ТУСУР | TUSUR UNIVERSITY

- РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
- РАДИОКОНСТРУКТОРСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
- ФАКУЛЬТЕТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
- ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
- ФАКУЛЬТЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
- ГУМАНИТАРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ
- ФАКУЛЬТЕТ БЕЗОПАСНОСТИ
- ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
- ФАКУЛЬТЕТ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
- ЮРИДИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
- ЗАОЧНЫЙ И ВЕЧЕРНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
- ФАКУЛЬТЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Преимущества обучения в ТУСУРе:

- Высокое качество образования в ТУСУРе основано на высокой квалификации профессорско-преподавательского состава, а также на передовой исследовательской материально-технической базе;

- Применение передовых технологий обучения, ориентированных на развитие творческого потенциала студентов, основанных на неразрывной связи с научными исследованиями и командной работой над реальными проектами;

- Полученное в ТУСУРе образование гарантирует 100%-ное трудоустройство, достойные условия труда, высокую зарплату и карьерный рост.

Прием документов на очную форму обучения начинается 20 июня и заканчивается 26 июля (если у абитуриента имеется полный комплект результатов вступительных испытаний в форме ЕГЭ или результатов олимпиад школьников, утвержденных Минобрнауки РФ) и 13 июля (если абитуриент будет сдавать вступительные испытания, проводимые ТУСУР самостоятельно). Абитуриент имеет право подать заявление не более чем на 3 направления подготовки и/или специальности ТУСУР.

Вступительные испытания профильной направленности для инженерно-технических направлений - математика, физика, русский язык; для направлений в области IT технологий и информационной безопасности - математика, информатика, русский язык; для экономико-управленческих направлений - математика, обществознание, русский язык; для гуманитарных направлений - история России, обществознание, русский язык.

Конкурс абитуриентов на бюджетные места очной формы обучения проводится с 27 июля по сумме баллов за три экзамена в порядке ее убывания. Возможен прием абитуриентов на бюджетные места по договорам целевого приема. Зачисление в число студентов ТУСУРа на бюджетные места будет вестись с 29 июля по 8 августа включительно, зачисление на платные места - с 19 июля по 19 августа включительно.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129
Тел.: (3822) 900-100
8-800-775-9025 (звонок по России бесплатный)

E-mail: onir@main.tusur.ru
Сайт: abiturient.tusur.ru

ТУСУР

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2016

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

25–27 мая 2016 г. (в шести частях)

Часть 2

г. Томск

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2016

Материалы
Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»

25–27 мая 2016 г., г. Томск

В шести частях

Часть 2

В-Спектр
2016

УДК 621.37/.39+681.518 (063)
ББК 32.84я431+32.988я431
Н 34

Н 34 **Научная сессия ТУСУР–2016:** материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г. – Томск: В-Спектр, 2015: в 6 частях. – Ч. 2. – 348 с.

ISBN 978-5-91191-337-3
ISBN 978-5-91191-339-7 (Ч. 2)

Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых посвящены различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированых систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанофотоники, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по математическому моделированию в технике, экономике и менеджменте, антикризисному управлению, правовым проблемам современной России, автоматизации управления в технике и образовании, а также работы, касающиеся социокультурных проблем современности, экологии, мониторинга окружающей среды и безопасности жизнедеятельности.

УДК 621.37/.39+681.518 (063)
ББК 32.84я431+32.988я431

Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках Конкурса научных проектов организации российских и международных молодежных научных мероприятий, проект № 16-37-10147

ISBN 978-5-91191-337-3
ISBN 978-5-91191-339-7 (Ч. 2)

© Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2016

Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»
25–27 мая 2016 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Шелупанов А.А. – председатель, ректор ТУСУРа, директор Института системной интеграции и безопасности, председатель правления Томского профессорского собрания, д.т.н., проф.;
- Шурыгин Ю.А. – заместитель председателя Программного комитета, первый проректор, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.;
- Мещеряков Р.В. – заместитель председателя Программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. БИС, д.т.н., проф.;
- Агеев Е.Ю., начальник научного управления, к.т.н.;
- Бабур-Каратели Г.П., к.т.н., PhD (TU Delft), научный сотрудник каф. ТОР ТУСУРа;
- Беляев Б.А., зав. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники Ин-та физики СО РАН, д.т.н., г. Красноярск;
- Васильковская Н.Б., доцент каф. экономики, к.э.н., доцент;
- Газизов Т.Р., зав. каф. ТУ, д.т.н.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС, к.т.н.;
- Грик Н.А., зав. каф. ИСР, д.и.н., проф.;
- Давыдова Е.М., декан ФБ, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.;
- Демидов А.Я., зав. каф. ТОР, к.ф.-м.н., доцент;
- Дмитриев В.М., зав. каф. МиСА, д.т.н., проф.;
- Дробот П.Н., доцент каф. УИ, к.ф.-м.н.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент;
- Ехлаков Ю.П., зав. каф. АОИ, д.т.н., проф.;
- Зариковская Н.В., доцент каф. ЭМИС, к.ф.-м.н., доцент;
- Каратели Д., PhD (Sapienza University of Rome), технический директор компании «The Antenna Company Nederland B.V.»;
- Карташев А.Г., проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н., проф.;
- Катаев М.Ю., проф. каф. АСУ, д.т.н., проф.;
- Коцубинский В.П., зам. зав. каф. КСУП, доцент каф. КСУП, к.т.н., доцент;
- Лощилов А.Г., зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена» ТУСУРа, к.т.н.;
- Лукин В.П., зав. лаб. когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН, почетный член Американского оптического общества, д.ф.-м.н., проф., г. Томск;
- Малюк А.А., проф. каф. «Кибербезопасность» НИЯУ МИФИ, к.т.н., г. Москва;
- Малютин Н.Д., начальник ОПП ТУСУР, д.т.н., проф.;
- Михальченко Г.Я., директор НИИ ПрЭ, д.т.н., проф.;
- Мицель А.А., проф. каф. АСУ, д.т.н., проф.;
- Мозгунов А.В., начальник ОНиР,
- Пустынский И.Н., проф. каф. ТУ, заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., проф.;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР НГТУ, д.т.н., проф., г. Новосибирск;
- Семенов Э.В., проф. каф. РЗИ, д.т.н., доцент;

- Соколовская Н.С., доцент каф. УП, зам. декана ЮФ по НИР, к.ю.н.;
- Суслова Т.И., декан ГФ, зав. каф. ФиС, д.ф.н., проф.;
- Троян П.Е., зав. каф. ФЭ, д.т.н., проф.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КИБЭВС, д.т.н., проф.;
- Шарангович С.Н., проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;
- Шарыгин Г.С., проф. каф. РТС, д.т.н., проф.;
- Шостак А.С., проф. каф. КИПР, д.т.н.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Мещеряков Р.В. – председатель Организационного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. БИС, д.т.н., проф.;
- Агеев Е.Ю., начальник научного управления, к.т.н.;
- Коротина Т.Ю., заведующая аспирантурой и докторантурой, к.т.н.;
- Медовник А.В., председатель Совета молодых ученых, доцент каф. физики, к.т.н.;
- Юрченкова Е.А., вед. инженер ОППО, к.х.н.

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1. Радиотехника и связь.

Подсекция 1.1. Радиотехнические системы и распространение радиоволн. Председатель секции – Шарыгин Герман Сергеевич, проф. каф. РТС, д.т.н., проф.; зам. председателя – Тисленко Владимир Ильич, проф. каф. РТС, д.т.н., проф.

Подсекция 1.2. Проектирование и эксплуатация радиоэлектронных средств. Председатель секции – Шостак Аркадий Степанович, проф. каф. КИПР, д.т.н.; зам. председателя – Озёркин Денис Витальевич, декан РКФ, зав. каф. КИПР, к.т.н., доцент.

Подсекция 1.3. Радиотехника. Председатель секции – Семенов Эдуард Валерьевич, проф. каф. РЗИ, д.т.н., доцент; зам. председателя – Артищев Сергей Александрович, инженер каф КУДР, к.т.н.

Подсекция 1.4. Аудиовизуальная техника, бытовая радиоэлектронная аппаратура и сервис. Председатель секции – Пустынский Иван Николаевич, проф. каф. ТУ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Костевич Анатолий Геннадьевич, доцент каф. ТУ НИЧ, к.т.н.

Подсекция 1.4.1. Аудиовизуальная техника и цифровое телерадиовещание. Председатель секции – Пустынский Иван Николаевич, проф. каф. ТУ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Костевич Анатолий Геннадьевич, доцент каф. ТУ, к.т.н., с.н.с.

Подсекция 1.4.2. Информационный сервис. Председатель секции – Идрисов Фарит Фатыхович, проф. каф. ТУ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Семиглазов Вадим Анатольевич, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Подсекция 1.5. Инфокоммуникационные технологии и системы широкополосного беспроводного доступа. Председатель секции – Демидов Анатолий Яковлевич, зав. каф. ТОР, к.ф.-м.н.; зам. председателя – Гельцер Андрей Александрович, доцент каф. ТОР, к.т.н.

Подсекция 1.6. Интеллектуальные системы проектирования технических устройств. Председатель секции – Шурыгин Юрий Алексеевич, первый проректор, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.; зам. председателя – Черкашин Михаил Владимирович, доцент каф. КСУП, к.т.н., доцент.

Секция 2. Электроника и приборостроение.

Подсекция 2.1. Проектирование биомедицинских электронных и наноэлектронных средств. Председатель секции – Еханин Сергей Георгиевич, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент; зам. председателя – Романовский Михаил Николаевич, доцент каф. КУДР, к.т.н., доцент.

Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры. Председатель секции – Лощилов Антон Геннадьевич, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена», к.т.н.; зам. председателя – Убайчин Антон Викторович, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.

Подсекция 2.3. Физическая и плазменная электроника. Председатель секции – Троян Павел Ефимович, зав. каф. ФЭ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Смирнов Серафим Всеволодович, проф. каф. ФЭ, д.т.н., проф.

Подсекция 2.4. Промышленная электроника. Председатель секции – Михальченко Геннадий Яковлевич, директор НИИ ПрЭ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Семёнов Валерий Дмитриевич, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

Подсекция 2.5. Оптические информационные технологии, нанофотоника и оптоэлектроника. Председатель секции – Шарангович Сергей Николаевич, проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.; зам. председателя – Буримов Николай Иванович, зав. УНЛ СВЧ микроэлектроники, доцент каф. ЭП, к.т.н.

Подсекция 2.6. Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры. Председатель секции – Газизов Тальгат Рашитович, зав. каф. ТУ, д.т.н.; зам. председателя – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Секция 3. Информационные технологии и системы.

Подсекция 3.1. Интегрированные информационно-управляющие системы. Председатель секции – Катаев Михаил Юрьевич, проф. каф. АСУ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Суханов Александр Яковлевич, доцент каф. АСУ, к.т.н.

Подсекция 3.2. Распределённые информационные технологии и системы. Председатель секции – Ехлаков Юрий Поликарпович, зав. каф. АОИ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Сенченко Павел Васильевич, декан ФСУ, доцент каф. АОИ, к.т.н., доцент.

Подсекция 3.3. Автоматизация управления в технике и образовании. Председатель секции – Дмитриев Вячеслав Михайлович, зав. каф. МиСА, д.т.н., проф.; зам. председателя – Ганджа Тарас Викторович, доцент каф. МиСА, к.т.н.

Подсекция 3.4. Моделирование в естественных и технических науках. Председатель секции – Зариковская Наталья Вячеславовна, доцент каф. ЭМИС, к.ф.-м.н., доцент; зам. председателя – Колотаев Илья Владимирович, разработчик ООО «СибирьСофтПроект».

Подсекция 3.5. Вычислительный интеллект. Председатель секции – Ходашинский Илья Александрович, проф. каф. КИБЭВС, д.т.н., проф.; зам. председателя – Сарин Константин Сергеевич, ассистент каф. КИБЭВС.

Подсекция 3.6. Современные библиотечные технологии. Председатель секции – Абдрахманова Марина Викторовна, директор библиотеки ТУСУРа; зам. председателя – Карауш Александр Сергеевич, доцент каф. РЗИ, к.т.н.

Подсекция 3.7. Молодежные инновационные научные и научно-технические проекты. Председатель секции – Дробот Павел Николаевич, доцент каф. УИ, к.ф.-м.н., доцент; зам. председателя – Нариманова Гуфана Нурлабековна, зав. каф. УИ, к.ф.-м.н., доцент.

Подсекция 3.8. Разработка программного обеспечения. Председатель секции – Гордиевских Вячеслав Валерьевич, генеральный директор ООО «СибирьСофтПроект»; зам. председателя – Пономарев Алексей Анатольевич, руководитель проектного офиса ООО «СибирьСофтПроект», к.т.н.

Подсекция 3.9. Инструментальные средства поддержки автоматизированного проектирования и управления. Председатель секции – Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, к.т.н., доцент; зам. председателя – Хабибулина Надежда Юрьевна, доцент каф. КСУП, к.т.н., доцент.

Секция 4. Информационная безопасность.

Подсекция 4.1. Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность. Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, ректор ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Давыдова Елена Михайловна, декан ФБ, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

Подсекция 4.2. Радиоэлектронные системы передачи информации и средства их защиты. Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, к.т.н.; зам. председателя – Бернгардт Александр Самуилович, доцент каф. РТС, к.т.н.

Секция 5. Экономика, управление, социальные и правовые проблемы современности.

Подсекция 5.1. Моделирование в экономике. Председатель секции – Мицель Артур Александрович, проф. каф. АСУ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Грибанова Екатерина Борисовна, доцент каф. АСУ, к.т.н.

Подсекция 5.2. Информационные системы в экономике. Председатель секции – Исакова Анна Ивановна, доцент каф. АСУ, доцент, к.т.н.; зам. председателя – Григорьева Марина Викторовна, доцент каф. АСУ, доцент, к.т.н.

Подсекция 5.3. Экономика и управление. Председатель секции – Васильковская Наталья Борисовна, доцент каф. экономики, к.э.н., доцент; зам. председателя – Цибульникова Валерия Юрьевна, доцент каф. экономики.

Подсекция 5.4. Современные социокультурные технологии в организации работы с молодежью. Председатель секции – Суслова Татьяна Ивановна, декан ГФ, зав. каф. ФиС, д.ф.н., проф.; зам. председателя – Орлова Вера Вениаминовна, д.соц.н., проф. каф. ФиС, директор НОЦ «СГТ».

Подсекция 5.5. Актуальные проблемы социальной работы в современном обществе. Председатель секции – Грик Николай Антонович, зав. каф. ИСР, д.и.н., проф.; зам. председателя – Куренков Артем Валериевич, старший преподаватель каф. ИСР, к.и.н.

Подсекция 5.6. Правовые проблемы современной России. Председатель секции – Соколовская Наталья Сергеевна, доцент каф. УП, зам. декана ЮФ по НИР, к.ю.н.; зам. председателя – Хаминов Дмитрий Викторович, зам. декана по УР ЮФ, зав. каф. ТП, к.ю.н.

Секция 6. Экология и мониторинг окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности. Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н., проф.; зам. председателя – Денисова Татьяна Владимировна, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

Секция 7. Открытия. Творчество. Проекты. (Секция для школьников). Председатель секции – Мозгунов Алексей Викторович, начальник ОНиР.

Адрес оргкомитета:

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40,
ГОУ ВПО «ТУСУР»
Научное управление (НУ), к. 205
Тел.: 8-(382-2) 701-524, 701-582
E-mail: nstusur@main.tusur.ru

1-й том – 1-я секции (7 подсекций);
2-й том – 2-я секция (6 подсекций);
3-й том – 3-я секция (1–5 подсекции);
4-й том – 3-я секция (6–9 подсекции);
5-й том – 4, 6, 7-я секции (2 подсекции в 4-й, по 1-й в 6 и 7-й);
6-й том – 5-я секция (6 подсекций)

Генеральный спонсор конференции – АО «ПКК Миландр»

АО «ПКК Миландр»
124498, г. Москва, Зеленоград,
Георгиевский проспект, дом 5

Т.: 495 981 5433
Ф.: 495 981 5436
www.milandr.ru

АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) является одним из ведущих предприятий радиоэлектронного комплекса России, деятельность которого связана с разработкой и производством изделий микроэлектроники и приборов на их основе. В настоящее время «Миландр» обеспечивает разработку высокоинтегрированных микросхем с проектными нормами до 0,065 мкм.

АО «ПКК Миландр» выполнило более 200 НИОКР в интересах предприятий радиоэлектронной промышленности РФ. Номенклатурная линейка «Миландра» составляет более 300 типономиналов микросхем (микроконтроллеры, микропроцессоры, радиочастотные микросхемы, микросхемы проводных интерфейсов, микросхемы управления питанием), которые широко используются российскими предприятиями оборонно-промышленного комплекса. Одним из конкурентных преимуществ компании является наличие собственного сборочного производства, позволяющего выполнять полный комплекс измерений параметров микросхем с последующей их установкой в металлокерамические (для спецприменений) или пластмассовые корпуса, а также Испытательного технического центра микроприборов, осуществляющего измерения, анализ и испытания микросхем. В числе постоянных заказчиков на выполнение работ по проектированию, изготовлению и поставке микроэлектронных изделий значатся российские центры проектирования, научно-исследовательские институты, приборостроительные предприятия и объединения. Компания постоянно расширяет географию и сферу научно-технического сотрудничества, заключая долгосрочные договоры с научными учреждениями России, СНГ и зарубежными научными организациями. Поставка изделий осуществляется в адрес более 800 предприятий радиоэлектронной промышленности.

В 2014 г. АО «ПКК Миландр» совместно с Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) и Томским государственным архитектурно-строительным университетом (ТГАСУ) одержали победу в конкурсе по созданию высокотехнологичного производства интеллектуальных приборов энергетического учета, разработанных и изготовленных на базе

отечественных микроэлектронных компонентов, и гетерогенной автоматизированной системы мониторинга потребляемых энергоресурсов на их основе, выполняемом по Постановлению Правительства Российской Федерации № 218. Для выполнения работ по комплексному проекту АО «ПКК Миландр» и ТУСУР открыли Центр системного проектирования. В Центре системного проектирования, созданном на базе ТУСУРа, разрабатывается программное обеспечение для интеллектуальных приборов энергоучёта и комплексной системы автоматизированного сбора и обработки информации. Результаты работ Центра системного проектирования будут не только внедряться в производство, но и активно использоваться в учебном процессе ТУСУРа. Широкое внедрение совместных разработок АО «ПКК Миландр», ТУСУРа и ТГАСУ позволит снизить затраты населения за тепло и электроэнергию на 15–20 %.

Также АО «ПКК Миландр» активно проводит различные программы по взаимодействию с вузами: предоставляет вузам оборудование собственного производства и методические пособия для проведения практических занятий на все время сотрудничества. По окончании курсов проводится аттестация студентов, по результатам которой самые выдающиеся студенты получают сертификаты. Проект реализуется под эгидой импортозамещения, позволяет студентам российских вузов приобрести навыки работы с отечественной элементной базой и иметь преимущество при трудоустройстве в ведущие приборостроительные предприятия России.

В 2016 г. в ТУСУРе создана базовая кафедра микроэлектроники, информационных технологий и управляющих систем (МИТУС) с применением дистанционного обучения, которая сможет решать приоритетые задачи по интеграции образования и науки в производство. Компания нацелена на то, чтобы выпускники кафедры стали незаменимыми сотрудниками различных предприятий радиоэлектронной промышленности и были востребованными специалистами на современном рынке труда. Для этого АО «ПКК Миландр» предоставит своей кафедре самую актуальную материально-методическую базу и обеспечит другими возможными ресурсами компании.

Спонсор конференции – ООО «Кейсайт Текнолоджиз»

ООО «Кейсайт Текнолоджиз» 495 797 3900 Т
Россия, 115054, г. Москва 495 797 3902 Ф
Космодамианская наб., 52, ст. 3 www.keysight.ru

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания, Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в т.ч. оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard/Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: www.keysight.ru

Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз» – Смирнова Галина Владимировна.

Спонсор конференции – Группа компаний «Научное оборудование»

Группа компаний
«Научное оборудование»
630128, Россия,
г. Новосибирск,
ул. Инженерная, 4а, оф. 212
Т.: 383 330 8295,
495 975 9295
www.spegroup.ru

Группа компаний «Научное оборудование» была образована в 1999 г. Основное направление деятельности компании – снабжение высокотехнологичным оборудованием учебных, научно-исследовательских и промышленных предприятий Сибири и Дальнего Востока России.

Мы анализируем задачи заказчика, подбираем оборудование под каждый конкретный случай, осуществляем поставку оборудования, а также оказываем технологическую и методологическую поддержку, гарантийный и послегарантийный ремонт. Некоторые наши заказчики доверяют нам полное закрытие всех потребностей своих лабораторий и в оборудовании, и в расходных материалах.

В штате компании состоят высококвалифицированные технические специалисты с собственным опытом научной работы. Наши специалисты регулярно знакомятся с новинками оборудования, с новыми подходами в приборостроении, посещают международные выставки и обучающие семинары от производителей. Для каждой задачи заказчика мы можем предложить самое современное решение. Существующие рабочие связи со многими лабораториями СО РАН позволяют оперативно привлекать к решению задач заказчика профильных научных специалистов. Кроме того, мы сами организуем мастер-классы и семинары, на которых наши заказчики имеют уникальную возможность попробовать новейшее оборудование для решения своих задач.

У нас налажены партнерские отношения со многими ведущими мировыми производителями научного и технологического оборудования как в России, так и за рубежом. У компании есть свой инженерный департамент; в случае необходимости мы можем самостоятельно разработать решение непосредственно под задачу заказчика.

Нашими заказчиками являются все академические институты Сибирского отделения Российской Академии Наук, многие про-

мышленные предприятия, технологические компании, учебные заведения высшего образования Сибирского и Дальневосточного регионов.

Кроме деятельности по поставке и разработке оборудования, мы участвуем в продвижении разработок институтов СО РАН на внешний рынок, организуем совместные проекты институтов СО РАН с разными организациями по разработке конкретных технологических и наукоёмких решений.

Мы видим своей целью построение долгосрочных взаимовыгодных отношений с каждым нашим заказчиком.

Спонсор конференции – АО «НПФ «Микран»

АО «НПФ «Микран»
634041, г. Томск,
проспект Кирова, 51д

Т.: 3822 90 0029;
3822 42 3615
http://www.micran.ru

Научно-производственная фирма «Микран» создана 17 апреля 1991 года в г. Томске, с 30 апреля 2008 года – закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», с 11 сентября 2015 года – Акционерное общество.

НПФ «Микран» – одно из ведущих российских предприятий в области разработки и промышленного производства СВЧ-радиоэлектроники. Работая на рынке высоких технологий с 1991 г., «Микран» создает широкий спектр продукции: от электронных компонентов, узлов и модулей на их основе до различной телекоммуникационной, радиолокационной и измерительной аппаратуры. «Микран» – компания полного производственного цикла – оперативно реагирует на потребности рынка, внедряет инновационные разработки, контролирует процесс создания технологии и передачи ее в производство, отслеживает качество выпускаемых изделий. Сейчас у «Микрана» более 1000 клиентов в России и за ее пределами, а география заказов распространяется от СНГ до стран Юго-Восточной Азии и Латинской Америки. Неслучайно предприятие отмечено высшей наградой Российской торгово-промышленной палаты «Золотой Меркурий».

Объем реализации продукции, работ и услуг в 2014 г. по ЗАО «НПФ «Микран» составил 2,6 млрд руб. (без НДС). Выпуск высокотехнологичной продукции компанией растет из года в год: в 2012 г. – 1 млрд рублей, в 2013 году – 2 млрд рублей, за 2015 г. достигнуто 3,5 млрд. рублей. По итогам российского рейтинга «ТехУспех–2013», «ТехУспех-2014» и «ТехУспех–2015» «Микран» вошел в «ТОП-30» быстроразвивающихся высокотехнологичных компаний (16-е место по России, 1-е – в Сибири), а в номинации «Самые инновационные предприятия России» занял 2-е место в рейтинге «ТехУспех-2014» и 5-е место в рейтинге «ТехУспех–2015».

Сдан в эксплуатацию в марте 2015 г. завод радиоэлектронной аппаратуры им. В.Я. Гюнтера (основатель компании, почетный гражданин города Томска) площадью 15 тыс. м² (рассчитан на 950 работающих) с собственным автономным энергоцентром, работающим в режиме «тригенерация» (на входе – газ, на выходе – электроэнергия, технологические тепло и холод).

Увеличение производственных площадей до 28 тыс м² позволит «Микрану» резко расширить свои возможности по выпуску продукции по четырем ключевым направлениям предприятия (СВЧ-модули, телекоммуникационное, радиоизмерительное и радиолокационное оборудование и системы). Следует отметить, что направления развития «Микрана» соответствуют четырем из пяти приоритетных направлений развития науки и техники страны, определенных Президентом России в 2010 году.

Одна из уникальных особенностей компании – она занимается как разработкой и производством СВЧ-электронной компонентной базы (ЭКБ), так и законченных систем на её основе. «Микран» планирует строительство на южной площадке Томской особой экономической зоны технико-внедренческого типа фабрики монолитных интегральных схем (корпус площадью 4280 м²) на долгосрочно арендуемой территории площадью 3,9 га. Это позволит в условиях санкций обеспечить ЭКБ не только нужды своего производства, но и осуществить реальное импортозамещение для многих предприятий страны. Минпромторг России в течение ряда лет подтверждает «Микрану» статус телекоммуникационного оборудования российского происхождения (приказ от 27.10.2014 № 2153 по базовым станциям и трансляторам сетей радиодоступа WiMIC и приказ от 24.03.2015 № 558 по цифровым радиорелейным станциям «МИК-РЛ»). Это позволяет предприятию обеспечивать в порядке импортозамещения поставки оборудования силовым структурам, сотовым операторам и нефтегазовому комплексу, занимая нишу в 60% от российского производства телекоммуникационной аппаратуры.

ТУСУР – базовый университет для НПФ «Микран», которая была создана в рамках одной из его лабораторий. Наше предприятие связывает с вузом и НИИ систем электрической связи своеобразный мост по подготовке высококлассных специалистов в области связи. Совместно с ТУСУРом проводились две крупные работы по Постановлению Правительства № 218, осуществляется сотрудничество по грантам Минобрнауки России. Компания также оказала содействие вузу при создании Научно-образовательного центра в «Технопарке». «Микран» для студентов ТУСУРа, специализирующихся в области СВЧ-электроники, создал именную стипендию основателя фирмы В.Я. Гюнтера в размере 10 тысяч рублей. Эту стипендию уже получили 45 студентов старших курсов. В «Микране» на сегодняшний день работает 1650 сотрудников, 600

из них – выпускники ТУСУРа, в том числе три доктора наук и 19 кандидатов.

В последние годы резко расширяется сотрудничество с ОАО «Газпром» в рамках дорожной карты, утвержденной руководством «Газпрома» и администрацией Томской области. В 2011 году «Микран» своим оборудованием обеспечил цифровую радиорелейную линию на газопроводе на полуострове Камчатка длиной в 450 км. Всего на предприятия ОАО «Газпром» «Микраном» поставлено более 500 цифровых радиорелейных станций «МИК-РЛ».

Руководство «Газпрома» доверяет «Микрану» поставку его телекоммуникационной аппаратуры высокоскоростной цифровой радиорелейной связи на строящийся магистральный газопровод «Сила Сибири». Такое же оборудование может быть поставлено и на МГ «Алтай» и на имеющуюся сеть газопроводов в порядке импортозамещения. «Микран» на собственные средства разработал для ОАО «Газпром» подвижный пункт управления с узлом связи (ППУ) на базе 3-осного КАМАЗа для обеспечения оперативной связью строителей и ремонтников газопроводов и готовится обеспечить его серийное производство под заказы «Газпрома». На таких же условиях разработана и прошла испытания в ООО «Газпром Трансгаз Томск» интегрированная система безопасности (твердотельный широкополосный радар в блоке с цифровой радиорелейной станцией, обеспечивающей передачу от видеоинфракрасных камер данных наблюдения за периметром охраняемой зоны в автономном режиме до 50 км). Эта система полезна «Газпрому» для контроля за безопасностью газохранилищ и газопроводов, в т.ч. и при их строительстве и эксплуатации.

НПФ «Микран» включена в Реестр инновационно-активных организаций и Перечень системообразующих предприятий Томской области, приказом Минпромторга России от 29.02.2016 № 508 научно-производственная фирма «Микран» включена в Перечень организаций, оказывающих существенное влияние на отрасли промышленности и торговли.

Деятельность АО «НПФ «Микран» соответствует целям, задачам и индикаторам государственных программ в Российской Федерации и отраслевых стратегий.

СЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – **Еханин С.Г.**, проф. каф. КУДР, доцент, д.ф.-м.н.*
*зам. председателя – **Романовский М.Н.**, доцент каф. КУДР,, доцент, к.т.н.*

МНОГОЦЕЛЕВОЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ УСТРОЙСТВО ПОДАЧИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ

М.Д. Джаныбеков, магистрант каф. РЭТЭМ,
Д.В. Бударагин, магистрант каф. КСУП
Научный руководитель С.П. Шкарупо, аспирант каф. РЭТЭМ,
г. Томск, ТУСУР, rk9uba@yandex.ru

Предложена конструкция устройства для подачи лекарственных препаратов. Описана конструкция устройства, перспективы развития устройства и применения.

Каждый из нас хоть раз в жизни болел. В современном мире достаточно препаратов, которые могут справиться с разнообразными болезнями, начиная от простуды и заканчивая сердечно-сосудистыми заболеваниями. Также существует проблема, о которой все знают. Человеку свойственно забывать некоторые вещи, и поэтому довольно-таки часто больные забывают принимать лекарственные препараты вовремя.

Целью данной работы является разработка устройства ручного и интеллектуального ввода лекарственных препаратов в тело человека.

На рис. 1, конструкция в виде небольшого ремня с небольшой коробочкой и дисплеем для удобства пользователя. Располагаться устройство будут на передненаружной области бедра. Предполагается, что в устройство будет встроены некоторые функции фитнес-трекера, разъемы для хранения информации Micro SD, разъем для разряда. Рассматривается возможность передачи данных геолокации и добавления функций глюкометра. Предполагаемое количество препаратов в устройстве ввода – 5 ампул.

Для работы устройства необходимо питание, поэтому в конструкцию устройства будет встроена малогабаритная батарея. Устройство будет работать на запрограммированной микросхеме типа STM для обеспечения интеллектуального ввода. Ввод лекарств будет осуществляеться тонкими одноразовыми иглами, встроенными в устройство.

Рис. 1. Модель устройства

Рис. 2. Электрическая структурная схема

На дисплее устройства будут отображаться все вышеупомянутые функции устройства, такие как заряд батареи, пульс, пройденное расстояние, количество препаратов в устройстве, количество сахара в крови. Ввод лекарств осуществляется иглой внутримышечно. Устройство может применяться при разных обстоятельствах. В условиях военных действий, при ранении, солдатам нужно максимально долго оставаться в сознании, а в разведке нужно не спать сутками. Устройство может вводить нужный препарат для поддержания нужного состояния. Также для примера можно взять не смертельно раненного солдата. Чтобы исключить медика из группы, данное устройство можно использовать для ввода обезболивающих. Как описывалось ранее, в разработке присутствует интеллектуальный ввод. В конструкции устройства присутствуют сенсоры, которые фиксируют пульс человека. Предполагается, что при ранении пульс солдата многократно учащается, сенсоры зафиксируют резкое изменение пульса и соответственно будет введено обезболивающее.

К достоинствам разрабатываемого устройства можно отнести возможность мониторинга состояния человека, интеллектуальное введение препаратов, небольшие габариты, многофункциональность.

Заключение. В предложенной статье разрабатываемое устройство имеет возможность помочь заболевшим людям, военнослужащим и простым пользователям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прибор* GlucoTrack DF-F [Интернет-ресурс]. Режим доступа: http://www.test-poloska.ru/novosti/neinvazivnyy-glyukometr-glucotrack-df-f-poluchil-markirovku-ce/. свободный (дата обращения: 10.10.2015).

2. *Прибор* фитнес-трекер [Интернет-ресурс]. Режим доступа: http://fitfixed.com/training/advise/nuzhnye-veshi-fitnes-trekery/ свободный (дата обращения: 05.03.2016).

3. *Подкожное* и внутримышечное введение лекарств [Интернет-ресурс]. Режим доступа: http://www.medinfo.ru/sprav/help/fh_vol5/10.phtml свободный (дата обращения: 01.03.2016).

4. *Микроконтроллер* STM32 [Интернет-ресурс]. Режим доступа: http://www.compel.ru/lib/ne/2011/2/3-stm32-epoha-32-bitnyih-mikrokontrollerov-nastupila/ свободный (дата обращения: 05.03.2016).

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А. Коленко, Р. Шарабудинов, Т. Елистратова, студенты каф. КУДР

г. Томск, ТУСУР, stalker@main.tusur.ru

Проект ГПО КУДР-1003 «Устройство диагностики и профилактики стрессовых состояний человека»

При определении уровня стресса в мировой практике используются различные электрические, биофизические и биохимические показатели [1]. Показана перспективность данных методов. Однако сложность в эксплуатации, дороговизна, необходимость подсоединения к пациенту множества контактов, проведения многочисленных анализов крови, делают такие системы и методы малодоступными для широкого использования. Следует также учитывать, что применение методов с датчиками, требующими наличия непосредственного контакта, создают значительные неудобства для пациента, мешают отвлечься от внешних раздражителей.

Поэтому разработка бесконтактных методов анализа психофизиологического состояния человека может существенно улучшить потребительские свойства аппаратов и систем определения стрессовых состояний и осуществления с их помощью управляемой релаксации.

Эксперименты по измерению гамма-излучения от человека, проведенные в СКБ «Сталкер» ТУСУРа [2], свидетельствуют о наличии

взаимосвязи между активностью мозга и интенсивностью и статистическим распределением его радиоактивного излучения, что позволяет использовать этот метод для осуществления диагностики состояний стресса. Кроме изменения интенсивности излучения, были выявлены отклонения в гистограммах распределения от Пуассоновского вида [2]. Для разных людей, а также для одного человека, находящегося в разных психофизиологических состояниях, наблюдается различный характер отклонения параметров статистического распределения. Однако было замечено существенное колебание результатов измерений, вида гистограмм распределения и других статистических параметров временных рядов показаний датчиков от времени.

Как выяснилось в дальнейшем, солнечная активность, проявляющаяся во взаимодействии протонного солнечного ветра с атмосферой и изменяющая поток атмосферных гамма-квантов [3], является основным мешающим фактором для осуществления БОС предложенным методом.

Для исключения влияния атмосферных гамма-квантов на канал БОС нами предлагалось в качестве датчика использовать сцинтилляционный датчик, способный различать гамма-частицы по энергиям. Однако реализация подобной схемы требует приобретения остродефицитных комплектующих, что приведет к существенному удорожанию устройства в целом.

В данной работе для выделения полезного сигнала используется аналитический метод, в котором реализуется вычитание из общего сигнала значений, обусловленных суммой короткопериодических циклов вариаций потока атмосферных гамма-квантов.

Эксперимент продолжался 2 ч. В течение первого часа измерялся фон. В течение второго часа экспериментатор в спокойном состоянии находился вблизи датчика (газоразрядный датчик СБМ-20). Расстояние от датчика до головы пациента составляло не более 1 м. Датчик располагался на уровне головы испытуемого. Данные эксперимента (интенсивность гамма-излучения) записывались в память компьютера.

Спектральный анализ периодических функций заключается в нахождении коэффициентов a_k и b_k ряда Фурье. Расчет был проведен для всех известных гармоник солнечной активности [3]. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

После этого произведено вычитание из рядов данных первого и второго часа экспериментов значений суммы гармоник для каждого случая. Для оставшихся после вычитания рядов данных были построены гистограммы статистических распределений (рис. 2).

Как видно из рис. 2, кривая распределения данных от испытуемого существенно отличается от фоновой. Причем кривая распределения

фонового излучения мало отличается от теоретической (ХИ^2 меньше критического значения), что подтверждает адекватность модели.

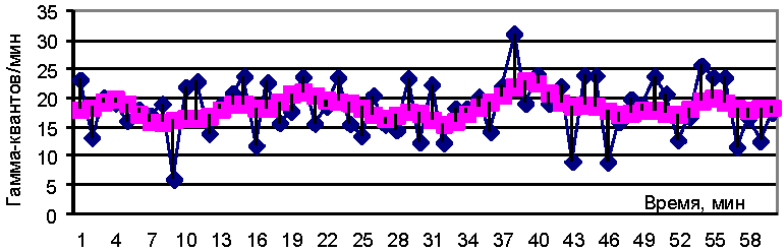


Рис. 1. Графики изменения интенсивности гамма-излучения от головы испытуемого и суммы гармонических составляющих солнечной активности (цветная линия) в течение второго часа эксперимента

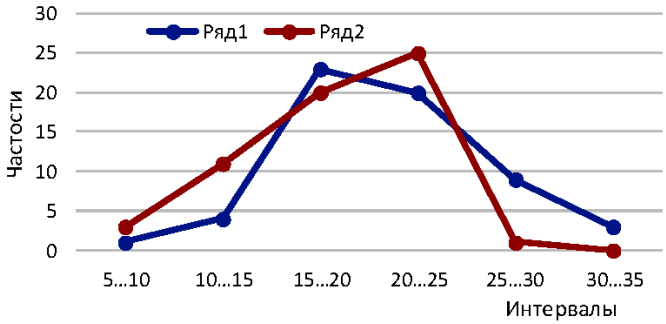


Рис. 2. Графики статистического распределения экспериментальных данных, где ряд *1* – фоновое излучение, ряд *2* – излучение от головы испытуемого

Таким образом, мы считаем, что данный аналитический метод позволяет эффективно выделять полезный сигнал и осуществлять бесконтактную БОС пассивным радиоизотопным методом [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иващенко О.И.* Перспективы использования метода биологической обратной связи в нейротерапии хронических заболеваний / Науч.-практ. конф. «Опыт лечения и диагностика». М., 2001.

2. *Молошников В.А., Еханин С.Г., Ярымова И.А.* Бесконтактный датчик для систем биологической обратной связи // Приборы и средства автоматизации. 2008. №12. С. 11–17.

3. *Гальпер А.М. и др.* Короткопериодические пульсации атмосферных гамма-квантов // Природа. 1977. №4.

О МИНИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИЙ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

В.С. Кунегин, О.-Ш.Р. Дабаев, Ю.А. Баранова, студенты каф. КУДР
Научный руководитель М.Н. Романовский, доцент каф. КУДР
г. Томск, ТУСУР, knockoutVladislav@gmail.com
Проект ГПО КУДР-1401 «Устройство для визуальной стимуляции головного мозга»

Исследования воздействия пульсирующего света на организм человека, которые проводились с середины XX в., показали, в частности, что мозг человека воспринимает пульсации света с частотой до 300 Гц [1]. Видимые пульсации света вызывают ощущения дискомфорта, усталости и даже недомогания. И даже при частоте мерцания 300 Гц свет способен влиять на гормональный фон, который в свою очередь воздействует на эмоции человека, его работоспособность, суточные ритмы, а также многие другие сферы жизнедеятельности.

Согласно нормативным документам [2, 3], коэффициент пульсаций света не должен превышать 10–20%. В [3] нормируются только те пульсации, частота которых ниже 300 Гц. С 2013 г. введен новый ГОСТ Р 54945–2012 [4]. В нем прямо указывается, что при расчете коэффициента пульсации освещенности учитываются пульсации светового потока с частотой до 300 Гц.

В настоящее время широкое распространение получили светодиодные (LED) источники света. Тест-аналитики проекта «Lamptest» проводят тестирование светодиодных ламп. Некоторые данные из их исследования приведены в таблице.

Результаты исследования светодиодных ламп

Бренд	Модель	Диммингг	Коэффициент пульсаций, %
Camelion	LED8-A60/830/E27	Нет	128
Uniel	Venturo LED-M88	Нет	52
IKEA	LED1337G15	Да	27
Наносвет	L234	Да	6
Supra	SL-LED-A60	Нет	1

Задача проекта «Lamptest» – точное измерение параметров светодиодных ламп и выявление их недостатков. Благодаря этому проекту можно выбирать светодиодные лампы, не боясь обмана, ведь некоторые производители заявляют одни параметры ламп, а на деле получаются параметры, которые не соответствуют нормативным документам.

Коэффициент пульсаций излучения светодиодных устройств определяется их драйверами. В большинстве недорогих светодиодных

ламп (например, в LED8-A60/830/E27) используются драйверы на балластных конденсаторах, так как это самый простой способ обеспечить питание светодиодов. Главный недостаток таких драйверов – большие пульсации на выходе. И большинство таких ламп не соответствуют нормативным документам.

В импульсных светодиодных драйверах чаще всего применяется топология понижающего преобразователя. Примером такого драйвера является микросхема NCP 3066 фирмы ON Semiconductor [5]. В большинстве импульсных драйверов используется полевой транзистор. Полевой транзистор осуществляет высокочастотную коммутацию тока в ключевом режиме. Соответственно работа преобразователя состоит из двух сменяющих друг друга фаз: период накачки энергии, когда транзистор открыт, и период разряда, когда транзистор закрыт. Преимущество таких драйверов заключается в высоком КПД (до 90–95%) и в широком диапазоне входных переменных напряжений (до 260 В). Недостатком таких драйверов является генерация высокочастотных помех при работе и невозможность полностью избавиться от пульсации светового потока.

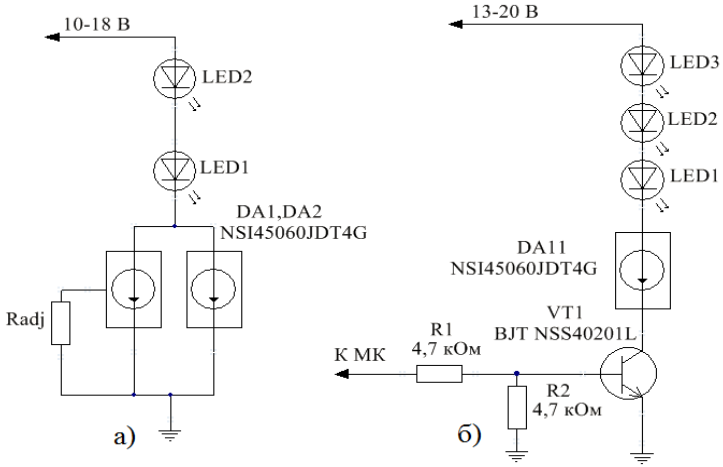


Рис. 1. Электрические принципиальные схемы драйвера светодиодов на линейном регуляторе тока (*а*) и ШИМ-управления яркостью (*б*)

Радикальный способ понижения коэффициента пульсаций – это использование в качестве светодиодных драйверов линейных регуляторов тока. Их преимущество перед импульсными драйверами – отсутствие пульсаций излучения светодиодов. Недостаток таких драйверов – малый диапазон входных напряжений и большая потребляемая

мощность. Примером линейных регуляторов тока может служить микросхема NSI45060JDT4G фирмы ON Semiconductor [6]. Микросхема сохраняет работоспособность при температурах до +175 °С, что важно для мощных светодиодных светильников, выделяющих в процессе работы большое количество тепла. В цепи регулировки тока используется элемент с отрицательным температурным коэффициентом. Со стороны анодной цепи регулятора предусмотрена защита от импульсных бросков напряжения. Через вывод R_{adj} можно управлять яркостью светодиодов (рис. 1, *а*). Высокое быстродействие регулятора позволяет использовать для димминга и ШИМ-управляемые транзисторные ключи (рис. 1, *б*).

Таким образом, наилучшим способом минимизации коэффициента пульсаций излучения светодиодных ламп является использование в качестве драйверов линейных регуляторов тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ошурков И.* Обоснованный подход к нормативам пульсаций светодиодного освещения // Современная электроника. 2013. №4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.soel.ru/cms/f/?/450811.pdf, свободный (дата обращения: 12.03.2016).

2. *Строительные* нормы и правила СНиП 23-05–95. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://base.garant.ru/2306278/, свободный (дата обращения: 8.03.2016).

3. *Санитарные* правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, и искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.infosait.ru/norma_doc/11/11776/index.htm, свободный (дата обращения: 8.03.2016).

4. *ГОСТ* Р 54945–2012 «Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_54945-2012, свободный (дата обращения: 8.03.2016).

5. *NCP3065*, NCV3065. «Up to 1.5 A Constant Current Switching Regulator for LEDs» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP3065.PDF, свободный (дата обращения: 14.03.2016).

6. *NSI45060JDT4G.* «Constant Current Regulator & LED Driver» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.onsemi.ru.com/pub_link/Collateral/NSI45060JD-D.PDF, свободный (дата обращения: 14.03.2016).

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРЯМОЙ ВАХ (В ОБЛАСТИ МИКРОТОКОВ) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ИСПЫТАНИЙ СИД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ РАБОЧИХ ТОКОВ

А.Е. Зуева, М.О. Лазарева, Э.В. Максимова, студентки каф. КУДР
Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, e-mail: stalker@main.tusur.ru
Проект ГПО КУДР-1003 «Изучение деградации светодиодных гетероструктур»

Светоизлучающие диоды (СИД) являются перспективными элементами приборов твердотельного освещения. По сравнению с лампами накаливания светодиоды способны обеспечить более высокий квантовый выход и долговременную стабильность [1]. Однако процессы деградации продолжают оставаться важной проблемой для светодиодов. Также проблемой является величина отношения цена/люмен. Решить данную проблему можно увеличением плотности тока, проходящего через светодиодный чип, а значит, и яркости. Соответственно, отношение цена/люмен будет меньше. В настоящее время этим путем идет большинство мировых производителей осветительных приборов на основе СИД.

Известно, что прямая вольт-амперная характеристика существенно меняется при нарастании деградационных явлений и особенно в области микротоков. Это связано с возникновением каналов предпочтительно зарядопереноса с повышенной электропроводностью [2].

Поэтому целью данной работы является исследование деградации СИД при испытаниях, которые проводятся при повышенных плотностях рабочего тока, в частности методом измерения прямой вольт-амперной характеристики в области микротоков.

Задачами исследования являются:

1. Анализ изменений ВАХ в области микротоков от величины рабочего тока и времени испытаний.

2. Нахождение первых признаков деградации и развитие этих признаков от режима испытаний.

В нашем случае был исследован планарный светодиод марки SemiLED средней мощности 0,1 Вт.

Экспериментальные исследования включали в себя измерения прямых вольт-амперных характеристик (ВАХ) при различных режимах испытаний. Вначале измерялись ВАХ «свежего» светодиода, а потом этот светодиод ставился на испытание. На первое испытание СИД ставился при рабочем токе 50 мА, после чего при каждом последующем испытании рабочий ток увеличивался на 10–20 мА, и так до 100 мА.

Длительность каждого подобного испытания один час. После каждого испытания измерялись вольт-амперные характеристики (рис. 1).

№ испытания	1	2	3	4	5	6
Рабочий ток, (мА)	50	60	80	80	100	100

Рис. 1. Методика испытаний СИД

Светодиоды ставились на испытания по 1 ч при рабочем токе от 50 до 100 мА (рис. 2). Прямые ВАХ светодиодов измерялись в постоянном режиме автоматического построителя ВАХ [3] в диапазоне от 0 до 50 мкА (область микротоков).

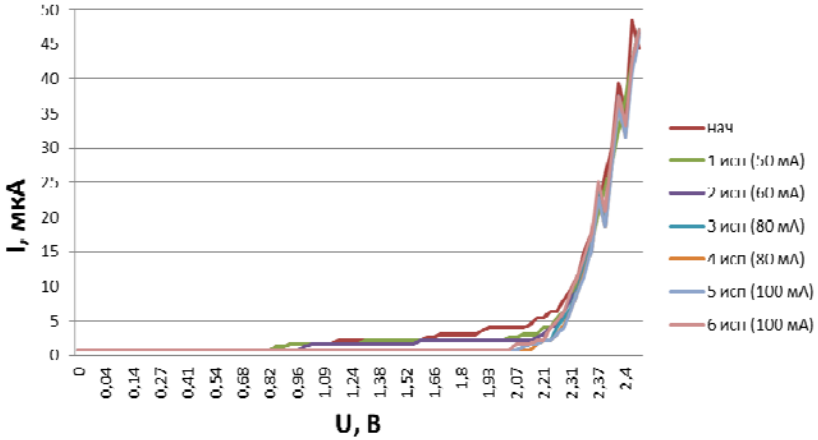


Рис. 2. Изменения прямой вольт-амперной характеристики СИД в зависимости от режимов испытаний.

В итоге после испытаний при 80 мА возник резкий сдвиг начального участка ВАХ (в области микротоков) в правую сторону (в область больших напряжений).

На рис. 1 показано, что изменение прямой вольт-амперной характеристики СИД от испытания к испытанию вначале меняется в правую сторону, а потом начинает смещаться обратно.

Предполагается, что в процессе испытаний увеличивается плотность состояний на гетерограницах InGaN/GaN и формируется электрический диполь [3, 4], заряды создают дополнительные барьеры протеканию прямого тока, что и приводит к смещению начальных участков ВАХ в область больших напряжений.

При проведении дальнейших испытаний при больших плотностях электрического тока формируются каналы предпочтительного зарядопереноса, в которых образуются и осаждаются дефекты и примеси, вследствие которых на картине прямой вольт-амперной характеристики происходит обратное смещение ВАХ микротоков (в область с меньшими напряжениями).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. М.: Физматлит, 2008.
2. *Бочкарева Н.И.* Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, №1. С. 122–27.
3. *Ермолаев А.В., Богатырева Д.В., Сапегина Н.В., Коровкин А.Н.* Установка для комплексных исследований СИД // Научная сессия ТУСУР–2012: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2012 г.: В 5 ч. Томск: В-Спектр, 2014. Ч. 1. С. 140–142.
4. *Полищук А.* Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и технологии. 2008. №2. С. 25–28.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ПЛОТНОСТЯХ РАБОЧЕГО ТОКА

Э.В. Максимова, А.Е. Зуева, М.О. Лазарева, студентки каф. КУДР

Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, stalker@main.tusur.ru

Проект ГПО КУДР-1003 «Изучение деградации светодиодных гетероструктур»

В последнее время светодиоды приобретают все большую популярность в связи с переходом на светодиодное освещение.

Из известных преимуществ светодиодных источников перед вакуумными и люминесцентными лампами необходимо отметить высокую надежность (срок службы СД более 100000 часов). СИД устойчивы к механическим воздействиям и имеют широкий диапазон рабочих температур. Производство светодиодов не наносит экологического вреда окружающей среде в отличие от люминесцентных ламп, в которых используются пары ртути.

Однако увеличение яркости СИД в большинстве случаев связывается с увеличением величины рабочей плотности тока, что наиболее существенно влияет на степень деградации гетероструктур СИД. Де-

градация особенно сильно сказывается на цветовом балансе и интегральной светимости.

В связи с этим в данной работе проведено изучение спектральных характеристик.

Изучение спектров проводилось при помощи установки для исследования спектральных характеристик туннельной ЭЛ СИД [1].

Экспериментальная часть. В нашем случае был исследован светодиод средней мощности фирмы SemiLED на основе InGaN.
Основные параметры светодиода приведены в таблице.

Основные параметры СИД

Марка	Материал	$I_{пр}$, мА	$U_{пр}$, В	λ_{max}, нм	Световой поток,лм
SemiLED	InGaN	150	3	460	50

Вначале проводились спектральные измерения свежего светодиода. Спектр туннельной электролюминесценции измеряется при малых напряжениях, когда основное излучение, связанное с инжекционными токами, минимально. Это связано с тем, что, как показано в работе [2], наибольшую информацию о деградации структуры СИД несет туннельная ЭЛ, спектральный состав которой сильно зависит от дефектов образующихся в гетероструктуре.

Далее светодиод сначала ставится на испытание при рабочем токе 50 мА, после чего при каждом последующем испытании увеличиваем рабочий ток на 10 мА, и так далее до 100 мА. Длительность каждого пробного испытания один час. После каждого испытания измеряем спектральные характеристики.

По полученным результатам построены нормированные спектральные характеристики туннельной ЭЛ СИД при различных режимах испытаний.

Из полученных зависимостей видно расширение спектра СИД с увеличением жесткости режимов испытаний (рис. 1).

Кроме того, как видно из рисунка, с увеличением времени испытаний и рабочего тока наблюдается сдвиг спектров в красную область.

Как указывается во многих литературных источниках, например [2–5], такой сдвиг обуславливается накоплением в гетероструктуре светодиода дефектов.

Кроме сдвига спектра, при увеличении рабочего тока наблюдается падение эффективности светодиодов. Это также не противоречит литературным данным, так как с увеличением концентрации дефектов в гетероструктуре после испытания СИД в условиях повышенного рабочего тока увеличивается количество безызлучательных рекомбинаций в квантовой яме.

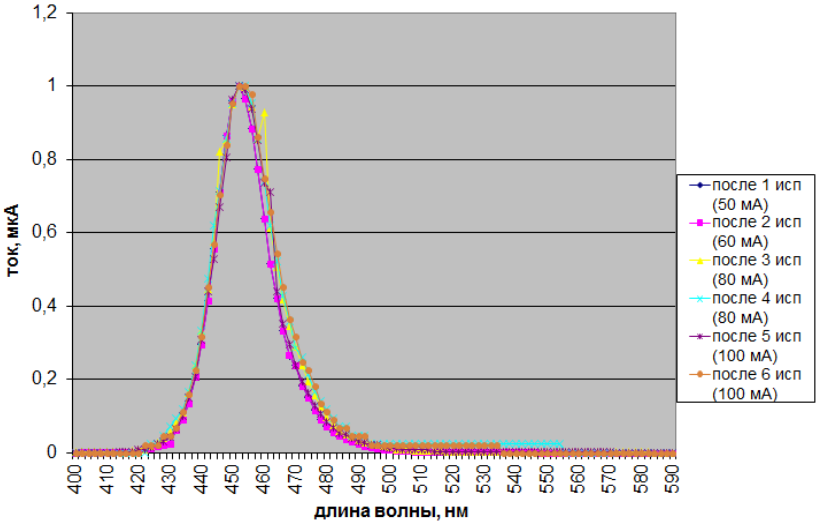


Рис. 1. Нормированные спектральные характеристики СИД после испытаний при различных значениях рабочего тока

Это следует учитывать при исследованиях долговечности сверхъярких СИД и при выборе оптимальных режимов их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Матвеев Д.П., Петенев Д.П., Простомолотов С.Н., Ермолаев А.В.* Установка для исследования характеристик туннельной ЭЛ СИД / Научная сессия ТУСУР–2014: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–16 мая 2014 г. : В 5 ч. Томск: В-Спектр, 2014. Ч. 1. С. 129–131.

2. *Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э.* Изменение люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, №2. С. 224–231.

3. *Бочкарева Н.И.* Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, №1. С. 122–127.

4. *Полищук А.* Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и технологии. 2008. №2. С. 25–28.

5. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. М.: Физматлит, 2008.

РАЗРАБОТКА БРАСЛЕТА-МОНИТОРА АРИТМИИ

В.С. Солдатов, А.А. Бояхчян, К.В. Оверчук, А.А. Уваров
Научный руководитель И.А. Лежнина, доцент каф. ФМПК, к.т.н.
г. Томск, Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, Retro-paladin@mail.ru

По статистике сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смертности во всем мире, а именно 30% от общего количества смертей в год. Из них 50% приходится на внезапную сердечную смерть, которая более чем в 80% начинается с аритмии и фибрилляции сердца [1]. Аритмия может проявляться хаотично. Подобные эпизоды аритмии трудно поймать на ЭКГ.

Часто первичным признаком заболевания являются различные виды аритмии. Проявления аритмии носят эпизодический характер, для ее диагностики предпочтительно использовать постоянно носимые устройства. Для этих целей создано множество устройств для диагностики нарушений сердца. Существенным ограничением этих приборов является использование по требованию, т.е. уже после того, как у человека появились какие-то симптомы.

Как возможное решение существуют различные фитнес-трекеры и пульсометры, но они не позволяют снимать ЭКГ, в результате чего невозможно определить характер аритмии. Большинство пульсометров плохо работает в условиях нестационарного ритма и не адаптировано под медицинское применение [2, 3].

Для того чтобы выявить эпизоды аритмии, нужен постоянный мониторинг сердца. С этой целью разрабатывается браслет-монитор для постоянного ношения, который будет выявлять эпизоды аритмии, проводить регистрацию ЭКГ и внезапной сердечной смерти. Наравне с этими функциями отличительной чертой этого устройства, будет присутствовать возможность автоматически определять патологические эпизоды и жизнеугрожающие синдромы. Также наравне с указанными функциями ключевыми факторами успешного применения являются простота эксплуатации и ценовая доступность.

Большинство патентов по данной тематике являются открытыми. По тем открытым ресурсам, которые удалось найти, составить достаточно полную и корректную картину действительности вполне возможно.

Создаваемый прибор будет отличаться от существующих устройств и обладать некоторыми преимуществами, а именно:

1. Будет разработан метод регистрации эквивалента одноканальной ЭКГ с одной руки.

Для того чтобы получить стабильную ЭКГ, используются точки на теле, расположенные друг от друга на достаточно большом расстоянии и находящиеся по разные стороны от электрической оси сердца. Разработка измерительного браслета требует регистрации сигнала по одной точке и создания соответствующей измерительной системы. Ожидается, что форма такого сигнала будет значительно отличаться от первого стандартного отведения, но даст возможность определить фазы сокращения и расслабления сердечной мышцы и ее частей для диагностики аритмии.

Также имеется второе решение данной задачи – это использование двух браслетов, синхронизируемых между собой по беспроводной связи. Такое решение позволяет получить стабильную ЭКГ в первом отведении, но гораздо сложнее технически, дороже и менее надежно.

2. Стабильность измерения в разных условиях.

Любые активные действия, совершаемые человеком, а также температура тела, влажность, волосяной покров могут существенно влиять на снятие ЭКГ. Таких влияющих факторов необходимо избегать, датчик должен показывать стабильные измерения в разных условиях.

3. Будет разработано миниатюрное низкоэнергопотребляющее устройство.

Так как прибор разрабатывается для регулярного ношения, устройство должно быть удобным и миниатюрным, чтобы не мешать человеку. Также необходимо подобрать комплектующие таким образом, чтобы сохранить полноценный функционал, но при этом потреблять минимальное количество энергии. В результате проведенных патентных исследований было установлено, что решаемая задача является актуальной на сегодняшний день. Был разработан первичный макет устройства (рис. 1) и проведены предварительные эксперименты.

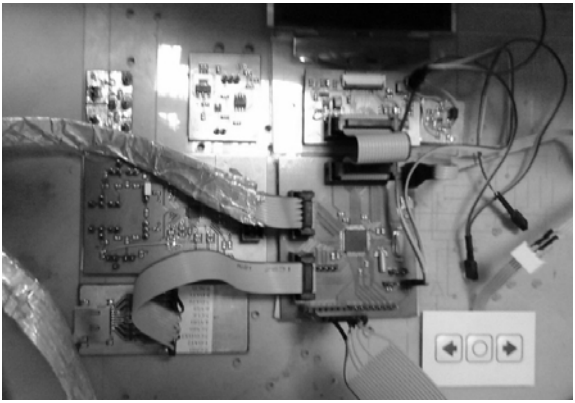


Рис. 1. Первичный макет устройства

С данным макетом были проведены эксперименты по снятию ЭКГ. ЭКГ снималось по двум каналам: с руки и с груди (рис. 2). С грудного отведения получается снять более качественное ЭКГ, т.к. сигнал в этой области очень сильный. Этот сигнал использовался для сравнения с остальными сигналами, полученными с рук.

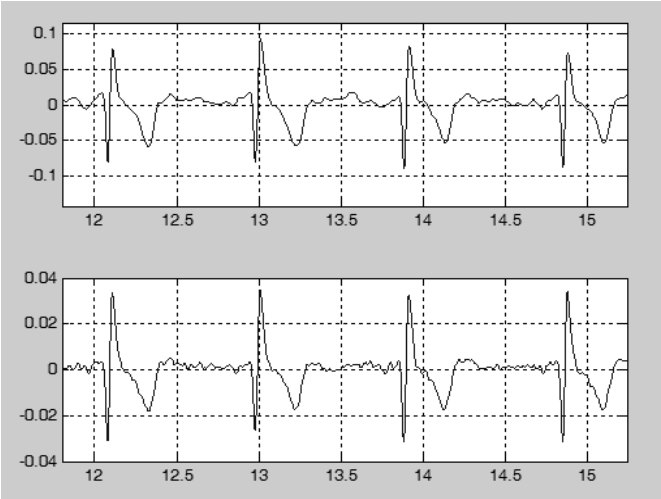


Рис. 2. Пример снятой ЭКГ

В дальнейшем планируется разработка устройства в форме браслета либо манжеты на плечо и проведение соответствующих экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Telemedicine Market (2015–2019). Mordor Intelligence, August 31, 2015.

2. *Солдатов В.С., Бояхчян А.А., Уваров А.А., Оверчук К.В.* Обзор беспроводных датчиков для электрофизиологической диагностики. Томск: ТПУ, 2015.

3. *Estes N.A.* 3rd. Predicting and preventing sudden cardiac death // Circulation. 2011. Vol. 124, № 5. P. 651–656.

4. *Beckmann B.-M., Pfeufer A., Kääb S.* Inherited Cardiac Arrhythmias. Diagnosis, Treatment, and Prevention // DtschArztebl Int. 2011. Vol. 108, № 37. P. 623–634.

5. *EPIC* Ultra Low power ECG Sensor. URL: http://www.mouser.com/ds/2/613/plesseysemiconductors_PS25205B-492421.pdf (дата обращения: 13.05.2015).

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД

А.Е. Зуева, М.О. Лазарева, Э.В. Максимова, студентки каф. КУДР
Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, stalker@main.tusur.ru
Проект ГПО КУДР-1003 «Изучение деградации светодиодных гетероструктур»

В последние годы светодиодное освещение приобретает все большую популярность. Многие производители светодиодных приборов намеренно завышают рабочие токи для увеличения яркости свечения и улучшения соотношения цена/люмен, однако чрезмерное завышение рабочих токов может привести к тому, что срок службы прибора окажется существенно меньше заявленного вследствие более интенсивного протекания процессов электрической деградации.

Как было показано ранее [1], критерием ранней диагностики начинающихся процессов электрической деградации могут служить изменения прямой и обратной ВАХ в области микротоков. Эти изменения связаны с неоднородным по площади гетероструктуры СИД протеканием рабочего тока и возникновением после испытаний при повышенных плотностях рабочего тока каналов предпочтительного зарядопереноса. Эти каналы приводят вначале к изменениям ВАХ в области микротоков, а потом при достаточно длительной эксплуатации СИД в таких режимах работы к ухудшению электрооптических характеристик и выходу СИД из строя.

Целью данной работы является модернизация измерительного комплекса [2] путем применения высокочувствительных приборов, позволяющих проводить прецизионные измерения электрооптических характеристик СИД в широком диапазоне значений токов и определять начинающиеся деградационные явления на более ранних стадиях.

В состав измерительного комплекса входит следующее оборудование:

1. Прецизионный измеритель LRC E4980A (Keysight Technologies, США).
2. Измеритель яркости (используется блок фоторегистрации МУМ-01.
3. Микроскоп МИМ-7 с видеокамерой (цифровой микроскоп).
4. Измеритель оптических спектров на основе монохроматора МУМ-01 с фотоэлектронным умножителем в качестве фоточувствительного элемента.
5. Персональный компьютер с программным обеспечением.

Основные технические характеристики измерительного комплекса:

– встроенный источник напряжения смещения до 40 В;

– одновременное измерение сопротивления постоянному току, постоянного тока и напряжения постоянного тока, а также импеданса;

– измерение тока в диапазоне от 1 нА до 1 А;

– измерение напряжения в диапазоне от 1 мкВ до 40 В;

– измерение емкости от 0,1 пФ;

– погрешность измерения 0,05%, высокая воспроизводимость результатов измерений как на нижних, так и на верхних пределах измерения импеданса;

– погрешность показаний счетчика длин волн монохроматора: ±0,2 нм;

– получение цифровых изображений поверхности кристалла СИД с коэффициентом увеличения до 5000 раз с выводом изображения на монитор ПК.

Функциональные возможности комплекса:

– измерение вольт-амперных характеристик;

– измерение вольт-вольт-фарадных характеристик;

–измерение спектральных характеристик свечения СИД;

– измерение вольт-яркостных характеристик;

– проведение испытаний на деградацию.

Модернизированный блок измерения ВАХ позволяет проводить изучение прямой и обратной ветвей ВАХ СИД в области нанотоков. Известно [1], что протяженные дефекты, в том числе дислокации, при прорастании через активный слой СИД проявляются на ВАХ в области нано- и микротоков. В этой области ВАХ сопротивление *p–n*-перехода велико, и дополнительные токи утечки объясняются образованием проводящих шунтов в активной области прибора. Увеличение электропроводности протяженных дефектов связывается с перераспределением примесей и электродиффузией в область дефекта атомов из электрода. Таким образом, данный блок установки позволяет фиксировать начинающуюся деградацию СИД на более ранних стадиях, чем в [2].

В нашем случае был исследован планарный светодиод производителя SemiLEDs средней мощности 0,1 Вт.

Экспериментальные исследования включали в себя: измерения прямых вольт-амперных (ВАХ), обратных ВАХ, а также спектральных характеристик светодиода. Вначале измерялись ВАХ «свежего» светодиода, а потом этот светодиод ставился на длительное испытание при рабочем токе, несколько превышающем номинальный. Далее вновь измерялись ВАХ (прямые и обратные).

На рис. 1 изображены обратные ветви ВАХ до (свежий образец) и после испытаний (старый) при рабочем токе 100 мА.

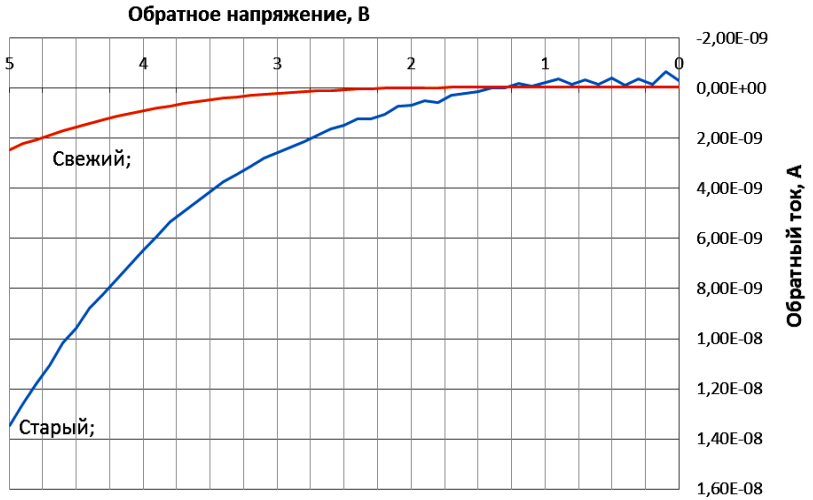


Рис. 1. Изменения обратной вольт-амперной характеристики СИД в зависимости от времени испытаний

Наблюдаемое изменение ВАХ при обратном напряжении после испытаний может быть обусловлено началом процесса формирования каналов предпочтительного зарядопереноса через гетерограницу в кристалле СИД.

Данную установку можно использовать для выбора оптимальных режимов эксплуатации светодиода, для оптимизации его эффективности и срока службы во время эксплуатации при повышенных плотностях рабочих токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коровкин А.А., Чехоненко А.П., Казко Е.И., Ермолаев А.В.* Деградация СИД и обратная ветвь вольт-амперной характеристики // Научная сессия ТУСУР–2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15–17 мая 2013 г. Томск: В-Спектр, 2013. Ч. 1. С. 161–163.

2. *Томашевич А.А., Ермолаев А. В., Коровкин А.Н.* Установка для комплексных исследований сверхъярких СИД. Каталог разработок молодых ученых ТУСУРа. Томск, 2013.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕДУРЫ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ

А.С. Комюстюрова[1], студентка каф. ПМЭ,
Е.Ю. Киселева[2], инженер, к.т.н., М.С. Куцов, инженер[2]
Научный руководитель Д.С. Жданов[2], м.н.с., к.т.н.
г. Томск, [1]Томский политехнический университет, x260694@mail.ru;
[2]ТГУ, eka.kiselyova@gmail.com

Одной из основных стратегических задач системы здравоохранения Российской Федерации является снижение смертности населения [1]. Достижение этой цели немыслимо без участия службы скорой медицинской помощи. В 2013 г. вышел приказ Минздрава РФ [2], согласно которому станции скорой помощи, отделения скорой помощи поликлиник и больниц должны иметь как минимум одно «устройство контроля качества непрямого массажа сердца с голосовыми подсказками».

Существующие аналоги [3–7] оценивают правильность проводимых реанимационных мероприятий лишь по косвенным признакам – оценивается степень компрессии грудной клетки по силе нажатия на нее. В то время как анализ состояния реанимируемого во время СЛР не производит ни одно из вышеперечисленных устройств.

Коллективом авторов было разработано устройство для контроля процедуры СЛР, позволяющее оценивать действия реаниматора по анализу акустических сигналов кровотока с области бифуркации сонных артерий и анализу эффективности действий реаниматора за счет поиска самостоятельных сердцебиений и дыхания реанимируемого. Структурная схема экспериментального образца устройства представлена на рис. 1.

В состав экспериментального образца устройства входят следующие блоки:

- пьезоакустические преобразователи, необходимые для получения биологических сигналов;
- аналоговые блоки, необходимые для согласования, предварительного усиления и обработки сигналов, получаемых с акустических датчиков;
- цифровой блок.

Для получения биологических сигналов наиболее эффективными из датчиков являются контактные датчики с пьезоэлектрическим чувствительным элементом, поскольку чувствительный элемент данного типа имеет широкий частотный диапазон, высокую линейность характеристик и простую конструкцию [8].

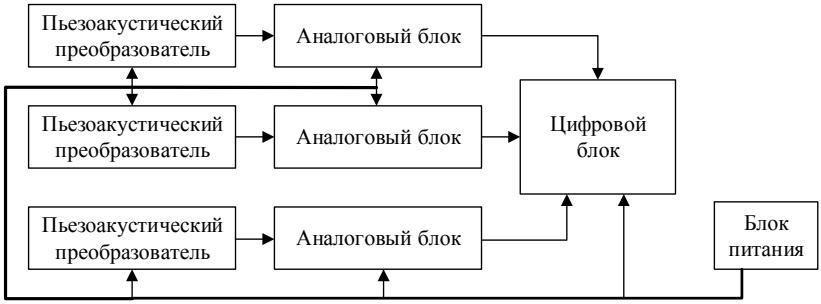


Рис. 1. Структурная схема устройства для контроля процедуры СЛР

Аналоговый блок включает в себя буферный усилитель, блок фильтрации и усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. Основной задачей буферного усилителя является преобразование высокого выходного импеданса пьезоэлектрического преобразователя в более низкий, а также обеспечение первичного усиления и согласование с цифровым блоком устройства. Блок фильтрации, состоящий из ФВЧ и ФНЧ, будет способствовать подавлению внешних шумов и помех и предотвратит перегрузку регистрирующего оборудования, т.е. аналого-цифрового преобразователя. Из-за неизвестного уровня сигнала, поступающего от блока фильтрации, необходимо введение дополнительного усилителя с функцией автоматической регулировки усиления (АРУ).

Все данные, получаемые от аналоговой части устройства. поступают на цифровой блок. Цифровой блок необходим для преобразования, обработки получаемых сигналов, визуальной и звуковой сигнализации о ходе проведения СЛР, сохранения получаемых сигналов на встроенное запоминающее устройство, взаимодействия с органами управления, контроля уровня заряда питающего элемента и др. В состав цифрового блока (рис. 2) входят:

- встроенное запоминающее устройство, используемое для сохранения оцифрованных сигналов, получаемых с трахеи и сонных артерий реанимируемого;
- блок органов управления и индикации, позволяющий отображать состояние и режим работы устройства, а также осуществлять управление устройством;
- блок звуковой индикации, позволяющий генерировать звуковые сигналы;
- блок контроля уровня заряда, позволяющий отслеживать уровень напряжения на питающем элементе;

• блок управляющего микроконтроллера, осуществляющий аналого-цифровое преобразование регистрируемых сигналов, обработку данных, согласование и управление работой всех элементов, входящих в состав цифрового блока.

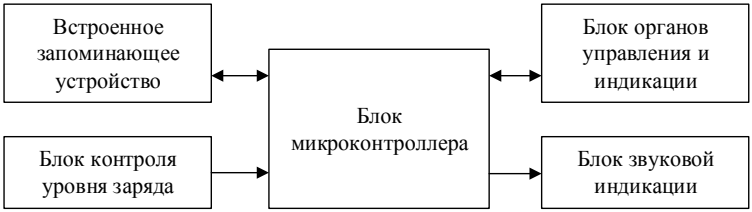


Рис. 2. Структурная схема цифрового блока устройства

Работы выполнялись в рамках соглашения № 14.578.21.0078 (уникальный идентификатор RFMEFI57814X0078) по теме «Устройство для контроля процедуры сердечно-легочной реанимации человека», заключенного между Минобрнауки РФ и Национальным исследовательским Томским государственным университетом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Улумбекова Г.* Здравоохранение России. Что надо делать. Научное обоснование «Стратегии развития здравоохранения РФ до 2020 года». Краткая версия. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 96 с.

2. Приказ Минздравсоцразвития России от 04.05.2012 № 477н (ред. от 07.11.2012) «Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи».

3. *Buléon C., Parienti J.-J., Halbout L., Arrot X. et al.* Improvement in chest compression quality using a feedback device (CPRmeter): a simulation randomized crossover study // The American Journal of Emergency Medicine. 2013. № 31(10). P. 1457–1461.

4. *Beckers S.K., Skorning M.H., Fries M. et al.* CPREzy™ improves performance of external chest compressions in simulated cardiac arrest // Resuscitation. 2007. № 72 (1). P. 100–107.

5. *Zapletal B., Greif R., Stumpf D. et al.* Comparing three CPR feedback devices and standard BLS in a single rescuer scenario: A randomised simulation study // Resuscitation. 2014. №85(4). P. 560–566.

6. http://factor-mt.ru/shop/pr01

7. *Krep H., Mamier M., Breil M. et al.* Out-of-hospital cardiopulmonary resuscitation with the AutoPulse™ system: A prospective observational study with a new load-distributing band chest compression device // Resuscitation. 2007. № 73(1). P. 86–95.

8. *Брюль К.* Пьезоэлектрические акселерометры и предусилители. Справочник по теории и эксплуатации. Нэрум (Дания): Брюль и Къер, 2000. С. 111, 178.

ПОДСЕКЦИЯ 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

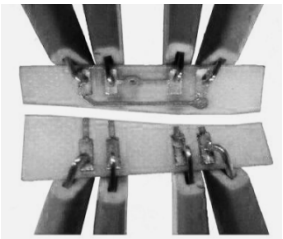
*Председатель – **Лощилов А.Г.**, зав. каф. КУДР,*
начальник СКБ «Смена», к.т.н.;
*зам. председателя – **Убайчин А.В.**, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.*

ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗРАЗЪЕМНЫХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СВЯЗЬЮ

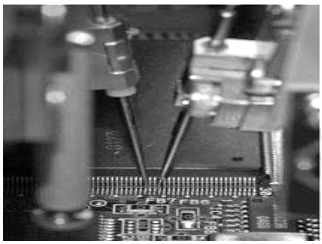
И.И. Александров, студент каф. КУДР,
С.П. Караульных, инженер СКБ «Смена»
Научный руководитель А.А. Бомбизов, м.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

В настоящее время в технологии создания спутниковых систем в космической отрасли широко используются проводные информационные магистрали. В их состав входят кабельные сборки, согласующие резисторы, разветвители с трансформаторной и непосредственной связями и др. В соответствии с существующими требованиями к надежности и обеспечению безотказной работы все элементы магистралей проходят проверку на соответствие регламентированных параметров согласно стандарту [1, 2]. Как правило, тестирование объектов осуществляется широким набором измерительного оборудования с использованием ручного подключения. Такой подход не гарантирует повторяемость и безошибочность измерений и требует значительных временных затрат. Впервые в России автоматизированная система контроля компонентов информационных магистралей космических аппаратов была создана коллективом СКБ «Смена» ТУСУРа [3]. Её особенностью является возможность выполнения измерений всех требуемых параметров за одно разъемное подключение. Однако новые тренды даже в космической технике направлены на сокращение издержек производства, массы изделий и т.д. Поэтому всё чаще промежуточные узлы изготавливаются в бескорпусном и безразъемном исполнении. Основной проблемой при выполнении контроля параметров таких узлов является нерешенная задача надежной коммутации с автоматизированным измерительным комплексом.

В действительности в большинстве случаев подключение узла к измерительному оборудованию осуществляется при помощи штатных щупов (рис. 1, *а*), что нельзя назвать надежным при тестировании партии подобных устройств. Ближайшим и очевидным решением может быть использование зондовых станций для диагностики печатных узлов [4]. Особенностью данной системы является наличие набора измерительных щупов, управляемых высокоточным координатографом (рис. 1, *б*). Но такой вариант является наиболее подходящим для исследования нестандартных изделий. Но ввиду дороговизны подобной установки и необходимости быстрого подключения объектов тестирования потребовалось разработать специализированное присоединительное устройство, которое будет совместимо с существующей системой контроля [3] для осуществления тестирования объектов за одно подключение.



а



б

Рис. 1. Штатные щупы

В результате анализа возможных решений выбран вариант с размещением объекта тестирования в некотором отсеке, в котором будет осуществляться электрическое соединение с системой контроля. Из проведенного обзора выбран соединитель Samtec SIBF-25-F-S-AD [5], содержащий двадцать прижимных контактов (рис. 2). При использовании такого соединения можно отметить следующие плюсы: прижимное подключение гарантирует минимальное трение между двумя контактами, тем самым предохраняя покрытие контактных площадок объектов тестирования; такое количество контактов с шагом 1,27 мм позволяет осуществлять тестирование объектов с практически произвольным расположением контактных площадок вдоль края.

Текущее решение с предложенными разъемами предполагает прижим и фиксирование объекта на разъемах. Исходя из обзора и требований к минимизации времени подключения, выбран прижимной механизм Clamptek CH-201 [6], изображенный на рис. 3. Конструкция прижимного винта (рис. 3, поз. *1*) подразумевает воздействие на центр

печатного узла, что может вызвать его деформацию и повреждение установленных электрорадиоэлементов.

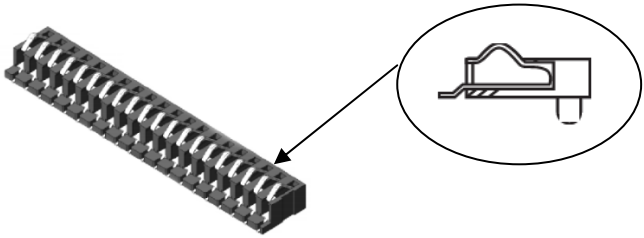


Рис. 2. Прижимной разъем для позиционирования объекта тестирования в присоединительном устройстве

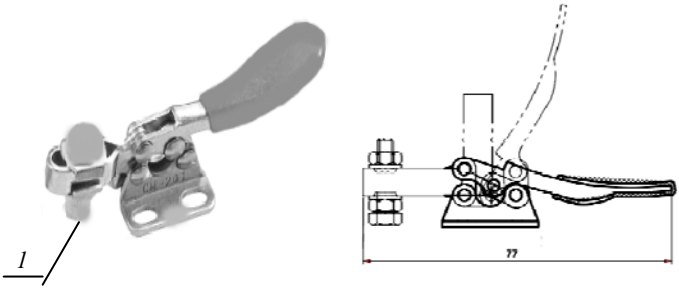


Рис. 3. Прижимной механизм

В связи с этим предложена альтернативная конструкция прижимного винта (рис. 4, поз. *1*) для обеспечения воздействия на объект тестирования только в области примыкания контактов, которая исключает возможную деформацию печатной платы. В результате на рис. 4. предложен эскиз конструкции присоединительного устройства для измерения параметров безразъемных разветвителей с трансформаторной связью.

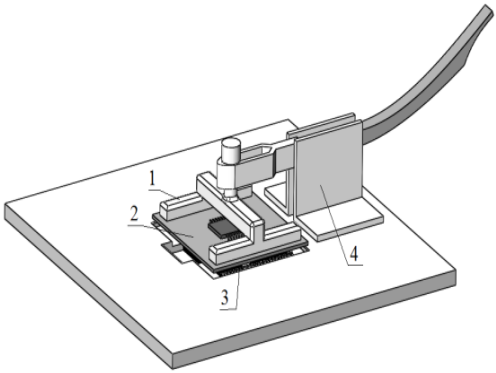


Рис. 4. Эскиз присоединительного устройства:
1 – прижимной винт;
2 – разветвитель;
3 – соединитель;
4 – прижимной механизм

Преимущество использования присоединительного устройства заключается в том, что тестирование проходит в автоматическом режиме. При однократном размещении тестируемого разветвителя в держателе можно за счет программного управления [3] поочередно произвести измерения всех параметров. Это позволит свести к минимуму влияние оператора, исключает возможность неправильного подключения объекта, сократит время тестирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ* Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Введ. 2004-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 26 с.

2. *ГОСТ* Р 52072–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Тестирование компонентов физической среды. Общие требования к методам контроля. Введ. 2004-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 14 с.

3. *Лощилов А.Г.* Автоматизированная система контроля параметров информационных магистралей и их компонентов для систем управления космических аппаратов / А.Г. Лощилов, А.А. Бомбизов, С.П. Караульных и др. // Изв. вузов. Физика. 2012. № 9/3. С. 72–78.

4. *Тестирование* смонтированных печатных плат зондовым методом [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://tech-e.ru/2007_6_61.php. (дата обращения: 24.08.2015).

5. *Прижимные* разъемы Samtec SIBF-25-F-S-AD [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.samtec.com/technical-specifications/Default.aspx?SeriesMaster=SIBF (дата обращения: 22.08.2015).

6. *Прижимной* механизм [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.clamptek.ru/production/details/2/1/mehanicheskiy-zagim-s-vertikalnoy-ruchkoy/ch-101-a.html (дата обращения: 23.08.2015).

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА НА ОСНОВЕ НУЛЕВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Е.В. Алексеев, Г.Г. Жук, студенты каф. РЭТЭМ,
А.В. Убайчин, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, egor123ea@mail.ru

Проект ГПО КУДР-1503 «Разработка системы радиометрического контроля и диагностики»

Процесс развития науки и техники привёл к появлению и последующему совершенствованию методов и средств, которые позволяют эффективно решать задачи в различных областях народного хозяйства, в таких как дистанционное зондирование, радиоастрономия, геология,

контроль рационального природопользования, и многих других. Особое место в таких исследованиях занимают микроволновые радиометры, в частности радиометрические системы на основе модификации нулевого метода измерения [1]. Данная модификация позволяет улучшить метрологические характеристики радиометрических систем [2] по сравнению с известными аналогами [3]. В основе работы нулевой модифицированной радиометрической системы заложен алгоритм синхронного выполнения двух видов импульсной модуляции – амплитудной и широтной. Данная особенность позволяет снизить влияние основных дестабилизирующих факторов работы микроволновых радиометров (дрейф, флуктуации собственной шумовой температуры и коэффициента усиления приемника). Данная особенность позволяет выразить шумовую температуру антенны косвенно через длительность сигнала широтно-импульсной модуляции.

Одним из основных блоков радиометрической системы на основе нулевого метода измерений является квадратичный детектор [4]. В данной статье рассматривается один из вариантов практической реализации квадратичного детектора нулевого модифицированного микроволнового радиометра, предназначенного для дистанционного зондирования.

Для разработки квадратичного детектора микроволнового радиометра на основе нулевого метода измерения необходимо выполнить следующие задачи:

1) разработать детекторную секцию для детектирования мощности шумовых сигналов с динамическим диапазоном от –50 до –30 дБм;

2) обеспечить КСВ входа детектора в рабочей полосе частот (60 МГц) не более 2;

3) обеспечить постоянную времени τ для каждой цепи интегрирования, равной 20 мс.

В соответствии с алгоритмом функционирования радиометрической системы [5] разработана структурная схема детектора. Структурная схема квадратичного детектора микроволнового радиометра показана на рис. 1.

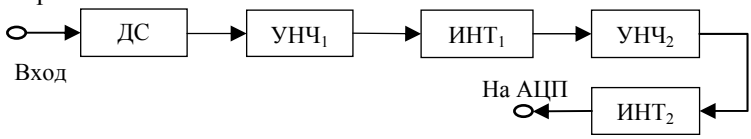


Рис. 1. Структурная схема квадратичного детектора

На рис. 1 ДС – детекторная секция, $УНЧ_1$ и $УНЧ_2$ – усилители низкой частоты, $ИНТ_1$ и $ИНТ_2$ – интеграторы.

Детекторная секция выполнена на основе диода Шоттки HSMS-2850 [2]. Схема включения детекторной секции показана на рис. 2.

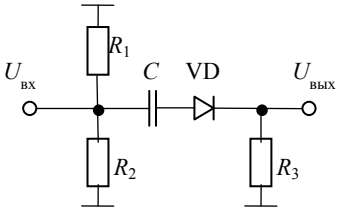


Рис. 2. Схема включения детекторной секции: R_1 = 100 Ом, R_2 = 100 Ом, R_3 = 20 кОм, C = 10 мкФ, диод VD – HSMS-2850

Функционирование квадратичного детектора осуществляется следующим образом [6]. На вход квадратичного детектора подаётся сложнокомпонентный шумовой сигнал. Резисторы R_1 и R_2 необходимы для обеспечения согласования импеданса диода и СВЧ-тракта. Конденсатор С выполняет функцию разделения цепей детекторной секции по постоянному току. Диод VD необходим для выделения огибающей высокочастотного сигнала по квадратичному закону. Для обеспечения линейной связи выходного напряжения и входной мощности детектирования сигналов необходимы усилители низких частот (УНЧ1 и УНЧ2) с соответствующими коэффициентами усиления (K_{y1} = 20 и K_{y2} = 20).

Проведён расчёт коэффициентов усиления [8] по формуле

$$K_y = 1 + \frac{R_3}{R_1}. \qquad (1)$$

По результатам расчётов получены следующие значения для УНЧ1: R_3 = 26 кОм и R_1 = 1,3 кОм. Аналогичные номиналы резисторов будут и для УНЧ2, так как коэффициенты усиления первого и второго усилителей низкой частоты равны. Выбор номиналов резисторов произведен в соответствии с технической документацией на операционный усилитель [9].

Интеграторы представляют собой однозвенные *RC*-цепи, которые осуществляют аналоговое накопление сигналов с постоянной времени τ. Согласно [1], параметр τ равен 20мс. Для выбора номиналов элементов интегратора ИНТ$_1$воспользуемся формулой (2).

$$\tau = R \cdot C. \qquad (2)$$

После расчёта номиналов элементов и их анализа были выбраны следующие значения: R = 13,3 кОм, C = 1,5 мкФ. Аналогичные номиналы элементов будут и для ИНТ$_2$.

На выходе квадратичного детектора сигнал должен быть представлен в виде цифровых данных, несущих качественную и количественную информацию о регистрируемом излучении. Поэтому к выходу последнего усилителя низких частот подключается аналого-цифровой

преобразователь, который необходим для передачи значений на компьютер посредством микроконтроллера.

Заключение. В соответствии с поставленными задачами разработанный квадратичный детектор радиометрической системы нулевого метода измерений позволяет работать в широком диапазоне частот и имеет удовлетворительные метрологические характеристики. По результатам проведения серии экспериментов выявлена проблема низкой чувствительности детекторной секции, которая ослабляет данные метрологические характеристики. Одним из способов решения данной проблемы является подключение узкополосного устройства согласования на реактивных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Филатов А.В.* Радиометрические системы нулевого метода измерений // А.В. Филатов. Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. 276 с.
2. *Filatov A.V.* A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, A.A. Bombizov // Measurement Techniques. 2013. Vol. 55, № 11. P. 1281–1286.
3. *Camps A., Tarongi J.M.* Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // Remote Sensing. 2010. Vol. 2. P. 1826–1843.
4. *Филатов А.В.* Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков // Радиотехника. 2011. № 1. С. 47–55.
5. *Filatov A.V., Ubaichin A.V.* The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency // Measurement Techniques. 2012. Vol. 54, № 10. С. 1–6.
6. *Филатов А.В.* Микроволновый четырехканальный нулевой радиометр L-диапазона / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Д.Е. Параев // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 67–72.
7. *Филатов А.В.* Микроволновый нулевой радиометр с комбинированной импульсной модуляцией / А.В. Филатов, Н.А. Каратаева, В.Д. Дмитриев // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 65–68.
8. *Мамий А.Р.* Операционные усилители / А.Р. Мамий, В.Б. Тлячев. Майкоп: АГУ, 2005. 192 с.
9. *Техническая* документация на операционный усилитель AD8606 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/225208/AD/AD8606.html (дата обращения: 06.03.15).
10. *Краус Д.Д.* Радиоастрономия / Д.Д. Краус. М.: Сов радио, 1973. 456 с.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРАХ

А.М. Дружков, аспирант каф. ИнИТ
Научный руководитель А.Л. Шестаков, проф. каф. ИнИТ, д.т.н.
г. Челябинск, НИУ ЮУрГУ, sandruzh@gmail.com

В тяжелых условиях эксплуатации хорошо себя зарекомендовали вихреакустические расходомеры [1]. В вихреакустических (вихревых) расходомерах информация о частоте вихреобразования поступает неравномерно во времени и зависит от измеряемого расхода [2]. Вычисление расхода на основе каждого измерения значения частоты вихреобразования (f) затруднено из-за ее нестабильности [3]. В этой связи возникает необходимость использования алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования с целью нахождения оценки действительного значения. Частота вихреобразования в вихреакустических расходомерах изменяется от десятых долей герц (в области малых расходов) до сотен герц (в области больших расходов).

Широко распространённые и простые алгоритмы, такие как скользящее среднее и медианная фильтрация с усреднением большого количества значений мгновенных частот вихреобразования, хорошо себя зарекомендовали в области больших расходов, где частота поступления информации велика. Однако в области малых расходов применение таких алгоритмов приводит к появлению замедленной реакции расходомера на изменение расхода.

Для решения поставленной задачи был разработан адаптивный алгоритм, позволяющий расходомеру эффективно работать во всем диапазоне измерения расходов.

Для рассмотрения предлагаемого алгоритма необходимо выделить два качественно разных режима, а работу расходомера рассматривать в виде последовательности этих режимов: режима стабильного (установившегося) расхода и режима изменения расходов.

Основная идея алгоритма заключается в том, чтобы применить несколько методов обработки временного ряда мгновенных значений частот вихреобразования, наиболее подходящих для каждого из режимов измерения (установившегося расхода или изменяющихся расходов). Схема предлагаемого алгоритма изображена на рис. 1.

На первом этапе происходит ввод массива значений мгновенных частот временного ряда. На втором этапе производится расчет критерия, на основе которого принимается решение об использовании одного из методов обработки данных. Если расходомер находится в режиме установившегося расхода, в качестве метода обработки данных выбирается скользящее среднее. Если расходомер в режиме изменения рас-

хода, то используется метод экспоненциального сглаживания [4]. В качестве критерия предлагается использовать значение коэффициента вариации [2]. В случае, если рассчитанный коэффициент вариации меньше заданного уровня, то в проточной части расходомера имеет место установившийся режим расхода. В противном случае можно говорить об изменяющемся режиме расхода [3]. На третьем этапе происходит вычисление оценки частоты вихреобразования на основе выбранного метода. Последний этап предусматривает расчет расхода измеряемой среды на основе полученных оценок частоты вихреобразование с помощью выбранной модели функции преобразования [1].

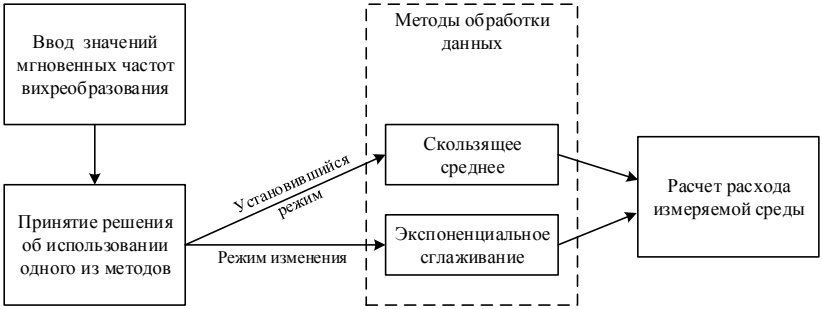


Рис. 1. Схема адаптивного алгоритма

На рис. 2 приведено сравнение работы предлагаемого адаптивного алгоритма и алгоритмов скользящего среднего, медианной фильтрации на примере измерения в области малых расходов с помощью вихреакустического расходомера с условным диаметром 50 мм и диапазоном расходов (0,5–50) м^3/ч.

В режиме установившихся расходов все алгоритмы эффективно устраняют составляющую помехи, подчиняющиеся нормальному закону распределения, и обеспечивают стабильность показаний расходомера. В режиме изменения расхода адаптивный алгоритм позволяет мгновенно подстроиться к его изменению, в то время как остальные рассматриваемые алгоритмы дают большую задержку реакции на произошедшее изменение расхода. Это приводит к негативному влиянию на погрешность измерения расходомера. Некорректные показания мгновенного расхода являются причиной возникновения погрешности накопленного объема, который вычисляется как интеграл значений мгновенного расхода за определенный промежуток времени.

Разработанный адаптивный алгоритм позволяет значительно снизить задержку реакции на изменение расходов при измерении в облас-

ти малых расходов. При измерении в области больших расходов предложенный алгоритм за счет снижения чувствительности коэффициента вариации к изменению расходов вырождается до алгоритма скользящего среднего, который в условиях поступления информации с большой скоростью не вызывает значительных задержек реакции на изменение расхода.

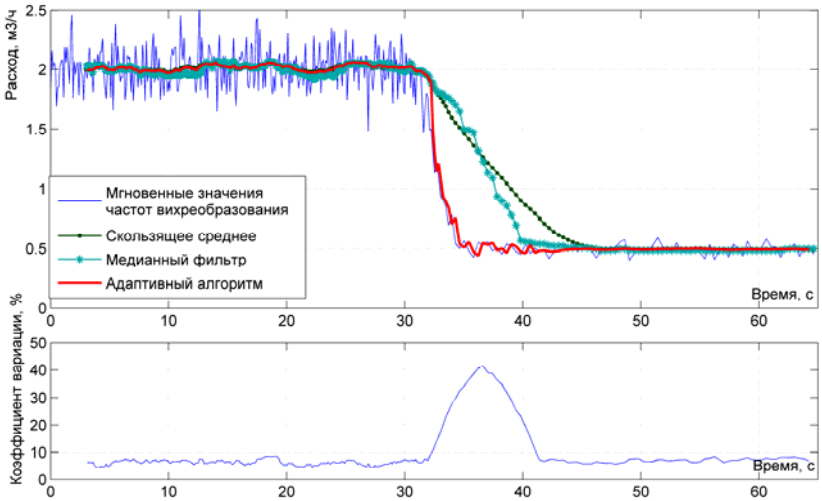


Рис. 2. Пример работы адаптивного алгоритма

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: справочник. / П.П. Кремлевский. Л.: Машиностроение, 2004. 701 с.
2. *Лапин А.П.* Исследование стабильности частоты вихреобразования в вихреакустическом расходомере / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 4. С. 89–98.
3. *Pankanin G.L.* The vortex flowmeter: various methods of investigating phenom-ena // Measurement science and technology. 2005. №16. P. R1–R16.
4. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. И.Г. Абрамовича. М.: Наука, 1973. 832 с.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕПЛЕНИЙ ДЛЯ СТЕНДА СБОРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖГУТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

Д.С. Ермаков, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.Г. Лощилов, нач. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

Электрический жгут – один из самых консервативных и распространенных элементов конструкции электротехнических систем. Как бы ни развивались современные технологии сборки, как бы ни росла степень интеграции элементной базы, сколь бы сложными и многослойными не становились печатные платы, неизменным остается одно – пучки проводов, связывающие отдельные элементы системы. Без них не обходятся ни бытовая техника, ни бортовое оборудование, ни системы промышленной электроники. И проблема не только в том, что жгут – достаточно объемный элемент конструкции. Изготовление жгутов сложнее всего поддается автоматизации, что противоречит современным тенденциям развития производства [1].

При изготовлении жгутов используют сборочные стенды – щиты с технологическими шпильками для крепежа, поворотов и ответвлений проводов, обеспечивающими необходимые радиусы изгибов и соответствие формы жгута его трассе согласно проекту. Зачастую в роли креплений используются обыкновенные гвозди, при этом уровень технологичности, эргономики и удобства монтажа остается невысоким.

Для решения данной проблемы были спроектированы и изготовлены специализированные крепления с применением FDM-технологии 3D-печати. На рис. 1 представлены модели спроектированных креплений.

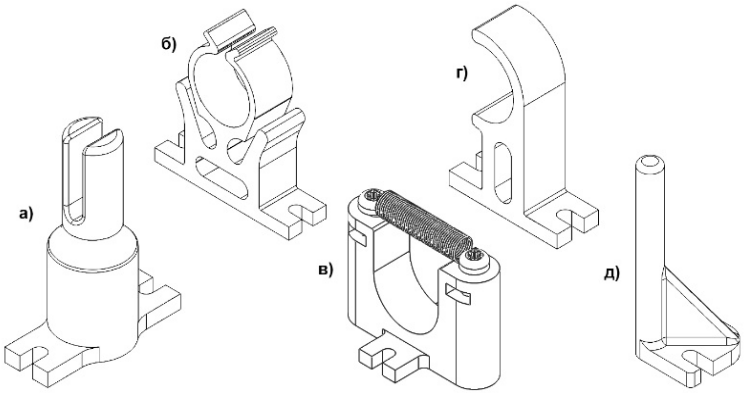


Рис. 1. 3D-модели спроектированных креплений

Крепление типа «*а*» предназначено для формирования *Т*-образного соединения проводов. Конструкция позволяет уменьшить использование кабельной стяжки в 3 раза за счет скрепления проводников в одной точке (рис. 2, *а*).

Крепление типа «*б*» обеспечивает поддержку и центрирование проводников, облегчает маршрутизацию (рис. 2, *б*).

Крепление типа «*в*» необходимо для закрепления начала и конца проводника. Благодаря пружине, в качестве фиксирующего элемента, проводники (до 15 шт.) плотно закрепляются между витками без повреждения изоляции и имеют подвижность на стенде, что необходимо при вязке жгута кабельными стяжками (рис. 2, *в*).

Крепление типа «*г*» обеспечивает поддержку и центрирование проводников при повороте маршрута на 90°.

Крепление типа «*д*» предназначено для формирования ветвей жгута, обеспечивает необходимые радиусы изгибов проводов (рис. 2, *г*).

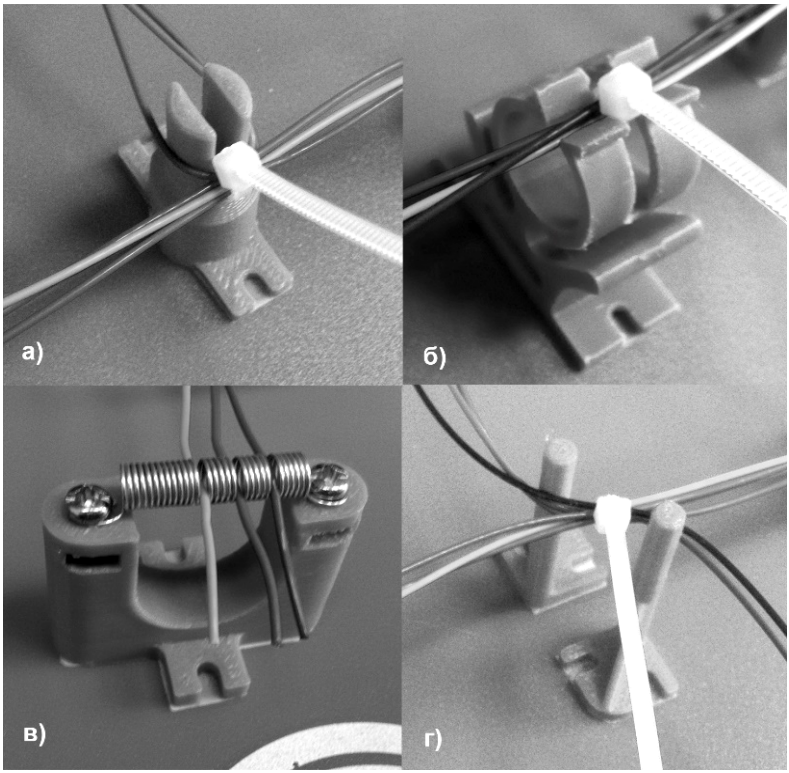


Рис. 2. Крепления, изготовленные с применением FDM-технологии 3D-печати

На рис. 3 приведена фотография макета монтажного стола, изготовленного с использованием разработанных креплений.

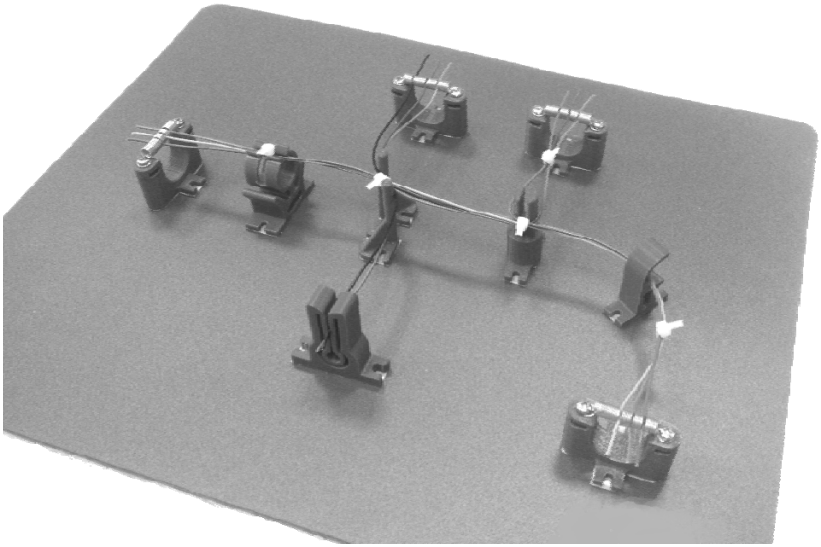


Рис. 3. Макет раскладки жгута с применением разработанных креплений

В результате проделанной работы были спроектированы и изготовлены необходимые типы креплений, собран макет монтажного стола, проложен произвольный маршрут жгута. Крепления показали надежность, удобство использования, эргономичность и высокую технологичность при монтаже жгута. Планируется изготовление стенда для монтажа конкретного жгута с применением результатов данной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вектор* высоких технологий №8 [Электронный ресурс]. Электрон. журн. 2015. URL: http://ostec-press.ru/pub/bulletins/vvt/vvt8-21/ (дата обращения: 8.03.2016).

2. *Вектор* высоких технологий №2 [Электронный ресурс]. Электрон. журн. 2015. URL: http://ostec-press.ru/pub/bulletins/vvt/vvt2-23/ (дата обращения: 8.03.2016).

БЛОК АНАЛОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.Д. Фисюк, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.А. Бомбизов, м.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, slacool@mail.ru, main@skbsmena.ru

При производстве и эксплуатации бетонных конструкций зачастую предъявляются высокие требования надежности, которая во многом определяется степенью неоднородности используемых блоков. Образование дефектных областей может происходить как при изготовлении, так и под воздействием агрессивной окружающей среды, что, в свою очередь, приводит к разрушению конструкции. Своевременное обнаружение и устранение неисправных областей является актуальной задачей в данной области.

В проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета (ПНИЛ ЭДИП ТПУ) проведен ряд исследований в области механоэлектрических преобразований в твердых телах с дефектной структурой [1–3], там же разработан импакт-электрический метод для определения дефектов в изделиях из бетона [4].

На данный момент коллективами ПНИЛ ЭДИП и СКБ «Смена» ТУСУРа ведется разработка программно-аппаратного комплекса для диагностики прочности железобетонных и других строительных конструкций, изготовленных на основе диэлектрических структур.

Принцип действия заключается в механическом возбуждении объекта исследования сигналом заданной формы и регистрации электромагнитного отклика, форма и характеристики которого могут позволить оценить неоднородность структуры исследуемого образца. Воздействие осуществляется пьезоэлектрическим ударником, а емкостным датчиком производится регистрация отклика. Малая его амплитуда обуславливает необходимость разработки аналогового блока усиления и фильтрации. Структура данной системы изображена на рис. 1 [5].

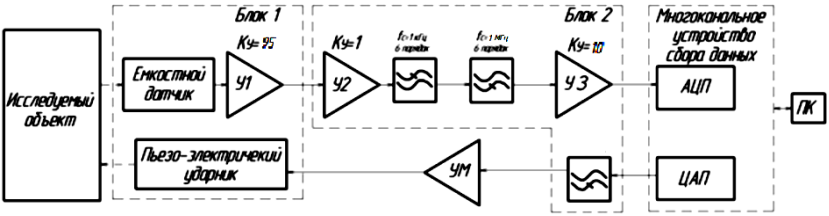


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого комплекса

Блок 1 состоит из пьезоэлектрического ударника, емкостного датчика и инструментального усилителя (ИУ), первый каскад которого для снижения потерь установлен как можно ближе к датчику. Регистрация сигнала с емкостных пластин осуществляется ИУ.

Применяемый ударник изображен на рис. 2. На корпусе (*1*) расположены две полукруглые пластины (*2*), представляющие собой обкладки емкостного датчика, соединенные по отдельной коаксиальной линии для каждой обкладки с ИУ. Внутри корпуса расположен пьезоэлектрический ударник (*3*), взаимодействие с ним происходит с помощью управляющего сигнала. В конструкции имеется пружина, которая позволяет обеспечивить необходимую силу прижима ударника. Перемещение ударника осуществляется с помощью координатографа.

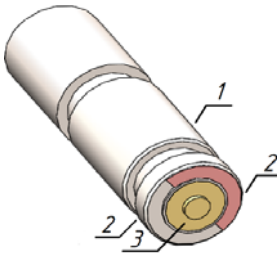


Рис. 2. Модель ударника

Блок 2 является блоком аналоговой обработки, выполнен в виде модуля PXI и содержит в себе второй каскад инструментального усилителя, полосовой фильтр и оконечный усилитель.

С учетом значимых дефектов и скорости распространения акустической волны в бетонных конструкциях (около 3000 м/с) полоса пропускания данного усилителя была выбрана в пределах от 1 кГц до 1 МГц. В цифровой обработке сигналов наблюдается явление зеркального отражения гармоник относительно частоты Найквиста (половина частоты дискретизации), лежащих за ее пределами, что затрудняет распознавание сигнала. Для данного АЦП NI PXI-5105 частота дискретизации равна 60 МГц, а динамический диапазон составляет 72 дБ (12 бит), из чего следует, что ослабление на частоте 59 МГц (частота дискретизации минус верхняя граница полосы пропускания) должно быть не ниже 72 дБ. В схеме использованы последовательно включенные фильтры Баттерворта верхних и нижних частот четвертого порядка структуры Салена–Кея. Суммарный коэффициент усиления аналогового блока составляет 950.

В результате проделанной работы были изготовлены корпус держателя ударника с первым каскадом ИУ, блок аналоговой обработки (рис. 3). Планируются работы по оптимизации датчиков для приёма сигнала с целью уменьшения влияния окружающей среды на результаты измерений. Также планируется размещение шести емкостных датчиков для увеличения площади исследования.

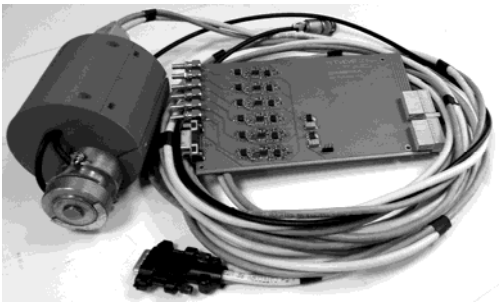


Рис. 3. Блок аналоговой обработки с ударником

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фурса Т.В.* Разработка метода определения концентрации и местоположения трещин в бетонах на основе явления механоэлектрических преобразований / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Вестник науки Сибири. 2012. № 4 (5). С. 89–94.

2. *Суржиков В.П.* К вопросу об оптимальном спектре импульсного возбуждения в методе механоэлектрических преобразований / В.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, П.Н. Хорсов // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 187–192.

3. *Беспалько А.А.* Механоэлектрические преобразования при деформационных процессах в горных породах / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов и др. // Всерос. конф. «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН»: сборник докладов. 2015. Т. 2. С. 105–107.

4. *Фурса Т.В.* Разработка импакт электрического метода определения места локализации дефекта в изделии из бетона / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов, С.И. Чеховских // Вестник науки Сибири. 2013. № 1 (7). С. 111–116.

5. Караульных С.П. Программно-аппаратный комплекс для диагностики твердых материалов на основе анализа продуктов механоэлектрического преобразования / С.П. Караульных, А.А. Бомбизов // Матер. науч. конф. «Научная сессия ТУСУР–2013». Томск, 2013. С. 206–209 [Электронный ресурс] http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/events/session/2013_1.pdf (дата обращения: 01.03.2016).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Д.А. Иванов, ст. преподаватель, к.т.н.,
Р.А. Хуснутдинов, Г.Д. Марданов, аспиранты
Научный руководитель Д.А. Иванов, ст. преподаватель каф. ПЭС, к.т.н.
г. Казань, ФГБОУ ВПО «КГЭУ», divanale@gmail.com

В наши дни существуют несколько дистанционных бесконтактных методов контроля состояния высоковольтных изоляторов в про-

цессе их эксплуатации. Эти методы условно можно разделить на две группы: по характеристикам частичных разрядов (ЧР) и по наличию локальных температурных градиентов [1–3].

С учетом вышесказанного целью нашей работы было создание комплексного метода контроля рабочего состояния высоковольтных изоляторов, сочетающего детектирование ряда характеристик ЧР ультразвуковым датчиком с регистрацией локальных областей нагрева тепловизором. Разработанная компьютерная система позволяет регистрировать основные характеристики и отображать распределение амплитуды и числа ЧР в зависимости от фазы приложенного напряжения [9].

Регистрация электромагнитных импульсов ЧР (рис. 1) осуществляется направленной антенной AOR LA380, соединенной с широкополосным перестраиваемым приемником AOR AR 5000A , позволяющим детектировать импульсы в интервале частот 0,5–600 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется активной параболической антенной, соединенной с приемником SDT-270 на частоте 40 кГц.

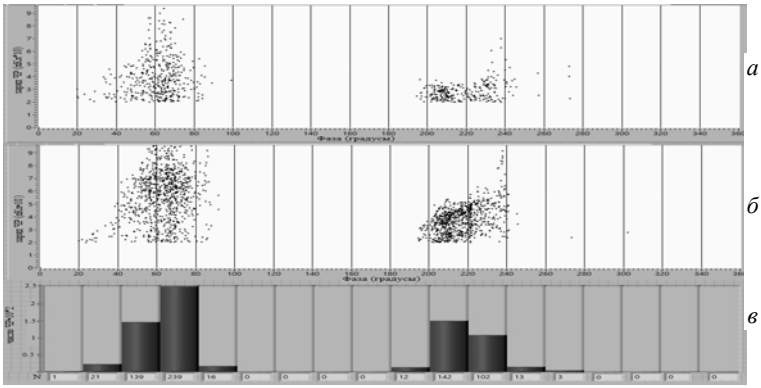


Рис. 1. Характеристики ЧР для работоспособного бездефектного изолятора № 3; *а* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – фазовое распределение количества (*N*) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком

Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами, как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так, акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20 Гц – 20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35–45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал / шум ≈ 2, акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15–25 м. С учетом низкочас-

тотных производственных электромагнитных помех в диапазоне (50–200 МГц) и выше 600 МГц, наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20–50 и 400–550 МГц, причем интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой.

Одновременно сигналы ЧР поступают на плату сбора данных АЦП NI USB-6341, преобразующую аналоговые сигналы в цифровые. Затем электромагнитные и акустические сигналы, синхронизированные с фазой высокого напряжения, накапливаются в компьютере по узким фазовым интервалам и далее разделяются по числу и интенсивности импульсов в каждом фазовом интервале [4]. Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для эталонного ВИ того же типа. Поскольку скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов отличаются на несколько порядков, то для их синхронизации с каждым конкретным фазовым интервалом используется блок фазовой синхронизации, учитывающий расстояние между дефектом и датчиками.

Разработанные нами метод и устройство были использованы для контроля различных диэлектрических элементов, находящихся в эксплуатации на подстанции ГПП ВЗС «Челныводоканал». Измерения показали сопоставимость результатов, полученных двумя методами.

Характеристики ЧР для работоспособного (№3) и дефектного (№5) ВИ, типичные для обеих групп изоляторов, приведены на рис. 1, 2. Визуально на изоляторе №5 наблюдался дефект в виде повреждения стеклопластикового стержня (рис. 2).

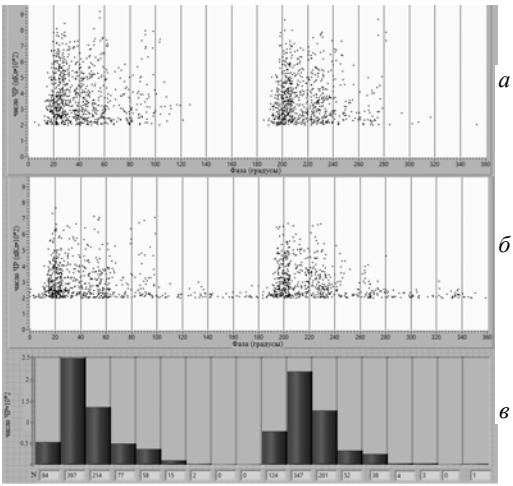


Рис. 2. Характеристики ЧР для дефектного изолятора №5; *а* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – фазовое распределение количества (*N*) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком

Различие в интенсивности и числе ЧР в фазовых интервалах с наибольшей интенсивностью, фазовом распределении этих интервалов внутри каждой группы ВИ составляло не более чем в 1,2–1,5 раза, а между группами работоспособных и дефектных ВИ не меньше чем в 3–5 раз. Более того, в первой группе (работоспособные) ВИ не наблюдались ЧР с интенсивностью, превышающей 100 пКл, в то время как для второй группы характерны отдельные ЧР с интенсивностью до 1–2 нКл.

На основе анализа характеристик ЧР для ВИ комплексным методом была разработана методика дистанционной диагностики состояния ВИ, основанная на одновременном детектировании и совместной компьютерной обработке электромагнитных и акустических сигналов от ЧР. При этом процессе в каждом из дискретных фазовых интервалов высокого напряжения определяются средние значения интенсивности и число импульсов реального заряда, которые превышают допустимый порог для возникновении дефектов или их развития, по сравнению с эталонным ВИ. Причем для повышения достоверности при оценке рабочего состоянии ВИ измеряется фазовый сдвиг интервалов числа ЧР с наибольшими интенсивностями в зависимости от степени дефектности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 156 с.

2. *Ramirez-Nino J., Pascacio A.* Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // Mean. Sci. Technol. 2009. Vol. 20. P. 115108.

3. *Pan C., Ming Y., Wu K., Han Z., Win K, Cheng Y.* Simulation of partial discharge sequences using fluid equations // Y. Phys. D. 2011. Vol. 44. P. 255201.

4. *Голенищев-Кутузов А.В., Синюгин И.Е., Марданов Г.Д.* Программа для ЭВМ «Программа записи, обработки и распределения сигналов частичных разрядов по амплитуде и фазе». №2014612238.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕМЕНТАМ NFC-АНТЕННЫ МАТРИЧНОГО ТИПА

В.М. Кобзев, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.Г. Лощилов, нач. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

Ранее в [1] было предложено реализовать систему хранения ключей с использованием технологии NFC и матричной схемы организации антенны.

Цель настоящей работы – обсуждение и выбор способа построения антенны матричного типа, анализ требований к элементам антенны в рамках выбранного способа реализации.

Анализ схемы построения. Для осуществления адресного считывания информации о хранящихся объектах рассмотрено два варианта матричной организации NFC-антенны. На рис. 1 приведены структурные схемы рассматриваемых вариантов.

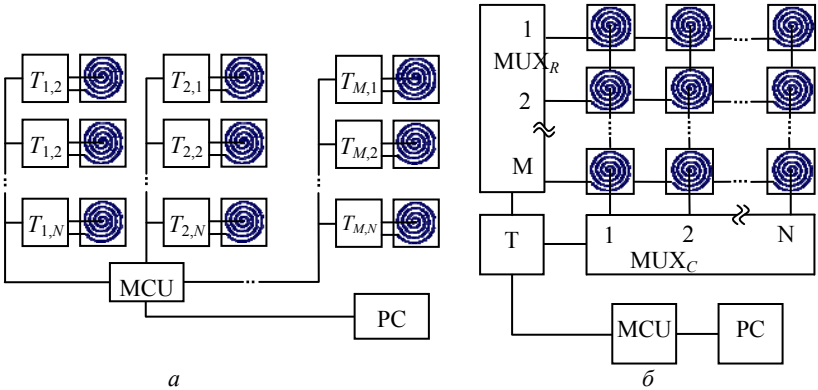


Рис. 1. Варианты построения матричной NFC-антенны:
а – с цифровой адресацией; *б* – с аналоговой адресацией

Первый вариант представляет собой систему NFC-приемопередатчиков ($T_{1,1}$, $T_{1,2}$, $T_{2,1}$, …, $T_{M,N}$), каждый из которых содержит устройство согласования, нагруженное на катушку индуктивности (антенну) матричной системы. Цифровые входы-выходы приемопередатчиков подключены к микроконтроллеру (MCU), позволяющему выполнять выбор активного приемопередатчика и адресное считывание информации о состоянии объекта.

Второй вариант основан на использовании одного NFC-приемопередатчика с устройством согласования (T), мультиплексорах (MUX_R, MUX_C), осуществляющих коммутацию аналоговых сигналов с входов-выходов NFC-приемопередатчика на катушки индуктивности, которые включены матричным образом. Выбор активного элемента антенны осуществляется путем установки адресов строки и столбца на мультиплексорах (MUX_R, MUX_C).

Преимуществом второго варианта построения матричной NFC-антенны является его дешевизна. При стоимости приемопередатчика порядка $6 экономия на затраты комплектующих при изготовлении матричной антенны 8×8 элементов может составлять до $350. Потенциальным недостатком является сложность согласования выхода

приемопередатчика, подключаемого через мультиплексоры MUX_R и MUX_C, с множеством катушек индуктивности (антенн).

В связи с этим возникает следующая задача: необходимо оценить влияние разброса индуктивности антенн L_a на величину рассогласования по входу приемопередатчика, определить допустимое значение такого отклонения для последующего проектирования.

Моделирование. Для последующего анализа воспользуемся типовой схемой включения NFC-антенны приемопередатчика PN532, которая приведена на рис. 2.

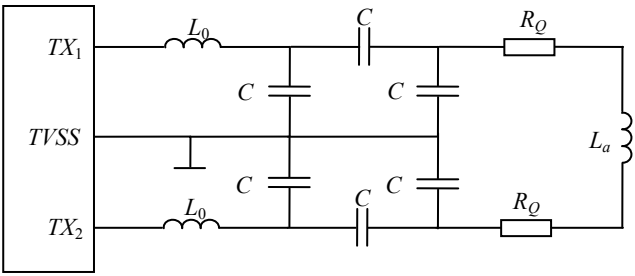


Рис. 2. Принципиальная схема включения NFC-антенны

Алгоритм расчета и настройки согласующего устройства, выполненного на элементах C_0, L_0, C_1, C_2, R_Q, приведен в [2].

Выражение, описывающее частотную зависимость комплексного входного сопротивления согласующего устройства, нагруженного на катушку индуктивности NFC-антенны (L_a), имеет вид

$$Z_{\text{вх}}(f)=2\cdot\left[X_{L0}(f)+\left[X_{C0}(f)^{-1}+\left[X_{C1}(f)+\left[X_{C2}(f)^{-1}+\left(X_a(f)+R_Q\right)^{-1}\right]^{-1}\right]^{-1}\right]^{-1}\right], \quad (1)$$

где $X_{L_0}(f)$ – функция комплексного сопротивления дросселя L_0 от частоты f; $X_{C0}(f)$, $X_{C_1}(f)$, $X_{C_2}(f)$ – функции комплексных сопротивлений конденсаторов C_0, C_1, C_2, от частоты f; R_Q – резистор, обеспечивающий заданную добротность антенны; $X_a(f)$ – функция комплексного сопротивления антенны от частоты f.

Выражение для комплексного сопротивления антенны имеет вид

$$X_a(f)=\frac{\left(i\cdot 2\pi f\cdot L_a+R_a\right)\cdot\dfrac{1}{i\cdot 2\pi f\cdot C_a}}{\left(i\cdot 2\pi f\cdot L_a+R_a\right)+\dfrac{1}{i\cdot 2\pi f\cdot C_a}},$$

где R_a – активное сопротивление катушки индуктивности антенны; C_a – паразитная емкость катушки индуктивности антенны катушки.

С использованием полученных выражений было произведено моделирование частотных характеристик входного сопротивления согласующего устройства.

На рис. 3 приведены результаты моделирования частотной зависимости модуля входного сопротивления согласующего устройства, нагруженного на индуктивность антенны L_a при номинальном значении индуктивности, равном 1,4 мкГн, и отклонениях индуктивности антенны от номинального, равных: ±3, ±5 и ±10%.

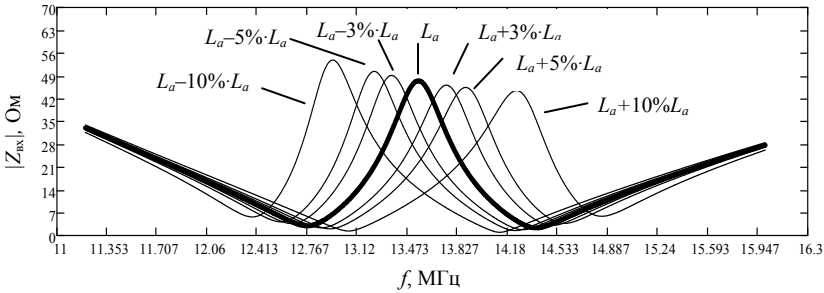


Рис. 3. Результаты моделирования частотных характеристик NFC-антенн

Заключение. Согласно требованиям к спектральной маске стандарта связи NFC [3] полоса рабочих частот по уровню –51 дБ не должна превышать ±150 кГц, центральная частота передачи данных должна быть равна 13,56 МГц.

На основании результатов проведенного моделирования можно сделать следующий вывод: при реализации аналоговой адресации для создания NFC-антенн матричного типа необходимо обеспечить разброс индуктивностей антенн не более ±3%· от номинального значения.

Частотные характеристики антенн при таком разбросе не будут противоречить требованиям стандарта NFC. Коэффициент стоячей волны (КСВ) приемопередатчика на центральной частоте не будет превышать 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кобзев В.М.* Разработка системы хранения ключей с использованием технологии NFC // Разработка контрольно-измерительной аппаратуры: Научная сессия ТУСУР–2015: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13–15 мая 2015 г.: в 5 ч. Томск: В-Спектр, 2015. Ч. 1. С. 247–251.

2. *Кобзев В.М.* Разработка антенны для NFC-приемопередатчика // Разработка контрольно-измерительной аппаратуры: Научная сессия ТУСУР–2015:

матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13–15 мая 2015 г.: в 5 ч. Томск: В-Спектр, 2015. Ч. 1. С. 251–254.

3. *High* Speed RFID/NFC at the Frequency of 13.56 MHz [Электронный ресурс]. Электрон. статья. 2007. URL: http://www.eurasip.org/Proceedings/Ext/RFID2007/pdf/s1p4.pdf (дата обращения: 1.03.2015).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

А.А. Кондрашов, студент, каф. КСУП,
И.М. Макаров, инженер СКБ «Смена»
Научный руководитель А.А. Бомбизов, м.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

Коллективами проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля (ПНИЛ ЭДиП ИНК) ТПУ и Специального конструкторского бюро «Смена» (СКБ «Смена») ТУСУРа выполняются исследования, разработка и создание методов диагностики дефектности и прочности материалов, изделий и природных сред, основанных на анализе параметров электромагнитных откликов при акустическом возбуждении контролируемых объектов [1].

Для проведения исследования дефектности бетонной конструкции, по признакам механоэлектрического преобразования сигналов, была разработана система MECAnalyzer (экспериментальная установка), структурная схема которой приведена на рис. 1.

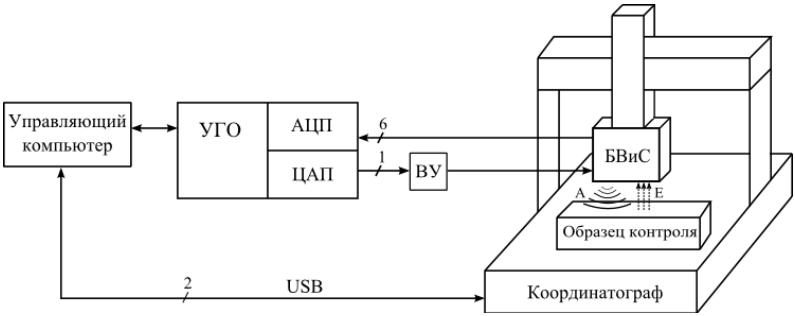


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Компоненты системы MECAnalyzer:

– координатограф для позиционирования блока воздействия и приема над объектом исследования;

– блок воздействия и съема для акустического воздействия и электромагнитного съема (БВиС);

– высоковольтный усилитель зондирующего сигнала (ВУ);

– устройство генерации и оцифровки (УГО) для генерации тестового воздействия и оцифровки откликов объекта исследования;

– управляющий компьютер (УК) и программное обеспечение MECAnalyzer [2] для управления аппаратными средствами системы и анализа данных.

В ходе данной работы решалась частная задача по управлению координатографа с PCI-подключением [3] при помощи не совместимого с ним персонального компьютера на платформе NI PXI. Для решения данной задачи необходимо было использовать второй персональный компьютер, что является нецелесообразным и ведет к дополнительным затратам в создание общей системы. В связи с этим было реализовано устройство взаимодействия между управляющим компьютером и координатографом.

При разработке устройства был использован микроконтроллер Arduino Pro Micro. Подключение и обмен данными осуществляются по последовательному LPT-порту и USB-шине.

Устройство взаимодействия координатографа и управляющего компьютера представлено на рис. 2.

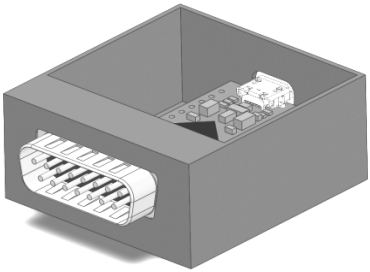


Рис. 2. Внешний вид устройства взаимодействия

Программа для микроконтроллера реализована в среде Microsoft Visual Studio 2013 на языке Си.

Взаимодействие устройства и персонального компьютера выполнено при помощи динамической библиотеки KoordLib.dll, которая загружается в программное обеспечение MECAnalyzer. Описание функций динамической библиотеки KoordLib.dll представлено в таблице.

Разработанное устройство предназначено для использования в составе системы MECAnalyzer и позволяет позиционировать БВиС в рабочей области координатографа в режиме программного управления.

Описание функций динамической библиотеки KoordLib.dll

Функция	Параметры	Назначение
Connect (void)		Выполнение инициализации прибора и открытие сессии для передачи данных
Disconnect (void)		Закрытие сессии для передачи данных
SetPositionAxis (Axis axis, float position)	*Axis* – выбор оси; *Position* – задание координат	Позиционирование оси
Calibration (Axis axis)	*Axis* – выбор оси	Калибровка оси
GetPositionAxis (Axis axis)	*Axis* – выбор оси	Получить текущую позицию оси
Stop (Axis axis)	*Axis* – выбор оси	Остановка оси
IsStop (Axis axis)	*Axis* – выбор оси	Получить значение о состоянии движения оси

В дальнейшем планируется разработать алгоритмы автоматизированного прижатия ББиС к бетонной конструкции, основываясь на построенном планарном графе поверхности или на получаемых параметрах сигнала, запоминании и воспроизведении маски движения координатографа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лощилов А.Г.* Экспериментальная установка для исследования дефектности бетонных материалов по признакам механоэлектрического преобразования сигналов / А.Г. Лощилов, А.А. Беспалько, И.М. Макаров и др. // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC–2015», 1–5 декабря 2015 г., Москва / под ред. акад. РАН А.С. Сигова. М.: МИРЭА, 2015. Ч. 1. С. 114–117.

2. *Макаров И.М.* Программное обеспечение системы сбора данных для диагностики качества твердых материалов // Сб. науч. трудов Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2013»: в 5 т. Томск: В-Спектр, 2013. Т. 1. С. 219–222.

3. *Петров С.В.* Шины PCI, PCI Express. Архитектура, дизайн, принципы функционирования. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 416 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ СВЧ

В.В. Ковалев, студент

Научный руководитель А. С. Загородний, доцент каф. СВЧиКР

г. Томск, ТУСУР, vasya.kowalev@yandex.ru

Для оценки энергетических параметров СВЧ-сигналов нередко используются детекторы. Детектором называют устройство, предна-

значенное для преобразования СВЧ-сигналов в сигналы постоянного тока, т.е. для выделения огибающей колебаний СВЧ.

Целью данной работы является исследование параметров и принципов работы направленного детектора проходящей мощности (ДПМ) на примере монолитной интегральной схемы (МИС) MD902.

ДПМ включаются в линию передачи без отключения от нагрузки, вносят малые потери и измеряют мощность, передающуюся в СВЧ-тракте. Необходимо разделять измерение мощности поступающего на вход сигнала и мощности отражённого сигнала. Отраженная мощность может оказывать существенное влияние на источник сигнала вплоть до выведения его из строя. Направленные детекторы мощности в идеальном случае детектируют только падающую мощность и не дают отклика на мощность отражённого сигнала.

Направленность детектора определяется отношением выходных напряжений детектора при прямом и инверсном включении. Под инверсным подключением понимается подключение источника к выходу детектора, а нагрузки – ко входу.

На рис. 1 представлена схема направленного ДПМ. Разделительные конденсаторы C_1 и C_4 необходимы для защиты схемы от воздействия постоянного тока. Резисторы R_1, R_2, R_3 образуют направленный мост. Детектор, образованный диодом VD1, резистором R_4, емкостью C3 и внешним сопротивлением нагрузки, детектирует разность потенциалов между точками A и B.

При выполнении условий $R_1 = 0{,}1Z_0$, $R_2 = Z_0$, $R_3 = 10Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление линии передачи, эквивалентное сопротивление со стороны входа равно $1{,}02Z_0$. При этом напряжение между точками B и A $V_{BA} = 0{,}18V_{вх}$, где $V_{вх}$ – эквивалентное напряжение на входе схемы при подключении к источнику сигнала сопротивления линии. Если источник подключить к выходу схемы, то $V_{BA} = 0$ [1].

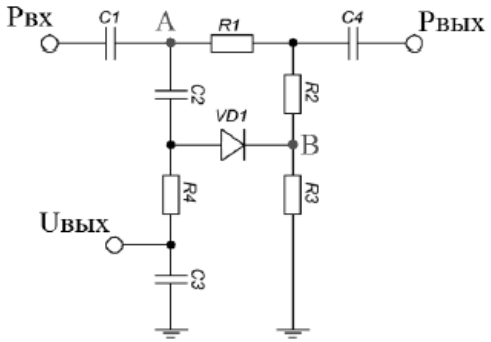


Рис. 1. Принципиальная схема направленного ДПМ MD902

На рис. 2. представлена схема усилителя напряжения, приходящего с выхода детектора. Коэффициент усиления дифференциального сигнала такой схемы определяется как $[(R_1+R_2+R_3)R_5]/[R_1R_4]$. Она имеет более высокий входной импеданс и обеспечивает большее усиление и лучший коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС) по сравнению со схемами на одном операционном усилителе (ОУ). Кроме того, величина КОСС менее чувствительна к точности подбора резисторов [2]. В качестве ОУ были выбраны OPA627, напряжение питания – 5 В.

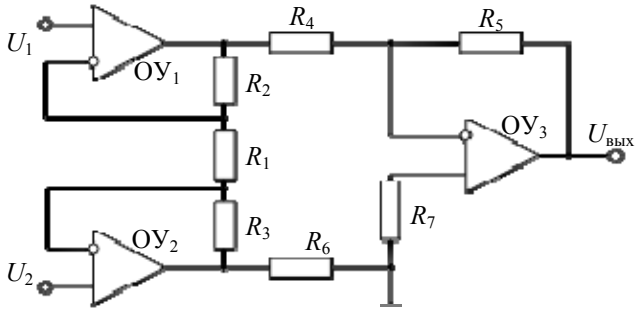


Рис. 2. Принципиальная схема усилительного каскада

Выходное напряжение детектора экспоненциально зависит от уровня входной мощности и изменяется от единиц мкВ до 2 В. Для обеспечения большого диапазона измеряемых мощностей целесообразно использовать несколько различных коэффициентов усиления. На рис. 3 изображена зависимость выходного напряжения от входной мощности с применением трех коэффициентов усиления: 5000, 100 и 1. При этом R_1 = 9, 226 Ом и 750 кОм соответственно; $R_2 = R_3$ = 21 кОм; $R_4 = R_6$ = 470 Ом; $R_5 = R_7$ = 510 Ом.

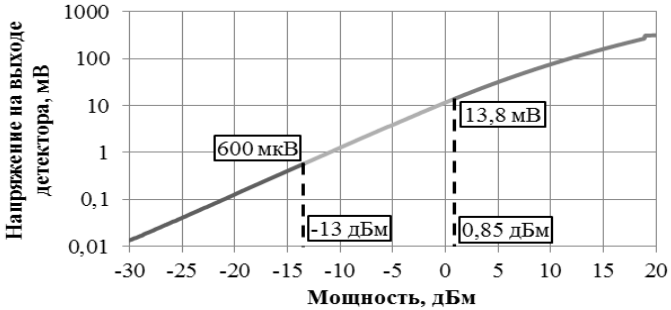


Рис. 3. Детекторная характеристика с указанием переключения коэффициента усиления

Для изменения R_1 необходимо использовать ключ с тремя возможными состояниями. Условием для переключения является превышение выбранного граничного уровня напряжения. При использовании аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и микроконтроллера переключение ключа выполняется последним после анализа значений АЦП. В схему заложен гистерезис, что позволяет исключить неоднозначность коэффициента усиления в точках переключения.

Итогом работы является схема, детектирующая проходящую в тракте мощность, преобразующая ее в напряжение и усиливающая его. Три коэффициента передачи переключаются с помощью схемы «АЦП–микроконтроллер–ключ» и позволяют измерять мощность сигнала в широком диапазоне значений – от минус 40 до 30 дБм. Данная схема может быть использована в измерительной аппаратуре с частотным диапазоном от 0,01 до 50 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Загородний А.С., Дроздов А.В., Воронин Н.Н., Юнусов И.В.* Сверхширокополосные направленные и ненаправленные детекторы проходящей мощности. Томск: ЗАО «НПФ «Микран», 2015. 4 с.

2. *Пейтон А.Дж., Волш В.* Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.:БИНОМ, 1994. 352 с.

АКУСТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ПОЛОСТИ

А.Ю. Меркушев, студент каф. ПМЭ,
Ю.В. Шульгина, ассистент каф. ПМЭ ИНК
г. Томск, ТПУ, merkushev1994@list.ru

Добыча полезных ископаемых приводит к извлечению породы и образованию пустот, вследствие которых могут накапливаться избыточные напряжения в породе, которые в свою очередь могут приводить к обрушениям. Точный расчет объема образовавшейся полости позволит точно рассчитать объем закладочной смеси, которую необходимо использовать для устранения полости и снятия накопившихся в породе напряжений.

Существующие измерительные приборы по измерению объема имеют достаточно высокую стоимость, а также большое время сканирования среза полости, что является недостатками данных устройств.

Для построения устройства измерения объема предлагается использование ультразвукового метода. Ультразвуковой контроль является подвидом неразрушающего контроля, имеющим большое количество достоинств, и самую широкую сферу применения, по сравнению с

другими видами контроля. К достоинствам акустического контроля можно отнести также высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека.

В ходе проведения работы была разработана структурная схема устройства, представленная на рис. 1.

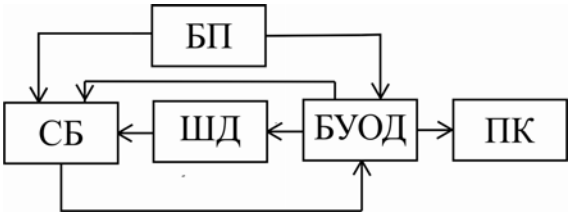


Рис.1. Структурная схема устройства

Сканирующий блок (СБ) включает в себя ультразвуковые приемники и излучатели, отвечает за посрезовое сканирование полости ультразвуком.

Шаговый двигатель (ШД) осуществляет поступательное движение СБ вдоль вертикали для проведения измерений следующей плоскости.

Блок управления и обработки данных (БУОД) выполняет функцию вычислительного устройства, а также подает команды шаговому двигателю о смене положения.

Персональный компьютер (ПК) служит для мониторинга результатов, а также визуализации самой полости для более наглядного представления.

Блок питания (БП) обеспечивает работоспособность всех блоков устройства.

Для эффективного измерения было принято, что датчики будут располагаться на границе окружности, при этом углы между датчиками необходимо сохранить одинаковыми для обеспечения надлежащей точности измерения. На излучатель подается сигнал на резонансной частоте преобразователя. Акустическая волна распространяется в сторону стенки полости, отраженная волна улавливается приемником. Каждая пара источник–приемник работает по очереди, тем самым после цикла работы устройства имеем длины отрезков от датчиков до границы раздела двух сред. По результатам цикла работы выстраивается геометрическая фигура и высчитывается ее площадь (рис. 2).

На рис. 2 S_1 и S_n – площади части среза. Для нахождения общей площади нужно просуммировать все полученные площади. Количество площадей равно количеству датчиков n.

Для определения необходимого числа датчиков было проведено моделирование вычисления площадей для правильных геометрических фигур. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из графика видно, что с увеличением количества датчиков увеличивается точность измерения.

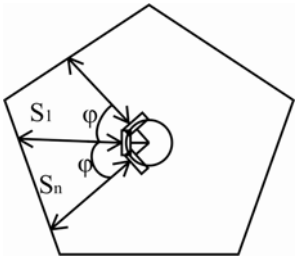


Рис. 2. Расположение сенсоров

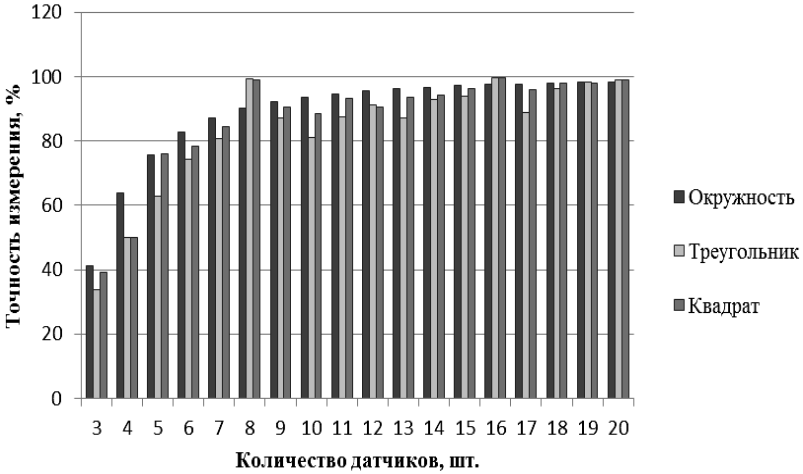


Рис. 3. Зависимость точности измерения от количества датчиков

Исходя из полученных результатов, для получения точности измерения в пределах 95% оптимальное количество датчиков равно 15, при дальнейшем увеличении количества датчиков точность увеличивается несущественно, но при этом достаточно сильно возрастает сложность и разрядность системы управления, что может привести к повышению стоимости готового устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ермолов И.Н.* Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.

2. *Балдев Радж.* Мир физики и техники. Применения ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. М.: Техносфера, 2006.

АНАЛИЗАТОР ШУМА ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Д.В. Петенёв, студент каф. КУДР,
А.А. Бомбизов, м.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.
Научный руководитель А.Г. Лощилов, нач. СКБ Смена, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

Источник опорного напряжения (далее – ИОН) – это значимый элемент электроники, главной задачей которого является обеспечение высокостабильного постоянного электрического напряжения независимо от изменений нагрузки, воздействия внешних факторов и срока эксплуатации.

Несмотря на то, что затраты на ИОН обычно составляют малую часть от стоимости системы в целом, результирующие характеристики прецизионных устройств, такие как точность и стабильность измерения, напрямую зависят от используемых в них источников [1].

Проектирование и испытание ИОН сопряжено с измерением уровней собственных шумов. Существующая аппаратура для этих целей – прецизионные, селективные вольтметры – дорогостоящая и не в должной мере информативная, так как с ее помощью невозможно выполнить анализ распределения шума по частоте.

В процессе работ над созданием прецизионного генератора управляемого напряжения возникла задача разработки анализатора шумов источника питания. Технические требования: диапазон частот – от
1 Гц до 10 МГц, диапазон напряжений от минус 10 до 30 В, чувствительность по входу не ниже 100 нВ.

Анализатор шума должен состоять из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть определяет чувствительность системы, поэтому должна быть выполнена с использованием высокочувствительных усилительных устройств, изолированных от шумовых воздействий питающего напряжения цифровой схемы. В связи с этим аналоговый тракт планируется выполнить разделенным на два блока. Первый – измерительная головка, которая через разделительный конденсатор подключается к тестовому объекту. Схема электрическая принципиальная представлена на рис. 1. Усиление реализовано с помощью малошумящих операционных усилителей (ОУ) с верхней частотой пропускания 100 МГц и максимальным уровнем шума на низких частотах не выше 30 нВ [2]. Коэффициент усиления по напряжению первого блока составляет 80 дБ. По дифференциальной паре усиленный сигнал передается во второй блок, в котором выполняется устранение синфазной помехи и оконечное усиление.

Организация питания в измерительной головке выполнена с использованием батареи «Крона» с напряжением 9 В. Это позволяет свести к минимуму шумы питающего напряжения. Опорный уровень (Uo) для усилительного тракта (DA1, DA3–DA5) реализован с использованием резистивного делителя и повторителя напряжения на ОУ.

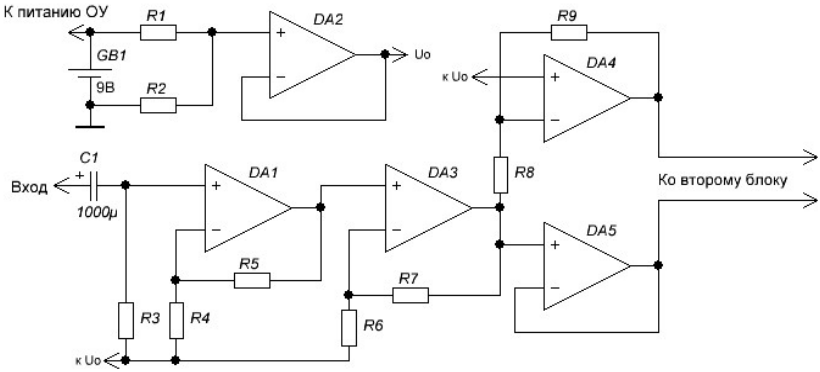


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная измерительной головки

Цифровая часть должна содержать аналого-цифровой преобразователь с производительностью порядка 100 млн выборок в секунду и вычислительную часть для выполнения спектрального анализа. В качестве базы для оцифровки и математической обработки выбрана платформа RedPitaya на основе системы на кристалле Zynq 7010, содержащей процессор Dual ARM Cortex-A9 и ПЛИС на 28000 логических вентилей [3]. Помимо этого, платформа содержит двухканальные 14-битные АЦП и ЦАП с частотой дискретизации 125 МГц. Уровень шумов по данным производителя составляет минус 119 дБм/Гц (в пересчете на уровень шумов по напряжению величина составляет 31 дБмкВ/√Гц). Фото RedPitaya приведено на рис. 2.

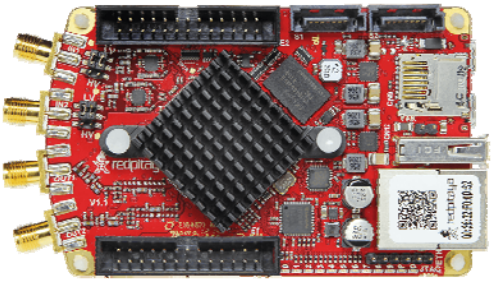


Рис. 2. Фото платформы RedPitaya

Для оценки спектральных характеристик собственных шумов платформы RedPitaya были выполнены следующие измерения: измерительные входы АЦП были замкнуты накоротко, выполнена оцифровка 8388608 (2^{23}) отсчетов на частоте дискретизации 125 МГц. По результатам измерений вычислен спектр собственных шумов платы. Результаты измерения приведены на рис. 3.

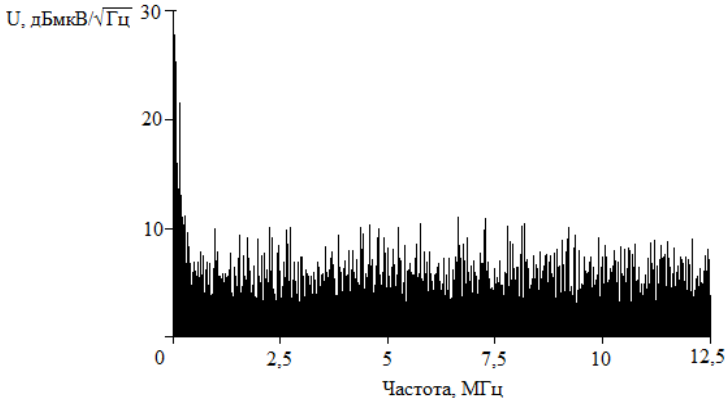


Рис. 3. Измеренные собственные шумы RedPitaya

Из рис. 3 видно, что на низких частотах спектральная плотность напряжения шума достигает 30 дБмкВ/√Гц, в диапазоне от 275 кГц величина собственных шумов не превышает 11 дБмкВ/√Гц, что соответствует заявленным производителем характеристикам [3].

В дальнейшем планируется изготовление и апробация аналоговой части анализатора источника опорного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прецизионные* источники опорного напряжения (ИОН) Apex Microtechnology (2013) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.icquest.ru/?section=4&id=44 (дата обращения: 08.03.2016).

2. *AD8099* – Analog Devices [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8099.pdf (дата обращения: 08.03.2016).

3. *Hardware* Overview – RedPitaya Wiki [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://wiki.redpitaya.com/index.php?title=Hardware_Overview (дата обращения: 08.03.2016).

4. *Пейтон А.Дж.* Аналоговая электроника на операционных усилителях / А.Дж. Пейтон, В. Волш. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОЛЯ ВЕКТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПО НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ В МЕТОДЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

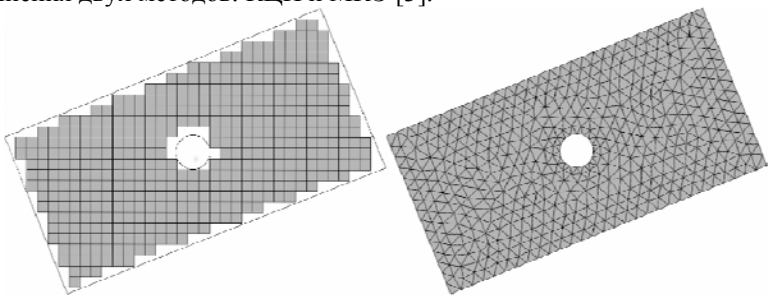
И.Ю. Поляков, аспирант, П.С. Любутин, н.с., лаб. ЛМПКМ, к.т.н., С.В. Панин, зав. лаб. МПКМ, проф., д.т.н.

Научный руководитель С.В. Панин, зам. дир. по НУ, проф., д.т.н.

г. Томск, ИФПМ СО РАН, fox.user.3@gmail.com

Метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) является оптическим методом оценки деформации и включает два основных этапа [1]: 1) построение поля векторов перемещений (ПВП) и 2) последующее численное дифференцирование смещений с целью вычисления поля деформации. Оптический метод оценки деформации является перспективным бесконтактным методом определения механического состояния материалов и инженерных конструкций. Большинство исследований в данной области направлено на повышение точности и увеличение помехоустойчивости определения перемещений либо снижения вычислительных затрат [2].

Большинство алгоритмов, основанных на методе корреляции цифровых изображений для построения ПВП, используют регулярную сетку. В случае задания обрабатываемой области на изображении (области интереса – ROI) [2] не может быть гарантировано покрытие сеткой такой области на границах (рис. 1, *а*). Кроме того, шаг сетки не варьируется, что не позволяет сгущать узлы сетки в локальных областях. Нерегулярная триангуляционная сетка (рис. 1, *б*) используется при моделировании напряженно-деформированного состояния материала методом конечных элементов (МКЭ). Это актуально и в случае объединения двух методов: КЦИ и МКЭ [3].



а *б*

Рис. 1. Примеры различных сеток: *а* – регулярная, *б* – нерегулярная

Цель настоящей работы – исследовать возможность применения нерегулярных сеток при построении полей векторов перемещений в

задаче оценки деформации материалов, а также исследовать возможность численного дифференцирования таких ПВП.

Описание подхода. Обрабатываемые изображения покрываются нерегулярной сеткой. Под «нерегулярной сеткой» подразумевается триангуляционная сетка, которая покрывает все изображение или, при использовании области интереса, только заданную область.

Для генерации сетки существуют готовые открытые библиотеки, например Freefem++ и Netgen [3]. Они обладают схожим функционалом, поэтому в дальнейшем будет использована только библиотека Netgen. Последняя позволяет задавать тип сетки: треугольной, четырехугольной, а также сгущать сетку (повышать плотность узлов) в локальных областях. В каждом узле автоматически сгенерированной сетки далее строится вектор перемещения.

После определения перемещений необходимо вычислить следующие компоненты деформации: продольная ε_{xx}, поперечная ε_{yy}, сдвиговая ε_{xy}, поворотная ω_z компоненты тензора дисторсии и интенсивность деформации сдвига γ_i. Выражения для них приведены ниже [4]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{dU_x}{dx}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{dU_y}{dy}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{dU_x}{dy} + \frac{dU_y}{dx}\right), \quad \omega_z = \frac{1}{2}\left(\frac{dU_y}{dx} - \frac{dU_x}{dt}\right),$$

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \frac{3}{2}\varepsilon_{xy}^2} \ .$$

При использовании регулярных сеток компоненты деформации рассчитываются путём численного дифференцирования построенного поля перемещений с помощью конечных разностей. Для нерегулярных сеток такой способ дифференцирования неприменим. Предложено решить задачу двумя способами:

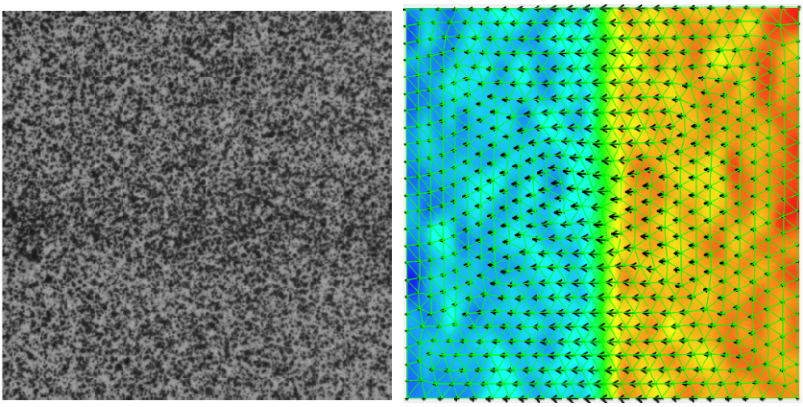
1. Производится аппроксимация нерегулярного ПВП с помощью многоуровневой B-сплайн-аппроксимации (Multilevel B-spline Approximation) [5], после чего полученное непрерывное поле дифференцируется.

2. Применение дифференцирующего фильтра Савицкого–Голея [6].

Тестирование программы. Программа тестировалась на модельных изображениях общества по экспериментальной механике (SEM) http://sem.org/dic-challenge/. Модельные изображения, используемые для тестирования, имели следующие характеристики: размер 512×512 px, формат файла .png, тип данных Grayscale, тип деформации – равномерное растяжение, а затем сжатие. Для оценки ошибки определения перемещений использовались модельные векторные поля.

Заключение. В ходе проделанной работы была проверена возможность использования нерегулярных сеток в задаче вычисления

полей векторов перемещений. Реализована программа, позволяющая строить ПВП и вычислять поля деформаций на нерегулярных сетках (рис. 2, *б*). Проведен анализ полученных результатов и намечены дальнейшие пути проведения исследований.



а *б*

Рис. 2. Пример входного модельного изображения (*а*) и результат работы программы (*б*)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schreier H., Orteu J., Sutton M.A.* Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements // Springer. 2009.

2. *Панин С.В., Титков В.В., Любутин П.С.* Снижение вычислительных затрат с применением алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска при построении векторов перемещений в оптическом методе оценки деформации // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 5.

3. *Besnard G., Hild F., Roux S.* «Finite-Element» Displacement Fields Analysis from Digital Images: Application to Portevin–Le Châtelier Bands // Experimental Mechanics December. 2006. Т. 46, № 6. P. 789–803.

4. *Физическая* мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 298–320.

5. *Lee S., Wolberg G., Sung Yong S.* Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics archive. 1997. Т. 3, № 3. P. 228–244.

6. *Savitzky–Golay* filter [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Savitzky-Golay_filter (дата обращения: 16.03.2016).

ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ТОЛЩИНЫ ПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Н.Ю. Рудый, студент каф. КСУП

Научный руководитель А.Н. Сычев, проф. каф. КСУП, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ans@main.tusur.ru

В настоящее время существует большое количество программных продуктов для моделирования микрополосковых структур, например, LINPARW, AWR Microwave Office и др. Тем не менее они не всегда удовлетворяют всем требованиям разработчиков СВЧ-устройств, поэтому существует потребность в создании альтернативных компьютерных программ, отличающихся высокой скоростью расчетов и достаточной для практики точностью. В качестве математического обеспечения таких программ более всего подходит метод конформных отображений, базирующийся на методе численных конформных преобразований Кристоффеля–Шварца [1], [2]. Основным действием в этом методе является конформное отображение некой канонической области, например круга или верхней полуплоскости, на внутренность заданного многоугольника. При этом предполагается известным и обратное отображение. Вследствие того, что использовались предварительные наработки, реализующие численные конформные отображения в виде отлаженных подпрограмм на классическом Фортране, а графический интерфейс пользователя кодировался на современном Си, неизбежно возникла проблема программного интерфейса, необходимого для сопряжения модулей мультиязычной программной системы.

Разработка мультиязычной программной системы. Программа имеет модульную структуру, благодаря которой имеется возможность подключать вычислительные программы к графическому интерфейсу пользователя (Graphical User Interface, GUI). GUI позволяет задать нужное количество линий, их геометрию и получить результат в удобном для пользователя виде.

На рис. 1 представлен пользовательский интерфейс программы. Графический интерфейс программы можно условно разделить на 5 частей: строка главного меню, дерево для выбора типа линии, область визуализации структуры, поля для ввода входных данных, поля для отображения результата вычислений. Программа позволяет производить расчеты от 1 до 8 линий. К тому же при изменении количества, геометрии линий происходит их моментальная перерисовка в области визуализации.

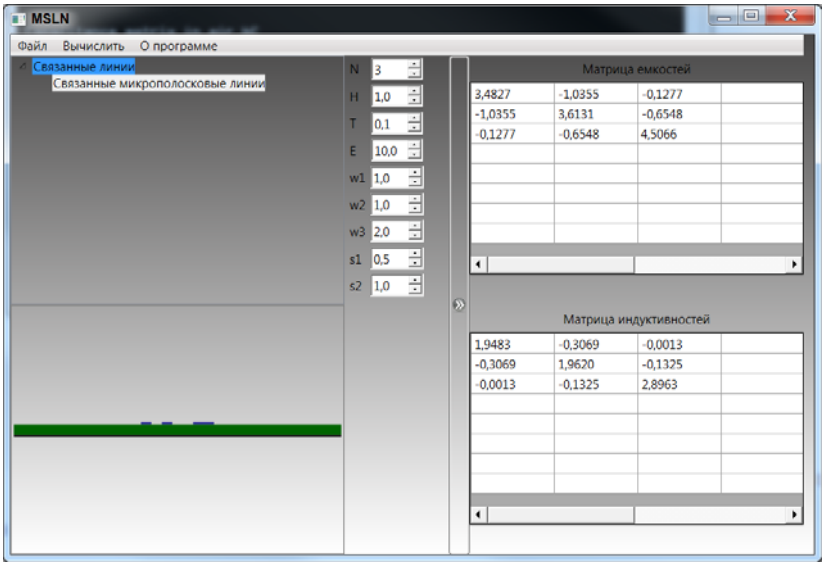


Рис. 1. Графический интерфейс программы

Для реализации вычислительной части был использован известный пакет численных программ SCPACK, в котором выполнена реализация метода численных конформных преобразований Кристоффеля–Шварца, созданный Л. Трефезеном в 1980 г. [3]. Кроме того, был написан вычислительный модуль на языке Fortran с использованием комплекса SCPACK, и скомпилирован в динамически подключаемую библиотеку MSLN.dll. Для создания dll библиотеки использовался пакет Intel® Parallel Studio XE [4]. MSLN.dll подключается к GUI, написанному на языке C#.

Чтобы использовать подпрограмму, написанную на языке Fortran, необходимо в классе C# создать объявление для содержащей её библиотеки с помощью служебного атрибута Microsoft – DLLIMPORT. Далее следует определить статический метод для самой подпрограммы [5].

Подпрограмма Fortran:

```
subroutine msln(iprint,n,aw,s,t,h,e, dC,dL,em,Um)
!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT :: msln
…
end
```

Класс C#:

```
public class DllWrapper
{
[DllImport(«msln.dll»,
CallingConvention=CallingConvention.Cdecl)]
```

```
public static extern void msln(ref int iprint, ref int n, ref double aw, ref double s, ref double t, ref double h, ref double   e, out double dC, out double dL, out double em, out double Um);
}
```

Заключение. Таким образом, была создана программная система для вычисления погонных параметров микрополосковых связанных линий с учётом толщины проводников. В качестве математической основы был выбран аналитический метод конформных преобразований Кристоффеля–Шварца, имеющий оптимальную численную реализацию. Создан наглядный, простой в понимании графический интерфейс пользователя, позволяющий легко и быстро ввести данные и получить результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сычев А.Н.* Комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. 138 с.
2. *Сычев А.Н., Чекалин М.А.* Методика численных конформных преобразований для анализа микрополосковых структур // 21-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико’2011): матер. конф. Севастополь: Вебер, 2011. С. 216–218.
3. *Trefethen L.N.* SCPACK ver.2. USER’S GUIDE [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://netlib.org/conformal/scdoc, свободный (дата обращения: 03.03.2016).
4. *Шестаков В.А., Сычев А.Н.* Создание мультиязычной программной системы, реализующей численные конформные преобразования Кристоффеля–Шварца для моделирования микрополосковых СВЧ-структур // Электронные средства и системы: матер. докл. науч.-практ. конф. (8–10 нояб. 2012 г.): в 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2012. С. 19–23.
5. *Стручков С.М., Сычев А.Н.* Вычисление погонных параметров и частотных характеристик микрополосковых линий передачи различных видов // Электронные средства и системы: матер. докл. науч.-практ. конф. (8–10 нояб. 2012 г.): в 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2012. С. 28–31.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СШП РАДИОЛОКАТОРА

Е.С. Семенов, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.Г. Лощилов, нач. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

В последнее время к технологиям дистанционного измерения психофизиологических параметров человека проявляется повышенный интерес. При выполнении таких задач, как обследование пациента,

страдающего синдромом апноэ во сне, или регистрация параметров дыхания и работы сердца во время выполнения процедуры следственного допроса подозреваемого в преступлении человека, применение приборов, требующих крепления его элементов на тело человека, может внести искажения в исследуемые процессы. Искажения связаны с возникновением дискомфорта и дополнительного стрессового воздействия. Одним из перспективных направлений развития данных технологий является сверхширокополосная (СШП) биорадиолокация.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма определения частоты перемещения исследуемого объекта на основе анализа радиолокационных откликов на СШП-тестовое воздействие.

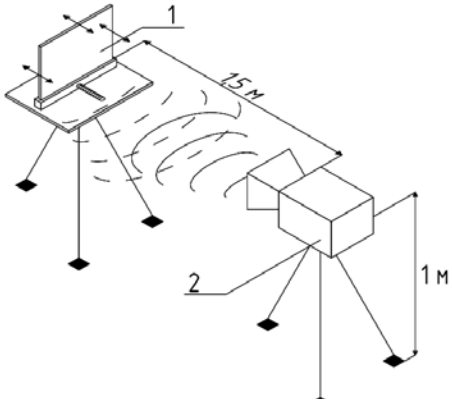


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – имитатор дыхания; *2* – радиолокатор

Для регистрации радиолокационных откликов объекта, совершающего периодические поступательные движения малой амплитуды (не более 10 мм), была изготовлена экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис. 1.

Установка включает в себя: СШП-радиолокатор и имитатор дыхания. СШП-радиолокатор реализует режим воздействия на исследуемый объект последовательностью импульсов и регистрирует отклики объекта. Параметры тестового воздействия: форма сигнала – первая произвольная импульса Гаусса; амплитуда 450 мВ; центральная частота 5 ГГц, полоса частот по уровню –10 дБ – 8,3 ГГц. Съем и обработка сигналов выполняются с использованием разработанного программного обеспечения (ПО) для исследования возможностей СШП импульсного локатора [1]. Имитатор дыхания [2] реализует поступательное перемещение пластины-отражателя размерами 290×220×2 мм по заданным параметрам амплитуды и частоты.

Был проведен ряд измерений радарограммы объекта при различных параметрах перемещения пластины-отражателя. Параметры перемещения объекта представлены в табл. 1.

На рис. 2 приведены зарегистрированные радарограммы для каждого из экспериментов.

Полученные результаты достаточно наглядно описывают изменение положения объекта в пространстве в ходе проведения эксперимен-

тов. На расстоянии 1,25–1,75 м наблюдаются периодические изменения положения объекта.

Таблица 1

Параметры перемещения объекта

№ эксперимента	Амплитуда перемещения, мм	Частота перемещения, Гц
1	2	0,2
2	2	0,3
3	2	0,4
4	2	0,5
5	2,5	0,2
6	5	0,2
7	10	0,2

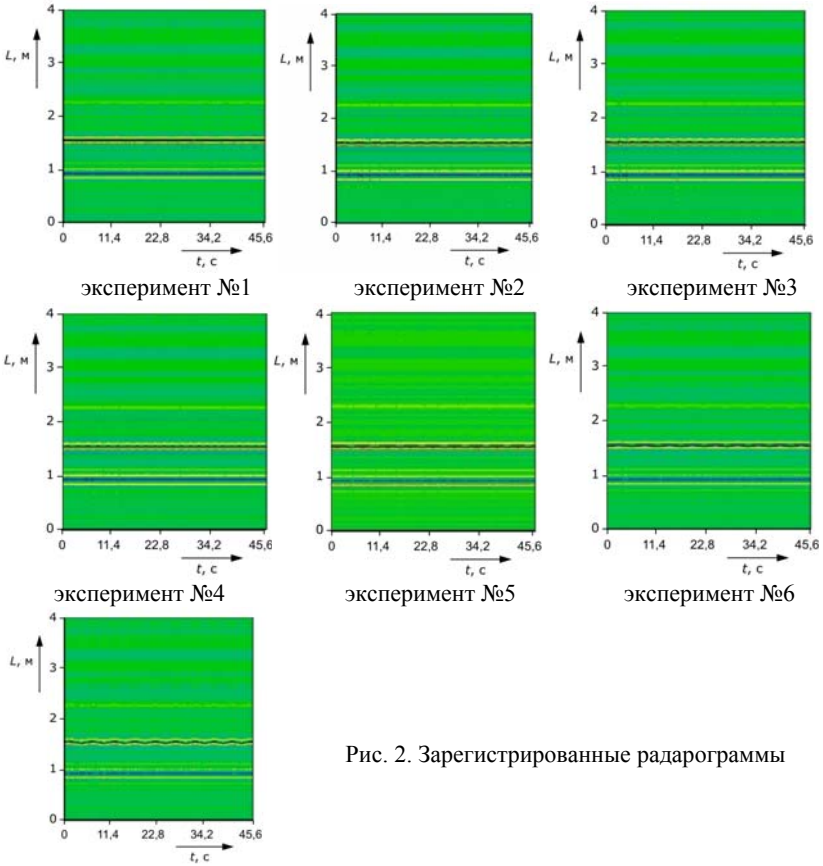


Рис. 2. Зарегистрированные радарограммы

Для определения частоты перемещения объекта был разработан алгоритм обработки радарограмм, включающий следующие основные шаги:

– определение временной зависимости задержки отраженного сигнала по измеренным радарограммам;

– фильтрация полученного сигнала;

– расчет спектральных характеристик и определение основной частоты колебаний.

На рис. 3 приведены результаты обработки радарограмм с использованием предложенного алгоритма.

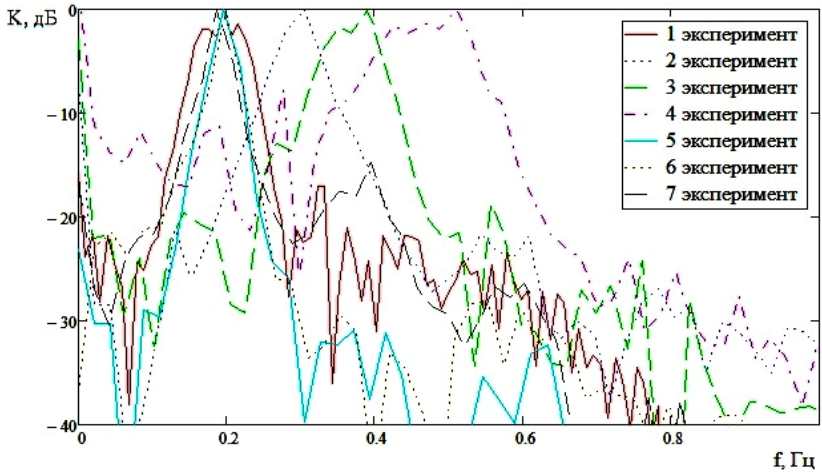


Рис. 3. Восстановленные амплитудные спектры измеренных радарограмм

В табл. 2 приведены полученные значения основной частоты колебаний для каждого из экспериментов.

Таблица 2

Значения частоты перемещения объекта

№ опыта	Частота, Гц
1	0,1958
2	0,3044
3	0,3912
4	0,5097
5	0,1965
6	0,1991
7	0,1874

Результаты предварительных исследований говорят о хорошем соответствии параметров перемещения, восстановленных по радаро-

грамме. Погрешность определения частоты перемещения пластины-отражателя имитатора дыхания не превышает 6,3% при времени наблюдения 45,6 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Семенов Е.С.* Конференция участников ГПО ТУСУР–2014 [Электронный ресурс]. Сверхширокополосный радиолокатор: электрон. журн. Томск: ТУСУР, 2014. Режим доступа: https://storage.tusur.ru/files/11321/КУДР-1302_Семенов.pdf.

2. *Семенов Е.С.* Разработка имитатора дыхания человека для задач СШП биорадиолокации // Научная сессия ТУСУР–2015: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: В-Спектр. 2015. Т. 1. С. 264–268.

РАЗРАБОТКА ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА АДДИТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Д.В. Шерстюк, А.М. Умаров, студенты каф. КУДР,
А.Е. Здрок, аспирант каф. КУДР
Научный руководитель А.Г. Лощилов, нач. СКБ «Смена», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru
Проект ГПО КУДР-1504 «Разработка устройства плоттерной печати узлов радиоэлектронной аппаратуры»

В настоящее время существует два метода изготовления печатных плат: аддитивный и субтрактивный, а также множество технологий на основе этих методов [1, 2].

Целью настоящей работы является создание печатающей головки для системы аддитивного изготовления печатных плат.

В качестве способа нанесения печатного рисунка принято решение использовать способ шприцевого дозирования.

Определены следующие требования к характеристикам печатающей головки (дозатора):

- шаг перемещения поршня шприца (не более) – 150 мкм;
- ширина линии – от 300 мкм;
- толщина слоя – от 1 мкм;
- возможность быстрой замены картриджей (шприцов);
- высокая повторяемость дозирования.

На рис. 1 приведена структурная схема печатающей головки.

Устройство функционирует следующим образом. Блок управления (БУ) по цифровому интерфейсу взаимодействует с платой управления (П) печатающей головки. Плата управления подает сигналы на драйвер шагового двигателя (ДШД), подключенный к шаговому дви-

гателю (ШД). Вращательные движения вала двигателя преобразуются в поступательные движения поршня шприца (Ш) посредством передачи винт–гайка. Перемещение поршня обеспечивает дозирование жидкости по заданному закону. Обратная связь (ОС) позволяет оценивать положение поршня в процессе дозирования и калибровки печатающей головки.

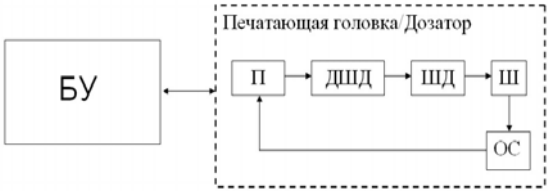
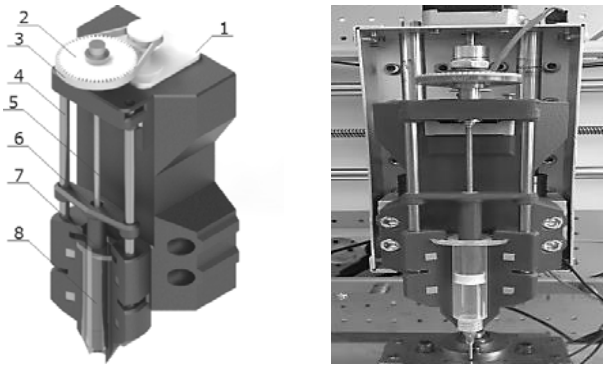


Рис. 1. Структурная схема печатающей головки

На рис. 2 приведены модель разработанной печатающей головки и макет устройства аддитивного изготовления печатных плат, использующий изготовленную печатающую головку.



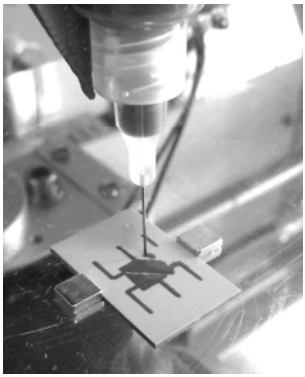
а *б*

Рис. 2. Печатающая головка: *а* – модель; *б* – макет, установленный на координатографе. *1* – шаговый двигатель; *2* – зубчатое колесо; *3* – зубчатый ремень; *4* – направляющие; *5* – вал; *6* – гайка; *7* – поршень шприца; *8* – шприц

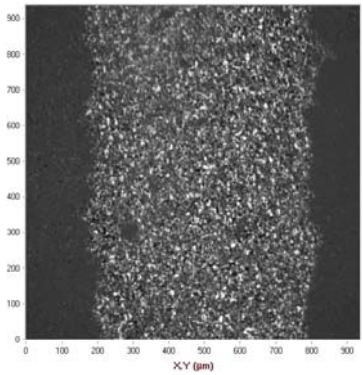
Для передачи движения с шагового двигателя (*1*) на поршень шприца (*7*), закрепленного на направляющих стойках (*4*), используется ременная передача через зубчатое колесо (*2*), к которому фиксируется вал (*5*) с резьбой, осуществляющий передачу винт–гайка.

Перемещение шприцевого дозатора с помощью координатографа (см. рис. 2, *б*) одновременно с выдавливанием токопроводящих чернил позволяет создавать необходимый рисунок на поверхности диэлектрической подложки.

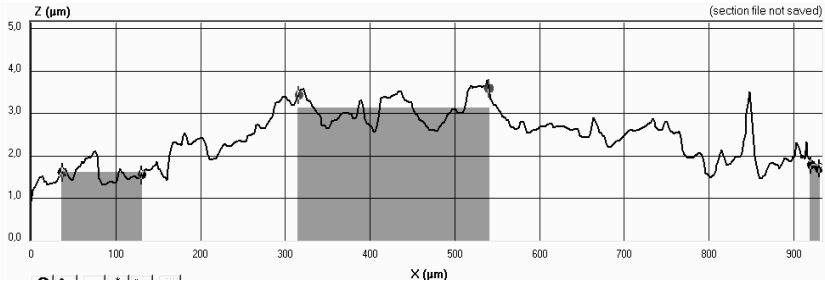
На рис. 3 представлены результаты первого тестирования разработанного макета.



а



б



в

Рис. 3. Тестирование макета печатающей головки: *а* – снимок процесса печати; *б* – микрофотография напечатанной пленки; *в* – профилограмма напечатанной пленки

Для печати использовались: игла диаметром 0,2 мм; нанодисперсные серебросодержащие чернила ANP DGP 40TE-20C; подложка из низкотемпературной керамики. После печати производился отжиг заготовки при температуре 150 °C продолжительностью 10 мин.

Толщина нанесенного слоя составила 1,6 мкм, ширина – 0,6 мм.

В настоящее время ведутся работы по уменьшению ширины топологического элемента, обеспечения заданной толщины пленки и выбора оптимальной композиции проводящих чернил.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Технологии* в электронной промышленности – журнал о печатных платах [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tech-e.ru/2005_5_34.php (дата обращения: 20.02.16).

2. *Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М.* Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

С.П. Шкаруло, А.Ю. Олисовец, аспиранты каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, rk9uba@yandex.ru

Надежность систем гарантированного электропитания, включающих вторичные химические источники тока (ХИТ) – аккумуляторы, имеет высокое значение, поскольку от своевременности проведения технического обслуживания и замены вышедших из строя аккумуляторов, зависит надежность и работоспособность питаемого оборудования.

Внутреннее сопротивление ХИТ является важным параметром, значение которого несет информацию о степени деградации ХИТ [1], позволяет прогнозировать продолжительность его работоспособности и определить время замены этого ХИТ.

На рис. 1 приведена эквивалентная схема внутреннего сопротивления ХИТ [5].

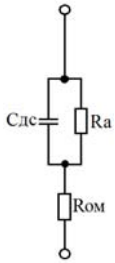


Рис. 1. Эквивалентная схема внутреннего сопротивления ХИТ

Эквивалентная схема ХИТ состоит из омического сопротивления электролита $R_{ом}$, активного сопротивления электрохимических реакций $R_а$ и электрической емкости двойных электрических слоев $C_{дс}$, имеющих место на границах разделов электродов с электролитом ХИТ.

Известные способы измерения [3] и [4] дают информацию только о величине внутреннего сопротивления постоянному току ХИТ и значениям активной и реактивной составляющих ХИТ.

Целью работы является разработка нового способа измерения значений всех составляющих внутреннего сопротивления ХИТ.

Измерение составляющих внутреннего сопротивления ХИТ проводится следующим образом. Микроконтроллер формирует на выходе *2* управляющее напряжение, приводящее к замыканию управляемого ключа S_1. Напряжение ХИТ через делитель R_1–R_2 подается на вход АЦП микроконтроллера *1*, где оно хранится в ОЗУ, после чего производятся расчеты. Измерение тока производится путем деления напряжения на ХИТ, на нагрузочный резистор R_1.

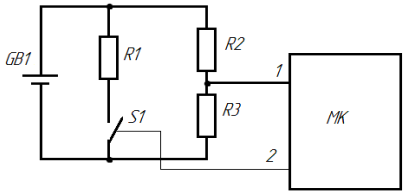


Рис. 2. Функциональная схема прибора

В результате импульсного воздействия на ХИТ получаем сигнал, изображенный на рис. 3.

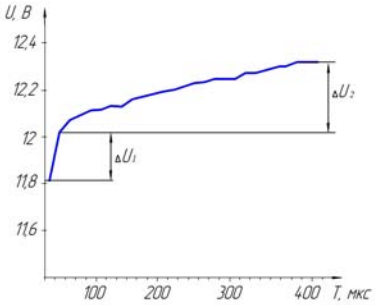


Рис. 3. Напряжение на ХИТ после воздействия импульсной нагрузки

Как мы видим из рис. 3, напряжение на аккумуляторе не изменяется резко, это обусловлено, как говорилось ранее, наличием реактивной составляющей.

Значение омического сопротивления $R_{ом}$ рассчитывается микроконтроллером по формуле (1):

$$R_{ом} = \Delta U_1 / I, \quad (1)$$

где ΔU_1 – изменение напряжение, I – ток, протекающий через ХИТ.

$$R_{ом} = 0{,}128 \text{ В} / 1{,}53 \text{ А} = 84 \text{ мОм}.$$

Значение активного сопротивления $R_а$ электрохимической реакции рассчитывается микроконтроллером по формуле (2):

$$R_а = \Delta U_2 / I, \quad (2)$$

где ΔU_2 – изменение напряжения, I – ток протекающий через ХИТ.

$$R_{ом} = 0{,}256 \text{ В} / 1{,}53 \text{ А} = 168 \text{ мОм}.$$

Значение емкости двойных электрических слоёв $C_{дс}$ рассчитывается по формуле (3):

$$C_{дс} = t_n / 3R_а, \quad (3)$$

где t_n – время переходного процесса, $R_а$ – сопротивления электрохимических реакций.

$$C_{дс} = 400\times10^{-6} / 3\times168\times10^{-3} \text{ мкФ}.$$

Суммарное внутреннее сопротивление аккумулятора, измеренное прибором, составляет: $R = R_а + R_{ом}$ =168 + 84 =252 (Ом), паспортные данные 260 Ом.

Таким образом, предлагаемый способ определения внутреннего импеданса позволяет определить составные части внутреннего сопротивления химического источника тока с достаточно высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Таганова А.А.* Диагностика химических источников тока // Современная электроника. 2007. №7. С. 20–22.

2. *Багоцкий В.С.* Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.

3. *ГОСТ* Р МЭК 60896-2–99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1999. 54 с.

4. *Пат.* 2 154 834 РФ, МКП G 01 R 27/02. Способ измерения составляющих полного сопротивления и устройство для его осуществления / Г.В. Петкевич, Е.А. Петров, В.П. Мокшанцев (РФ). Заявл. 14.10.1998; опубл. 20.08.2000. Бюл. № 7.

5. *Туев В.И.* Измерение сопротивлений двухполюсников с применением импульсного сигнала // Изв. Том. политех. ун-та. 2006. № 1. С. 178–182.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

А.Л. Старостин, студент, Ю.В. Шульгина, ассистент каф. промышленной и медицинской электроники

г. Томск, ТПУ, astarostin11@gmail.com

Большое количество акустических приборов имеют дело с сигналами, подверженными волноводному распространению, в результате чего устраняется или уменьшается расхождение волн в стороны, помимо затухания звука, на форму принятого сигнала будет влиять неравенство фазовых скоростей различных мод. Также изменение формы эхо-сигнала возможно из-за нарушения формы волновода, которое может возникнуть, например вследствие наличия дефекта.

По описанными выше причинам, происходит существенное изменение формы принятого эхо-сигнала по сравнению с первичным сигналом, что вносит дополнительные трудности для определения измеряемого параметра, например, времени задержки распространения сигнала.

Один из вариантов проведения анализа волноводного распространения акустического сигнала – использование метода геометрической акустики. При моделировании будем считать, что излучатель и приемник акустического сигнала лежат на оси волновода на некотором расстоянии друг от друга и являются точечными.

Излучатель акустического сигнала создает множество звуковых волн, которые отклоняются от оси волновода каждая на свой угол (рис. 1).

По закону отражения линия звуковой волны при столкновении со стенкой волновода отразится от нее, причем угол падения будет равен углу отражения. Сигнал на датчике будет представлять собой сумму сигналов различных мод (линий акустического сигнала), причем в первую очередь будут приходить те моды, которые прошли меньшее расстояние, а соответственно и потерпели меньше отражений от сте-

нок волновода. Разница во времени прихода мод на приемник создает некоторый фазовый сдвиг между модами.

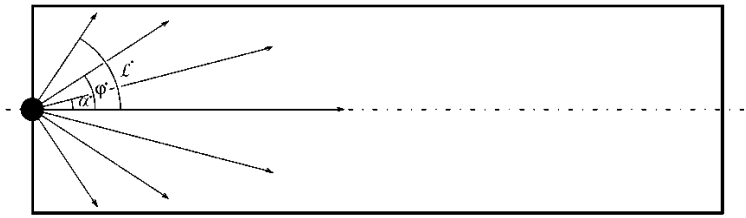


Рис. 1. Распределение акустических лучей от источника звука

Рассмотрим случай, когда линия акустического сигнала потерпела n-ое количество отражений от стенок волновода (рис. 2).

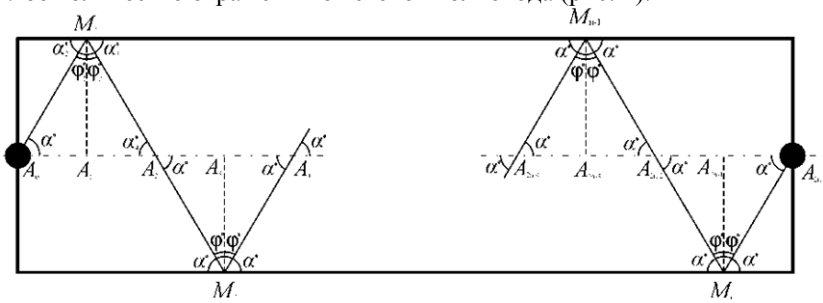


Рис. 2. Распространение акустического луча, потерпевшего n отражений в волноводе

$M_1 \ldots M_n$ – точки отражения акустического луча, n таких точек порождают n треугольников, таких как $A_0M_1A_2$ и т.д.

Рассмотрим треугольник $A_0M_1A_2$. Излучатель акустического сигнала находится в точке A_0 и создает акустический луч под углом α_1 относительно оси волновода. Исходя из теоремы об углах, образованных двумя параллельными прямыми и секущей, видно, что углы α_1 и α_2 равны, т.к. являются накрест лежащими. По закону отражения углы φ_1 и φ_2 равны. Тогда т.к. угол $A_1M_1M_3$ является прямым, то угол $\alpha_3 = 90 - \varphi_2$, и поскольку угол $\alpha_2 = 90 - \varphi_1$, то $\alpha_2 = \alpha_3$. Углы α_3 и α_4 также являются накрест лежащими, и поэтому равны. Так как соответствующие углы треугольников $A_0M_1A_1$ и $A_1M_1A_2$ равны друг другу, а сторона M_1A_1 общая, то треугольники равны. Доказательство равенства с остальными треугольниками находится аналогично.

Таким образом, n точек отражения создают $2n$ равных прямоугольных треугольника и соответственно делят длину волновода L на

$2n$ равных части. Для определения длины всего акустического луча необходимо найти гипотенузу треугольника и умножить ее на $2n$.

Из теоремы Пифагора длина луча будет составлять $l_n = 2n\sqrt{\left(\frac{L}{2n}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}$. Разделив на скорость звука в воздухе, получим время, которое затратила волна на перемещение к датчику. Получим значение времени, на которое мода пришла позднее сигнала, который двигался по оси, вычитанием: $T = \frac{1}{\upsilon} 2n\sqrt{\left(\frac{L}{2n}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} - \frac{L}{\upsilon}$, где υ – скорость звука.

При сравнении с сигналом, полученным экспериментально (рис. 3), видно, что расчетный и экспериментальные сигналы имеют схожую форму.

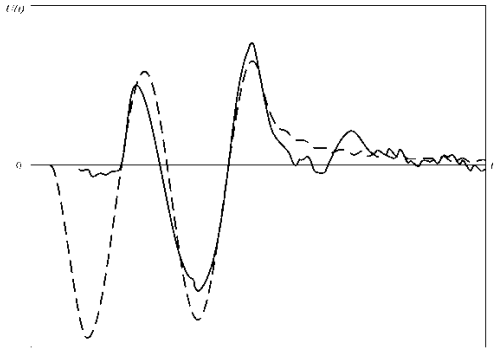


Рис. 3. Форма акустического импульса на приемнике для волновода с диаметром 15 см и длиной 3 м при частоте 700 Гц, где сплошная линия – экспериментальный сигнал, пунктирная линия – расчетный сигнал

Некоторые несоответствия обусловлены тем, что в расчетной модели излучатель и приемник являются точечными, а также не учитывались потери энергии сигнала при прохождении его через волновод. В реальном случае и излучатель, и приемник являются объемными, а также имеют место быть потери энергии акустического сигнала в волноводе, например, потери на отражение от стенок волновода, причем чем больше отражений потерпит сигнал, тем меньшей будет его амплитуда.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shulgina Yu.V. et al.* Mathematical analysis of the echo-impulse position detection by the dual-frequency sensing method [Electronic resources] // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) : proceedings of the International Conference, Tomsk, 16–18 October, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU) ; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). [S. l.]: IEEE, 2014. 4 p.

2. *Шульгина Ю.В.* Повышение точности определения временного положения эхо-импульса [Электронный ресурс] / Ю.В. Шульгина, А.И. Солдатов // Современные техника и технологии: сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12–16 апреля 2010 г.: в 3 т. 2010. Т. 1. С. 288–289.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

О.Ю. Терентьева, студентка, Ю.В. Шульгина, ассистент каф. промышленной и медицинской электроники
г. Томск, ТПУ, oksanaterenteva95@mail.ru

Повышение точности акустических измерений является очень актуальной задачей для большого количества устройств. Значительная часть погрешности измерения связано с ошибкой определения момента прихода импульса. Это связана с изменением формы акустического сигнала при прохождении через объект контроля.

В ряде устройств время прихода импульса определяется по достижении сигнала определенного уровня. При этом в случае затянутого фронта сигнала погрешность может составлять несколько периодов несущей частоты, что является существенным недостатком данного метода определения временного интервала. Введение поправочных коэффициентов, учитывающих форму нарастания сигнала, в расчетную формулу позволит увеличить точность определения расстояния.

Для определения точности рассматривается случай, когда передний фронт огибающей сигнала можно с достаточной точностью аппроксимировать прямой линией, тогда принятый сигнал можно описать уравнением

$$U(t) = A(t) \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где $A(t)$ – прямая, описывающая крутизну нарастания переднего фронта сигнала.

При прямом определении времени прихода импульса получим нарастающую с каждым периодом погрешность измерения. В этом случае точность измерений будет определяться уровнем срабатывания компаратора. Для большого количества акустических приборов погрешность в несколько периодов является недопустимой. Для этих случаев вводят поправочный коэффициент, позволяющий увеличить точность определения момента прихода акустического сигнала. С целью повышения точности измерения задаются крутизной нарастания переднего фронта сигнала. Через точку, в которой произошло срабатывание компаратора, достраивается прямая, имеющая такой же наклон, как выбранная крутизна нарастания переднего фронта сигнала.

Момент пересечения этой прямой с временной осью и считается моментом прихода импульса.

На рис. 1 изображена синусоидальная форма сигнала, момент времени t_0 определяет погрешность измерения.

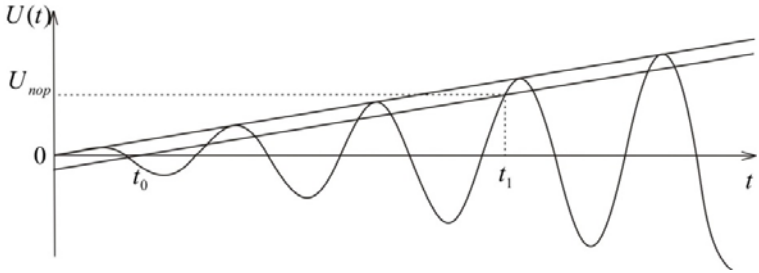


Рис. 1. Определение момента прихода акустического сигнала

Для численного определения погрешности измерения необходимо решить уравнение

$$U_{\text{пор}} = k \cdot t \cdot \sin(\omega \cdot t) \ ,$$

где k – предполагаемый коэффициент наклона огибающей переднего фронта сигнала.

График зависимости ошибки измерения от уровня порога срабатывания компаратора изображен на рис. 2.

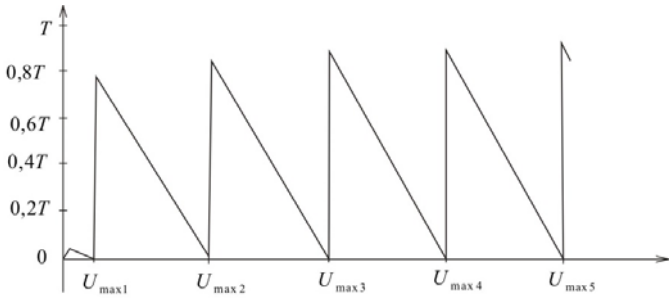


Рис. 2. Зависимость ошибки измерения от уровня порога срабатывания компаратора

Из графика видно, что тем ближе пороговое напряжение компаратора к значению амплитуды напряжения для данного периода, тем меньше погрешность измерения t_0.

Так как зачастую предсказать форму огибающей переднего фронта невозможно, то необходимо рассмотреть ситуацию для случая, ко-

гда крутизна нарастания сигнала не совпадает с заданной в алгоритме вычислительного процесса крутизной.

Построим в одной плоскости графики ошибки измерения в случае ошибочного определения наклона на ±5% относительно истинного наклона (рис. 3).

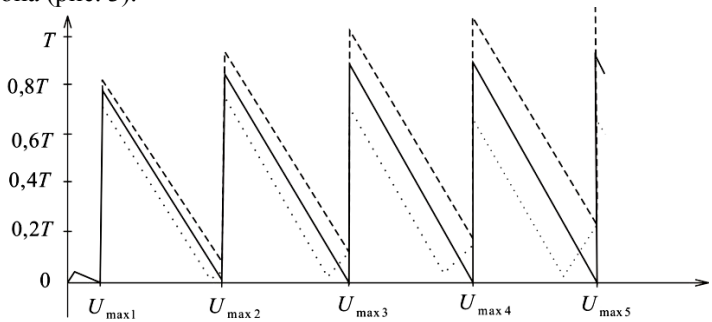


Рис. 3. Графики ошибки измерения

Достоинство описанного метода – простота реализации. В общем случае не требует процессорного блока для проведения вычислений.

Недостатки: наличие высокого уровня погрешности измерения при неправильно выбранной крутизне нарастания переднего фронта.

Заключение. В случае, если передний фронт сигнала можно аппроксимировать прямой линией, то предложенный метод расчета момента прихода акустического сигнала позволит получить ошибку в пределах одного периода, что является существенным. Однако зачастую крутизну переднего фронта невозможно предугадать и заложить алгоритмически, например, для приборов, имеющих дело с распространением сигналов по волноводу, для них следует применять другие методы обработки сигналов, например «метод двух компараторов» [1], который позволяет определить с определенной точностью крутизну переднего фронта огибающей.

ЛИТЕРАУТРА

1. *Шульгина Ю.В.* Повышение точности ультразвуковых измерений методом двух компараторов / Ю.В. Шульгина, А.И. Солдатов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2010. № 9 (110). С. 102–106.

2. *Пат.* № 2013146205 РФ. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора / А.И. Солдатов, Ю.В. Шульгина, А.А. Солдатов, Н.В. Дичев. Заявлено 17.10.2014.

3. *Солдатов А.И.* Теоретическое и экспериментальное исследование акустического тракта скважинного глубиномера / А.И. Солдатов, Ю.В. Чиглинцева // Изв. Том. политех. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 85–89.

УСТРОЙСТВО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ПЕЧАТИ

А.М. Умаров, студент 3-го курса каф. РЭТЭМ

Научный руководитель А.Г. Лощилов, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, main@skbsmena.ru

Проект ГПО КУДР-1504 «Разработка устройства плоттерной печати узлов радиоэлектронной аппаратуры»

В настоящее время для формирования печатного рисунка электронных изделий активно внедряются технологии аддитивного нанесения [1]. Одной из перспективных технологий получения печатного рисунка для задач электроники является технология ультразвуковой капиллярной печати [2]. К преимуществам метода относятся: высокая точность дозирования (от 0,6 пл), высокое разрешение (от 5 мкм) и детализация рисунка (диаметр точки от 5 мкм).

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что одним из механизмов тонкого регулирования параметров пленок получаемых методом ультразвуковой капиллярной печати, является управление температурой подложки, на которую осуществляется печать [3].

Целью настоящей работы является разработка устройства термостатирования подложек для совершенствования технологии ультразвуковой капиллярной печати.

На рис. 1 приведена структурная схема разрабатываемого устройства.

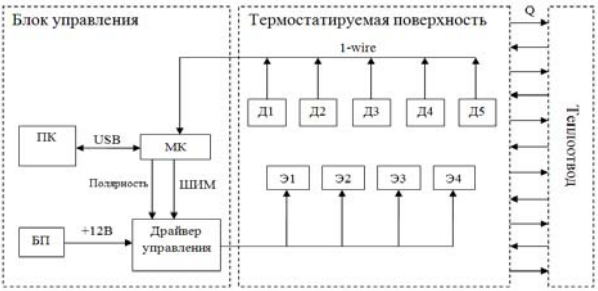
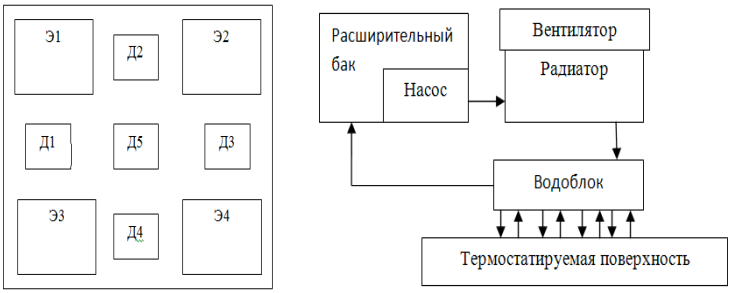


Рис. 1. Структурная схема устройства

Блок управления выполнен на микроконтроллере (МК), подключенном к компьютеру (ПК) и реализующем пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) алгоритм регулирования. Изменяя в соответствии с алгоритмом скважность сигнала, происходит изменение тока протекающего в цепи элементов управления темпера-

турой. В качестве таких элементов используются термоэлектронные модули (Э1–Э4) на эффекте Пельтье TEC12706. Для управления полярностью и мощностью термоэлектронного модуля используется драйвер управления в виде Н-моста. В качестве датчиков обратной связи (Д1–Д5) используются датчики температуры DS18b20Z.

Конструктивно устройство выполнено в виде многослойной структуры. Верхний и нижний слои представляют собой алюминиевые пластины размерами 120×120×3 мм. Промежуточные слои выполнены из пластин диэлектрического материала с низкой теплопроводностью. В пластинах сделаны отверстия для крепления датчиков температуры, монтированных на печатной плате и термоэлектронных элементов, схема размещения показана на рис. 2, *а*. Для отвода теплоты от термоэлектронных модулей изготовлен теплоотвод с жидким теплоносителем, схема которого показана на рис. 2, *б*.



а *б*

Рис. 2. Схемы: *а* – компоновки элементов; *б* – структурная схема теплоотвода

Предложенная схема и конструкция изделия позволят уменьшить время выхода на требуемую температуру, а также обеспечить контроль за равномерным нагревом/охлаждением и стабилизацией температуры по всей поверхности.

На рис. 3 представлен внешний вид разработанного изделия.

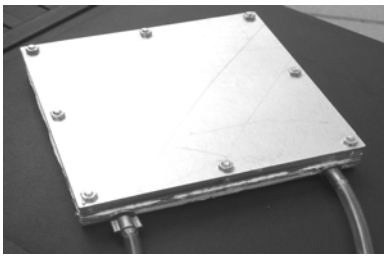


Рис. 3. Внешний вид термостатируемой поверхности

Скорость выхода на режим, а также скорость, точность и надежность стабилизации температуры обеспечивает дискретный ПИД-регулятор, для корректной работы устройства была проведена настройка управляющих коэффициентов по методу Зиглера–Никольса [5].

Были проведены измерения однородности температуры по диагонали термостатируемой поверхности с использованием инфракрасного тепловизора Testo 876 (при температуре термостатирования 25 °С). Результаты измерения приведены на рис. 4.

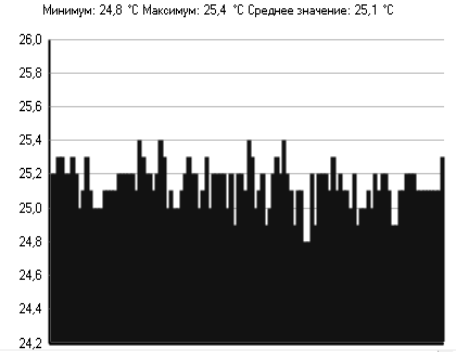


Рис. 4. Результаты измерения температуры термостатируемой поверхности

Как видно из результатов измерений, неоднородность температуры по поверхности стола не превышает ±0,3 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Казмирчук К.* Аддитивные технологии в российской промышленности / К. Казмирчук, В. Довбыш [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://konstruktor.net/podrobnee-det/items/additivnye-texnologii-v-rossijskojpromyshlennosti.html], свободный (дата обращения: 3.03.2016).

2. GIX Microplotter II [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sonoplot.com/products/gix-microplotterii// (дата обращения: 18.02.2016).

3. *Здрок А.Е.* Исследование технологии плоттерной печати изделий полимерной электроники // Научная сессия ТУСУР–2014: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 14–16 мая 2014 г.: в 5 ч. Томск: В-Спектр, 2014. Ч. 1. С. 180–183.

4. DS18b20Z [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf (дата обращения: 23.02.2016).

5. Метод настройки [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_metho (дата обращения: 5.03.2016).

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ

Г.Г. Жук, Е.В. Алексеев, студенты каф. РЭТЭМ,
А.В. Убайчин, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, grigoriy26.04@mail.ru
Проект ГПО КУДР-1503 «Разработка системы радиометрического контроля и диагностики»

Область радиоэлектроники, относящаяся к пассивной радиолокации, подразумевающая прием и обработку шумовых сигналов тепловой природы в радиодиапазоне, называется микроволновой радиометрией [1].

Радиометрические методы позволяют решать широкий круг задач, например: дистанционное зондирование Земли, прогнозирование изменений климата, исследование параметров атмосферы, влажности почвы и т.д. [2]. Исследуемые при этом шумовые сигналы тепловой природы обладают низкой (порядка 10–21 Вт/Гц) интенсивностью [3]. Поэтому применение систем микроволновой радиометрии нецелесообразно без решения ряда задач электромагнитной совместимости. Одной из таких задач является реализация интерфейса передачи данных от измерительной высокочастотной части системы к обрабатывающей ЭВМ, находящейся, как правило, на значительном (до одного километра) расстоянии от приемной антенны. Ключевые требования к реализации интерфейса заключаются в минимизации побочного электромагнитного излучения, в том числе в рабочей полосе частот радиометрической системы и пропускной способностью не менее 100 кбит/с.

Ранее нашим коллективом исследованы характеристики проводных интерфейсов USB, RS-232 – «Токовая петля» [4], Ethernet и т.д. Из-за малой дальности, низкой скорости передачи данных и технической сложности реализации использование этих интерфейсов не эффективно. В результате анализа принято решение об использовании интерфейса RS-485 и его интеграции в блоки микроволновой радиометрической системы.

В основе интерфейса RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных. Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам, причем по одному проводу (провод Data+) идет оригинальный сигнал, а по другому (провод Data–) – его инверсная копия [1]. Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе [5].

Приемники сигнала являются дифференциальными, т.е. принимают только разность между напряжениями на линий Data+ и Data–. В соответствии с техническими характеристиками интерфейса RS-485 разность напряжений от 200 мВ до +12 В на линиях соответствуют значению логической единицы, а при напряжении от –200 мВ до –7 В – эквивалентно соответствуют логическому нулю [6].

Благодаря симметрии линий относительно общей точки в них наводятся помехи, близкие по форме и величине. В приемнике с дифференциальным входом сигнал выделяется путем вычитания напряжений на линиях, поэтому после вычитания напряжения все аддитивные помехи оказываются равными нулю. В реальных условиях, когда существует небольшая асимметрия линий и нагрузок, помеха подавляется не полностью, но ослабляется существенно. Для минимизации чувствительности линии передачи к электромагнитной наводке используется витая пара проводов. Токи, наводимые в соседних витках вследствие явления электромагнитной индукции, по «правилу буравчика» оказываются направленными навстречу друг другу и взаимно компенсируются. Степень компенсации определяется качеством изготовления кабеля и количеством витков на единицу длины. В соответствии со стандартом RS-485 была разработана модификация интерфейса связи микроволнового радиометра и ЭВМ, изображённая на рис. 1.

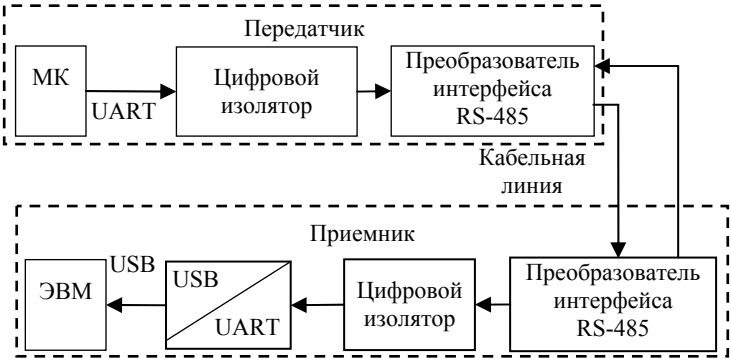


Рис. 1. Схема электрическая структурная интерфейса RS-485

Суть модификации заключается в том, что если порты RS-485 подключены к линии передачи на большом расстоянии друг от друга, то потенциалы их нулевых точек могут сильно различаться. В этом случае для исключения пробоя выходных каскадов микросхем трансиверов (приемопередатчиков) интерфейса было принято решение об

использовании гальванической изоляции между портами RS-485 и общей точкой.

Практическая реализация интерфейса RS-485 выполнена следующим образом. Управляющий микроконтроллер МК радиометрической системы передает результаты измерений по последовательной шине UART на 3-канальный цифровой изолятор ADuM1301, предназначенный для гальванической развязки от физического уровня RS-485. Преобразователь интерфейса реализован на драйверах ADM485. На обрабатывающей ЭВМ интерфейс подключается к последовательному порту при помощи созданного преобразователя на базе микросхемы FT232.

Заключение. В результате проделанной работы был разработан интерфейс связи между радиометрической системой и обрабатывающей ЭВМ. Реализованный приемопередатчик обладает высокой электромагнитной совместимостью с радиометрической системой. В настоящий момент интерфейс работает на скорости 9,6 Кбит/с при длине кабеля 10 м. Также был проведен ряд испытаний изготовленных макетов физического уровня RS-485 на максимальную дальность и скорость передачи данных с заданной вероятностью ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Филатов А.В.* Микроволновый нулевой радиометр с комбинированной импульсной модуляцией / А.В. Филатов, Н.А. Каратаева, В.Д. Дмитриев // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 65–68.

2. *Убайчин А.В.* Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Изв. высш. учеб. завед. Физика. 2012. Т. 55, № 9–3. С. 130–133.

3. *Филатов А.В.* Радиометрические системы нулевого метода измерений: монография / А.В. Филатов. Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. 276 с.

4. *Жук Г.Г., Алексеев Е.В., Убайчин А.В.* О способе повышения дальности интерфейса RS-232 // Научная сессия ТУСУР–2015: матер. конф.: в 5 т. Т. 1. С. 283–286.

5. *RS-485* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/RS-485 (дата обращения: 28.03.16).

6. *Интерфейс* RS-485: описание, подключение [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.novosoft.by/?page=b_rs_485 (дата обращения: 02.03.16).

ЕМКОСТНЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ МАГНИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Д.О. Зятьков, аспирант

Научный руководитель А.В. Юрченко, проф. каф. ФМПК ИНК ТПУ, д.т.н.

г. Томск, ТПУ, zyatkov.88@mail.ru

Датчики магнитного поля представляют собой устройства для измерения магнитного поля и находят широкое применение в современной электронике и в различных технических областях.

В статье рассмотрены возможности использования магнитной жидкости для их применения в качестве чувствительных элементов датчиков слабого магнитного поля. Важность решаемых задач связана с поиском перспективных магнитных веществ, восприимчивых к слабому магнитному полю. Поэтому исследование влияния конструктивных параметров магнитных частиц, входящих в состав магнитных веществ, на параметры датчика слабого магнитного поля является актуальной задачей. Особенно важно выяснить, как влияют конфигурация и размер магнитных частиц в магнитном материале на параметры датчика слабого магнитного поля. Как правило, в связи с применением магнитных жидкостей их исследуют в сильных магнитных полях ($B = 10^{-3}$–10^{3} Тл). Исследование механизма структурирования магнитных частиц в жидкой матрице под действием слабого магнитного поля ($B = 10^{-6}$–10^{-9} Тл) и создание модельных композиционных магнитных сред для чувствительного элемента емкостного датчика магнитных полей представляют несомненный научный интерес.

Магнитные жидкости (феррожидкости) представляют собой взвесь магнитных частиц в жидкой основе (керосин, вода, минеральные и кремнийорганические масла и т.д.). Диполь-дипольное взаимодействие магнитных моментов частиц приводит к формированию цепочечной структуры [1, 2]. В магнитном поле цепочечная структура магнитных частиц имеет червеобразный вид. Формирование цепочечных структур способно привести к значительным изменениям магнитных и других свойств феррожидкостей, которые проявляются на изменении емкости конденсатора, заполненного магнитной жидкостью [3, 4].

Взаимодействие нанодисперсных магнитных частиц в результате структурных превращений во многом определяет физические свойства магнитных жидкостей. Исследованы особенности магнитных свойств, связанных с процессом структурных превращений в ансамбле коллоидных наночастиц, а также с учетом ориентации магнитных и электрических полей и направления силы тяжести.

Исследования основаны на изменении емкости конденсатора с мелкодисперсным магнитным наполнителем в виде частиц анизотропной формы. Частицы, имеющие вытянутые (в виде «иголок») или плоские (в виде «дисков») формы, легче поддаются магнитному текстурированию, т.е. упорядочению в направлении магнитных осей частиц.

В экспериментальных исследованиях применялись магнитные жидкости на основе полиметилфенилсилоксана (ПФМС-4) с магнитными частицами дисперсностью менее 40 микрон. Эти магнитные частицы получали из ленты нанокристаллического сплава марки 5БДСР.

Порог чувствительности емкостной ячейки с магнитной жидкостью составил 38,7 мкТл и может быть снижен при уменьшении размеров частиц.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что цепочная ориентация мелкодисперсных магнитных частиц и их взаимодействие приводят к зависимости емкости пластинчатого конденсатора от величины магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блум Э.Я.* Магнитные жидкости / Э.Я. Блум, М.М. Майоров, А.О. Цеберс. Рига: Зинатне, 1989. 387 с.

2. *Зятьков Д.О., Юрченко А.В., Балашов В.Б. и др.* Исследование емкостных чувствительных элементов датчиков магнитного поля // Вестник науки Сибири. 2015. Вып. 15. С. 161–167.

3. *Зятьков Д.О., Юрченко А.В., Балашов В.Б., Юрченко В.И.* Использование магнитных сред для емкостного чувствительного элемента датчика магнитного поля // Ползуновский вестник. 2015. Вып. 3. С. 161–164.

4. *Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю.* Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Успехи химии. 2005. Вып. 74 (6). С. 539–574.

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Троян П.Е.**, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.*
*зам. председателя – **Смирнов С.В.**, проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ПОНИЖЕННОЙ РАЗМЕРНОСТИ

А.И. Альбеков, А.С. Молчанов, студенты каф. ФЭ
Научный руководитель Ю.С. Жидик, аспирант каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, aai-k@mail.ru
Проект ГПО ФЭ-1502 «Разработка и создание технологий нанесения тонкопленочных покрытий ионно-плазменными методами на поверхность гетероэпитаксиальных структур без образования в них радиационных дефектов»

Развитие микроэлектронной промышленности предъявляет все более высокие требования к оптимизации характеристик существующих и разработке принципиально новых устройств наноэлектроники и нанофотоники, реализующих свою функциональность за счет особенностей зонной структуры, эффектов размерного квантования, явлений, возникающих на гетерограницах. Один из путей решения проблемы повышения эффективности прибора – применение функциональных покрытий с различными физическими свойствами, формируемыми вакуумными методами напыления и позволяющими значительно улучшить характеристики полупроводниковых приборов [1].

Наиболее приемлемыми методами вакуумного нанесения функциональных покрытий на поверхность современных гетероструктур пониженной размерности приборов наноэлектроники и нанофотоники являются термическое и электронно-лучевое испарение, в то время как при нанесении покрытий методом магнетронного распыления гетероструктура подвергается значительной бомбардировкое высокоэнергетичными заряженными частицами, что вызывает в ней появление радиационных дефектов. С другой стороны, метод нанесения материалов магнетронным распылением при варьировании различных технологических параметров позволяет в очень широких пределах проводить модификацию получаемых покрытий.

Таким образом, можно смело утверждать, что актуальной проблемой, требующей своего решения, является совершенствование технологии нанесения функциональных покрытий методом магнетронного распыления на поверхность гетероструктур пониженной размерности. В связи с этим задачей данного научного исследования является разработка методики регистрации радиационных дефектов в светодиодных гетероструктурах пониженной размерности, образованных в результате напыления на их поверхность покрытий методом магнетронного распыления.

В настоящее время вопрос нанесения прозрачных проводящих контактов к p-области GaN-гетероструктур в России до конца не решен. В то же время зарубежные компании – производители светодиодов не публикуют детали технологического процесса, видимо, рассматривая его в качестве ноу-хау. Информации, посвященной прямым исследованиям образования дефектов в гетероструктуре при ее электронно-ионной бомбардировке в процессе магнетронного напыления, практически нет. О деградации гетероструктуры при проведении такого процесса как в отечественной, так и в зарубежной литературе делается вывод, исходя из анализа параметров получаемых полупроводниковых приборов.

В связи с этим как метод регистрации образующихся дефектов наш коллектив предлагает использовать катодолюминесценцию. Как пример использования данного метода можно привести работы А.П. Суржикова, А.М. Притулова, опубликованные в монографии [2].

Суть метода заключается в следующем. Регистрируя сигнал длинноволнового электромагнитного излучения в ИК-видимой и УФ-областях, характерного для полупроводниковых, органических и некоторых других материалов, можно получить информацию о дефектах кристаллической структуры, неравномерности распределения примесей и т.п.

Электронные возбуждения – один из видов нарушений (дефектов) идеальной кристаллической решетки. В самом деле, в идеальном кристалле частично заполненные энергетические зоны отсутствуют. Следовательно, появившийся свободный электрон в зоне проводимости является одним из дефектов. Аналогично обстоит дело и в случае появления незанятого электроном квантового состояния (дырки) в валентной зоне. При взаимодействии частиц и квантов элактромагнитного излучения с твердыми телами большая часть их энергии расходуется на возбуждение электронной подсистемы кристаллов.

Таким образом, облучение гетероструктур на основе GaN, подверженных электронно-ионной бомбардировке, ультрафиолетовым излучением приводит к изменению спектра фотолюминесценции свечения, интенсивность которого возрастает с ростом дозы облучения.

Данный метод позволяет проводить неразрушающий контроль возникновения радиационных дефектов в светодиодных гетероструктурах на основе GaN, образованных в результете напыления на их поверхность покрытий методом магнетронного распыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Давыденко Ю.Н.* Высокоэффективные современные светодиоды // Современная электроника. 2004. №8. С. 36–43.

2. *Суржиков А.П., Притулов А.М.* Создание и накопление радиационных дефектов в монокристаллах оксида магния. М.: Энергоатомиздат, 1999. 173 с.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

И.Ю. Бакеев, аспирант, м.н.с., А.А. Зенин, с.н.с. каф. физики, к.т.н.

Научный руководитель Ю.А. Бурачевский, доцент каф. физики, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, bakeeviyu@mail.ru

Технология EBM (electron beam melting) в настоящее время активно применяется для изготовления изделий сложной формы из сплавов титана, например биомедицинских протезов [1]. При этом даже при обработке металлического порошка электронным лучом, генерируемого в традиционном диапазоне давлений (10^{-1}–10^{-3} Па), может наблюдаться заряд частиц до высоких потенциалов и их дальнейший разлет [2]. Разработка технологии прототипирования материалов из диэлектрических порошков электронным лучом в настоящее время осложнена данным эффектом.

При генерации и транспортировке электронных пучков в форвакуумной области давлений (1–100 Па) обработка диэлектрических материалов становится возможной ввиду компенсации заряда диэлектрика потоком ионов из пучковой плазмы [3]. Таким образом, целесообразным является проведение исследований о возможности использования электронных пучков, генерируемых в форвакуумной области давлений, для обработки диэлектрических порошков, в частности различных марок керамик.

Методика проведения эксперимента. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперименты проводились на порошке алюмооксидной керамики *1*, средний размер частиц которого составлял 100 мкм. Порошок в тигле *2*, выполненном из кварцевого стекла, помещался в вакуумную камеру *3*, откачиваемую форвакуумным насосом. При этом давление *P* остаточного газа в камере регули-

ровалось непосредственной подачей рабочего газа (воздуха) и до взаимодействия электронного пучка с порошком составляло 8 Па. Генерация непрерывного электронного пучка *4* производилась электронным источником на основе тлеющего разряда с полым катодом [4], размещаемого на фланце вакуумной камеры. Зажигание тлеющего разряда осуществлялось при подаче напряжения U_d источником питания разряда *5* между полым катодом *6* и анодом *7* для извлечения электронов из разрядной плазмы *8* в котором выполнено эмиссионное окно, перекрытое перфорированным электродом *9* с множеством отверстий. Ускорение электронов производилось напряжением U_a, прикладываемым между анодом *7* и ускоряющим электродом *10*. Фокусировка пучка осуществлялась магнитным полем катушки *11*. Ток пучка оценивался по току I_e в цепи источника ускоряющего напряжения *12*. Диаметр пучка составлял 7–10 мм.

Результаты экспериментов. При мгновенном облучении керамического порошка электронным пучком с мощностью, достаточной для его спекания, как и в случае традиционного диапазона давлений, происходит сильный разлет частиц (рис. 2). Однако в случае постепенного повышения мощности электронного луча данного разлета удалось избежать.

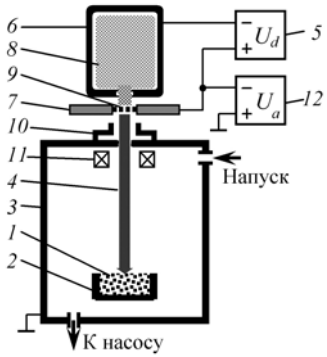


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 – порошок алюмооксидной керамики; *2* – тигель; *3* – вакуумная камера; *4* – электронный пучок; *5* – источник питания разряда; *6* – полый катод; *7* – анод; *8* – эмиссионная плазма; *9* – перфорированный электрод; *10* – экстрактор; *11* – магнитная фокусирующая катушка; *12* – источник ускоряющего напряжения

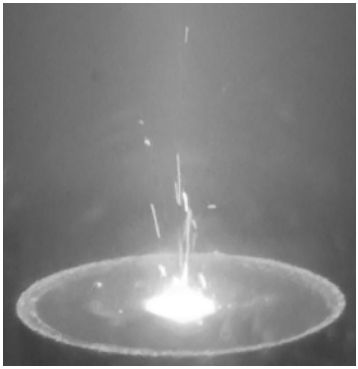
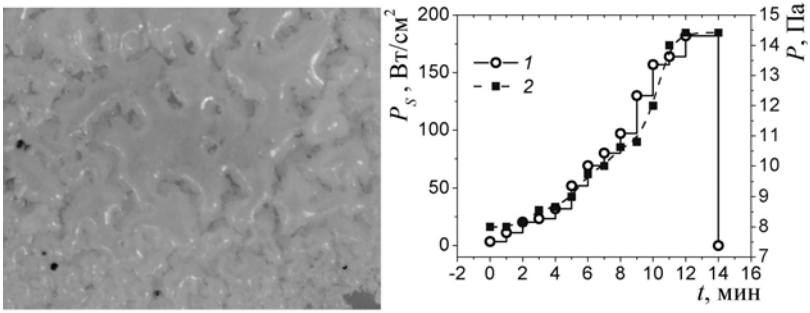


Рис. 2. Разлет частиц порошка при мгновенном облучении электронным пучком (плотность мощности электронного луча P_S = 120 Вт/см^2)

На рис. 3, *а* представлены изображение поверхности спеченных частиц порошка алюмооксидной керамики, предварительно прогреваемых электронным лучом. Как видно из режима облучения (рис. 3, *б*), по мере повышения мощности пучка давление в камере увеличивается, что свидетельствует об интенсивном газовыделении с поверхности частиц.



а *б*

Рис. 3. Фотография поверхности порошка алюмооксидной керамики (*а*), спеченной электронным пучком, и режим обработки (*б*):
1 – плотность мощности P_S электронного пучка; *2* – давление газа P

Заключение. В работе исследована обработка порошка алюмооксидной керамики электронным пучком, генерируемым в форвакуумной области давлений. Показано, что разлета частиц порошка при облучении можно избежать в случае постепенного повышения мощности пучка, причем достигаемой мощности достаточно для спекания. Данные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности дальнейшего применения форвакуумного электронного источника для 3D-прототипирования изделий из различных видов керамик.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-00871-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Heinl P., Muller L., Korner C. et al.* Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting // Acta Biomater. 2008. Vol. 4. P. 1536–1544.

2. *Sigl M., Lutzmann S., Zäh M.F.* Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering / Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 17, 14 – 16.08.2006, Austin, Texas/USA, 2006. P. 397–405.

3. *Burdovitsin V.A., Dvilis E.S., Medovnik A.V. et al.* Surface structure of alumina ceramics during irradiation by a pulsed electron beam // Tech. Phys. 2013. Vol. 58, № 1. P. 111–113.

4. *Бурдовицин В.А.* О предельном рабочем давлении плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом // ЖТФ. 2001. Т. 71, вып. 2. С. 48–50.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО НАРУШЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОШАБЛОННЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

А.А. Чистоедова, студентка каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, профессор каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, annechist@mail.ru

В настоящее время фотошаблонное стекло широко используется в производстве полупроводниковых и интегральных схем. От состояния фотошаблонного стекла зависит качество изготовляемой продукции, поэтому на сегодняшний день большое внимание уделяется технологии обработки поверхности фотошаблонов и защиты их от воздействия атмосферы и реагентов.

Цель работы: исследовать влияние влаги на состояние поверхности фотошаблонов.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы фотошаблонных стекол в виде полированных пластин с химическим составом: Na – 9,4; Ca – 1,9; Mg – 2,1; K – 0,3; Si – 18,4; O – 67,8%.

Образцы выдерживались в деионизованной воде в течение 80 ч. В процессе испытаний периодически контролировались изменения структуры поверхностного слоя с помощью атомно-силового микроскопа Certus Optic и растрового электронного микроскопа TM-1000 (Hitachi, Япония) с разрешением 30 нм и чувствительностью по химическому анализу 0,5%, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализатора SwiftED (Bruker, Германия).

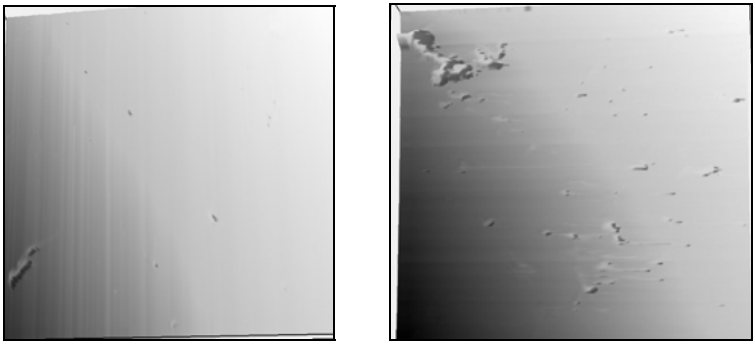
Ранее было установлено [1], что при длительном взаимодействии влаги с фотошаблонным стеклом вблизи поверхности происходит образование гидратированного слоя стекла толщиной от 100 до 500 нм вследствие процесса гидратации поверхностного слоя. Образование подобных слоев приводит ухудшению оптических свойств фотошаблонов, а именно: к увеличению показателя поглощения более чем в два раза и уменьшению коэффициента пропускания на 13–16%. Установлено также, что процесс гидратации поверхности происходит в течение 300 ч с постепенным уменьшением скорости роста [1].

В данной работе были исследованы образцы фотошаблонного стекла, выдержанные в деионизованной воде 24, 52 и 96 ч.

В процессе взаимодействия воды и стекла происходит выщелачивание поверхностного слоя стекла с образованием гидратированного слоя [1].

Рентгеноспектральным методом анализа было установлено, что в результате длительного взаимодействия стекла и деионизованной воды в раствор из поверхностного слоя стекла выходят катионы щелочных

металлов. С течением времени на поверхности стекла происходит образование новой фазы из раствора в виде кристаллов и агрегатов со средним значением площади 200 мкм^2 и высотой 800 нм (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Изображения поверхности фотошаблонов, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (66×66 мкм):
а – после 24 ч воздействия, *б* – после 52 ч воздействия влаги

При длительном воздействии влаги на поверхности стекла образуется слой, известный в литературе как «накипь» [2] (рис. 2).

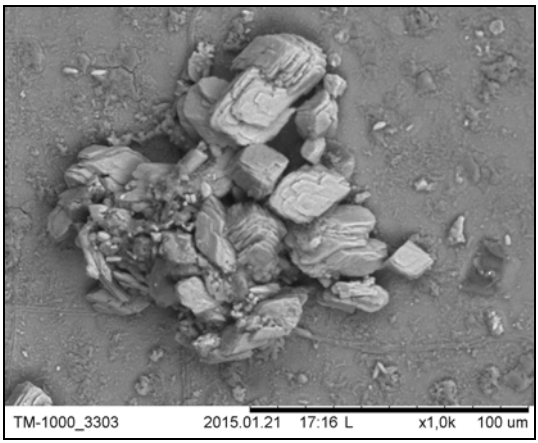


Рис. 2. Образование на поверхности стекла

В ходе исследований было установлено, что кристаллизация происходит преимущественно в области образования зародыша. Так, уже через 4 суток наблюдается усиление процесса кристаллизации (рис. 3).

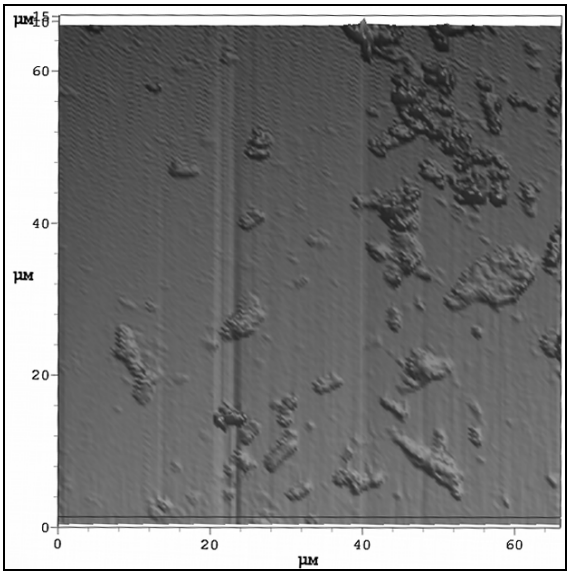


Рис. 3. Поверхность фотошаблона после 4 суток воздействия влаги

Проведенный химический анализ показал, что в составе аморфных образований на поверхности стекла присутствуют такие элементы, как магний, натрий и хлор (Mg – 7,7; Na – 4,7; Cl – 1%). Это доказывает то, что кристаллические образования состоят из элементов, входящих в состав стекла.

Выводы

1. С помощью метода атомно-силовой микроскопии можно установить структурные изменения поверхностного слоя фотошаблонов при взаимодействии с деионизованной водой на ранней стадии.

2. При длительном воздействии влаги происходит кристаллизация солей на поверхности фотошаблонов в виде агрегатов различной формы.

3. Образования на поверхности фотошаблонного стекла имеют с ним сходный химический состав.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чистоедова А.А.* Исследование наноразмерного гидратированного слоя на поверхности фотошаблонных стекол // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XI Междунар. науч.-практ. конф. (25–27 ноября 2015 г.): в 2 ч. Ч. 1. Томск: В-Спектр, 2015. С. 88–91.

2. *Горшков В.С., Савельев В.Г., Федоров Н.Ф.* Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: учеб. для вузов по спец. «хим. технология тугоплав. неметалл. и силикат. Материалов». М.: Высш. шк., 1988. 400 с.

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОЯВЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ

Т.Х. Фам, студент каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, аспирант каф. ФЭ

Одним из критических процессов при формировании транзисторов является процесс формирования затвора. Условно процесс формирования затвора включает процесс формирования маски, процесс металлизации затвора и процесс удаления маски. При формировании маски одним из этапов, влияющих на выход годных приборов, является этап проявления фоторезиста (ФР). На сегодняшний день существует несколько способов проявления ФР. Оптимизация режимов проявления ФР является актуальным вопросом. Программа моделирования процесса проявления не только облегчит решение проблемы создания субмикронных затворов для быстродействующих транзисторов, но и поможет в дальнейшем оптимизировать рецепты проявления на установках влажной обработки струйного типа.

В работе [1] показано, что для создания субмикронных Т-образных затворов транзистора методом углового напыления было необходимо решить проблему разброса по ширине окна при проявлении фоторезистивной маски. Также для подтверждения был проведен эксперимент на установке влажной обработки OptiwetSB-30. В результате было подтверждено, что разброс по ширине окна зависит от характера подачи струи проявляющего вещества, т.е. участки, по которым не проходила струя проявителя, имеют меньший размер окна, в отличие от участков, по которым проявитель подавался непосредственно.

Работа направлена на создание программы, позволяющей моделировать процесс проявления на установках влажной обработки струйного типа, учитывая все её особенности.

Разработка программы осуществлялась в среде Unity (рис. 1). При подборе размера подложки, скорости вращения подложки и скорости движения струи программа будет решать следующие задачи: быстрая визуализация траектории движения струи и расчет времени всего процесса.

Для подтверждения исправности созданной программы введем параметры, которые используются в рецепте (рис. 2).

Как видно по рис. 2, траектория движения струи, построенная программой, полностью совпадает с траекторией, построенной математически, что свидетельствует об исправности программы.

На рис. 3 представлена траектория движения струи (построенная математическим методом) по используемому рецепту.

а

б

Рис. 1. Интерфейс программы:
а – ввод начальных параметров; *б* – ввод конечных параметров

Для создания основного этапа рецепта проявления необходимо было, чтобы траектория движения струи равномерно распределялась по поверхности подложки. На рис. 4 представлен результат моделирования основного этапа рецепта проявления.

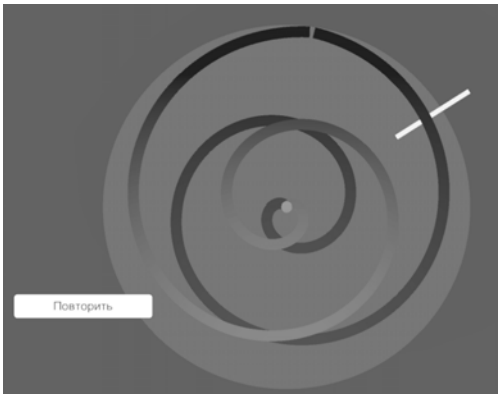


Рис. 2. Результат моделирования движения сопла по используемому рецепту

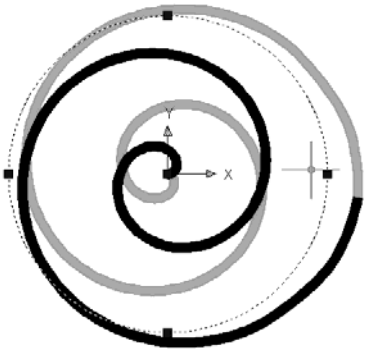


Рис. 3. Траектории движения струи по подложке

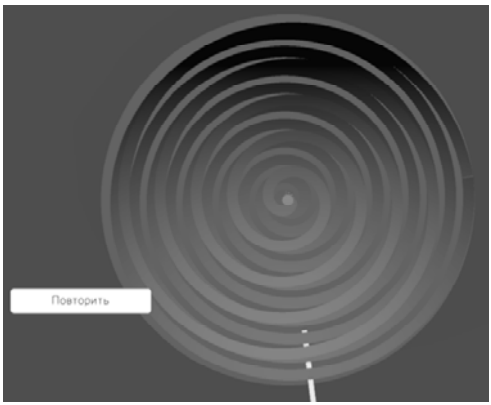


Рис. 4. Результат моделирования основного этапа рецепта проявления

Так как общее время проявления фоторезиста составляет 60 секунд, то время на один этап движения струи составило 16 секунд. В результате этап полива повторяется три раза с перерывом, что делает возможным проводить калибровку рецепта по времени.

Разработанная программа позволяет определить время прохождения струи проявляющего вещества, а также визуально демонстрирует характер движения струи (траекторию движения).

Используя данную программу для моделирования процесса проявления, можно в дальнейшем проводить не только оптимизацию режима проявления готовых рецептов, но и создавать новые рецепты для проведения экспериментов с разными размерами подложек, времени проявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кулинич И.В., Фам Т.Х.* Исследование процесса проявление фоторезистивной маски // Международный научный институт «Educatio». 2015.

2. *Sister* semiconductor equipment, Manual OPTIwet SB30. 2008. 1100 с.

СИЛОВЫЕ ДИОДЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ

И.В. Федин, аспирант каф. ФЭ,
Е.В. Ерофеев, нач. лаб. АО «НПФ «Микран», к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, АО «НПФ «Микран», fedinivanvladimirovich@mail.ru, erofeev@micran.ru

Широкозонные полупроводники, такие как нитрид галлия (GaN), привлекают всё большее внимание разработчиков как перспективные материалы силовой электроники. Диоды с барьером Шоттки (ДБШ) на основе эпитаксиальных гетеростуктур нитрида галлия могут оказаться элементной базой силовых приборов следующего поколения. Это обусловлено большой шириной запрещённой зоны, высокой электрической прочностью и низким сопротивлением канала AlGaN/GaN гетероструктуры [1, 2].

В данной работе приведены результаты разработки силовых диодов с барьером Шоттки на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия.

В работе использовались эпитаксиальные гетероструктуры нитрида галлия, выращенные на подложках кремния методом металлорганической газофазовой эпитаксии. Исследовались GaN-диоды с барьером Шоттки на основе пленки Ni с длиной анода 5 мкм и шириной от 10 до 200 мм, формируемого методами лазерной литографии. Расстояние

катод–анод ($L_{C\text{-}A}$) варьировалось в диапазоне от 3 до 7 мкм. Длина анодного полевого электрода (FieldPlate) составляла L_{FP} = 2 мкм (рис. 1).

На рис. 2 приведена микрофотография полученного GaN ДБШ с шириной анода 60 мм и расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 4 мкм.

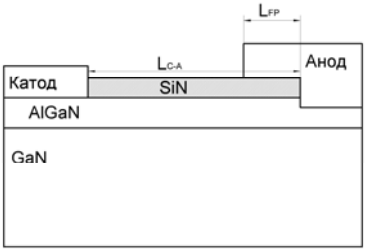


Рис. 1. Схематическое изображение силового GaN ДБШ

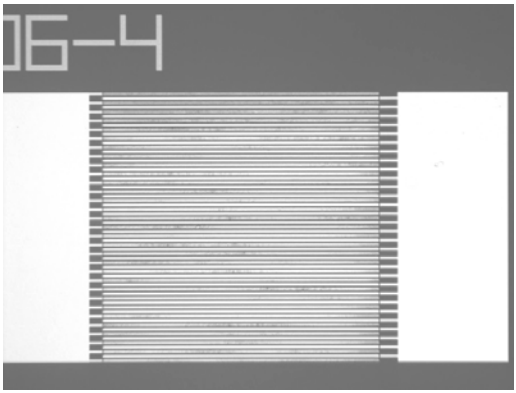


Рис. 2. Микрофотография GaN ДБШ с шириной анода 60 мм и расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 4 мкм

На рис. 3 приведена прямая ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) GaN ДБШ с расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 7 мкм и шириной анода W_A= 200 мм.

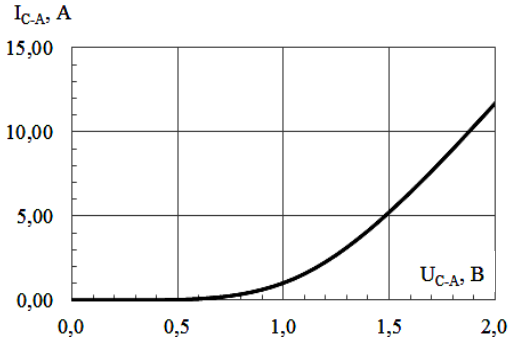


Рис. 3. Прямая ветвь ВАХ GaN ДБШ с расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 7 мкм и шириной анода W_A= 200 мм

Как видно из рис. 3, прямое падение напряжения на GaN ДБШ составляет 0,6 В. Величина рабочего тока GaN-диода составляет 2,2 А при напряжении смещения 1,2 В.

На рис. 4 приведена обратная ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) GaN ДБШ с расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 7 мкм и шириной анода W_A= 200 мм.

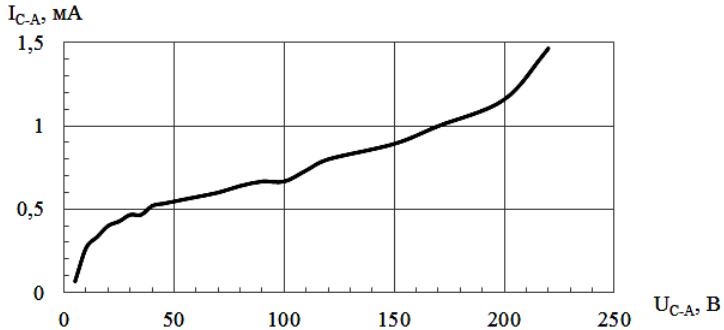


Рис. 4. Обратная ветвь ВАХ GaN ДБШ с расстоянием катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 7 мкм и шириной анода 200 мм

Как видно из рис. 4, ток утечки GaN диодов с шириной анода 200 мм составляет порядка 5 мкА/мм, что соответствует мировому уровню разработок в данном направлении исследований [3]. Напряжение пробоя диода в обратном смещении при расстоянии катод–анод $L_{C\text{-}A}$ = 7 мкм составило 220 В.

На рис. 5 приведены результаты измерения ёмкости диодов с периферией от 10 до 200 мм на частоте 1 МГц.

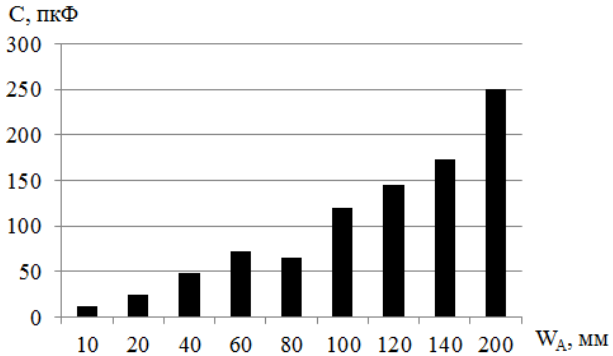


Рис. 5. Результаты измерения ёмкости GaN ДБШ с шириной анода от 10 до 200 мм на частоте 1 МГц

Как видно из рис. 5, ёмкость GaN ДБШ с шириной анода 10 и 200 мм составляет C = 12 и 250 пкФ, соответственно, что позволяет использовать разработанные диоды в схемах быстродействующей преобразовательной техники.

Заключение. В данной работе представлены результаты разработки силовых диодов с барьером Шоттки на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия.

Силовые GaN-диоды с шириной анода 200 мм при расстоянии катод–анод 7 мкм демонстрировали напряжение пробоя 220 В и рабочий ток 2,2 А при напряжении прямого смещения 1,2 В. Емкость диода на частоте 1 МГц составила 250 пкФ, что позволяет использовать диоды в схемах быстродействующей преобразовательной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0204 от 27.10.15).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nomura T. et al.* Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Deviceand ICs, 2006. 313.

2. *Bahat-Treidel E. et al.* Fast-switching GaN-based lateral power Schottky barrier diodes with low onset voltage and strong reverse blocking / IEEE Electron Device Lett. Mar. 2012. Vol. 33, № 3. P. 357–359.

3. *Mingda Zhuetal.* 1.9-kV AlGaN/GaN Lateral SchottkyBarrier Diodes on Silicon // IEEE Electron Device let. April 2015. Vol. 36, № 4. P. 375–377.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА $LaCA_3Fe_5O_{12}$ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В.В. Голенкина, студентка каф. ФЭ

Научный руководитель С.А. Гынгазов, ТПУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ФЭТ, lerago3@gmail.com

В последнее время активно ведутся исследования по применению нового класса ферритов – лантаноидов. Их особенность заключается в том, что они содержат редкоземельные металлы, которые и определяют их новые уникальные свойства. Особый интерес представляет композит $LaCa_3Fe_5O_{12}$ (феррилантаноид). Благодаря высокой электрической проводимости и кислородной проницаемости твердые растворы этого композита являются перспективными материалами для создания газовых сенсоров и электродов твердооксидных топливных элементов. Также используются в качестве катализаторов полного окисления в различных реакциях газоотчистки.

Ввиду растущих требований к многофункциональности создаваемых материалов, вызванных современным развитием науки и техники

важно оценить результат взаимодействия композита на основе феррилантаноида с электромагнитным излучением (ЭМИ) СВЧ-диапазона. Эффективность взаимодействия с ЭМИ данного композита ранее не изучалась, хотя известно, что ферриты широко используются в качестве радиопоглощающих материалов для экологической защиты биологических объектов от вредного воздействия, предотвращение утечек информации по радиоканалу, подавления помех средствами связи, в стелс-технологии и т.д. [1–3].

Экспериментальные образцы для радиофизических измерений были изготовлены из порошка исследуемого композита и эпоксидной смолы в виде шайб внешним диаметром 7 мм и внутренним – 3 мм. Толщина шайбы изменялась от 0,5 до 2 мм. Для заполнения формы шайб использовано по 3 г феррита и связующего на 30, 50, 65 вес. % концентраций вещества.

Радиофизические измерения проведены в диапазоне частот от 0,01 до 4,00 ГГц образцов на аналоговом измерителе модуля коэффициента передачи прохождения и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) Р2М-04 (home made) фирмы «Микран», а в полосе частот от 4,00 до 18,00 ГГц – на векторном анализаторе цепей E8363B (Agilent technologies).

Из рис. 1 видно, что коэффициент отражения $LaCa_3Fe_5O_{12}$ в исследуемом диапазоне зависит от частоты и описывается кривой с максимумом, положение которого зависит от концентрации феррита в композите (30, 50, 65%).

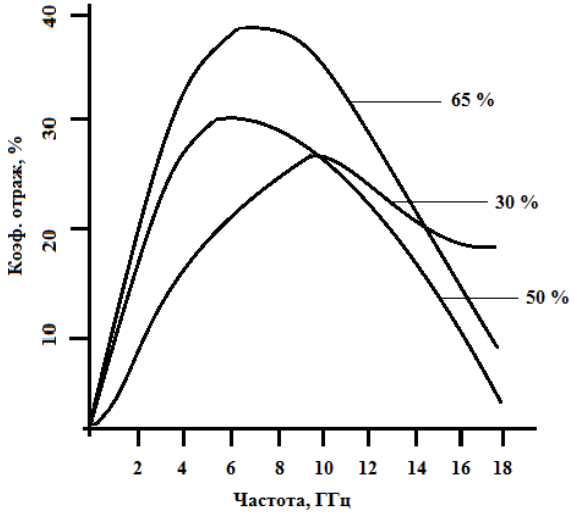


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения от частоты ЭМИ

Кривые зависимости коэффициента прохождения от частоты представлены на рис. 2, из которого видно, что коэффициент прохождения также зависит от концентрации феррита в композите (30, 50, 65%) и описывается кривой с минимумом. Положение минимума приходится на диапазон частот от 6–16 ГГц.

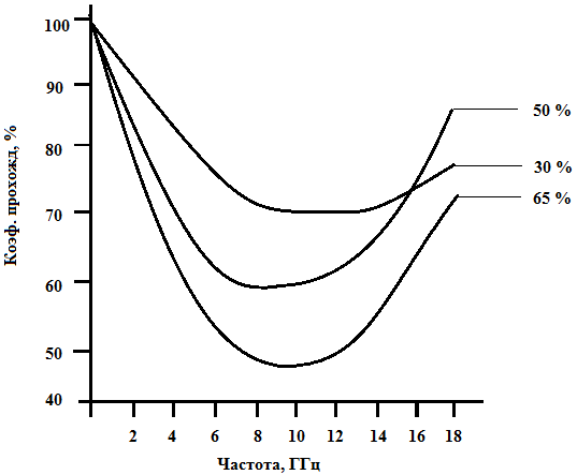


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от частоты ЭМИ

Коэффициент поглощения исследуемого материала плавно увеличивается с увеличением частоты и возрастает при фиксированной частоте по мере увеличения концентрации феррита в композите (30, 50, 65%) (рис. 3).

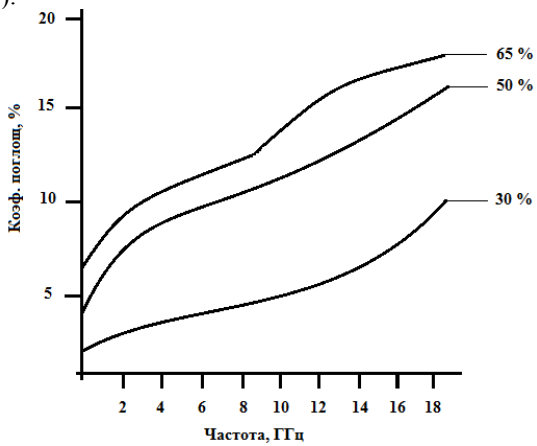


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от частоты ЭМИ

Заключение. В результате исследований установлено, что композит состава $LaCa_3Fe_5O_{12}$ эффективно взаимодействует с электромагнитным излучением. Эффективность взаимодействия прямо пропорциональна концентрации композита. Повышение концентрации композита приводит к росту коэффициента отражения, что связано с высокой проводимостью материала и заметным снижением коэффициента прохождения в области частот 4–14 ГГц, что может быть использовано в создании экранирующих устройств для решения задач электромагнитной совместимости современной высокочастотной радиоаппаратуры. Подбором толщины композита можно изменить рабочий диапазон частот и эффективность взаимодействия с ЭМИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I.* Analysis and correction of the magnetic permeability spectra of $Ba_3Co_2Fe_24O_{41}$ hexaferrite by using Cramers-Kronig relations //Russian Physics Journal. 2006. № 49 (8). P. 840–846.

2. *Naiden E.P., Zhuravlev V.A., Minin R.V. et al.* Structural and magnetic properties of SHS-produced multiphase W-Type hexaferrites: Influence of radiation-thermal treatment // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2015/ 22 July. Vol. 24, Iss. 3. P. 148–151.

3. *Сусляев В.И., Найден Е.П., Коровин Е.Ю. и др.* Способ получения радиопоглощающего материала и радиопоглощающий материал, полученный этим способом. Патент РФ. №2382804, зарегистрирован 27 февраля 2010 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Al-Si-N ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

А.Р. Кадыров, студент каф. ФЭ ТУСУРа,
В.Н. Легостаев, с.н.с., А.М. Лебединский, м.н.с.,
Е.А. Смолянский, инженер-исследователь,
А.Л. Лаук, вед. инженер, лаб. №1, ИФВТ ТПУ
Научный руководитель Г.Е. Ремнёв, проф. каф. ЭФ ТПУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, alekstosis@gmail.com

Нанокомпозиты – новое поколение материалов, состоящее, по крайней мере, из двух отдельных фаз с нанокристаллической (нк) и / или аморфной (а) структурой, или их комбинации. Нанокомпозиты, вследствие структурных особенностей, демонстрируют улучшенные или совершенно новые свойства, отличные от традиционных материалов, состоящих из зерен размером ≥ 100 нм.

Одной из основных особенностей таких нанокомпозитов является повышенная твердость по сравнению с материалами, образующими его.

Добавление одного или нескольких элементов в основной материал – эффективный способ получить нанокомпозит с высокой твердостью [1]. Именно поэтому, в течение последнего десятилетия ведутся активные исследования нанокомпозитов типа нк-MeN/a-Si_3N_4, где Me – металл.

Нанокомпозитные покрытия Al-Si-N с низким содержанием кремния (≤ 10 ат.%) обладают высокой твердостью [2], однако не демонстрируют температурной стабильности и стойкости к окислению при температурах выше 1000°C. Данная проблема может быть решена увеличением содержания Si ≥ 25 ат.%, что приводит к формированию рентгенаморфной структуры, стабильной при температурах более 1000 °C [3].

Целью данной работы было исследование механизма деградации поверхности Al-Si-N покрытий при термическом отжиге.

Подложки из монокристаллического кремния с ориентацией (100) диаметром 75 мм проходили предварительную очистку в УЗ-ванне, а затем ионами Ar^+, генерируемыми ПИНК (плазменным источником с накаленным катодом) в атмосфере Ar (p = 0,4 Па) в течение 5 мин. После этого на подложки наносились покрытия Al-Si-N методом реактивного магнетронного распыления композиционного катода (Si 75% – Al 25%) в атмосфере Ar и N_2. Для исследования температурной стабильности полученные образцы покрытий отжигались при температурах 800–1100 °C на воздухе и в парах воды. Механические характеристики (твердость H, модуль Юнга E*) покрытий получены при наноиндентировании. Исследование морфологии поверхности и элементного состава покрытий было выполнено на электронном микроскопе TM-1000 Hitachi.

На рис. 1 представлено изображение поверхности образца 139-19, полученное с помощью микроскопа TM-1000.

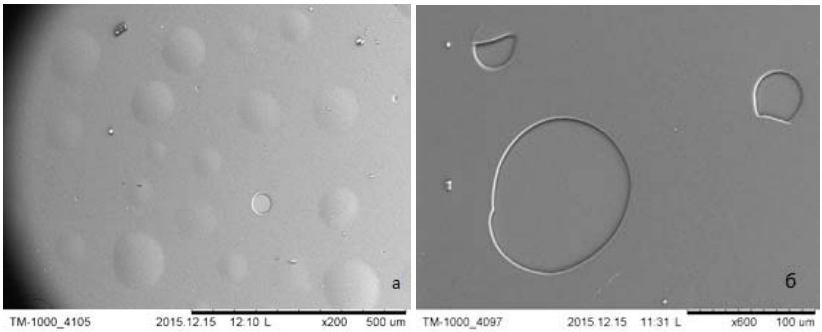


Рис. 1. Изображение поверхности образца покрытия Al-Si-N, отожжённого в парах воды при 1000 °C: *а* – увеличение в 200 раз; *б* – увеличение в 600 раз

Из рис. 1 следует, что на поверхности покрытий после отжига образуются «пузыри» и «кратеры». Такие нарушения поверхности характерны для покрытий, прошедших термический отжиг при температурах выше 1100 °С – на воздухе и 900 °С – в парах воды. Образование наблюдаемых дефектов покрытий Al-S-N сопровождается ухудшением механических характеристик (таблbwf).

Элементный состав покрытий и их механические характеристики

Образец	Среда отжига	Температура отжига, °С	Кремний, ат. %	Азот, ат. %	Алюминий, ат. %	Кислород, ат. %	Примеси, ат. %	Изменение веса, мг	Твердость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Исходный	–	–	22,7	53,8	9,3	10,5	3,7	–	15,48	187,22
138–13	Воздух	1100	24,2	35,4	9,2	9,9	3,3	–0,128	7,95	132,26
139–19	Пары воды	1000	31,2	–	10,9	58	–	0,043	12,07	138,47
138–13 (в кратере)	Воздух	1100	64	0,5	–	35,5	–	–	–	–
139–23 (в кратере)	Пары воды	800	90	3,9	–	6,1	–	–	–	–
139–10 (в кратере)	Пары воды	1100	48,2	–	–	51,8	–	–	–	–
139–19 (в кратере)	Пары воды	1000	54,8	–	–	45,2	–	–	–	–

Элементный анализ «кратеров» указывает на наличие кремния, кислорода и следовых количеств азота, что свидетельствует о формировании оксида кремния на поверхности подложки в процессе термического отжига. Следует отметить, что повышение температуры отжига как в парах воды, так на воздухе приводит к снижению содержания азота и росту количества кислорода в покрытиях Al-Si-N. Наблюдаемое снижение содержания азота и увеличение количества кислорода в образцах, по-видимому, может быть обусловлено замещением атомов азота атомами кислорода в нитридах кремния и алюминия.

Таким образом, исходя из приведенных данных, можно предположить, что деградация механических характеристик покрытий Al-Si-N при термическом отжиге на воздухе и парах воды при $T \geq 1000$ °С обуславливается замещением атомов азота на атомы кислорода и формированием дефектов типа «пузыри» и «кратеры» в покрытии Al-Si-N. Установление причин и механизмов образования «пузырей» и «кратеров» требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Musil J., Sasek M., Zeman P.* Properties of magnetron sputtered Al-Si-N thin films with a low and high Si content // Surface & Coatings Technology. 2008. № 202. P. 3485–3493.

2. *Musil J., Vlcek J.* Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties // Surface & Coatings Technology. 2001. № 142. P. 557–566.

3. *Musil J.* Properties of hard nanocomposite thin films // Nanocomposite Thin Films and Coatings. 2007. B492. P. 281–328.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОЭДС МАРГАНЕЦ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ

В.В. Каранский, магистрант, Е.В. Саврук доцент, к.т.н., А.Ю. Лобажевич, студент, каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, karanskii_vitali@mail.ru

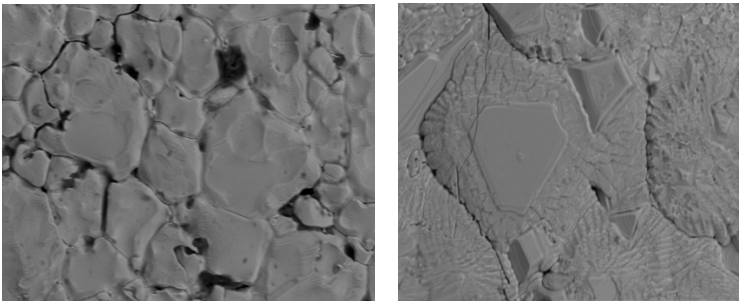
В настоящее время в устройствах микроэлектроники радиочастотного и СВЧ-диапазона широко используются различные поликристаллические ферритовые материалы со структурой шпинели. Наибольшее распространение получили марганец-цинковые ферриты (Mn-Zn-ферриты) стехиометричного состава, магнитные, электрические и механические свойства которых в значительной степени зависят от их микро- и наноструктуры. В связи с этим особую роль играет не только объемная микроструктура материала, но и поверхностная. Методы лазерной и электронной обработки, обладающие высокой локальностью и селективностью воздействия, являются перспективными методами для использования в микро- и нанотехнологии материалов электронной техники [1, 2]. Слои с повышенной электропроводностью могут быть использованы для создания элементной базы спинтроники. Таким образом, целью данного исследования является влияние низкоэнергетической электронной обработки поверхности Mn-Zn-феррита на термоЭДС материала.

В работе исследовались образцы поликристаллического Mn-Zn-феррита марки НМ2000 с химическим составом $Mn_{0,6}Zn_{0,4}Fe_2O_3$ в виде пластин размером 15×65×5 мм. Обработка поверхности образцов пучком низкоэнергетических электронов с энергией 10–20 кэВ проводилась на экспериментальной установке с плазменным источником электронов ленточной конфигурации (без сканирования луча) при давлении в рабочей камере 5–15 Па, плотности мощности пучка 10^3–10^4 Вт/см^2 и времени воздействия 5 с [3].

На рис. 1, *а* представлена исходная микроструктура поверхности Mn-Zn-феррита с размером зерна 10–40 мкм. Поверхность характеризуется наличием большого количества межзеренных границ и пор, а также наличием внутризеренной пористости. Подобная морфология поверхности оказывает отрицательное воздействие не только на струк-

туру, но и на свойства нанесенных на поверхность изделия металлических пленок.

На рис. 1, *б* представлена микроструктура поверхности Mn-Zn-феррита после обработки. Из рис. 1, *б* видно, что происходит перекристаллизация поверхности с образованием призматических кристаллов гематита Fe_2O_3.



а *б*

Рис. 1. Фотографии микроструктуры поверхности Mn-Zn-феррита:
а – до обработки; *б* – после обработки

Степень окисления катионов Mn и Fe, а также характер их расположения в узлах кристаллической решетки шпинели оказывает значительное влияние на магнитные свойства феррита.

Ввиду того, что Mn-Zn-ферриты можно рассматривать как полупроводники с одним типом носителей заряда, в данном случае это электроны, то термоЭДС описывается формулой Хейкеса–Джонсона для прыжковой проводимости. ТермоЭДС измерялась микрозондом с электрическим нагревом при температуре 300–595 K (рис. 2).

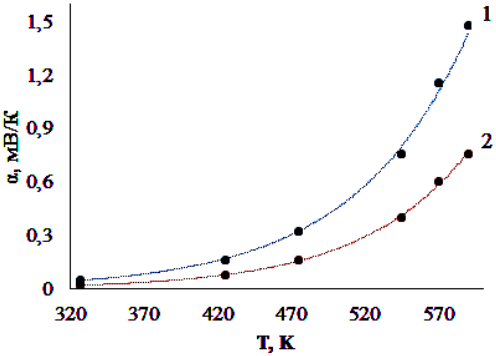


Рис. 2. Температурная зависимость термоЭДС Mn-Zn-феррита:
1 – до обработки;
2 – после обработки

Из приведенного графика видно, что термоЭДС соответствует электронному типу проводимости и после обработки поверхности феррита низкоэнергетическими электронами уменьшается, что связано с увеличением концентрации катионов $[Fe^{3+}]$.

Заключение

1. Установлено, что в процессе обработки низкоэнергетическими электронами поверхности Mn-Zn-феррита наблюдается восстановление [Fe^{3+}] до [Fe^{2+}] и перераспределение катионов по подрешеткам с частичным переходом [Fe^{2+}] в тетраэдрические позиции. Это приводит к уменьшению термоЭДС.

2. Обработка поверхности изделий из Mn-Zn-феррита потоком низкоэнергетических электронов (10–20 кэВ) в кислородсодержащей среде приводит к выравниванию рельефа поверхности, уменьшению межзеренных и внутризеренных пор и трещин и тем самым к повышению качества и стойкости к разрушению ферритовых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Саврук Е.В., Смирнов С.В.* Исследование структуры алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77, № 6. С. 32–35.

2. *Саврук Е.В., Смирнов С.В.* Формирование светорассеивающего микрорельефа на поверхности керамических подложек из Al_2O_3 // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 11. С. 33–34.

3. *Саврук Е.В., Смирнов С.В., Климов А.С.* Модификация поверхности Mn-Zn-феррита пучком низкоэнергетических электронов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. Т. 2, № 2 (26). С. 172–174.

4. *Толстик А.И., Ивановская М.И., Паньков В.В.* Исследование структурных особенностей низкотемпературных Mn-Zn-ферритов // Вестник БГУ. Сер. 2. 2009. № 1. С. 30–34.

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ УСКОРЯЮЩЕГО ПРОМЕЖУТКА ФОРВАКУУМНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

А.В. Казаков, инженер-исследователь каф. физики,
В.Н. Макаров, студент каф. ФЭ,
А.В. Медовник, доцент каф. физики
г. Томск, ТУСУР, andrykazakov@gmail.com

Одними из основных параметров плазменных источников электронов являются максимальные ток (плотность тока) пучка и энергия электронов [1], которые зависят от электрической прочности ускоряющего промежутка и типа используемого разряда, формирующего эмиссионную плазму. Использование дугового разряда для генерации эмиссионной плазмы в импульсном форвакуумном источнике электронов позволило увеличить максимальные ток разряда и его длитель-

ность [2]. Однако предельные параметры форвакуумного плазменного источника на основе дугового разряда ограничены электрической прочностью ускоряющего промежутка, что обусловлено ионизационными процессами, которые в форвакуумном диапазоне давлений протекают гораздо интенсивнее, чем в традиционном для электронно-лучевых источников диапазоне $p < 10^{-1}$ Па. Электрическая прочность ускоряющего промежутка в форвакуумном диапазоне давлений исследовалась для плазменных источников непрерывного электронного пучка [3], а также для источников импульсного электронного пучка небольшого радиуса (менее 10 мм) с током пучка не более 10 А [4]. В то же время для плазменных широкоапертурных источников, генерирующих импульсные сильноточные электронные пучки в форвакуумном диапазоне давлений, данный вопрос изучен недостаточно.

В связи с этим цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния длительности разрядного импульса на электрическую прочность ускоряющего промежутка форвакуумного широкоапертурного плазменного источника электронов.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Исследования осуществлялись с использованием широкоапертурного форвакуумного импульсного плазменного источника электронов на основе дугового разряда (рис. 1). Плоскопараллельный ускоряющий промежуток источника образован эмиссионной мелкоструктурной сеткой *6*, перекрывающей эмиссионное окно диаметром 90 мм, и сеточным ускоряющим электродом (экстрактором) *7*. Оба электрода изготовлены из нержавеющей стали.

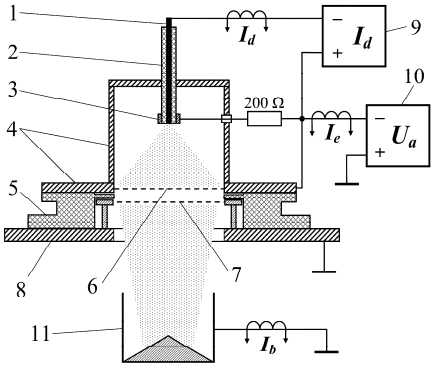


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – катод; *2* – изолятор; *3* – поджигающий электрод; *4* – анод; *5* – высоковольтный изолятор; *6* – эмиссионный электрод (анодная сетка); *7* – ускоряющий электрод; *8* – фланец вакуумной камеры; *9* – импульсный блок питания разряда; *10* – высоковольтный блок постоянного ускоряющего напряжения; *11* – цилиндр Фарадея

Более подробное описание данного форвакуумного плазменного источника представлено в [2]. Импульсный плазменный источник электронов размещался на фланце *8* вакуумной камеры, откачка которой осуществлялась только механическим насосом. Давление, которое

во всех экспериментах составляло p = 8 Па, регулировалось непосредственной подачей рабочего газа (воздух) в вакуумную камеру.

Питание форвакуумного источника электронов осуществлялось импульсным блоком питания разряда *9* и высоковольтным блоком постоянного ускоряющего напряжения *10*. Эксперименты проводились при постоянном ускоряющем напряжении U_a = 10 кВ. Частота следования импульсов составляла 0,1–0,5 Гц. Измерение токов I_d разряда и I_e эмиссии осуществлялось трансформаторами тока (поясами Роговского) в соответствующих электрических цепях. Измерение тока пучка осуществлялось цилиндром Фарадея *11* и трансформатором тока.

Результаты экспериментов и их анализ. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы токов I_d разряда, I_e эмиссии и I_b пучка. За ток пучка бралось значение амплитуды тока, усредненное по импульсу. В качестве максимального (предельного) тока I_{bm} пучка принималось значение тока пучка, при котором количество пробоев ускоряющего промежутка не превышало 10 % от общего числа импульсов. Зависимость максимального тока I_{bm} пучка от длительности τ_d разрядного импульса представлена на рис. 3.

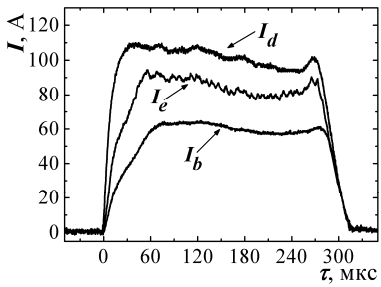


Рис. 2. Типичные осциллограммы токов I_d разряда, I_e эмиссии и I_b пучка

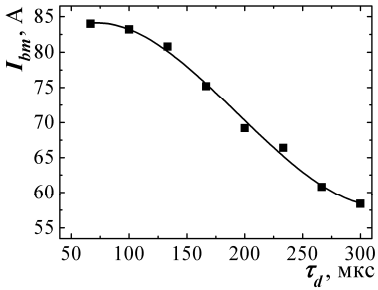


Рис. 3. График зависимости максимального тока I_{bm} пучка от длительности τ_d разрядного импульса (U_a = 10 кВ, p = 8 Па)

Как показали исследования, увеличение длительности τ_d разрядного импульса приводит к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка, что проявляется в уменьшении максимального тока I_{bm} электронного пучка (рис. 3). Поскольку в экспериментах длительность τ_d импульсов составляла от десятков до сотен микросекунд, то на электрическую прочность ускоряющего промежутка плазменного источника оказывают влияние не только ионизационные процессы, но и, по-видимому, относительно медленные тепловые процессы. В качестве теплового процесса может выступать нагрев электродов и

элементов электрической изоляции ускоряющего промежутка источника, обусловленный обратным ионным потоком в сторону эмиссионного электрода, который возникает вследствие ионизации рабочего газа электронным пучком.

Заключение. Экспериментальные исследования показали, что увеличение длительности разрядного импульса приводит к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка форвакуумного импульсного плазменного источника электронов. Снижение электрической прочности ускоряющего промежутка, приводящее к уменьшению максимального тока пучка, обусловлено не только ионизационными процессами, но и, по-видимому, тепловыми процессами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00224 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с.

2. *Казаков А.В., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М.* Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов на основе дугового разряда // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 50–53.

3. *Бурдовицин В.А., Гореев А.К., Климов А.С. и др.* Расширение рабочего диапазона форвакуумных плазменных источников электронов в область более высоких давлений // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, вып. 8. С. 62–66.

4. *Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Окс Е.М.* Формирование импульсного электронного пучка в системе с плазменным катодом в форвакуумной области давлений // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53, №. 2. С. 27–32.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

К.В. Короткова, студентка каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ

г. Томск, ТУСУР, klavdiya_95k@mail.ru

Проект ГПО ФЭ-1203 «Спектральные методы анализа тонких диэлектрических пленок»

Современный мир невозможно представить без миниатюрных полупроводниковых приборов, в том числе и без приборов, излучающих свет. Одной из важнейших характеристик светодиодных электроизделий является цветовая температура. Именно от нее зависит то, насколько комфортно мы ощущаем себя в интерьере, освещаемом свето-

диодными источниками света, а также их способность передавать реальные цвета физических объектов, освещаемых этими источниками.

Целью проведения данной работы является исследование фотометрических характеристик светодиодных ламп. Фотометрические характеристики необходимы для определения качества полупроводниковых источников света и полезности их светового излучения.

В данной работе были исследованы миниатюрные полупроводниковые лампы ЛПМ 26 производства ОАО НИИПП, предназначенные для замены ламп накаливания типа МН 26-012. Основные типовые параметры исследуемых источников света: номинальное напряжение питания 26 В, потребляемый ток 0,02 А, световой поток 12 лм, рабочий диапазон температур от –60° до +50 °С. Основными преимуществами полупроводниковых ламп являются малое энергопотребление и большой срок службы – до 50000 ч.

Рис. 1. Внешний вид полупроводниковых ламп ЛПМ 26

Измерения были проведены с помощью высокочувствительного оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048.

В ходе работы были измерены интенсивность, цветовая температура, полуширина спектра полупроводниковых ламп белого свечения с разной цветовой температурой. В процессе измерения производился нагрев корпуса лампы от комнатной температуры до 100 °С.

На рис. 2 изображена зависимость цветовой температуры от температуры корпуса лампы. Из зависимости следует, что увеличение температуры корпуса лампы приводит к увеличению цветовой температуры и ее значения переходят в область более холодного белого света. Наиболее комфортное для человека излучение – солнечный свет – имеет цветовую температуру порядка 2800–3500 К.

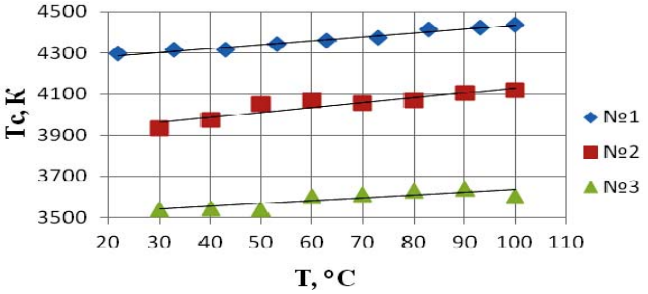


Рис. 2. Зависимость цветовой температуры от температуры корпуса

В результате измерений также была получена температурная зависимость интенсивности (рис. 3), из которой видно, что интенсивность одной лампы вследствие повышения температуры увеличивается, а двух других – уменьшается. Это объясняется различием люминофорных покрытий, используемых в лампах. Люминофор оказывает непосредственное воздействие на фотометрические характеристики и цветопередачу источников света. В частности, цветопередача зависит от толщины и равномерности нанесенного слоя люминофора.

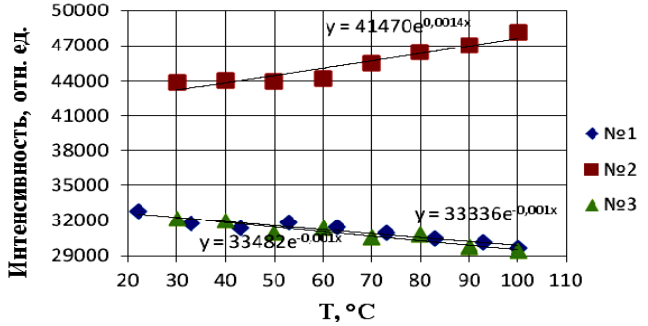


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности свечения ламп

Проведенные исследования показали, что фотометрические характеристики полупроводниковых источников света изменяются с повышением температуры окружающей среды. Цветовая температура ламп увеличивается и переходит в область холодного белого света, а изменение интенсивности обуславливается люминофорным покрытием.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды / пер. с англ. под редакцией А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

2. *Никифоров С.Г.* Температура в жизни и работе светодиодов. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2006. №1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ФОТОРЕЗИСТЕ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.А. Лысенко, аспирант каф. БИС,
Д.Д. Зыков, доцент, директор НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа, к.т.н.
Научный руководитель Р.В. Мещеряков, проф., проректор
по научной работе и инновациям ТУСУРа, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, Caladenia92@gmail.com

Целью работы является исследование оптических эффектов в тонких фоторезистивных пленках, возникающих при экспонировании, а также изучение возможностей моделирования для оптимизации параметров процесса фотолитографии и сокращения времени проведения экспериментов.

Рассматривая волновые процессы при экспонировании фоторезиста (ФР), следует прежде всего обратить внимание на такие явления, как отражение, дифракция и интерференция света. Данные оптические явления приводят к ухудшению качества получаемого изображения и существенно ограничивают возможности фотолитографии, часто являясь препятствием к внедрению новых технологических методов (например, проекционной фотолитографии с использованием монохроматического излучения). Особое влияние оказывает интерференция света, являясь причиной возникновения таких нежелательных эффектов, как стоячие волны, а также нелинейной зависимости дозы экспонирования от толщины резиста (колебательные кривые).

Стоячие волны – это периодические колебания интенсивности излучения по глубине пленки фоторезиста, возникающие в результате интерференции падающих и отраженных от границы раздела фоторезист–подложка световых лучей (лучи I_1 и I_3 на рис. 1). В случае очень тонких пленок и подложки с высоким коэффициентом отражения интенсивность данных лучей становится соизмеримой, что приводит к перераспределению интенсивности излучения в слое фоторезиста и вызывает послойное усиление и ослабление экспозиции, т.е. имеют место чередующиеся максимумы (пучности колебаний) и минимумы (узлы колебаний). Данный эффект приводит к неравномерному засвечиванию фоторезиста по толщине и впоследствии к образованию волнистых стенок проявленного профиля резиста. Таким образом фоторезист возле подложки может оказаться недоэкспонированным или переэкспонированным, что повлияет на размер элементов в резистивной маске. Широко распространенными методами борьбы со стоячими волнами являются выбор оптимальной толщины резиста, применение антиотражающих покрытий и постэкспозиционная термообработка [1, 2].

Кроме того, существует другой класс смежных оптических эффектов, обусловленных интерференцией света в пленке. Данные явления приводят к нелинейной зависимости дозы экспонирования, необходимой для полной засветки резиста, от толщины резиста и обычно описываются с помощью колебательных кривых. Гармонический характер данной зависимости объясняется конструктивным или деструктивным действием интерференции (лучи I_2 и I_3 на рис. 1) и изменением количества поглощенного пленкой излучения. Негативным последствием такого эффекта является большой разброс критического размера в результате относительно небольших изменений толщины фоторезиста. Методы борьбы с данным явлением аналогичны описанным выше, за исключением постэкспозиционной тепловой обработки.

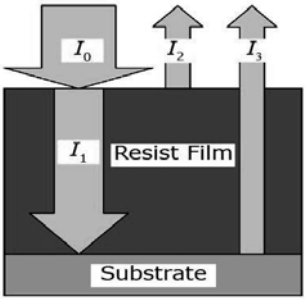


Рис. 1. Интерференция в пленке

Таким образом, возникающие в результате интерференции оптические эффекты значительно усложняет контроль точного воспроизведения размеров элементов в фоторезисте и должны быть учтены при проведении фотолитографии.

Для минимизации данных оптических эффектов на практике необходимо подобрать оптимальные материалы и параметры технологического процесса фотолитографии, и применение средств приборно-технологического моделирования позволяет в значительной степени сократить многочисленные эмпирические эксперименты.

Широкие возможности для моделирования всех этапов фотолитографии предоставляет программный пакет Silvaco TCAD [3]. Процесс включает в себя следующие этапы:

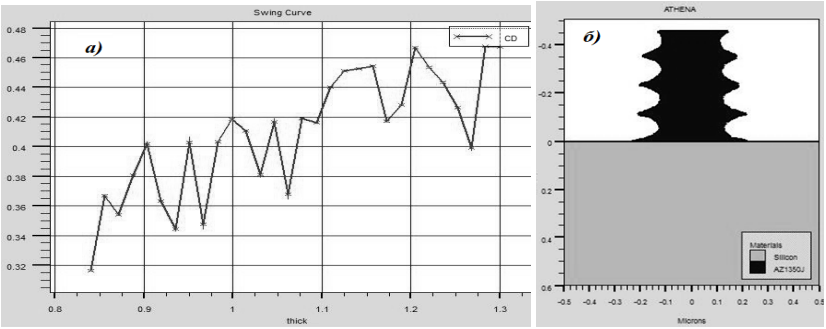
1. Расчет распределения интенсивности излучения на поверхности резистивной пленки.

2. Моделирование экспонирования с учетом сведений о распространении света, оптических явлениях в пленке, а также о входящем в состав резиста фотоактивном компоненте и его поведении при воздей-

ствии актиничного света. Результатом данного этапа является скрытое изображение в резисте.

3. Моделирование проявления как изотропного процесса травления, в котором скорости травления по различным направлениям определяются скрытым изображением, рассчитанным ранее.

На рис. 2, *а* и *б* представлены результаты моделирования фотолитографии в программном пакете Silvaco TCAD с учетом оптических эффектов, возникающих в пленке резиста. Для этого в модель были заложены технологические параметры, такие как тип и толщина резиста, доза экспонирования, длина волны излучения и др.



а *б*

Рис. 2. Результаты моделирования фотолитографии:
а – колебательная кривая E_0 от толщины ФР; *б* – стоячие волны в ФР

Таким образом, используя программный пакет для приборно-технологического моделирования, можно минимизировать влияние оптических эффектов в резистивной пленке без многочисленных и трудоемких эмпирических исследований, в том числе выбрать необходимое антиотражающее покрытие, найти оптимальную толщину фоторезиста, температуру и время задубливания и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению № 14.577.21.0204.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Макарчук В.В., Родионов И.А., Цветков Ю.Б.* Конспект лекций по курсу «Методы литографии в инженерии». М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 84 с.

2. *Беднарж Б., Ельцов А.В., Заховал Я.* Светочувствительные полимерные материалы / под ред. А.В. Ельцова. Л.: Химия, 1985. 296 с.

3. *Официальный* сайт Silvaco [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.silvaco.com (дата обращения: 08.03.2016).

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА p–n-ПЕРЕХОДА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А.П. Молева, Р.А. Соколова, студентки каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, moleva.asya@rambler.ru, rad77mila@gmail.com

В практике изготовления *p–n*-переходов на кремниевых пластинах существует ряд методов, такие как диффузия, эпитаксия и ионная имплантация.

Наибольшие успехи в области меза-эпитаксиальной технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем были достигнуты ионной имплантацией. Именно с ионной имплантацией в значительной степени связано бурное развитие микроэлектроники в последние десятилетия.

Преимуществом ионной имплантации по сравнению с вышеперечисленными методами формирования *p–n*-перехода является:

− то, что процесс не требует нагрева пластин и, следовательно, не приводит к изменению параметров ранее сформированных слоёв (за счёт диффузионной разгонки);

− так как ионный пучок перпендикулярен к пластине, размеры легированной области точно соответствуют размерам окна в оксидной маске.

В данной работе были исследованы свойства *p–n*-перехода в зависимости от параметров ионной имплантации бора в кремниевую пластину.

Для реализации поставленной задачи использовались кремниевые пластины 6КЭФ-0,8. При выполнении эксперимента было произведено 4 ионных внедрения на 4 различных кремниевых пластинах.

Был произведен контроль параметров легированного слоя, а именно поверхностного сопротивления (четырехзондовым методом), глубины залегания *p–n*-перехода и его коэффициента неидеальности. А также была измерена величина добротности на уже изготовленных варикапах по данным структурам.

В настоящей работе для определения глубины залегания *p–n*-перехода используется метод шарового шлифа. В образце кремния металлическим шаром производится вышлифовка углубления, которое пересекает границу *p–n*-перехода. Для измерения глубины залегания *p–n*-перехода использовался метод химического окрашивания, действующий на область одного типа проводимости и не оказывающие влияние на область другого типа проводимости.

В настоящей работе использовался избирательный травитель, состоящий из концентрированной плавиковой кислоты с добавлением приблизительно 0,1% азотной кислоты. При попадании этого травите-

ля на шлиф области *p*-типа темнеют, а цвет областей *n*-типа остается неизменным.

Для выявления коэффициента неидеальности использовался графический метод определения, а именно по измеренной вольт-амперной характеристике изготовленного диода. Измерения проводились на установке KEITHLEY 2410.

Для определения величины добротности использовалась установка AGILENT E4991A ВЧ LRC.

Полученные экспериментальные данные представлены в таблице.

Результаты эксперимента

№	Параметры ионной имплантации бора	x_j	r_S	Q	n
1	E = 60 кэВ; Q = 2 мкКл	≤ 0,58	1036	492	1,3
2	E = 60 кэВ; Q = 10 мкКл	≤ 0,58	578	483	1,32
3	E = 60 кэВ; Q = 1800 мкКл	0,62	33	433	1,28
4	E = 90 кэВ; Q = 40 мкКл	0,82	36	405	1,2

Из таблицы видно, что режимы ионной имплантации не влияют на качество *p–n*-перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карзанов В.В., Королев Д.С.* Ионное легирование кремния: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского, 2013. 21 с.

ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ МЕМРИСТОРНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ

С.Г. Нагайчук, Д.П. Аргунов, П.А. Змановский, студенты
Научный руководитель П.Е. Троян, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, p.e.troyan@mail.ru

В современном мире постоянно возрастает потребность в наращивании вычислительных мощностей как персональных компьютеров, так и специализированных вычислительных комплексов гражданского и военного применения. Применение мемристорных элементов памяти позволит реализовать более эффективные вычислительные системы. Мемристор – это пассивный элемент электроники, ключевой особенностью которого является способность изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от прошедшего через него электрического заряда [1].

Поскольку мемристорные структуры на основе оксида титана представляют большой интерес с практической точки зрения, то необ-

ходимо уделить особое внимание изучению возможности создания мемристорных элементов памяти с использованием различных модификаций данного материала.

Целью данной работы является разработка технологии получения тонких пленок диоксида титана и его соединений, а также получение мемристорных структур, обладающих эффектом памяти.

Экспериментальная часть. В данной работе пленки диоксида титана получались магнетронным распылением [2, 3]. Напыление пленок TiO_2 производилось в атмосфере аргона и кислорода при давлении 10^{-2} мм рт. ст., разрядный ток составлял 300 мА. Толщина полученных пленок ~120 нм. Скорость распыления пленки составляет приблизительно 6 нм/мин.

Пленки TiO_2 с добавкой углерода [3] были так же получены методом магнетронного распыления, при этом источником углерода служат таблетки, равномерно распределённые по площади зоны эрозии и занимающие 30% её поверхности. Напыление производилось в атмосфере аргона и кислорода при давлении 10^{-2} мм рт. ст., разрядный ток составлял 300 мА. Толщина полученных пленок ~120 нм. Скорость распыления пленки составляет приблизительно 6 нм/мин.

Пленки TiO_2 с добавкой алюминия были получены аналогичным методом, что и с добавкой углерода. Напыление производилось так же в атмосфере аргона и кислорода при давлении 10^{-2} мм рт. ст., разрядный ток составлял 300 мА. Толщина полученных пленок ~120 нм. Скорость распыления пленки составляет приблизительно 6 нм/мин.

На стеклянных подложках были сформированы конденсаторные структуры Al-TiO_2-Al, Al-TiO_2(C)-Al и Al-TiO_2(Al)-Al (на каждой подложке располагалось по 20 структур).

С помощью измерителя иммитанса Е7-23 были измерены параметры полученных структур, в частности, электрическое сопротивление, электрическая емкость, тангенс угла диэлектрических потерь. Полученные данные приставлены в таблице.

Следует упомянуть, что структуры на основе TiO_2 с добавкой Al оказались нестабильными. Достаточно большое количество структур имели «закоротки», что подтверждалось высоким тангенсом угла диэлектрических потерь и низким сопротивлением порядка сотен ом.

Как показали результаты измерения вольт-амперных характеристик, структуры на основе TiO_2 и TiO_2(C) обладают абсолютно линейной зависимостью тока от приложенного напряжения в обеих полярностях. Однако также было установлено, что одна из структур с добавкой алюминия дает неоднозначный эффект, который проявляется в том, что при увеличении напряжения ток линейно растет и при достижении некоторого напряжения резко падает практически до нуля, по-

сле чего при смене полярности ток снова линейно растет, а описанный эффект повторяется (рис. 1).

Экспериментальные параметры структур

Параметр		Al-TiO_2-Al	Al-TiO_2(C)-Al	Al-TiO_2(Al)-Al
R, ГОм	мин	0,9	0,14	–
	тип.	1,8	3,7	3,2
	макс	2,6	7,0	–
C, пФ	мин	1,0	1,3	–
	тип.	2,6	2,5	2,3
	макс	5,0	4,8	–
tg δ	мин	0,001	0,04	–
	тип.	0,037	0,12	0,02
	макс	0,060	0,23	–

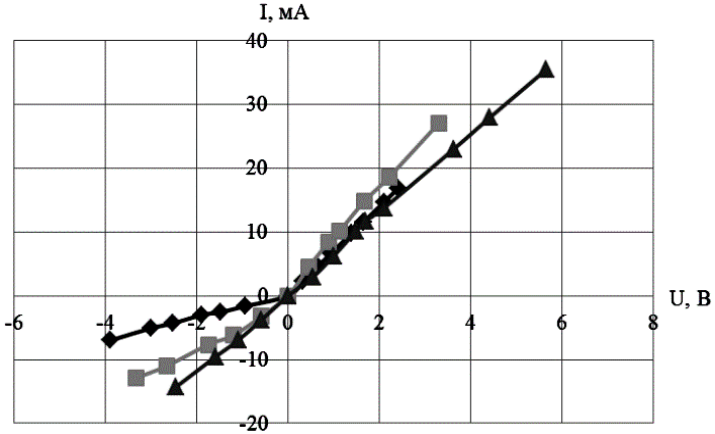


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики структур с TiO_2(Al)

Подобное переключение производилось несколько десятков раз на нескольких МДМ-структурах. Следует заметить, что напряжение, при котором происходит резкое изменение тока, протекающего через МДМ-структуру, не является постоянной величиной для отдельно взятого элемента и изменяется при каждом акте переключения, его типичные значения лежат в диапазоне от 2 до 6 В.

Заключение. В ходе проделанной работы был получен ряд экспериментальных образцов на основе материалов, состоящих из диоксида титана с добавками углерода и алюминия. С полученных структур были сняты некоторые электрофизические параметры, такие как электрическое сопротивление, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что структуры на основе соединений диоксида титана с добавкой алюминия проявляют потенциал к дальнейшему применению в качестве материала для создания мемристорных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.* The missing memristor found // NATURE. 2008. Vol. 453. P. 80–83.

2. *Балагуров Л.А.* Магнетронное осаждение слоев диоксида титана с диагностикой плазмы высокочастотного разряда методом оптической эмиссионной спектроскопии / Л.А. Балагуров, И.В. Кулеманов, А.Ф. Орлов, Е.А Петрова // Материалы электронной техники. 2011. №1. С. 4–7.

3. *Сахаров Ю.В., Троян П.Е.* Исследование пористых пленок диоксида кремния // Доклады ТУСУРа. 2011. №2 (24). С. 77–80.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

И.В. Пилипец, магистрант каф. ФЭ

Научный руководитель Е.Ю. Воробинский, гл. технолог АО «НИИПП»

г. Томск, ТУСУР, azlogor@yandex.ru

В современной электронной технике полупроводниковые приборы играют исключительную роль. В частности, полупроводниковые варикапы используются для изменения резонансной частоты колебательных контуров радиоприемных устройств, а также находят применение в различных генераторах, смесителях и частотных преобразователях для умножения частоты. Основным электрическим параметром, характеризующим мощный полупроводниковый варикап, является пробивное напряжение, существенное влияние на которое оказывают конструкция и технология изготовления прибора.

Целью данной работы является изучение влияния различных конструктивно-технологических методов на пробивное напряжение кремниевых варикапов. В качестве таких методов было рассмотрено применение полевой обкладки и диффузионного охранного кольца в плоскостных и мезаструктурах. Полевая обкладка представляет собой верхний металлический контакт, площадь которого больше площади *p–n*-перехода, нанесенный поверх защитного диэлектрика. Технология диффузионного охранного кольца заключается в увеличении глубины диффузионного p+ слоя на границе *p–n*-перехода [1].

В ходе данной работы было проведено моделирование процессов пробоя диодов в различных конструктивных исполнениях в системе

TCAD Synopsys [2]. На рис. 1 представлена структура в плоскостном исполнении без применения дополнительных технологических решений, направленных на увеличение напряжения пробоя. Рассчитано значение напряжения пробоя в структуре $U_{пр} = 57$ В при концентрации примеси в базе $N = 3 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$.

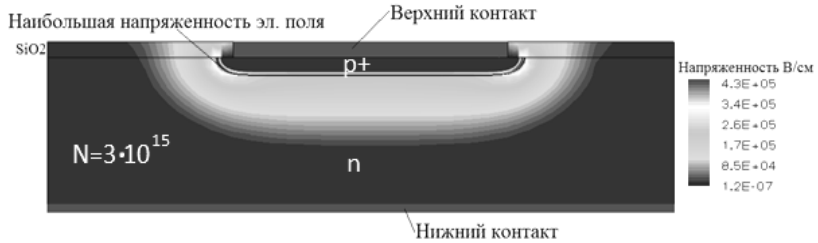


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля в структуре при напряжении 57 В

В данной структуре пробой происходит по краю диффузионной области, где напряженность электрического поля намного выше, чем в плоскости, и составляет $E = 4{,}3 \cdot 10^5$ В/см, что отображено на рис. 1. В то же время материал с концентрацией примеси $N = 3 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ позволяет получить в плоскости максимальное напряжение пробоя 152 В. Для уменьшения напряженности электрического поля на краю диффузионной области возможно применение диффузионного охранного кольца, такая структура представлена на рис. 2.

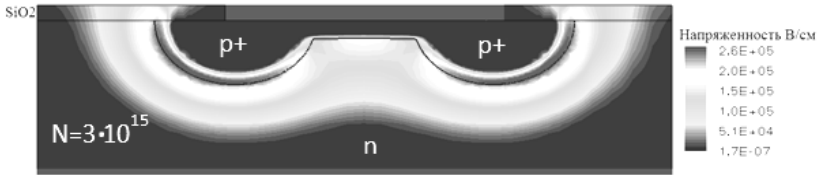


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в структуре с диффузионным кольцом при напряжении 57 В

В данной структуре напряженность электрического поля уменьшается благодаря увеличению радиуса кривизны диффузионной области и составляет $E = 2{,}6 \cdot 10^5$ В/см, что ведет к увеличению напряжения пробоя структуры до 96 В.

Также возможно применение полевой обкладки в мезаструктурах (рис. 3). Данная технология позволяет увеличить напряжение пробоя до 140 В при напряженности электрического поля $E = 1{,}8 \cdot 10^5$ В/см.

По результатам моделирования составлены оптимальные технологические режимы и на их основе получены кремниевые диффузионные варикапы на базе АО «НИИПП». Выполнен анализ полученных ре-

зультатов и проведено сравнение диодов с серийно выпускаемыми образцами. На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики, снятые с экспериментальных образцов.

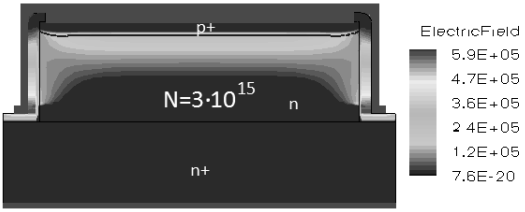


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в мезаструктуре с полевой обкладкой при напряжении 57 В

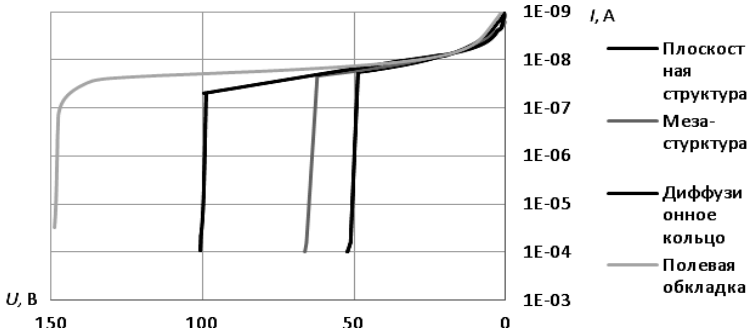


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики экспериментальных образцов

Благодаря использованию диффузионного охранного кольца в плоскостной технологии удалось увеличить пробивное напряжение плоскостных диодов с 50 до 100 В, а применение полевой обкладки в мезадиодах позволило отказаться от проблемной технологии защиты мезы электроизоляционным лаком и повысить пробивное напряжение с 65 до 140 В. Результаты компьютерного моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Результаты работы могут служить основой для внесения изменений в технологический маршрут изготовления варикапов и изменения технологических режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блихер А.* Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / пер. с англ. В.М. Волле и Л.С. Костиной; под ред. И.В. Грехова. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.

2. *Макарчук В.В.* Особенности применения системы технологического моделирования TCAD / В.В. Макарчук, В.М. Курейчик, С.К. Зотов // Инженерный вестник. 2012. № 9 (9). С. 1–7.

ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ОПТИЧЕСКОГО ВЫВОДА СВЕТА ИЗ КРИСТАЛЛА GaN

А.А. Попов, студент каф. ФЭ

Научный руководитель Т.И. Данилина, проф. каф. ФЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, part.94@yandex.ru danti123@mail.ru

В настоящее время одной из основных задач в исследовании полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов является увеличение внешнего квантового выхода светодиода [1].

Внешний квантовый выход излучения светодиодного кристалла определяется двумя основными параметрами – внутренним квантовым выходом η_{int} и коэффициентом оптического вывода h_{extract}.

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \cdot h_{\text{extract}}.$$

Эффект полного внутреннего отражения, заключающийся в локализации света внутри структуры светодиода, снижает вероятность выхода фотонов за пределы полупроводника.

Коэффициент оптического вывода – это отношение числа фотонов, излученных светодиодом (вышедших из кристалла), к числу фотонов, образованных в активной области светодиода в единицу времени (секунду) [2].

Для светодиодных кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур критический угол составляет ~23° (показатели преломления GaN и сапфира соответственно 2,5 и 1,6). Поэтому лишь малая часть фотонов, падающих на границу раздела под углом, лежащим в диапазоне 0÷23°, способна покинуть кристалл.

В настоящее время наиболее эффективными способами преодоления этой проблемы представляются создание рассеивающих свет поверхностей и использование просветляющих оптических покрытий. Оптическая толщина просветляющего покрытия *nd* должна быть равна четверти длины волны, излучаемой кристаллом GaN, т.е. $n_1 d = \lambda/4$, где $\lambda = 455$ нм [3].

Целью данной работы является исследование влияния микрорельефа в просветляющих покрытиях на основе SiO_2 и ITO на коэффициент оптического вывода света.

Для исследования влияния микрорельефа, сформированного в просветляющем покрытии из SiO_2 и ITO с оптической толщиной $\lambda/2$ в программном продукте LEDSimuLight [4], была разработана следующая методика: боковые и нижняя грани кристалла нитрида галлия (показатель преломления $n_{\text{GaN}} = 2{,}5$) закрывались отражающим материа-

лом (рис. 1). В таком случае световыводящей поверхностью является верхняя грань. На верхнюю грань наносилась тонкая плёнка с меньшим, чем у нитрида галлия, показателем преломления (n_{SiO2} = 1,43, n_{ITO} = 1,9), в которой далее формировался микрорельеф различной конфигурации. Излучение в данной структуре возникает в слое нитрида галлия.

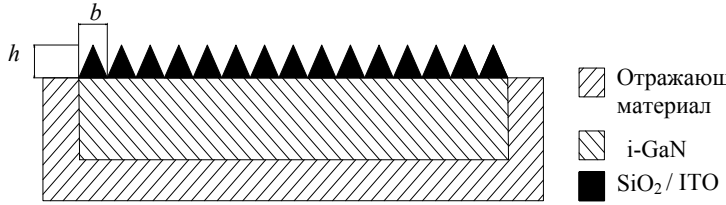


Рис. 1. Структура с микрорельефом в оптическом покрытии

Данный подход позволяет исследовать эффективность вывода света с верхней грани, поскольку учитываются кванты, не испытавшие отражения при прохождении границы активная область – световыводящий слой (GaN). Определяя относительное число квантов, вышедших с верхней грани при различных конфигурациях микрорельефной поверхности, можно оценивать влияние микрорельефа на коэффициент оптического вывода светодиода.

При моделировании плоской структуры без оптического покрытия было получено значение коэффициента оптического вывода $h_{extract}$ = 0,37. Следовательно, из кристалла вышло только 37% всех фотонов, прошедших в световыводящий слой GaN из активной области. Результаты моделирования структур со сплошными просветляющими пленками показывают, что значение коэффициента оптического вывода увеличивается: для пленки SiO_2 значение $h_{extract}$ = 0,41, а для пленки ITO $h_{extract}$ = 0,43.

В процессе моделирования была исследована геометрия рельефа в виде микроострий из SiO_2 и ITO. При проведении эксперимента изменялось соотношение ширины и высоты микроострия *b/h.*

Было установлено, что наибольшим значением коэффициента оптического вывода обладают структуры с микрорельефной поверхностью, где основание острия соизмеримо с его высотой. При уменьшении и увеличении соотношения *b*/*h* значение коэффициента оптического вывода снижается (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что наиболее оптимальное соотношение *b/h* лежит в диапазоне (1÷1,33) и характеризуется максимальным значением коэффициента оптического вывода $h_{extract} \approx$ 51% для просветляющего покрытия из ITO и $h_{extract} \approx$ 45,6% для плёнки из SiO_2.

В результате проведенного исследования была установлена оптимальная геометрия микрорельефа в оптическом покрытии (соотношение длины основания микроострия к его высоте), при которой наблюдается максимальное значение коэффициента оптического вывода.

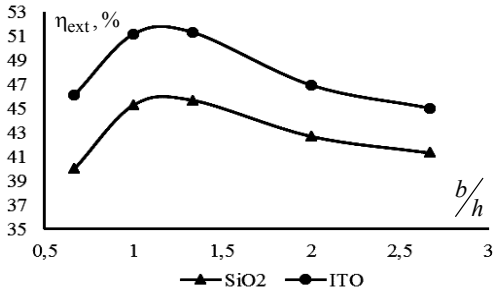


Рис. 2. Зависимость коэффициента оптического вывода от соотношения ширина / высота микроострия

ЛИТЕРАТУРА

1. *Данилина Т.И.* Моделирование коэффициента оптического вывода светодиода на основе GaN при наличии микрорельефа на световыводящей поверхности / Т.И. Данилина, А.А. Попов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2015. №4 (38). С. 83–85.

2. *Шуберт Ф.* Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

3. *Данилина Т.И.* Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2011. №2(24). С. 64–67.

4. *Мухамадеев Р.А., Данилина Т.И.* Программа для проектирования светодиодов с повышенным внешним квантовым выходом «NEMO LED». Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015616575. 17 Апрелья. 2015.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА СЕРЕБРО – ЛАТУНЬ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ-ТРАКТА С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

И.А. Рыбалко, студент каф. ФЭ

Научный руководитель А.Б. Марков, с.н.с. ЛВЭ ИСЭ СО РАН, к.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, ivan.a.rybalko@gmail.com

В настоящее время для формирования проводящих покрытий в устройствах СВЧ-диапазона наиболее широко используются гальванические покрытия, наносимые методом электрохимического осаждения.

Данные покрытия не всегда имеют хорошую адгезию к подложке, кроме того, данный способ нанесения не может обеспечить желаемой шероховатости поверхности. Качественное улучшение характеристик проводящих покрытий возможно при замене гальванических покрытий поверхностными сплавами. Главные достоинства поверхностного сплава, формируемого с помощью электронного пучка, – это наличие переходной области, в которой материал покрытия плавно переходит в материал подложки, что положительно сказывается на его адгезионной прочности, а также высокая гомогенность и низкая шероховатость поверхности, что важно для снижения потерь сигнала в устройствах СВЧ-диапазона [1].

В данной работе приведены результаты сравнительного исследования прохождения СВЧ-сигнала через фильтры с поверхностным сплавом серебро–латунь и гальваническим покрытием из серебра, толщиной 6 мкм.

Прохождения СВЧ-сигнала исследовались на экспериментальных образцах в виде фильтра низких частот (рис. 1), разработанных совместно со специалистами НПФ «Микран». Фильтр состоит из корпуса и крышки, выполненных из латуни ЛС59-1 (59,0% Cu; 39,77% Zn; 0,89% Pb; 0,22% Ni; 0,12% Fe) размерами 54×28×10 и 54×28×2 мм, соответственно. Корпус фильтра содержит четыре прямоугольных полости 13×11 мм глубиной 8 мм и радиусом скругления 2 мм. На корпусе и крышке фильтров формировался поверхностный сплав серебро–латунь с помощью электронно-пучковой машины «РИТМ-СП» [2]. Процесс формирования поверхностного сплава заключается в чередовании операций магнетронного напыления серебряной пленки на образец и его последующего облучения электронным пучком [3].

Исследование прохождения СВЧ-сигнала проводилось путем измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) с помощью векторного анализатора цепей Р4М-18 на частоте *X*-диапазона СВЧ-излучения, для образцов с поверхностным сплавом серебро–латунь и гальваническим покрытием. Шероховатость поверхности образцов с поверхностным сплавом составляла R_a = 0,6 мкм, а образцов с гальваническим покрытием R_a = 2,9 мкм.

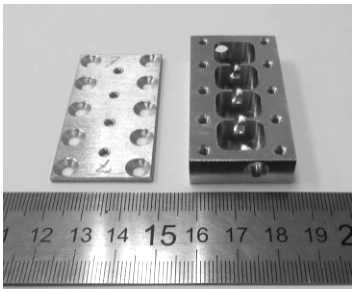


Рис. 1. Образец фильтра с крышкой для исследования прохождения СВЧ-сигнала

На рис. 2 и 3 представлены АЧХ исследуемых фильтров.

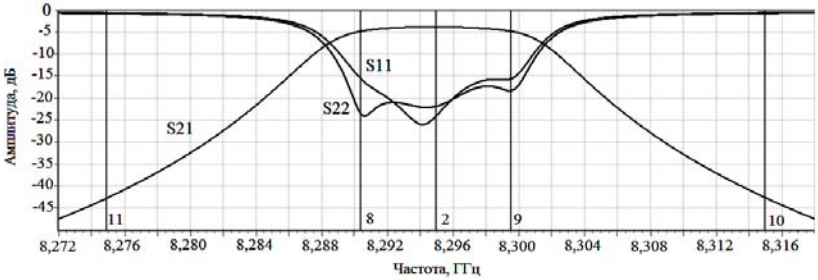


Рис. 2. АЧХ образца с поверхностным сплавом

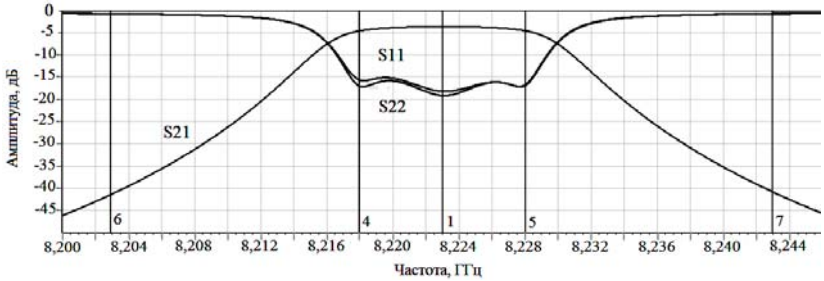


Рис. 3. АЧХ образца с гальваническим покрытием

Параметры S_{11} и S_{22} – комплексные коэффициенты отражения, характеризующие возвратные потери сигнала. Параметр S_{21} – комплексный коэффициент передачи, характеризующий вносимые потери.

Как видно из рисунков, кривые S_{21} для обоих образцов имеют одинаковый вид, но фильтр с поверхностным сплавом обладает лучшим подавлением сигнала вне полосы пропускания до значения –43 дБ (маркеры 10, 11, см. рис. 2), по сравнению с фильтром с гальваническим покрытием, –41 дБ (маркеры 6, 7, см. рис. 3). Полоса пропускания фильтра с поверхностным сплавом по уровню –3,81 дБ составила 8,290–8,300 ГГц (маркеры 8, 9, см. рис. 2). Для фильтра с гальваническим покрытием по уровню 3,6 дБ – 8,218–8,228 ГГц (маркеры 4, 5, см. рис. 3).

Обратные потери (S_{11} – S_{22}) для фильтров с поверхностным сплавом составили от –22,5 до –24,5 дБ, т.е. произошло отражение около 0,5–0,7% полезного сигнала. В фильтрах с гальваническим покрытием потери составили от –17,5 до –19 дБ, т.е. теряется 1,2–1,6% передаваемого сигнала.

Заключение. В результате проведенного измерения частотных характеристик СВЧ-фильтров было установлено, что *S*-параметры фильтров с поверхностным сплавом имеют определенные преимуще-

ства перед фильтрами с гальваническим покрытием: фильтры со сформированным поверхностным сплавом обладают на единицы процентов меньшими потерями сигнала и лучшим подавлением вне полосы пропускания. Поскольку адгезия поверхностного сплава значительно лучше, чем у гальванического покрытия, нанесенного электрохимическим осаждением, можно предположить, что элементы СВЧ-тракта со сформированным поверхностным сплавом смогут обеспечить более продолжительный срок службы изделия. Таким образом, формирование поверхностных сплавов может быть альтернативным способом нанесения покрытий на поверхности СВЧ-трактов и фильтров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Яковлев Е.В., Марков А.Б., Петров В.И.* Свойства высокопроводящего поверхностного сплава, сформированного на образцах, имитирующих элементы СВЧ-тракта // Изв. высш. учеб. завед. Физика. 2014. № 10–3. С. 178–181.

2. *Марков А.Б., Миков А.В., Озур Г.Е., Падей А.Г.* Установка РИТМ-СП для формирования поверхностных сплавов // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 122–126.

3. *Яковлев Е.В, Марков А.Б., Петров В.И.* Формирование высокопроводящего поверхностного сплава с помощью низкоэнергетического сильноточного электронного пучка // Изв. высш. учеб. завед. Физика. 2014. № 10–3. С. 332–336.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС КЛЮЧА

Т.В. Сигута, магистрант каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, аспирант каф. ФЭ

г. Томск, ТУСУР, sigytik@mail.ru

Немаловажным фактором разрабатываемой технологии является возможность воспроизведения геометрических размеров заложенной модели. Отклонение геометрических размеров прибора от заложенных размеров при расчете в процессе эксплуатации повлияет как на электрические характеристики, так и на его надежность.

Целью данной работы является анализ технологии изготовления МЭМС ключа и выявления критичных участков.

Результаты работы. Технологию изготовления МЭМС ключа можно разделить на три этапа: формирование сигнальной линии и заземляющих электродов (*1*), формирование управляющих электродов (*2*) и формирование подвижной части ключа (*3*). Подвижной частью ключа является балка.

Процесс формирования балки заключается в нанесении трехслойной фоторезистивной маски, её поэтапном экспонировании, напыле-

нии металлизации и удалении резиста методом «взрыва». Для формирования балки используется «жертвенный» слой. В качестве «жертвенного» слоя используется фоторезист. Нанесение фоторезиста осуществляется методом центрифугирования, в результате чего происходит частичная планаризация поверхности. Максимальная толщина жертвенного слоя ограничена толщиной зазора между управляющим электродом и балкой. Увеличивая зазор, происходит повышение управляющего напряжения.

Эксперимент проводился на полупроводниковой подложке GaAs, в качестве жертвенного слоя использовался фоторезист m-AP 1225 с режимами нанесения 2500 об/мин, что позволяет получать резист толщиной 2 мкм на ровной поверхности [1]. Предварительно на подложке были сформированы металлические контакты сигнальной линии и заземляющих электродов толщиной 2 мкм, и контакт управляющего электрода толщиной 1 мкм. После формирования балки переключателя резистивная маска была удалена. На рис. 1 представлена фотография балки в области пересечения металлических контактов.

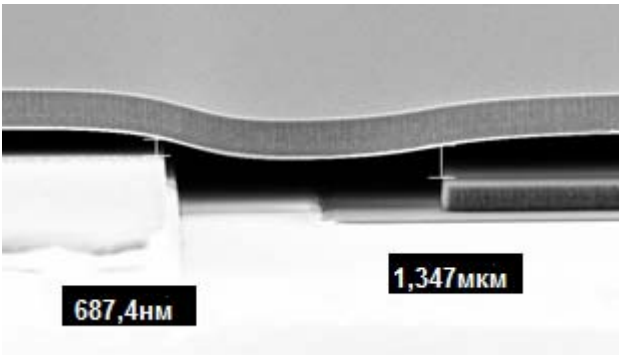


Рис. 1. Микрофотография балки в области пересечения металлических контактов

Из рис. 1 видно, что наименьший зазор наблюдается в области пересечения балки с заземляющим электродом МЭМС ключа. Толщина зазора в этой области составила 687 нм, что является критическим и в дальнейшем может повлиять на параметры МЭМС ключа.

На рис. 2 представлена микрофотография воздушного моста, входящего в конструкцию МЭМС ключа.

Из рис. 2 видно, что воздушный мост на краю металлизации имеет «крылья», что может негативно отразиться на характеристиках ключа. Данный эффект обусловлен процессами проявления верхнего слоя при формировании фоторезистивной маски.

На рис. 3 представлена фотография управляющего электрода с нанесенным диэлектрическим слоем.

На основании рис. 3 можно сделать вывод, что использование метода электронно-лучевого напыления диэлектрика позволяет получать плёнки с комфортным осаждением.

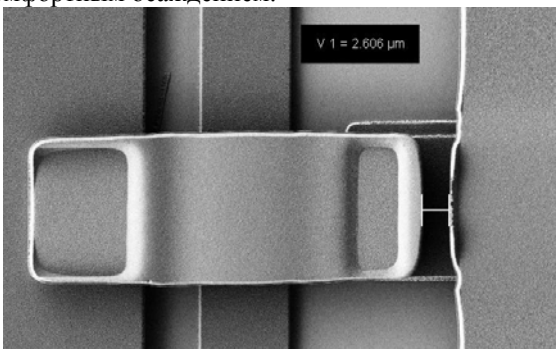


Рис. 2. Микрофотография воздушного моста

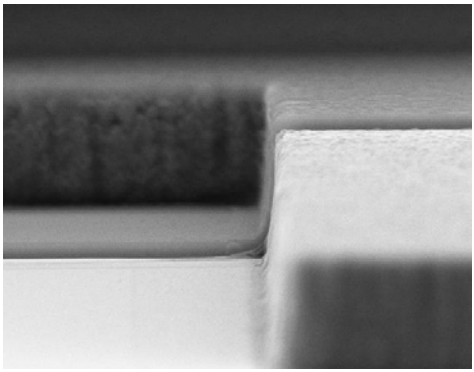


Рис. 3. Микрофотография управляющего электрода
с тонкой пленкой диэлектрика

Для решения проблемы образования «крыльев» необходимо провести корректировку топологии, а также осуществлять промежуточный контроль при проявлении верхнего слоя резистивной маски. Для увеличения зазора между заземляющим электродом необходимо использовать дополнительный жертвенный слой, позволяющий сгладить перепад высоты в области заземляющего электрода.

Заключение. В работе проведен анализ технологии изготовления МЭМС ключа. Выявлены критические этапы используемой технологии и установлены необходимые контрольно-измерительные точки. Проведена оценка используемых методов получения тонких пленок при формировании МЭМС ключа.

Авторы работы выражают благодарность коллективу научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ФГБОУ ВПО ТУСУРа и АО «НПФ «Микран» за помощь при выполнении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта У.М.Н.Н.И.К. Фонда содействия развитию малых форм предприятия в научно-технической сфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. *MicroChem* Corp [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://microchem.com/Prod-LithographyOverviewPosNeg.htm (дата обращения: 20.03.2016).

БЫСТРЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К AlGaN/GaN HEMT НА ПОДЛОЖКАХ SIC

П.Е. Сим, аспирант каф. ФЭ, инженер-технолог,
Л.Э. Великовский, гл. технолог НПК «Микроэлектроника»,
В.В. Скубо, инженер-технолог, студент каф. ФЭ,
Ю.Н. Поливанова, инженер-технолог
Научный руководитель П.Е. Троян, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.
г. Томск, АО «НПФ «Микран», ТУСУР, simpe@micran.ru

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN позволяют получать наилучшее среди полупроводниковых СВЧ-приборов сочетание плотности выходной мощности, КПД и усиления. Уменьшение сопротивления омических контактов к истоку и стоку позволяет улучшить частотные и мощностные характеристики транзисторов [1, 2]. В ходе операции быстрого термического отжига (БТО) металлизации контакта происходит перемешивание слоев металлизации контакта с образованием соединений Ti-Al, Au-Al, Mo-Al, Al_2O_3, TiN. Азот диффундирует из GaN на поверхность, а его вакансии в GaN, являясь донорными центрами в GaN, делают барьер Шоттки туннельно прозрачным для протекания тока [3].

В работе [4] был выбран оптимальный ($R_c \leq 0{,}35$ Ом·мм) состав металлизации Ti/Al/Mo/Au, использовавшийся в дальнейших исследованиях. В настоящей работе исследованы особенности применения БТО для формирования контактов к HEMT-гетероструктурам, изготовленных на различных подложках и имеющих разную площадь.

Эксперименты показали, что при формировании омических контактов к GaN HEMT, выращенных на подложках SiC, величина R_c выше на 40–70%, чем в GaN HEMT на подложках Si, Al_2O_3 или маленьких кусках GaN/SiC. Очевидно, что это связано с иной динамикой ра-

зогрева подложки карбида кремния. В то же время даже кратковременный перегрев образца на 30–40 °С также приводит к увеличению сопротивления контакта.

Решение проблемы потребовало значительного увеличения мощности галогенных ламп установки БТО в момент разогрева образцов в сочетании с тщательной калибровкой динамики разогрева с использованием пирометра и термопары, а также изменение используемой для отжига оснастки установки БТО. Были найдены оптимальные режимы отжига для GaN HEMT на подложках SiC диаметром 2″, 3″ и 100 мм.

Было проведено также исследование влияния скорости разогрева на сопротивление контакта. Для этого проводился нагрев с разной скоростью маленьких (площадью до 15 кв. мм) образцов GaN/SiC, инерционностью разогрева которых можно пренебречь. Результаты показали, что нагрев должен происходить за время не более чем 10 с (рис. 1). Внешний вид полученных в разных режимах контактов также заметно отличался, что позволяет в дальнейшем использовать полученные данные для анализа отклонений в технологическом процессе формирования контактов.

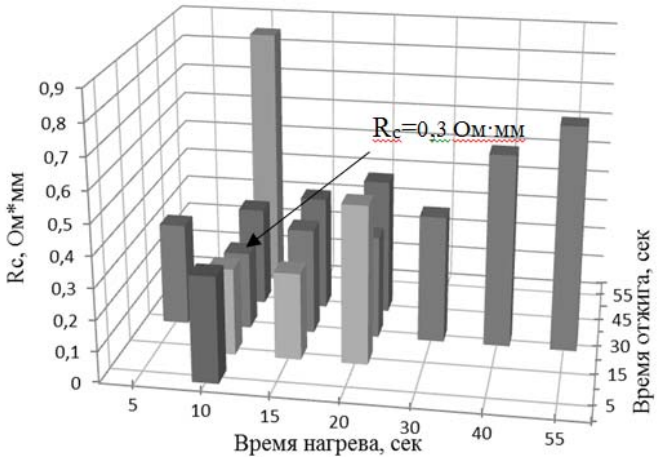


Рис. 1. Зависимость контактного сопротивления от времени нагрева и отжига при 800 °С

Таким образом, в ходе оптимизации режима БТО на пластинах GaN на SiC, отожженных при T = 800 °С, $t_{нагрева}$ = 10 с, $t_{отжига}$ = 30 с, удалось получить омические контакты с $R_c \leq 0{,}3$ Ом·мм и гладкой морфологией поверхности (рис. 2).

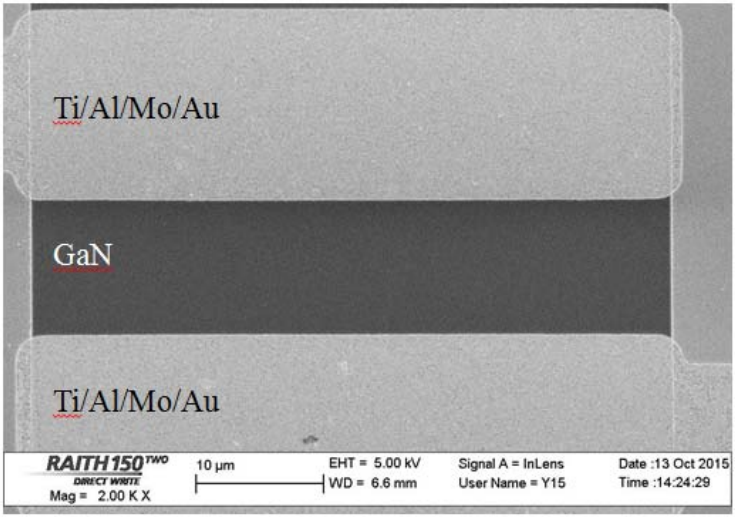


Рис. 2. Внешний вид Ti/Al/Mo/Au после БТО при $T = 800$ °C, $t_н = 10$ с, $t_{отж} = 30$ с

Разработанный режим отжига был оптимизирован для GaN на Si, SiC, Al_2O_3 и позволил существенно снизить величину контактного сопротивления. Результаты данных исследований используются при изготовлении мощных СВЧ-транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Selvanathan D.* Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / D. Selvanathan, F.M. Mohammed, A. Tesfayesus, I. Adesida // Journal of Vacuum Sceience & Technology B. New York. 2004. Vol. 22, №5. P. 2409–2417.

2. *Bright A.N.* Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaN/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy / A.N. Bright, P.J. Thomas, M. Weyland, D.M. Tricker, C.J. Humphreys, R. Davies // Journal of Applied Physics. New York. 2001. Vol. 89, №6. P. 3143–3151.

3. *Xin H.P.* Optimization of AlGaN/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance / H.P. Xin, S. Poust, W. Sutton, D. Li et al. // CS Mantech conference (Beaverton). 2010. №9. P. 149–152.

4. *Великовский Л.Э.*, Сим П.Е. / Оптимизация омических контактов к AlGaN/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов // Доклады ТУСУРа. Томск, сент. 2014 г. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2014. Ч. 3(33). С. 66–69.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ Au-Al НА КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДКАХ КРИСТАЛЛА И ТРАВЕРСОВ ВНЕШНИХ ВЫВОДОВ

Д.В. Синельников, магистрант каф. ФЭ

Научный руководитель В.В. Вавилов, нач. испытательно-технического центра АО НПЦ «Полюс»

г. Томск, АО НПЦ «Полюс», dimon.2d@mail.ru

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС для создания межэлементных соединений на кристалле широко используется алюминиевая разводка. Для создания внутренних соединений между контактными площадками на кристалле и корпусе прибора применяются соединения из золотой или в большинстве случаев из алюминиевой проволоки. По мере возрастания степени интеграции разработчики больших и сверхбольших ИМС вынуждены переходить на многоуровневую разводку. Внутренние выводы из золотой проволоки присоединяются к контактным площадкам кристалла термокомпрессионной сваркой при температуре подложки порядка 300 °С. В процессе термокомпрессии происходит взаимная диффузия свариваемых металлов, в результате чего и создается прочное соединение в месте контакта. В месте контакта одновременно с диффузией происходит и химическая реакция с образованием интерметаллических соединений, или интерметаллидов.

В зависимости от температуры, давления, концентрации золота и алюминия в месте их контакта могут образовываться следующие соединения: $AuAl_2$, AuAl, Au_2Al, Au_5Al_3, Au_4Al, существенно отличающиеся по удельному сопротивлению, коэффициенту термического расширения и твердости.

Области образования данных соединений, представлены на рис. 1.

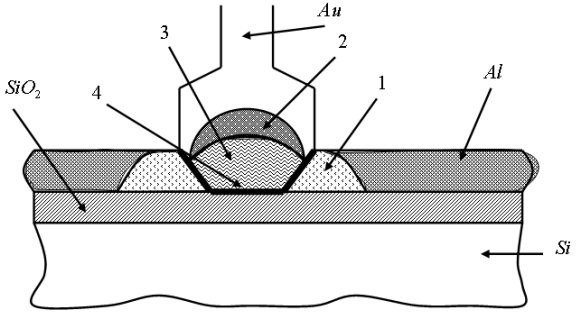


Рис. 1. Структура термокомпрессионного контакта Al-Au:
1 – Au_2Al, *2* – Au_4Al, *3* – Au_5Al_3, *4* – микротрещины

При температурах выше 300 °С образуется чрезвычайно пористое соединение $AuAl_2$, называемое за свой цвет пурпурной чумой. Эта разновидность интерметаллида наиболее опасна при формировании термокомпрессионного соединения. На рис. 2 показана структура контакта золотой проволоки с алюминиевой контактной площадкой. Из рисунка следует, что весь контактный объем состоит из различных модификаций интерметаллидов, распространяющихся на всю глубину алюминиевой пленки. По периметру контакта из-за различия в коэффициентах термического расширения интерметаллических фаз образуются микротрещины.

Процесс понижения прочности металлического контакта за счет образования интерметаллических соединений усугубляется эффектом Киркендалла, суть которого заключается в том, что при контакте различных металлов в месте контакта происходит взаимная диффузия металлов по междоузлиям или вакансиям. При этом в результате различия коэффициентов диффузии в металле с большим коэффициентом диффузии образуются пустоты. В случае контакта золото–алюминий, золото имеет больший коэффициент диффузии в алюминий, поэтому на стороне золота образуются пустоты.

Таким образом, процессы образования слоев интерметаллидов, пустот и трещин по периметру контакта снижают его прочность, увеличивают контактное сопротивление, что, в конечном счете, приводит к постепенному или внезапному отказу контакта, т.е. к его обрыву. Постепенные отказы связаны со снижением быстродействия ИМС из-за увеличения контактного сопротивления, ростом напряжения насыщения транзисторов в импульсном режиме и т.п. Внезапные отказы происходят вследствие обрыва контакта при возникновении механических нагрузок из-за повышенной хрупкости контактного соединения (наличие микротрещин). Кроме того, возможно перегорание контакта при больших плотностях протекающего тока в местах скопления пустот и трещин из-за его сильного разогрева.

На рис. 2 приведены микрофотографии (контакт–контактная площадка). Вывод – из алюминия, контактная площадка – из золота. Метод сварки – ультразвуковая сварка. На данных микрофотографиях наглядно видно образование интерметаллида в сварном соединении, что ведет к деградации и полному отказу контакта. Микрофотографии получены на РЭМ.

В качестве исследуемого образца был выбран эпитаксиально-планарный транзистор PNP-типа, подозрительный на наличие интерметаллидов. Данный образец был исследован на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D. Полученные результаты представлены на рис. 3.

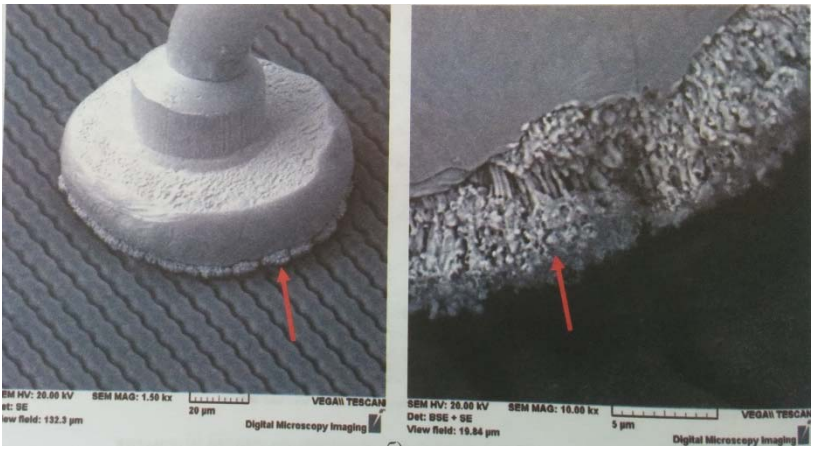


Рис. 2. Наличие интерметаллидов в сварном соединении

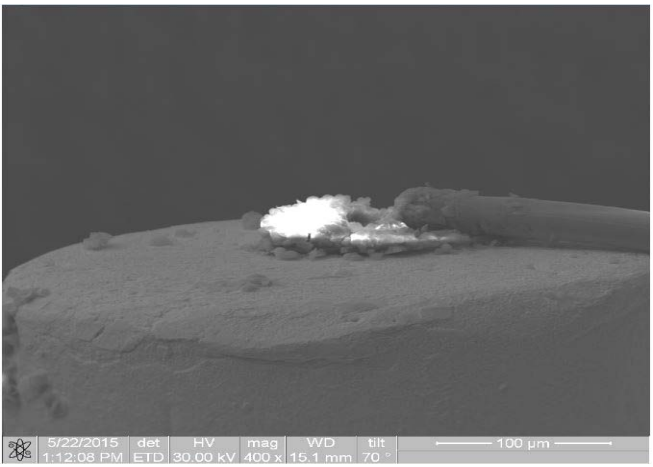


Рис. 3. Наличие коррозии в сварном соединении (траверс внешнего вывода)

На данном рисунке виден накопившийся заряд (белое свечение) на месте сварного соединения, что свидетельствует о токонепроводящем слое, ведущем к деградации контакта. Для исследования природы интерметаллического соединения и выявления элементного состава необходимо получить дифракционные картины. Дифракционная картина данного соединения, представлена ниже на рис. 4.

На основании рис. 5 можно сделать вывод, что катализатором возникновения интерметаллического является наличие кремния (2%) в

алюминиевой проволоке, что говорит о несоответствии материалов при изготовлении данного транзистора. Наличие кислорода в составе не привносит никаких изменений на возникновение нетокопроводящих соединений, несмотря на достаточно большое количество (25%).

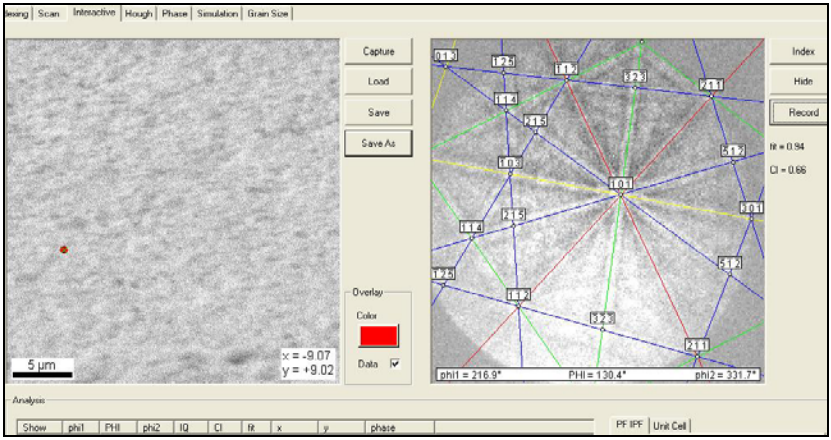


Рис. 4. Дифракция отраженных электронов для определения элементного состава (получена на установке Quanta 200 3D)

Полученный элементный состав представлен на рис. 5.

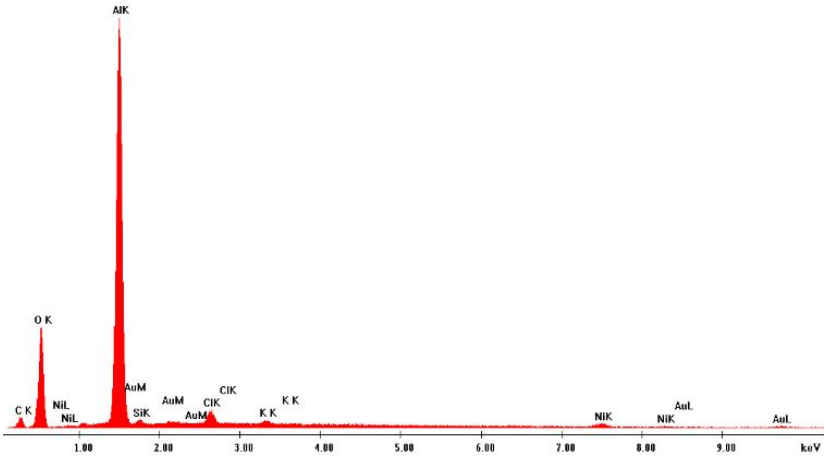


Рис. 5. Диаграмма элементного состава интерметаллиеского соединения

Для дальнейших исследований будет проведён сравнительный анализ алюминиевых проводников с различным содержанием кремния.

Также будет выявлен главный фактор, влияющий на образование интерметаллидов в сварном соединении, что веден к полному отказу и деградации контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белоус А.И., Емельянов В.А.* Основы технологии микромонтажа интегральных схем. М.:ДМК Пресс, 2013. 316 с.

2. *Особенности* использования золота и алюминия в мощных СВЧ-транзисторах, работающих в импульсном режиме // Компоненты и технологии №5’2010 [Электронный ресурс]. Доступ к сайту: http://www.etsc.ru/files/gold_vs_aluminium_in_transistors.pdf

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕНТА ВЫХОДА ГОДНЫХ ПО ДОБРОТНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Р.А. Соколова, А.П. Молева, магистранты

Научный руководитель О.Ю. Малаховский, к.ф.-м.н.

г. Томск, НИИПП, rad77mila@gmail.com

Одним из важнейших параметров полупроводниковых приборов является добротность, которая в значительной мере зависит от структуры полупроводникового материала и определяет процент выхода годных в целом. При условии выбора оптимального материала общий процент выхода годных может достигать 95%, что является экономической эффективностью производства.

Сборка полупроводниковых приборов на примере варикапов осуществляется в несколько этапов: напайка, присоединение выводов, герметизация. Каждый из этапов несет вклад в изменение добротности. Точное определение процента выхода годных по добротности представляет собой задачу с двумя решениями:

1. Для определения процента выхода нужно прибегнуть к статистическому анализу варикапов по добротности в соответствии с запуском кристаллов.

2. Оптимизация на уровне моделирования и прогнозирования поведения кривой распределения добротности варикапов.

Наиболее распространенным методом определения процента выхода годных является статистический анализ, с использованием программы LabVIEW.

В данной работе рассматривается метод статистического анализа добротности в соответствии с защитой кристаллов до герметизации.

Известно, что добротность зависит от степени энергетических потерь в электронно-дырочном переходе и определяется как величина, равная отношению реактивной мощности $P_{реакт} = \omega\ C_б \cdot U_2$ к мощности

потерь $P_{пот}$. Мощность потерь имеет две составляющие: потери в нижнем омическом контакте и потери в *p–n*-переходе [1]. Так как измерения проводятся при 50 МГц, то добротность вычисляется по формуле

$$Q = f \cdot C_б \cdot R_б. \quad (1)$$

С целью анализа и исследования нестабильности добротности варикапов используется высокочастотный анализатор импеданса и параметров материалов Keysight E4991A [2].

Прибор E4991A проводит измерения добротности при 50 МГц в двадцати точках, затем применяет усреднение.

Объектом исследования являются варикапы типа КВ110. Параметры варикапа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры варикапов типа КВ110Б1

C, пФ $U = 4$ В	Q, $U = 4$ В	K_c, U_1/U_2	I_0, мкА / U, В
14,4–21,61	>300	>2,5	<0,5 / 45
Предлагаемые структуры полупроводника			
(5,5–10) КЭФ (0,8–1,4)			

После испытаний диодов, проведенных в тепле при температуре в электрошкафу 125±5°С в течение 50 часов, партии диодов №1 и №9 стали браком по добротности (2 из 10).

Таблица 2

Значения добротности варикапов с защитой ККП2

№ партии	Q, $U = 4$ В	U_{o1}, В	% выхода годных
1	298	45	80
2	574	45	
3	548	45	
4	492	45	
5	501	45	
6	603	45	
7	557	45	
8	619	45	
9	285	45	
10	618	45	

Проблема получения качественного прибора в том, что существует нестабильность создания прибора (этапы технологического маршрута), а также его защиты. Для сравнения были применены другие виды защитных покрытий кристаллов: ВГО, АД9103, силагерм типа А и силагерм типа Б. В табл. 3 представлены значения добротности с соответствующей защитой.

Таблица 3

Значения добротности варикапов с защитами

Наименование	№ партии	Q, $U = 4$ В	U_{01}, В	% выхода годных
ВГО	1	439	45	100
	2	492	45	
	3	436	45	
АД9103	4	522	45	100
	5	396	45	
	6	578	45	
Силагерм А	7	371	45	62
	8	248	45	
	9	285	45	
Силагерм Б	10	531	45	100
	11	727	45	
	12	652	45	

Процент выхода годных максимален при 3 видах защит: ВГО, АД9103, силагерм Б. Для поставки годных приборов заказчику проводятся испытания, одним из таких является испытание на повышенную температуру. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Процент выхода годных при проведении испытаний на повышенную температуру (+125 °С)

Наименование	% выхода годных	Причина возникновения брака
ВГО	89	Необратимое изменение значения параметров – критериев работоспособности
АД9103	71	
Силагерм А	45	
Силагерм Б	95	

Для определения экономической выгоды производству был выбран вариант с герметиком силагерм типа Б по причине наиболее стабильного процента выхода годных после проведения испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соколова Р.А.* Нестабильность добротности полупроводниковых диодов // Технические науки: Проблемы и перспективы: матер. междунар. науч.-практ. конф., 23 августа 2015. Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. С. 33.

2. E4991A. Измеритель RLC [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.jais.ru/e4991.htm (дата обращения: 15.07.2015).

3. *Троян П.Е.* Твердотельная электроника / П.Е. Троян Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006. 335 с.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ФОРВАКУУМНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

А.П. Андрейчик, студент каф. УИ,
Р.И. Степанов, студент, каф. ЭП,
И.Ю. Бакеев, аспирант каф. физики,
А.С. Климов, с.н.с. каф. физики, к.т.н.
Научный руководитель Е.М. Окс, д.т.н., зав. каф. физики
г. Томск, ТУСУР, andreichik94@mail.ru

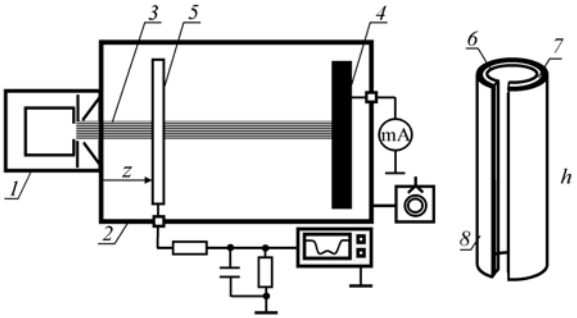
Обработка поверхности диэлектрических материалов с помощью ленточных электронных пучков является уникальным методом позволяющим провести упрочнение, сглаживание, а также сварку протяженных и объемных изделий большой площади. Получить непрерывный электронный пучок ленточной конфигурации в отсутствие продольного магнитного поля и специальной фокусирующей системы позволяет форвакуумный плазменный источник электронов [1]. Использование источника такого рода помогает избежать накопления отрицательного заряда на облучаемой поверхности (компенсация происходит за счет поступления на облучаемую поверхность положительных ионов из пучковой плазмы), а значит, обеспечивает возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов, в числе которых керамика и полимеры. Равномерность обработки напрямую зависит от однородности распределения плотности тока по сечению электронного пучка, на которую, в свою очередь, оказывают влияние неоднородность в распределении концентрации эмиссионной плазмы, а также рассеяние электронов пучка при его распространении в области давлений 5–20 Па.

Цель настоящей работы – исследование однородности распределения плотности тока ленточного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, в зависимости от различных параметров эксперимента.

Методика проведения эксперимента. Схематическое изображение установки, с помощью которой проводились эксперименты, представлено на рис. 1, *а*. Электронный источник *1*, расположенный на фланце вакуумной камеры *2*, представлял собой трехэлектродную систему, состоящую из полого катода, плоского анода и ускоряющего электрода. Подробнее конструкция и характеристики данного источника описаны в [1]. Генерируемый им непрерывный электронный пучок ленточной конфигурации *3* после прохождения вакуумной камеры улавливался коллектором *4*. Рабочая камера откачивалась механическим форвакуумным насосом BocEdwards 80, необходимое давление

обеспечивалось напуском рабочего газа (воздуха) непосредственно в камеру.

Распределение плотности тока в поперечном сечении пучка было получено при равномерном перемещении измерительного зонда *5*, схема которого представлена на рис. 1, *б*. Электроны пучка при прохождении через продольную щель шириной 1 мм собирались внутренней поверхностью полого медного цилиндра *6*, сигнал с которого регистрировался осциллографом. Для предотвращения попадания электронов пучка на внешнюю поверхность цилиндра последняя закрывалась диэлектриком *7* и защитным экраном *8*. Высота приемной части измерительного зонда составляла 15 см. Расстояние *z* от ускоряющего электрода до плоскости движения зонда составляло 5, 20 и 35 см.

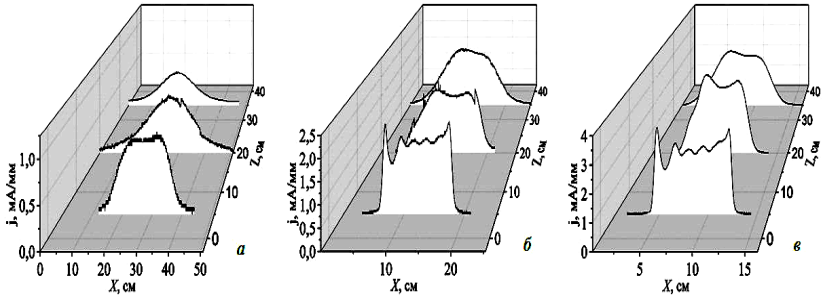


а *б*

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (*а*) и измерительного зонда (*б*):
1 – электронный источник; *2* – вакуумная камера; *3* – электронный пучок;
4 – коллектор; *5* – измерительный зонд; *6* – полый цилиндр; *7* – диэлектрик;
8 – защитный экран

Результаты экспериментов. Распределения плотности тока ленточного электронного пучка при ускоряющих напряжениях 2, 5 и 8 кВ представлены на рис. 2. На вид распределения существенное влияние оказывает ускоряющее напряжение и расстояние от экстрактора. С ростом ускоряющего напряжения, а также с уменьшением расстояния от экстрактора неоднородность в распределении плотности тока усиливается (см. рис. 2). Улучшение равномерности может быть связано с рассеянием электронов пучка на молекулах остаточной атмосферы вакуумной камеры. Рассеяние также способствует расширению пучка, причем при меньших ускоряющих напряжениях оно выражено в большей степени, что объясняется большей частотой соударений электронов с молекулами газа и тем самым отклонением их на большие углы.

Ухудшение равномерности распределения плотности тока вблизи экстрактора при повышении ускоряющего напряжения однозначно связано с изменением распределения концентрации эмиссионной плазмы, что, как отмечено в [2], обусловлено усилением исходной неоднородности плазмы под влиянием обратного ионного потока из ускоряющего промежутка.



а *б* *в*

Рис. 2. Распределения плотности тока ленточного электронного пучка:
а – *Ua* = 2 кВ; *б* – *Ua* = 5 кВ; *в* – *Ua* = 8 кВ. Ток пучка 200 мА. Давление 7,5 Па

Заключение. В работе исследована однородность распределения плотности тока по сечению ленточного электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником, в зависимости от ускоряющего напряжения и расстояния до экстрактора. Показано, что увеличение ускоряющего напряжения приводит к повышению неоднородности пучка вблизи экстрактора. Дальнейшее рассеяние электронов на молекулах газа приводит к улучшению однородности пучка, таким образом, отдаляя зону наиболее равномерной электронно-лучевой обработки от экстрактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Климов А.С.* Формирование ленточного электронного пучка форвакуумным плазменным источником электронов / А.С. Климов, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, Е.М. Окс, А.А. Зенин, Ю.Г. Юшков // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 35–39.

2. *Бурдовицин В.А.* Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров // Приборы и техника эксперимента. 2003. №2. С. 127–129.

ДЕТЕКТОР ПОЛЯ

Е.А. Сваровский, магистр каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, JohnTenniel@outlook.com

В данной статье представлены основы и принципы работы детектора поля, который разрабатывается в рамках написания магистерской диссертации. Принципиальная электрическая схема самого детектора, а также антенного модуля (антенна идет отдельным блоком) представлена на рис. 1.

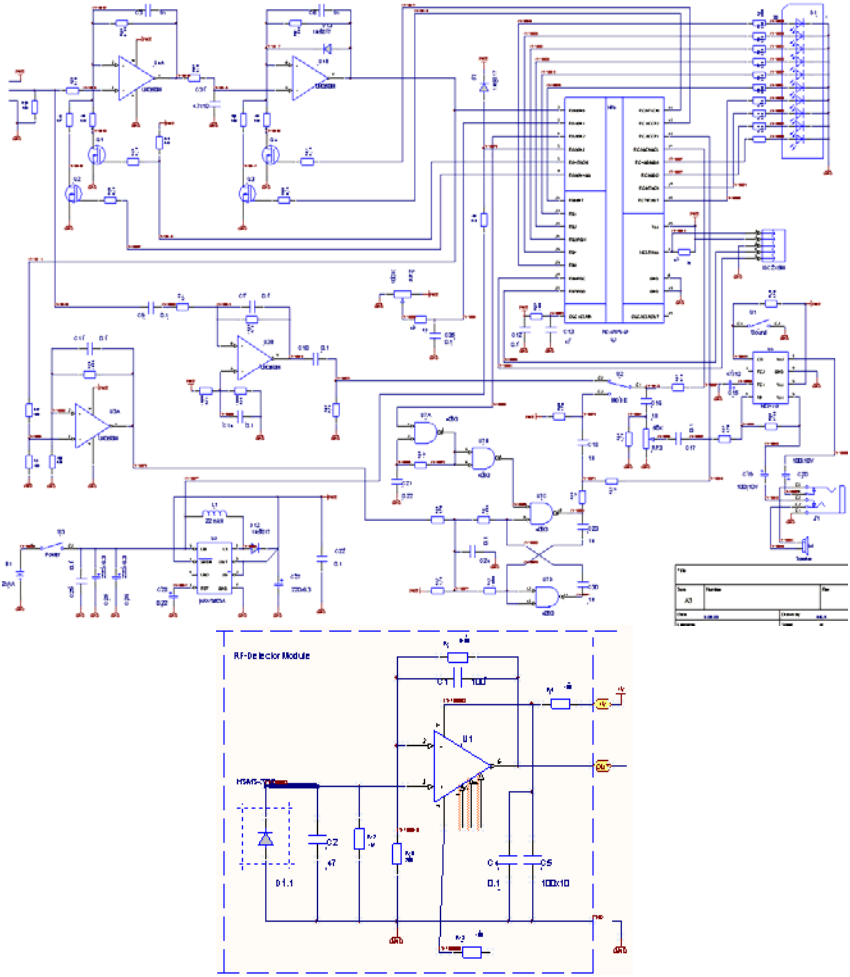


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

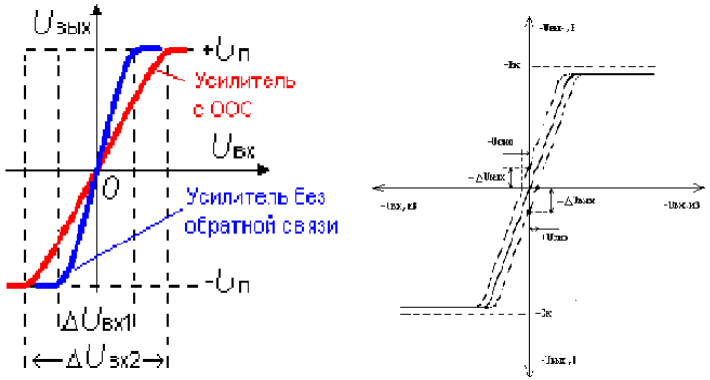
Детектирование поля происходит стандартным образом, антенна улавливает сигнал и передает его на детекторный диод, далее сигнал с диода через систему операционных усилителей попадает либо на микроконтроллер, а с него на панель из светодиодов, либо на генератор аудиосигнала (в виде связки триггера и триггера Шмитта) и на динамик в зависимости от режима работы. Данный детектор поля работает в двух режимах: световая индикация и аудио. Первый способ представляет собой последовательное загорание светодиодов на лицевой панели детектора. Чем больше уровень сигнала, тем больше светодиодов загорается. Сами светодиоды имеют 3 цвета, первая партия зеленая – находясь в таком поле, человек не получает вреда, вторая партия желтая – средняя нагрузка на организм и третья партия красная – такое поле опасно для человека.

Второй режим отличается от первого только тем, что информация о поле выдается не в виде свечения светодиодов, а в виде писка (в динамике на задней части либо в наушниках, подключенных к детектору), и чем ближе и мощнее поле, тем чаще будет писк.

Основной особенностью этого детектора является возможность подстройки усилителя. Сигнал, попадающий на антенну, детектируется диодом и поступает на операционные усилители, и дальнейшее его «поведение» зависит от них. Чтобы получить более точную картину поля, нужно следить за коэффициентом усиления и напряжением смещения операционного усилителя. Для этой цели в этом детекторе резисторы перед первым усилителем и на обратном смещении являются переменными, и, меняя их сопротивление, мы влияем на работу операционного усилителя. Меняя сопротивления резистора в обратном смещении, мы корректируем коэффициент усиления, т.е. уменьшаем напряжение обратной связи, а это влияет на выходное напряжение (рис. 2, *а*) $K_y = \dfrac{U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}}{1 - U_{\text{вх}\,0\text{С}}/U_{\text{вых}} \cdot U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}}$. На рисунке показан усилитель с обратной связью и без нее, но это отчетливо показывает разницу в усилении при изменении сопротивления на резисторе. Меняя сопротивление резистора перед усилителем, мы влияем на напряжение смещения, т.к. $U_{\text{вых}} = K_y(U_{\text{вых}} - U_{\text{см}})$. На рис. 2, *б* пунктирными линиями изображено смещение относительно идеального состояния. Отрезок на оси X (напряжение входа) от 0 до пересечения графика с этой осью и будет графически отображать напряжение смещения.

Так как данный детектор обладает динамиком, то его можно использовать для нахождения скрытых передатчиков и записывающих устройств. В этом случае работает принцип акустической обратной связи (АОС) (рис. 3). Антенна (вход) улавливает сигнал микрофона и

передает его на генератор звуковых колебаний, а с него на динамик, звук проходит без искажений и изменений, микрофон в свою очередь улавливая звук, издаваемый детектором, усиливает его, и данное действие происходит постоянно, и чем ближе мы находимся к микрофону, тем громче и четче будет звук, издаваемый детектором.



а *б*

Рис. 2. Изменение коэффициента усиления при изменении сопротивления: *а* – в обратном смещении; *б* – на входном канале

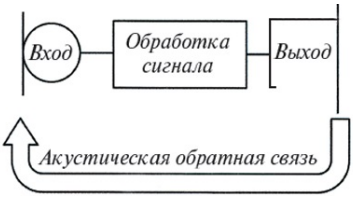


Рис. 3. Принципы акустической обратной связи

Технические характеристики

Диапазон частот	2–31 ГГц
Максимальная чувствительность	0,02 мкВт/см^2
Динамический диапазон индикатора	20 дБ
Питание	2–3 В
Потребляемый ток	Не более 250 мА
Габариты (без учета выступающих частей)	150×70×25 мм
Масса (без элементов питания)	250 г

Детектор находится на стадии разработки, но на его основе в будущем можно будет спроектировать детектор сотовых телефонов. Так

как даже в ждущем режиме (не во время звонка) телефон обменивается с оператором (вышкой, станцией) сигналом, но этот сигнал очень короткий, и его могут уловить только единицы детекторов. Поставив в антенный модуль этого детектора триггер, можно ловить и зацикливать сигнал и подавать его на усилители чтобы можно было работать уже с усиленным сигналом, а далее, определяя его природу (при помощи программного обеспечения), выдавать, какое именно устройство было продетектировано. Такое устройство может хорошо зарекомендовать себя на объектах, в которых запрещено вносить и пользоваться сотовыми телефонами и подобными устройствами.

ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК ITO

М.И. Воротников, Н.И. Зудова, студенты,
Ю.С. Жидик, аспирант, каф. ФЭ
Научный руководитель П.Е. Троян, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.
г. Томск, ТУСУР , maxim240395@mail.ru
Проект ГПО ФЭ-1301 «Расчет и формирование проводящего прозрачного покрытия для светодиодов»

Оксид индия, легированный оловом (indium-tin oxide, ITO), является смесью оксида индия (III) (In_2O_3) и оксида олова (IV) (SnO_2), как правило, в соотношении 90% In_2O_3, + 10% SnO_2 по массе и является полупроводником n-типа с проводимостью, сравнимой с металлической, где ионы олова служат донорами электронов. В тонких слоях порядка 200 нм, нанесенных на стекло при температурах около 400 °С в кислородосодержащей атмосфере, этот материал демонстрирует высокую прозрачность и может иметь поверхностное сопротивление около 6 Ом/□ [1].

Ранее нами была отработана и описана в [2] технология напыления пленки ITO с поверхностным сопротивлением 10 Ом/□ при толщине 110 нм методом реактивного магнетронного распыления металлической мишени In(90%)/Sn(10%) в кислородосодержащей атмосфере при строгом контроле значения парциального давления кислорода.

С увеличением количества кислорода сопротивление ITO начинает расти и достигает сотен МОм/□. Прозрачные высокоомные слои имеют максимальное сопротивление на несколько порядков больше, большую механическую прочность и большую устойчивость к воздействию высоких температур.

Таким образом, данная работа посвящена изучению диэлектрических свойств аморфных пленок ITO, напыленных методом реактивного магнетронного распыления в условиях избытка кислорода.

В качестве исследуемых образцов были изготовлены МДМ-структуры. Производилось напыление пленки ITO в качестве диэлектрика путем реактивного распыления мишени In(90%)/Sn(10%) в атмосфере чистого кислорода. Напыление производилось на стеклянные подложки, нагретые до 120 °С. После напыления у полученных МДМ-структур измерялись значения их емкости с помощью измерителя иммитанса Е7-20, что позволило отметить следующее. При распылении мишени In(90%)/Sn(10%) в атмосфере чистого кислорода полученные пленки являются практически диэлектрическими. Связано это с тем, что электропроводность пленок ITO обусловлена наличием кислородных вакансий. Кислородные вакансии, с одной стороны, обеспечивают наличие электронов проводимости. Таким образом, вероятно, что в полученных нами пленках ITO, в связи с большой концентрацией кислорода в составе газовой смеси, кислородные вакансии практически отсутствуют, что и явилось причиной сочетания высокой прозрачности и низкой электропроводности.

Получена матрица, состоящая из 25 конденсаторов. Средняя емкость конденсаторов составляет 0,96 нФ. С учетом геометрии электродов образца значение диэлектрической проницаемости получается равным $\varepsilon = 12{,}5$.

Заключение. Сходство структурных и оптических характеристик проводящей и изолирующей модификаций ITO открывает возможность для создания структур проводник–изолятор. В полученной пленке ITO, в связи с большой концентрацией кислорода в составе газовой смеси, кислородные вакансии практически отсутствуют, что и явилось причиной высокой прозрачности и низкой электропроводности, а также позволило получить значение диэлектрической проницаемости равным $\varepsilon = 12{,}5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Обзор* рынка оксидов индия-олова (indium-tin oxide, ITO) и материалов для их производства в мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.infomine.ru/order-demo/458.

2. *Жидик Ю.С., Троян П.Е., Сахаров Ю.С.* Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления // Доклады ТУСУРа. 2014. № 1(31). С. 99–102.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ ПЛЕНКА–ПОДЛОЖКА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Е.И. Зайцева, Е.О. Ипатова, студентки каф. ФЭ
Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР
zaitcevalena@sibmail.com, katerina.ipatova18@gmail.com
Проект ГПО ФЭ-1203 «Спектральные методы анализа тонких диэлектрических пленок»

Проблема точного определения оптических констант подложки и пленки является важной практической задачей экспериментальной эллипсометрии. Как показывает практика, оптические свойства материала зависят не только от пленки, но и от переходного слоя структуры пленка–подложка, который представляет собой пленку естественного окисла, адсорбированные пленки воды и масел [1].

Для исследования использовался спектральный эллипсометрический комплекс «Эллипс 1891 САГ», работающий в диапазоне длин волн 350–1000 нм и предназначенный для проведения прецизионных измерений толщины однослойных и многослойных тонкопленочных структур, а также исследования спектральных оптических постоянных (показателя преломления и коэффициента поглощения), структурных свойств материалов (пористость, концентрации и распределения примесей в пленке).

Для измерения толщины пленки и толщины промежуточного слоя была использована структура, состоящая из оксида кремния на кремниевой подложке, полученная ВЧ магнетронным распылением. Измерения проводились на длине волны 632,8 нм при углах падения луча от 45 до 70°.

Результаты измерений

α, °	$d_{пл.}$, нм	$d_{п-п}$, нм	n
45	96,3	11,8	1,495
50	97,0	10,9	1,489
55	97,02	8,3	1,489
60	96,9	7,5	1,484
65	97,04	6,5	1,485
70	98,5	5,3	1,477

В таблице представлены результаты измерений толщины пленки $d_{пл}$, толщины промежуточного слоя пленка–подложка $d_{п-п}$, а также показателя преломления пленки n при углах падения луча от 45 до 70°.

По результатам измерений были построены зависимости толщины промежуточного слоя и толщины пленки от угла падения луча, которые представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

В результате данной работы установлено, что толщина пленки является функцией угла падения луча. Из рис. 2 видно, что при увеличе-

нии угла толщина пленки возрастает, что связано с неровностью поверхности пленки, ее шероховатостью [2].

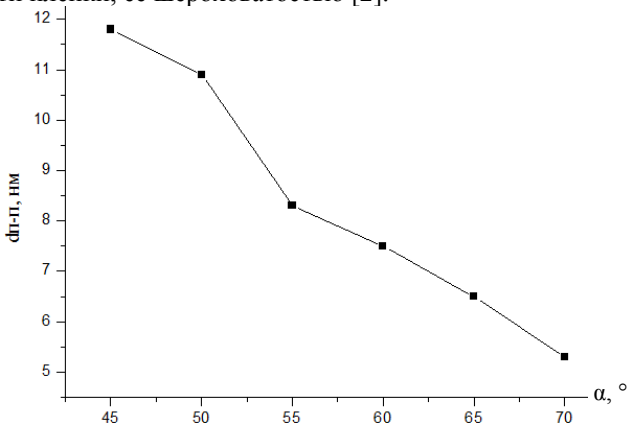


Рис. 1. График зависимости толщины промежуточного слоя пленка–подложка от угла падения луча

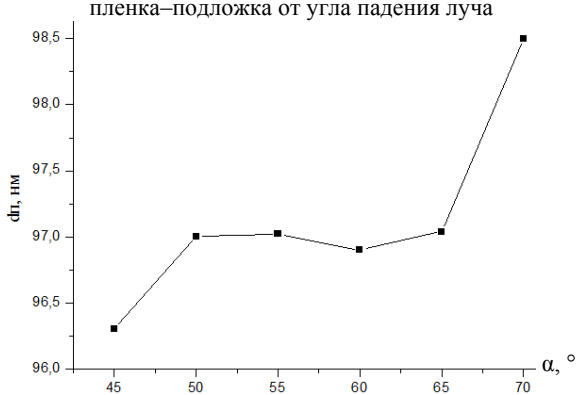


Рис. 2. График зависимости толщины пленки от угла падения луча

Толщина переходного слоя с увеличением угла падения луча изменяется. Мы предположили, что целесообразно взять усредненное значение толщины окисла, которое составило $d_{п\text{-}п} = 8{,}383$ нм.

Граница раздела между кремнием и окислом представляет интерес не только с точки зрения технической важности, но и структурной и химической простоты.

Наличие окисла на подложке нежелательно, но он является естественным состоянием практически любой структуры. Для того чтобы уменьшить толщину окисла, необходимо улучшить качество обработки материала перед напылением пленки, т.к. переходный слой оказы-

вает влияние на физические свойства структуры и на определение параметров эллипсометрических измерений.

Таким образом, установлено незначительное влияние переходного слоя на точность определения толщины пленки и ее показателя преломления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Резвый Р.Р.* Эллипсометрия в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1983. 120 с.

2. З*айцева Е.И., Ипатова Е.О.* Исследование тонких пленок Ta_2O_5 методом спектральной эллипсометрии: XI Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015. С. 160–162.

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТОКА ПО СЕЧЕНИЮ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В ФОРВАКУУМЕ

А.А. Зенин, с.н.с., к.т.н., И.Ю. Бакеев, аспирант, м.н.с. каф. физики; А.Н. Николаенко, студент, каф. ЭП

Научный руководитель Е.М. Окс,зав. каф. физики, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, zenin1988@gmail.com

Форвакуумные плазменные источники электронов на протяжении последнего десятилетия активно развиваются кафедрой физики ТУСУРа. Неоспоримым преимуществом электронных пучков, генерируемых данными источниками, по сравнению с традиционными пучками электронов, получаемыми в высоком вакууме, является возможность обработки диэлектрических материалов и изделий без применения дополнительных средств компенсации заряда на поверхности [1]. Наиболее перспективными операциями электронно-лучевой обработки являются сварка и пайка керамики, стекла, обработка поверхностей с целью уменьшения шероховатостей, модификация приповерхностных слоев, спекание керамики, сверление отверстий в твердых материалах [2, 3]. Приведенные технологические операции зачастую требуют узкосфокусированный пучок электронов с возможностью управления его основными параметрами, такими как энергия электронов, ток и диаметр пучка.

Основной задачей, решаемой в данной статье, является исследование распределения тока по диаметру узкосфокусированного пучка электронов в форвакуумном диапазоне давлений.

Методика проведения эксперимента. Измерение диаметра пучка осуществлялось методом вращающегося зонда [4] с той лишь раз-

ницей, что зонд представлял собой металлический диск с двумя параллельными прорезями (щелями), установленный на оси электродвигателя. При вращении оси электродвигателя щели на диске по очереди пересекали электронный пучок, при этом осциллограф регистрировал токовый сигнал с неподвижного коллектора, расположенного под вращающимся диском.

Диаметр пучка электронов определялся по обычной для такого метода процедуре – на полувысоте пика. Также для оценки диаметра пучка использовалось распределение тока по сечению. С применением интегрального преобразования Абеля [5], учитывающего геометрические размеры пучка, из зондограммы было найдено распределение плотности тока по сечению:

$$J(r)=\frac{1}{\Delta a_n \pi r}\frac{d}{dr}\int_r^{r_e}\frac{i(x)xdx}{\sqrt{x^2-r^2}},$$

где $J(r)$ – распределение плотности тока по сечению пучка; Δa_n – ширина щели; i – ток электронного пучка через щель; r – текущий радиус; x – координата отклонения (движения) электронного пучка.

Рабочим газом в эксперименте являлся гелий, давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне 30 Па, ускоряющее напряжение было равно 18 кВ, ток пучка – 15 мА.

Результаты экспериментов. На рис. 1 и 2 приведены зондограмма тока, распределение тока и плотности тока по сечению пучка соответственно.

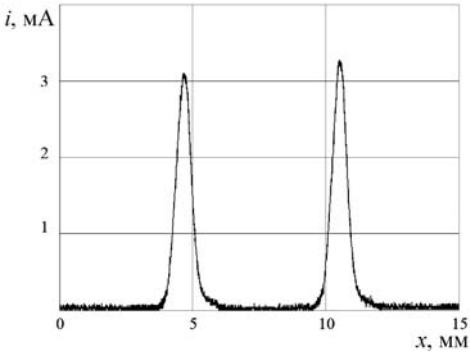


Рис. 1. Зондограмма тока, приходящего на зонд

Из графика видно, что диаметр пучка на полувысоте для кривой *1* (распределение тока по сечению пучка) составляет порядка 0,56 мм, а для кривой *2* (распределение плотности тока) – порядка 0,5 мм. Полученные значения отличаются незначительно, к тому же следует заметить, что характер распределения плотности тока по сечению пучка имеет схожий с распределением тока вид. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что для оценки диаметра получаемых в форвакуумной области давлений электронных пучков можно использовать оба метода.

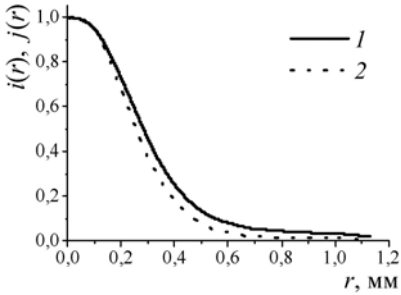


Рис. 2. Нормированное распределение тока $i(r)$ (кр. *1*) и плотности тока $j(r)$ (кр. *2*) по сечению пучка

Заключение. В результате работы продемонстрирована методика оценки диаметра пучка двумя способами – по зондограмме тока и распределению плотности тока по сечению пучка. Полученные в обоих случаях диаметры электронного пучка в форвакууме практически не отличаются.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-38-60032 мол_а_дк.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с.

2. *Зенин А.А.* Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронов / А.А. Зенин, А.С. Климов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 1 (27). С. 10–13.

3. *Казаков А.В.* Электронно-лучевой синтез диоксидциркониевой керамики / А.В. Казаков, А.С. Климов, А.А. Зенин // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2(26). Ч. 2. С. 186–189.

4. *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. *Кайдалов А.А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Экотехнология, 2004.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ, НА ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

М.И. Воротников, Н.И. Зудова, студенты,
Ю.С. Жидик, аспирант, каф ФЭ
Научный руководитель П.Е. Троян, проф., д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, nina-an42@mail.ru
Проект ГПО ФЭ-1301 «Расчет и формирование проводящего прозрачного покрытия для светодиодов»

В последнее время тонкие пленки ITO, полученные методом магнетронного распыления, привлекают всё больше внимание исследова-

тельских коллективов благодаря их уникальному сочетанию низкой удельной электропроводности и высокого коэффициента пропускания в видимой части солнечного спектра. Пленки ITO широко используются в технике как прозрачные проводящие электроды при изготовлении устройств отображения информации, оптоэлектронных приборов, топливных элементов (в том числе высокотемпературных) и т.д. [1]. Электропроводящие пленки на основе In_2O_3, будучи нанесенными на автомобильные или авиационные стекла, способны нагревать их до 100 °С при пропускании тока и тем самым предотвращать их обледенение и запотевание [2].

Авторы многих опубликованных работ, посвященных исследованию вопросов получения прозрачных проводящих пленок оксидов металлов [3, 4], говорят о том, что непосредственно после напыления прозрачность получаемых пленок недостаточна и для ее увеличения требуется дополнительная обработка. В большинстве работ для повышения прозрачности пленок проводящих оксидов металлов, полученных различными методами, проводится их дополнительный отжиг.

Данная работа посвящена исследованию влияния термического отжига на электрофизические свойства пленок ITO.

Для исследования были подготовлены образцы двух видов. Технология получения заключается в использовании метода магнетронного распыления металлической мишени In(90%)/Sn(10%) в кислородосодержащей атмосфере с конденсацией окисленных атомов индия и олова на стеклянную подложку и проведением последующего высокотемпературного отжига сконденсированных пленок в едином вакуумном цикле. Детально данная технология описана в [2]. Первые образцы пленок были с удельным поверхностным сопротивлением R_s = 27 Ом/□ при толщине 120 нм. Вторые образцы имеют идентичную технологию изготовления, различие заключается только в отсутствии термического отжига. Вследствие низкой концентрации донорных кислородных вакансий удельное поверхностное сопротивление таких пленок ITO было на уровне 435 Ом/□.

На подготовленные образцы для подключения необходимых измерительных приборов напылялись четыре медных контакта в виде площадок, расположенных попарно противоположно друг другу и равноудаленных друг от друга на расстояние 1,5 см.

Для непосредственного определения концентрации и подвижности носителей наиболее удобным методом является эффект Холла. Данный эффект основан на следующем явлении. При помещении полупроводникового исследуемого образца во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля под действием силы Лоренца происходит пространственное перераспределение носителей зарядов.

Измеряя возникающую при этом ЭДС, можно с легкостью рассчитать константу Холла, а затем концентрацию и подвижность носителей в материале.

Заключение. На основе результатов исследований можно сделать вывод, что проведение высокотемпературного отжига пленок, синтезированных методом магнетронного распыления металлической мишени In(90%)/Sn(10%) в кислородосодержащей атмосфере, приводит к увеличению электропроводности пленок ITO. Это связано с увеличением подвижности электронов с $2{,}29 \cdot 10^{-4}$ до $2{,}46 \cdot 10^{-3}$ м^2 /В·с в результате повышения структурного совершенства пленки и с тем, что в процессе высокотемпературной обработки оксидной пленки атомы кислорода, внедренные между узлами кристаллической решетки, диффундируют из объёма образца, что приводит к образованию донорных кислородных вакансий и возрастанию концентрации с $6{,}1 \cdot 10^{26}$ до $9{,}14 \cdot 10^{26}$ м$^{-3}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Обзор* рынка оксидов индия-олова (indium-tin oxide, ITO) и материалов для их производства в мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.infomine.ru/order-demo/458.

2. *Жидик Ю.С., Троян П.Е., Сахаров Ю.С.* Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления // Доклады Том. гос. ун-а систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2014. № 1(31). С. 99–102.

3. *Жидик Ю.С., Троян П.Е.* Технология получения электропроводящих пленок ITO высокой оптической прозрачности с низким значением величины удельного поверхностного сопротивления // Доклады Том. гос. ун-а систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2014. № 2(26), ч. 2. С. 169–171.

4. *Марков Л.К., Смирнова И.П., Павлюченко А.С.* Отражающий p-контакт на основе тонких пленок ITO для флип-чип-светодиодов AlGaInN // Физика и техника полупроводников, 2009. Т. 43, №11. С. 1564–1569.

ПОДСЕКЦИЯ 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Михальченко Г.Я.**, директор НИИ ПрЭ., проф., д.т.н.;*
*зам. председателя – **Семёнов В.Д.**, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.*

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ EPSON MOVERIO BT-200

В.В. Анисимов, магистрант, каф. ПрЭ,
Н.В. Калиновский, генеральный директор ООО «ИНТЭК»,
Б.А. Давыдов, технический директор ООО «ИНТЭК»
г. Томск, ТУСУР, anisimov.vladimir@intecgroup.ru

В современном мире информационных технологий доступ в Интернет является жизненно важным ресурсом для любой компании, и его внезапное отсутствие может вызвать множество проблем вплоть до полной остановки рабочего процесса. Причина неполадки может быть любой от программных сбоев и до поломки сетевого оборудования. Найти причину сбоев в сети не всегда является простой задачей, особенно в крупных помещениях или промышленных объектах.

Одно из решений этой задачи было предложено в работе В.В. Анисимова, Н.В. Калиновского, Б.А. Давыдова «Техническое обслуживание и мониторинг сетевого оборудования с применением технологий дополненной реальности», опубликованной в материалах настоящей конференции. В данной статье предлагается использовать устройство дополненной реальности (очки Epson Moverio BT200) со специально разработанным ПО, для упрощения процесса диагностики и мониторинга всей сетевой инфраструктуры помещения.

Принцип работы всей системы следующий. На каждом сетевом оборудовании в здании расположен свой QR-код, в который зашифрован уникальный id и тип устройства, кроме этого, QR-код присвоен и самому объекту (зданию). Данные о каждом из устройств и объекте хранятся на Cloud-сервере. В бинокулярные очки дополненной реальности установлено ПО, которое позволяет расшифровывать QR-код и по полученному id и типу вывести соответствующую информацию об устройстве или объекте. Например, план помещения с указанным на

нем расположением устройств, архитектуру сети, состояние устройства и т.д., полученные с сервера. Таким образом, используя очки и установленное на них ПО, технический сотрудник может мгновенно определить местоположение устройства в помещении и получить о нем все технические данные, не отходя от него.

Использование QR-кодов позволяет легко и быстро расширять систему в будущем, добавляя новые сетевые устройства или объекты. Для расширения системы необходимо на Cloud-сервере добавить id-устройство и заполнить его необходимой информацией. После этого нужно сгенерировать QR-код с зашифрованным в него id, который и будет размещен на устройстве.

Структурная схема работы системы представлена на рис. 1.

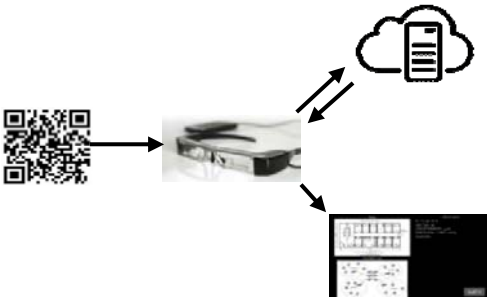


Рис. 1. Структурная схема работы системы мониторинга и диагностирования

В качестве основного оборудования было решено выбрать очки дополненной реальности от фирмы Epson (Moverio BT200). Одной из особенностей данного устройства является то, что в нем используется операционная система Android (версия 4.0.3). В первую очередь это облегчает разработку мобильного приложения, так как можно использовать стандартные инструменты разработчика от Google.

Распознавание QR-кода производится с помощью библиотеки zbar. Данная библиотека распространяется под лицензией LGPL2.1, что позволяет бесплатно использовать ее в данном приложении, кроме того, она имеет хорошее соотношение скорости и качества распознавания.

В приложение встроено «кэширование» данных, что позволяет сотруднику в любом случае получить данные об устройстве, «закэшированные» до потери связи с Интернетом.

Приложение состоит из трех основных окон: окно авторизации, окно камеры или поиска QR-кода и окно вывода информации (рис. 2–4). Управление смешанное, ввод пользовательских данных и возврат на предыдущее окно осуществляются с помощью джойстика, другие действия производятся с помощью датчиков, встроенных в очки.

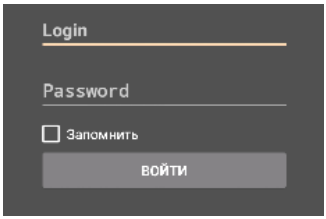


Рис. 2. Окно авторизации

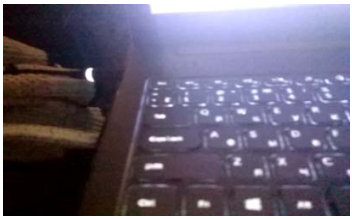


Рис. 3. Окно камеры

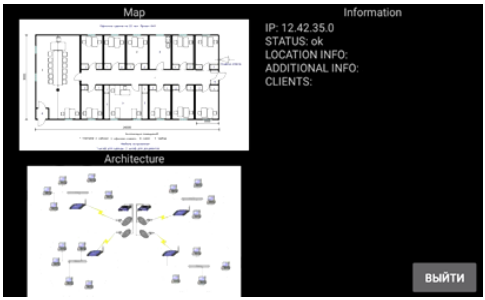


Рис. 4. Окно вывода информации

Первая версия мобильного приложения уже успешно применяется в Якутии. Полученный опыт применения позволит понять, в каком направлении дальше необходимо развивать приложение и всю систему в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Moverio* BT-200 Technical Information [Электронный ресурс]. URL: https://tech.moverio.epson.com/en/life/index.html (дата обращения: 14.03.2016).

2. *Android* Developer [Электронный ресурс]. URL: http://developer.android.com/preview/index.html (дата обращения: 14.03.2016).

ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. М. Журавлев, студент каф. ПрЭ

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, iv_zhuravlev@mail.ru

Современную жизнь сложно представить без использования разнообразных гаджетов, навигаторов и прочих мобильных устройств, получающих данные напрямую со спутника. Постоянно возрастающая мощность бортового электрооборудования повышает требования к эффективности и массогабаритным показателям всех модулей космического аппарата, но в первую очередь к модулю электропитания.

Модуль электропитания функционально состоит из 5 подмодулей:
– аккумуляторная батарея (АБ),
– зарядное устройство (ЗУ),
– разрядное устройство (РУ),
– солнечная батарея (СБ),
– система управления (СУ).

Таким образом, схемотехнической модернизации подвержены лишь три подмодуля: зарядное устройство, разрядное устройство и система управления. Повысить эффективность и снизить массогабаритные показатели в них возможно несколькими способами. Наиболее радикальным решением является их объединение в единое зарядно-разрядное устройство (ЗРУ). Основные требования, предъявляемые к ЗРУ, – это двунаправленная передача энергии и возможность работы в повышающем и понижающих режимах в обоих направлениях.

Принципиальная схема совмещенного ЗРУ, выполненного на двух полных мостах указана на рис. 1. Направление протекания тока, а также выбор режима работы происходят при помощи СУ. Таким образом, используя паузу в управлении, можно передавать энергию как от АБ к нагрузке, так и от нагрузки к АБ.

Основными потерями в подобных схемах являются потери на переключение транзисторов [1]. Одним из способов снижения потерь на переключение является использование резонансных инверторов; т.к. при работе в резонансе нет разности фаз между током и напряжением, переключение ключей практически без потерь. Для снижения динамических потерь был введен последовательный резонансный контур, состоящий из катушки индуктивности Lr и емкости Cr, настроенный на частоту 100 кГц.

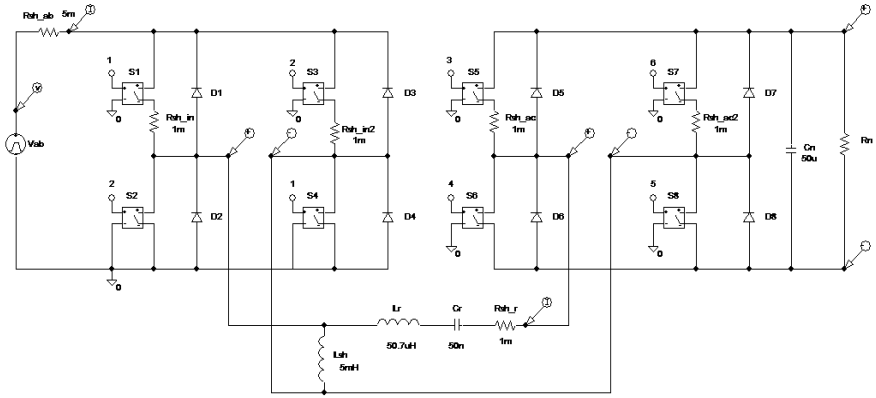


Рис. 1. Совмещенное зарядно-разрядное устройство на основе инверторных ячеек

Другим способом решения задачи снижения потерь на переключение является использование инверторов с квазирезонансным переключением при нулевом напряжении. Практическая реализация этой идеи – это автономный инвертор с фазовой либо частотной модуляцией.

Заключение. При выполнении моделирования были достигнуты поставленные задачи по созданию единого модуля для системы электропитания. Данная схема позволяет получить улучшенные удельные характеристики мощности и снизить массогабариты конечного устройства при сохранении высокого значения КПД (до 97%). Учитывая, что космические аппараты обладают малым объемом и высокими требованиями к данному типу оборудования, исследования в сторону объединения зарядно-разрядного устройства в виде двух инверторных ячеек будут активно развиваться.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Waffler S., Kolar J.W., Member S.* A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bidirectional Buck + Boost Converters // IEEE Transactions on power Electronics. June 2009. Vol. 24, № 6.

2. *Кобзев А.В., Коновалов Б.И., Семенов В.Д.* Энергетическая электроника: учеб. пособие. Томск: Том. межвузовский центр дистанционного образования, 2010. 164 с.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

И.М. Журавлев, студент каф. ПрЭ

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, iv_zhuravlev@mail.ru

Современная тенденция перехода от двигателей внутреннего сгорания к гибридным и электродвигателям в машиностроении обуславливает постоянный рост количества аккумуляторных батарей, которые периодически нуждаются в процессе заряда-разряда. Для этого необходимо мощное зарядное устройство, так как современные аккумуляторные батареи имеют большую емкость, а процесс заряда должен пройти максимально быстро. С учетом миниатюризации и встраивания оборудования в готовое изделие важную роль начинают играть такие параметры, как удельная мощность (Вт/кг) и массогабаритные показатели. Таким образом, можно сформулировать основные требования к проектированию зарядного устройства для электромобиля: увеличение выходной мощности, КПД и снижение массы, габаритов и различного рода потерь энергии.

Одним из вариантов реализации зарядного устройства является его проектирование на основе инверторного преобразователя с пассивным или активным (рис. 1) выпрямительным мостом. Преимуществом подобного вида устройств являются низкие потери по сравнению с зарядными устройствами на основе непосредственных преобразователей частоты, при условии, что инвертор работает в резонансе.

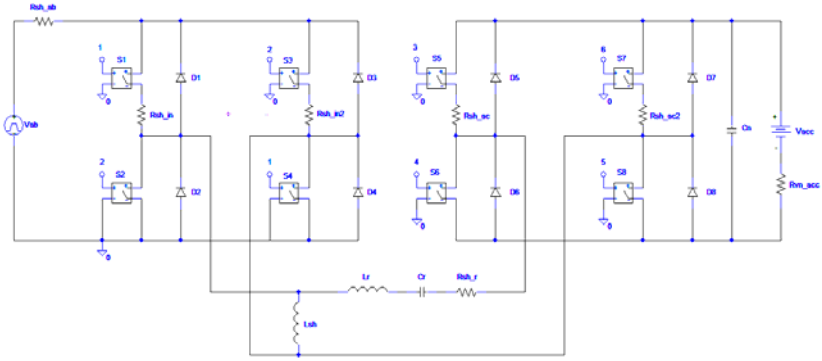


Рис. 1. Резонансный преобразователь частоты
с активным выпрямительным мостом

Преобразователи с пассивным выпрямительным мостом требуют на выходе *LC*-фильтр, т.к. без него амплитуда пульсаций тока и напряжения достигает значительных величин [2]. Это, в свою очередь, ухудшает качество электрической энергии, потребляемой аккумуляторной батареей, и приводит к снижению ресурса её использования.

Преобразователи с активным выпрямительным мостом не требуют обязательного выходного *LC*-фильтра [3], позволяя обходиться более дешевым и меньшим по объему *C*-фильтром, однако более чувствительны к изменениям нагрузки в два раза и более. Однако за счет введения дополнительных ключей возрастают динамические потери в активном выпрямителе. Одним из вариантов уменьшения данного вида потерь является работа в резонансном режиме, что позволяет получить мягкое включение транзисторов. Одним из алгоритмов, которым можно реализовать подобное включение, является двустороннее симметричное ШИМ-регулирование.

На рис. 2 приведены графики напряжения на выходе инвертора и входе активного выпрямителя при данном алгоритме управления.

Регулировка выходного напряжения происходит путем регулирования ширины $U_{акт}$. Динамические потери снижаются за счет переключения в нуле тока. Зависимость выходного напряжения от входного при двустороннем симметричном ШИМ-регулировании указана на рис. 3.

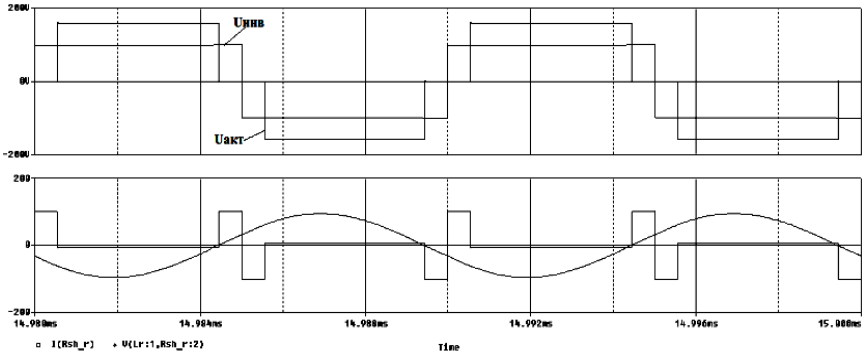


Рис. 2. Графики напряжения и токов преобразователя частоты с активным выпрямительным мостом

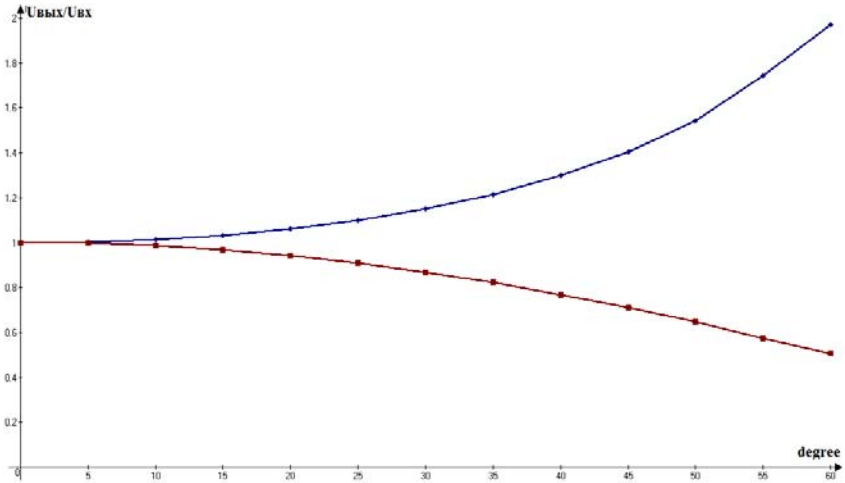


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от угла регулирования

Заключение. На данный момент, проведено моделирование зарядного устройства на основе инверторного преобразователя с последовательным резонансным контуром и симметричным двусторонним ШИМ-регулированием. Использование подобной схемы позволяет снизить как потери при переключении, так и объем устройства, за счет работы на частотах порядка сотен килогерц. В дальнейшем планируется продолжить исследование в данной области, а также решить основную проблему данной схемы – неблагоприятное включение второй стойки активного выпрямителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кобзев А.В., Коновалов Б.И., Семенов В.Д.* Энергетическая электроника: учеб. пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010. 164 с.

2. *Коновалов Б.И.* Основы преобразовательной техники: учеб. пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. 157 с.

3. *Dianbo Fu.* Topology Investigation and System Optimization of Resonant Converters. February 4, 2010. Blacksburg, Virginia.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА ПО ПРИНЦИПУ ТЕПЛООБМЕННЫХ КАМЕР

В.В. Старостенко, А.В. Шарафеев, Р.В. Ермоленко, студенты, М. Алькова, магистрант, каф. ПрЭ

Научный руководитель А.В. Литвинов, электроник каф. ПрЭ

г. Томск, ТУСУР, masha_3344@mail.ru

Проект ГПО ПрЭ-1603 «Система охлаждения персонального компьютера ICE-BOX»

На сегодняшний день компьютеры становятся незаменимыми помощниками. Системные блоки для компьютеров используются на предприятиях, на производстве, дома и в государственных учреждениях.

В системном блоке находится множество различных электронных компонентов, которые подвержены перегреву. Основной причиной перегревания системного блока (процессора) является пыль, забивающая вентиляционные отверстия, поэтому горячий воздух не выходит наружу. Регулярный перегрев компьютера приводит к снижению его производительности и уменьшению времени службы [1].

Для того чтобы предотвратить перегревание, предлагается понизить рабочую температуру внутри системного блока путем эффективного охлаждения, основанного на принципе работы холодильных камер. Создать герметичный корпус для системного блока персонального компьютера с внутренней термостабилизацией и влагоотводом, который позволит увеличить срок службы и качество работы оборудования, находящегося внутри корпуса.

Основным рабочим элементом, отвечающим за охлаждение, будет являться компрессор, который обеспечит перекачку хладагента по теплообменной системе. Хладагент – рабочее вещество с низкой температурой кипения (испарения), с помощью которого осуществляется охлаждение. Он является инертным, не подвергается горению при контакте с воздухом, не взрывается, простой в производстве и хранении.

Среднестатистическая мощность, которая выделяется внутри системного блока, составляет примерно 500 Вт, для того чтобы её отводить предполагается выбрать компрессор ротационного типа, так как он является самым компактным, легким, обладает низким уровнем шума, высокой эффективностью и высоким уровнем надежности. По предварительным расчётам, чтобы обеспечить температуру в корпусе персонального компьютера ниже 0 °С при выделяемой суммарной мощности внутри него 500 Вт, достаточно компрессора мощностью 150 Вт [2].

Разрабатываемая система охлаждения позволяет решить проблему перегрева всех современных персональных компьютеров и электронных компонентов. Предлагаемое решение позволит продлить срок службы персональных компьютеров. Одной из основных задач этой работы является обеспечение внедрения и широкого использования предложения в современных персональных компьютерах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перегрев компьютера [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pca.org.ua/story/page-10, свободный (дата обращения: 03.03.2016).

2. *Кошкин Н.Н., Сакуна И.А. и др.* Холодильные машины. Л.: Машиностроение, 1985. 542 с.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И МОНИТОРИНГ СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В.В. Анисимов, магистрант каф. ПрЭ,
Н.В. Калиновский, генеральный директор ООО «ИНТЭК»,
Б.А. Давыдов, технический директор ООО «ИНТЭК»
г. Томск, ТУСУР, anisimov.vladimir@intecgroup.ru

Дополненная реальность – это «достройка» информационного макета реального объекта любыми виртуальными элементами. Еще совсем недавно такое комплексное представление являлось совершенной фантастикой. Сегодня же это одно из перспективнейших направлений развития информационных технологий. Каждый день на рынке появляется все больше и больше подобных гаджетов, наиболее известные из них: «Google Glass», «Epson Moverio», «Microsoft Hololens» и др.

С помощью технологии дополненной реальности цифровая информация автоматически связывается с объектами реального мира в определенном контексте. Она создает и наглядно отображает взаимосвязь между существующим и виртуальным миром. В варианте предельного развития расширенную реальность можно считать высшей

стадией развития поиска информации, который очевиден, очень удобен и легко управляем даже для неподготовленного пользователя.

Первоначально дополненная реальность использовалась преимущественно в маркетинговых исследованиях, в развлекательных и образовательных комплексах. Но в настоящее время все большее количество компаний предпочитают использовать эту технологию для организации технического обслуживания и ремонта различных объектов.

Предпосылками такой востребованности является ряд проблем, связанных со сложностью сборки, постройки и обслуживания современных технических объектов. Зачастую инженеру, техническому сотруднику или рабочему приходится обращаться к документации, что чаще всего занимает много времени для поиска необходимой информации или использование которой является не всегда удобным в процессе сборки или ремонта.

На сегодняшний день существует несколько решений данной проблемы (таблица).

Обзор существующих решений

Решение	Плюсы	Минусы
Использование документации в бумажном виде		1. Быстро устаревает, неудобно осуществлять поиск информации в больших объемах документации. 2. Для использования должны быть свободны руки
Использование документации в цифровом виде на смартфонах или планшетах	1. Всегда актуальная, не занимает много места (относительно бумажной). 2. Быстрый поиск	1. Неудобно использовать в перчатках. 2. Для использования должны быть свободны руки

Таким образом, использование устройств дополненной реальности является идеальным решением текущей проблемы. Такие корпорации, как оборонная компания Raytheon, Caterpillar и производитель электроники Mitsubishi Electric, уже имеют достаточно большой опыт подобного использования.

Например, инженеры компании Mitsubishi Electric смогли существенно упростить ремонт своей техники с помощью программного обеспечения компании Metaio и «умных» очков Epson Moverio. Благодаря эффекту использования дополненной реальности обслуживающему персоналу нет необходимости изучать руководство для понима-

ния внутреннего устройства сложных электронных продуктов. С «умными» очками им достаточно одного взгляда, чтобы определить места расположения различных компонентов и приступить к поиску неисправности [2].

Это, в свою очередь, позволяет существенно снизить затраты компании на организацию процесса технического обслуживания и повышает востребованность подобных технологий в этой сфере бизнеса.

С помощью технологии дополненной реальности можно решить проблему обслуживания сетевого оборудования в крупных объектах со сложной структурой и рассредоточенным территориальным расположением (медучреждениях, университетах и др.). Например, сотрудник, использующий очки дополненной реальности с предустановленным ПО, может получить всю информацию об электронном устройстве и его текущем состоянии, просто взглянув на него.

Структурная схема работы системы представлена на рис. 1.

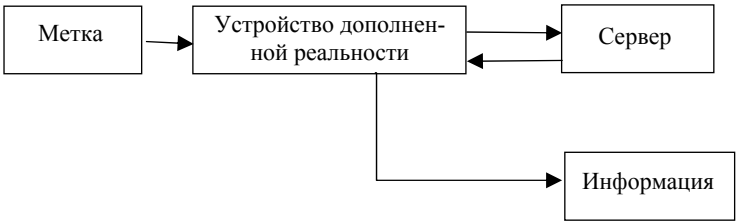


Рис. 1. Структурная схема системы

С помощью устройства дополненной реальности (например, очков) с соответствующим ПО происходит распознавание сетевого устройства по его метке. После расшифровки метки на сервер отправляется запрос с полученным id-устройства, а в ответ от сервера приходит вся необходимая информация об устройстве и его состоянии. Эту информацию в результате и видит сотрудник.

Представленное решение существенно упрощает процесс технического обслуживания и мониторинга сетевого оборудования внутри больших промышленных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Как* использовать дополненную реальность в образовании и обучении персонала [Электронный ресурс]. URL: http://www.smart-edu.com/augmented-reality-in-learning.html (дата обращения: 2 марта 2016).

2. *Дополненная* реальность: надежда работодателей [Электронный ресурс]. URL: http://today.mts.com.ua/posts/dopolnennaya-realnost-rabotat-stanovitsya-proshhe (дата обращения: 2 марта 2016).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В.И. Апасов, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, vovaap@mail.ru

В данной статье представляется синтезированная математическая модель комбинированного преобразователя с трехкомпонентным вектором неизвестных. Подобный преобразователь может быть использован при построении отдельной силовой ячейки в многомодульной системе электропитания. При этом напряжении на входных шинах может быть как выше, так и ниже выходного значения [1].

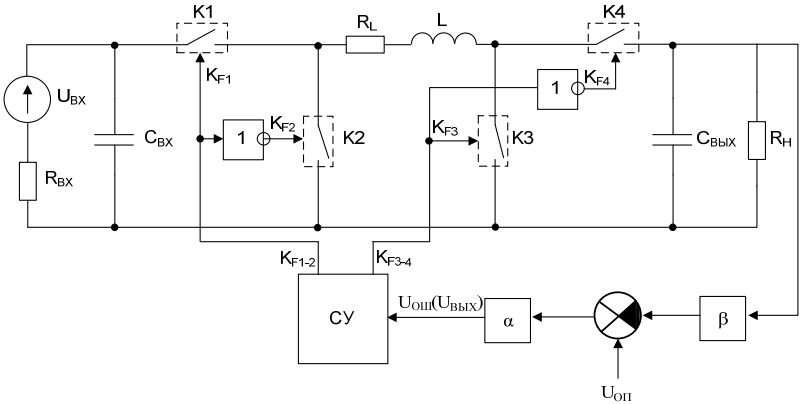


Рис. 1. Структурная схема комбинированного преобразователя со стабилизацией входного напряжения

На структурной схеме комбинированного преобразователя (рис. 1) приняты следующие обозначения: $U_{вх}$ – напряжение входного источника; $R_{вх}$ – внутреннее сопротивление входного источника; К1…К4 – силовые коммутационные элементы; $C_{вх}$ – емкость входного фильтра; R_L – сопротивление обмоток дросселя; L – индуктивность дросселя; $C_{вых}$ – емкость выходного фильтра; $R_Н$ – сопротивление нагрузки; β – коэффициент передачи звена обратной связи; $U_{ош}$ – сигнал ошибки; $U_{оп}$ – опорное напряжение; α – коэффициент усиления пропорционального звена; $K_{F1\text{-}2}$, $K_{F3\text{-}4}$ – коммутационные функции для управления ключами; СУ – система управления.

Математическая модель строится на основе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными матрицами состояний **A** и **B**

для каждого из возможных состояний схемы, зависящей от коммутационных функций $K_F(\xi)$:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\big(K_F(\xi)\big)\cdot\mathbf{X} + \mathbf{B}\big(K_F(\xi)\big). \qquad (1)$$

В свою очередь, $\mathbf{X} = \{i_L, U_{вх}, U_{вых}\}$, где i_L – ток в дросселе; $U_{вх}$ – напряжение на входном конденсаторе; $U_{вых}$ – напряжение на выходном конденсаторе. По причине того, что в схеме присутствует как выходной, так и входной фильтр, матрица состояния **A** данного преобразователя имеет размерность (3×3), а матрица **B** – (1×3). Принципы построения подобных математических моделей рассмотрены ранее в [2, 3].

Верификация полученной математической модели проведена с помощью симуляционного пакета LTSpice IV. Для этого в нем была промоделирована работа подобного преобразователя. В программе получены характеристики (рис. 2), а также диаграммы установления выходного напряжения при различных напряжениях входного источника. Полученные результаты были сопоставлены с результатами экспериментов в вычислительном пакете MathLab (рис. 3) и полученные значения выходных параметров отличаются не более чем на 3%.

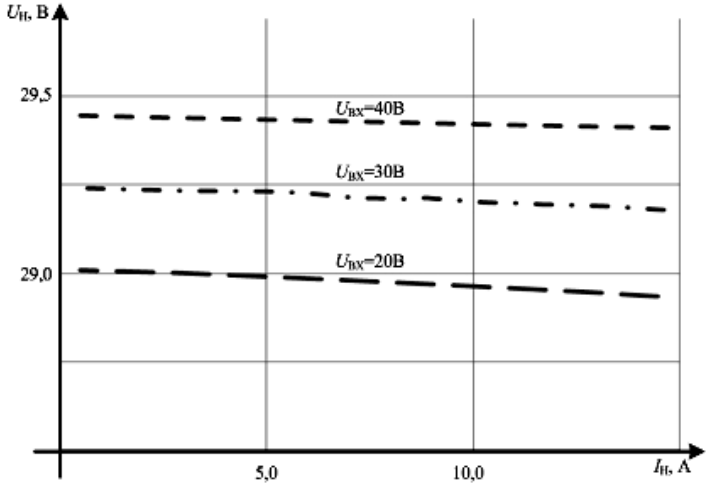


Рис. 2. Нагрузочные характеристики комбинированного преобразователя при моделировании в программе LTSpice IV

В результате проделанной работы была получена и проверена адекватность математической модели комбинированного преобразователя с трехкомпонентным вектором переменных. Данная модель может быть в дальнейшем использована для исследования работы преоб-

разователя с позиций нелинейной динамики систем электропитания, построенных на основе таких устройств, с погрешностью результата не более 3%.

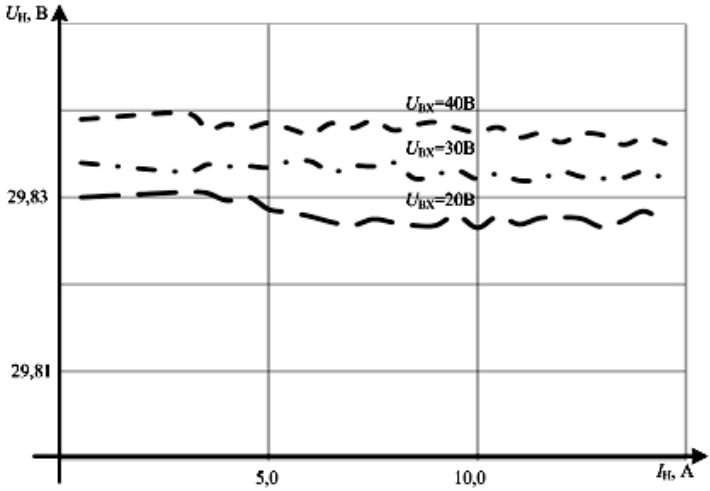


Рис. 3. Нагрузочные характеристики комбинированного преобразователя при математическом моделировании в программе MathLab

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мелешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 632 с.

2. *Апасов В.И., Михальченко С.Г., Коцубинский В.П.* Математическое моделирование комбинированного преобразователя напряжения со стабилизацией выходного напряжения // Докл. ТУСУРа. 2013. № 4(30). С. 96–102.

3. *Апасов В.И., Михальченко С.Г.* Бифуркационный анализ комбинированного преобразователя при изменении емкости выходного фильтра // Решетневские чтения: матер. XVIII Междунар. науч. конф.: в 3 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 2. С. 15–17.

СОХРАНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

А.В. Асадчий

г. Томск, АО «НПЦ «Полюс», aavtpu90@mail.ru

В радиоэлектронной технике, работающей без присутствия операторов, особую роль играют диагностические сигналы, несущие ин-

формацию о состоянии аппаратуры в моменты времени, когда в ней возникают неисправности или она отключается из-за перегрузки, перебоев в электропитании.

Рассмотрим данную ситуацию на конкретном примере. На рис. 1 показана структурная схема преобразовательного устройства со встроенными устройствами контроля, которое преобразует входное нестабилизированное напряжение в выходное стабилизированное и в случае перегрузок отключает напряжение питания потребителя с последующей выдачей диагностических сигналов.

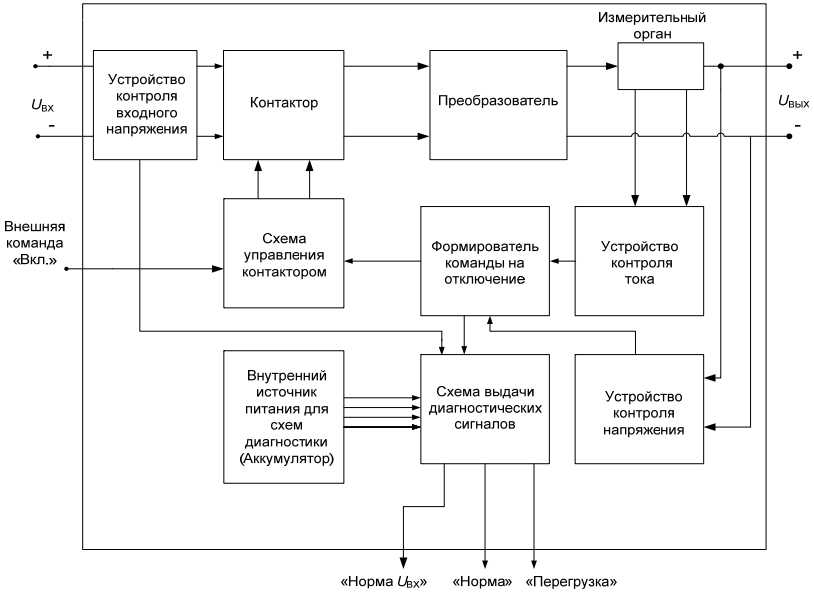


Рис. 1. Преобразовательное устройство

В устройствах контроля напряжения используется устройство стробирования для исключения выдачи ложных диагностических сигналов при включении аппаратуры, при кратковременных увеличениях тока нагрузки сверх номинального значения.

Режимы работы преобразовательного устройства предусматривают пять ситуаций (рис. 2):

– ситуация № 1 – штатный режим работы;
– ситуация № 2 – перегрузка (1,1÷1,3) $I_н$;
– ситуация № 3 – перегрузка (1,30÷1,45) $I_н$;
– ситуация № 4 – перегрузка свыше 1,45 $I_н$;
– ситуация № 5 – включение при коротком замыкании.

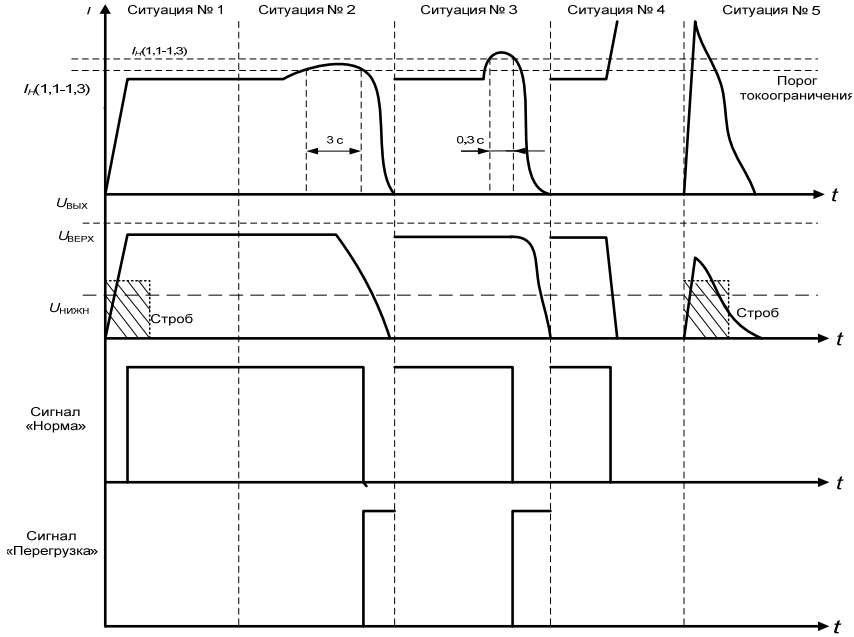


Рис. 2. Режимы работы преобразовательного устройства

Из рис. 2 видно, что в ситуации № 4 при наступлении перегрузки сигнал «Норма» снимается, а сигнал «Перегрузка» не формируется. В ситуации № 5 сигналы «Норма» и «Перегрузка» не формируются, так как выходное напряжение за время стробирования не успевает увеличиться до требуемого предела и спадает, что усложняет процесс выяснения причины, по которой сработала защита преобразовательного устройства.

Выходом из данной ситуации является введение в преобразовательное устройство энергонезависимой памяти (рис. 3), которая будет сохранять всю информацию о перегрузке и выдавать диагностические сигналы на устройство считывания. Это будет способствовать упрощению процесса диагностики при отключении устройства, что, несомненно, является достоинством данного метода.

Наиболее перспективным техническим решением для организации энергонезависимой памяти служит использование полупроводниковых структур, поскольку они могут сохранить достаточно большой объем данных [1].

Данный способ сохранения диагностических сигналов при разных критических ситуациях, возникающих в работе преобразовательного устройства, вполне приемлем.

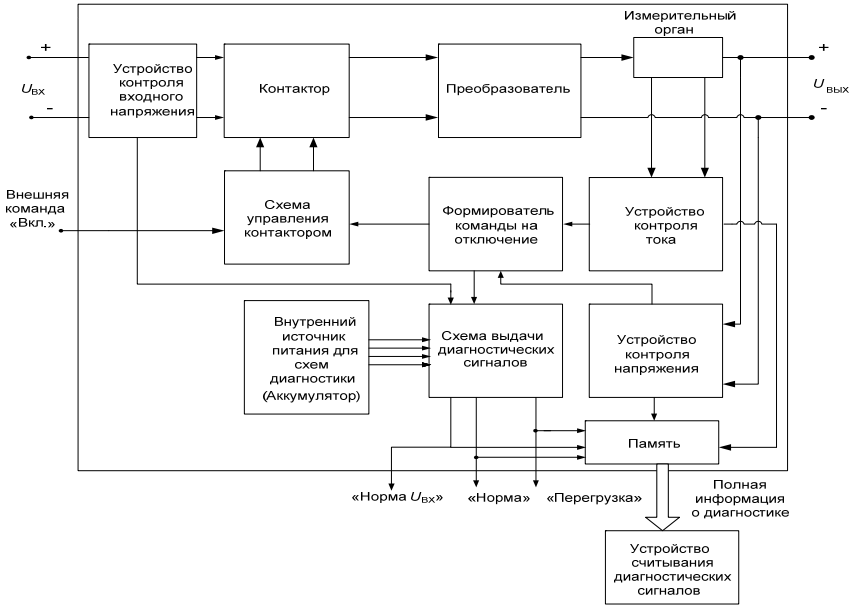


Рис. 3. Преобразовательное устройство с энергонезависимой памятью для сохранения диагностических сигналов

На сегодняшний день для организации данного способа проводятся обзор различных типов энергонезависимой памяти, построение алгоритма диагностики и реализация математической модели. Результаты исследований будут представлены в дальнейшем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Угрюмов Е.П.* Цифровая схемотехника. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2000. С. 157–190.

КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНЗИСТОРЕ ПРИ РАБОТЕ НА АКТИВНО-ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ БЕЗ НУЛЕВОГО ДИОДА

Д.Б. Бородин, аспирант, В.Д. Семёнов, проф., каф. ПрЭ, к.т.н.
Научный руководитель В.Д. Семёнов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, Borodindanila@mail.ru

В работе [1. С. 19–21] рассматриваются особенности работы полупроводниковых приборов на комплексную нагрузку на качественном уровне, что не позволяет количественно оценить времена пере-

ключений и коммутационные потери на включение и выключение. Количественные оценки этих величин позволяют более точно представить переходные электромагнитные процессы в полупроводниковых ключах при их переключении, что делает эту тему актуальной.

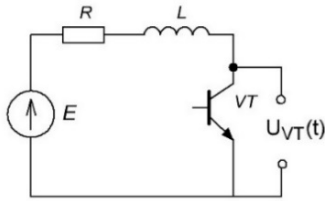


Схема транзисторного ключа с активно-индуктивной нагрузкой представлена на рис. 1.

Рис. 1. Транзисторный ключ с активно-индуктивной нагрузкой

Для исследования процессов включения принимаем допущение о том, что напряжение коллектор–эмиттер уменьшается линейно, что можно записать следующим образом:

$$U_{VT} = \left(1 - \frac{t}{t_{\text{сп}}}\right), \tag{1}$$

где $t_{\text{сп}}$ – время спада напряжения на транзисторе от напряжения питания E до нуля.

Тогда к нагрузке RL будет приложено напряжение

$$e(t) = E - U_{VT}(t) = \frac{E}{t_{\text{сп}}} \cdot t = A \cdot t. \tag{2}$$

Дифференциальное уравнение, соответствующее времени 0 – $t_{\text{сп}}$, будет иметь вид

$$L\frac{di}{dt} + t \cdot R = A \cdot t. \tag{3}$$

Решение этого уравнения [2. С. 46–47] имеет вид

$$i = \frac{A}{R}(t - \tau e^{-t/\tau}), \tag{4}$$

где $\tau = L/R$ – постоянная времени цепи нагрузки.

Разлагая экспоненту в ряд $e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau}...$ и ограничиваясь первыми тремя членами, выражение (4) преобразуем к виду

$$i = \frac{A}{R} \cdot \frac{t^2}{2\tau}. \tag{5}$$

Подставляя A и τ в (5), получаем ток в нагрузке на этапе включения:

$$i_{\text{вкл}} = \frac{E}{R} \cdot \frac{t^2}{2 \cdot \tau \cdot t_{\text{сп}}}. \tag{6}$$

Поскольку, при $t = t_{сп}$ напряжение на транзисторе (1) станет равным нулю, а ток вырастет до значения

$$I(t_{сп}) = \frac{E}{R} \cdot \frac{t_{сп}}{2 \cdot \tau}, \tag{7}$$

то время включения транзистор $t_{вкл} = t_{сп}$. Тогда мгновенная мощность, выделяемая на транзисторе во время включения, будет равна

$$P_{вкл}(t) = U_{VT\ вкл}(t) \cdot i_{вкл}(t) = E\left(1 - \frac{t}{t_{вкл}}\right) \cdot \frac{E}{R} \cdot \frac{t^2}{2 \cdot \tau \cdot t_{выкл}}. \tag{8}$$

Энергия, рассеиваемая в транзисторе за одно выключение:

$$W_{вкл}(t) = \int_0^{t_{вкл}} P_{вкл} dt = \frac{1}{24} \cdot \frac{E^2}{R} \cdot \frac{t_{вкл}^2}{\tau}. \tag{9}$$

Временные диаграммы, поясняющие процесс переключения транзистора при принятых попущениях, представлены на рис. 2.

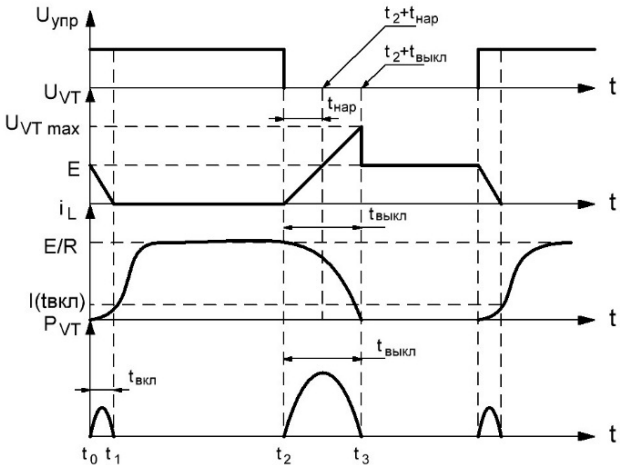


Рис. 2. Диаграммы процессов переключения

После момента времени $t_1 = t_{сп} = t_{вкл}$, когда транзистор включён, *RL*-нагрузка находится под напряжением *E* и дифференциальное уравнение соответствующее этому интервалу времени будет иметь вид

$$L\frac{di}{dt} + i \cdot R = E. \tag{10}$$

Решение уравнения (10) с учётом начальных условий [1. С. 33]:

$$i = \frac{E}{R}(t - e^{-t/\tau}) + I_0\, e^{-t/\tau}. \tag{11}$$

Установившееся значение тока при $t > (3 \div 5)\tau$ будет равно E/R.

В момент времени t_2 приходит сигнал на выключение транзистора VT. Напряжение на нём, согласно нашему допущению, начинает линейно возрастать в соответствии с выражением

$$U_{VT}(t) = \frac{E}{t_{\text{пер}}} \cdot t = A_1 \cdot t. \tag{12}$$

Дифференциальное уравнение, соответствующее интервалу времени $t_2 \div (t_2 + t_{\text{выкл}})$, имеет вид

$$L\frac{di}{dt} + i \cdot R = E - U_{VT}(t) = E - A_1 \cdot t. \tag{13}$$

При начальных условиях: $I(0) = E/R$.

Дифференциальному уравнению (13), с учётом начальных условий, соответствует операционное уравнение

$$L(p) \cdot I(p) + R \cdot I(p) - L(p) \cdot I(0) = E - \frac{A_1}{p}. \tag{14}$$

Решаем (14) относительно тока:

$$I(p) = \frac{E}{L(p + 1/\tau)} + \frac{I(0) \cdot p}{(p + 1/\tau)} - \frac{A_1}{pL(p + \tau)}. \tag{15}$$

Оригинал изображения (15) найден как

$$i(t) = \frac{E}{L} \cdot \tau(1 - e^{-t/\tau}) + I_0 e^{-t/\tau} - C\alpha^{-1}\left(\frac{A_1}{pL(p + 1/\tau)}\right), \tag{16}$$

где $C\alpha^{-1}\left(\frac{A_1}{pL(p+1/\tau)}\right)$ – обратное преобразование по Карсону, причём

$$C\alpha^{-1}\left(\frac{A_1}{pL(p + 1/\tau)}\right) = \frac{A_1}{L \cdot (1/\tau)}\left(1 - e^{-t/\tau}\right),$$

а множитель $1/p$ в третьем члене выражения (15) эквивалентен интегрированию в пределах от 0 до t соответствующего оригинала.

Тогда

$$i(t) = \frac{E \cdot \tau}{L}(1 - e^{-t/\tau}) + I_0 e^{-t/\tau} - \frac{A_1 \cdot \tau}{L}\int_0^t (1 - e^{-t/\tau})dt =$$

$$= \frac{E}{R}\left(1 + \frac{\tau}{t_{\text{нар}}} - \frac{t}{t_{\text{нар}}} - \frac{\tau}{t_{\text{нар}}} \cdot e^{-t/\tau}\right). \tag{17}$$

Разлагая экспоненту в ряд и ограничивая тремя членами, получим

$$i(t) = \frac{E}{R}\left(1 + \frac{\tau}{t_{\text{нар}}} - \frac{t}{t_{\text{нар}}} - \frac{\tau}{t_{\text{нар}}} \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau}\right)\right) = \frac{E}{R}\left(1 - \frac{t^2}{2 \cdot \tau \cdot t_{\text{нар}}}\right). \tag{18}$$

При $t = t_{вкл}$ ток = 0. Отсюда

$$0=\frac{E}{R}\left(1-\frac{t_{выкл}^2}{2\cdot\tau\cdot t_{нар}}-t_{выкл}=\sqrt{2\cdot\tau\cdot t_{нар}}\right). \quad (19)$$

Напряжение на ключе при $t = t_{вкл}$

$$U_{VT\,\max}=U_{VT}(t_{выкл})=\frac{E}{t_{нар}}\cdot t_{выкл}=E\sqrt{2\cdot\frac{\tau}{t_{нар}}}. \quad (20)$$

Тогда

$$P_{выкл}(t)=U_{VT\ выкл}(t)\cdot i_{выкл}(t)=\frac{E}{t_{нар}}\cdot t\cdot\frac{E}{R}\left(1-\frac{t^2}{2\cdot\tau\cdot t_{нар}}\right)=\frac{E^2}{R\cdot t_{нар}}t-\frac{E^2\cdot t^2}{R\cdot 2\cdot\tau\cdot t_{нар}}. \quad (21)$$

Энергия, рассеиваемая в транзисторе за одно выключение:

$$W_{вкл}=\int_0^{t_{выкл}}\frac{E^2}{R^2\cdot t_{нар}}\cdot t\,dt-\int_0^{t_{выкл}}\frac{E^2\cdot t^3}{R\cdot 2\cdot\tau\cdot t_{нар}}\cdot dt=\frac{E^2}{R\cdot t_{нар}}\left(\frac{t_{выкл}^2}{2}-\frac{t_{выкл}^4}{8\cdot\tau\cdot t_{нар}}\right). \quad (22)$$

Подставляя (19) в (22), получаем

$$W_{вкл}=\frac{E^2}{R\cdot t_{нар}}\left(\frac{2\cdot\tau\cdot t_{нар}}{2}-\frac{4\cdot t_{нар}^2\cdot t^2}{8\cdot\tau\cdot t_{нар}}\right)=\frac{E^2\cdot\tau}{2R}=\frac{I_{уст}^2\cdot L}{2}. \quad (23)$$

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 и договора между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0182.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тугов Н.М. и др.* Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

2. *Гинзбург С.Г.* Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. М.: Высшая школа, 1967. 388 с.

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ В НУЛЕ ТОКА

Д.Б. Бородин, аспирант каф. ПрЭ, В.А. Кабиров, зав. лаб. ГПО

Научный руководитель В.Д. Семёнов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Borodindanila@mail.ru

В данной статье рассматривается способ уменьшения потерь в силовых полупроводниковых элементах за счёт введения «мягкой ком-

мутации». Квазирезонансные преобразователи (КРП), обеспечивающие мягкую коммутацию, подразделяются на преобразователи с переключением в нуле тока (КРП–ПНТ) и с переключением в нуле напряжения (КРП–ПНН). На рис. 1 представлен исследуемый квазирезонансный преобразователь напряжения повышающего типа с ПНТ.

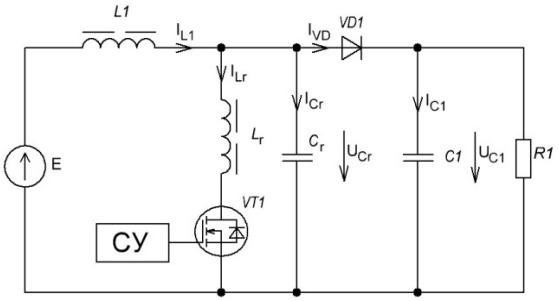


Рис. 1. Квазирезонансный преобразователь повышающего типа с переключением в нуле тока

Диаграммы работы преобразователя представлены на рис. 2. В исходном состоянии транзистор VT1 выключен, установившийся ток дросселя I_{L1} протекает через диод VD1. Конденсатор C_r заряжен до величины напряжения на нагрузке U_{C1}.

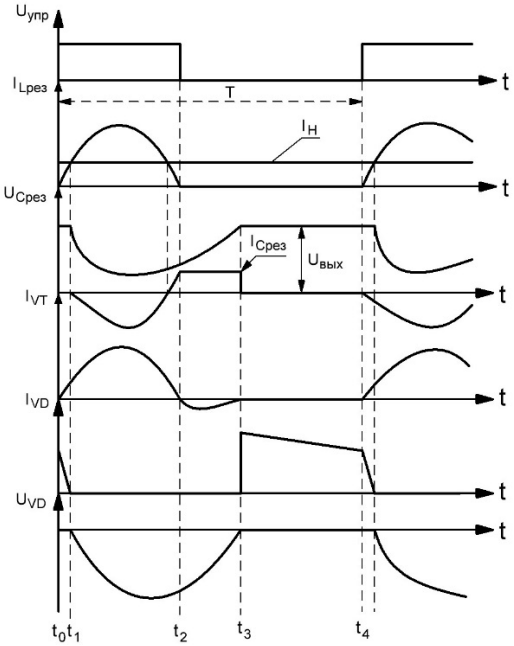


Рис. 2. Диаграммы работы преобразователя

Работу квазирезонансного преобразователя можно разделить на 4 этапа [1]:

1) $\Delta t_1 = t_1 - t_0$. Включение транзисторного ключа и накопление тока в резонансном дросселе L_r до величины I_{L1}. Ток диода VD1 уменьшается до нулевого значения и выключается.

2) $\Delta t_2 = t_2 - t_1$. Транзистор VT1 открыт, происходит разряд резонансной ёмкости C_r по цепи $C_r - L_r -$ VT1 и резонансное уменьшение тока дросселя L_r до нуля (включение обратного диода транзистора).

3) $\Delta t_3 = t_3 - t_2$. Ёмкость вновь заряжается до значения, и диод VD1 открывается. Транзистор VT1 на этом этапе должен быть выключен

4) $\Delta t_4 = t_4 - t_3$. Напряжение на резонансной ёмкости вновь достигло величины U_{C1}. Транзистор VT1 закрыт. Диод VD1 включается и остаётся открытым.

Для расчёта индуктивности и ёмкости резонансного контура зададимся следующими величинами:

$$U_{вх} = 55 \text{ В}; \quad U_{вых} = 100 \text{ В}; \quad I_{L\max} = 15 \text{ А}; \quad f_{пр} = 450 \text{ кГц}.$$

Относительная длительность открытого состояния транзисторного ключа

$$\gamma = 1 - U_{вх} / U_{вых} = 1 - 55/100 = 0{,}45.$$

Для облегчения условия перехода тока транзистора через нуль, необходимо выполнить условия

$$I_{L\max} \cdot \rho_r \le U_{вых}, \tag{1}$$

где $I_{L\max}$ – максимальный ток дросселя; ρ_r – волновое сопротивление резонансного контура; $U_{вых}$ – выходное напряжение преобразователя.

Длительность периода резонансного процесса должна быть равна длительности включённого состояния транзистора, т.е.

$$\gamma \cdot (1/f_r) = T_r = 2\pi / f_{пр}. \tag{2}$$

Используя (1), находим:

$$\rho_r \le (U_{вых} / I_{L\max}) \le 6{,}6 \text{ Ом}.$$

Используя (2), определим:

$$f_r = 2\pi / [\gamma \cdot (1 / f_{пр})] = 6{,}28 / (0{,}45 \cdot 2{,}22 \cdot 10^{-6}) = 1 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Для вычисления параметров резонансного контура используем систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_r = \sqrt{\dfrac{L_r}{C_r}}, \\ \omega_r = \dfrac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_r}}, \end{cases} \tag{3}$$

где L_r – индуктивность резонансного контура, C_r – ёмкость резонансного контура.

Используя (3), получим $C_r = \dfrac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot \rho_r} = \dfrac{1}{6{,}28 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 6{,}6} = 23{,}55$ нФ.

Величина резонансной индуктивности будет равна $I_{рез}$ = 1 мкГн. В качестве среды моделирования для анализа работоспособности схемы и исследования коммутационных потерь и потерь в преобразователе используем программный пакет MATLAB/Simulink. Модель преобразователя в среде Simulink представлена на рис. 3.

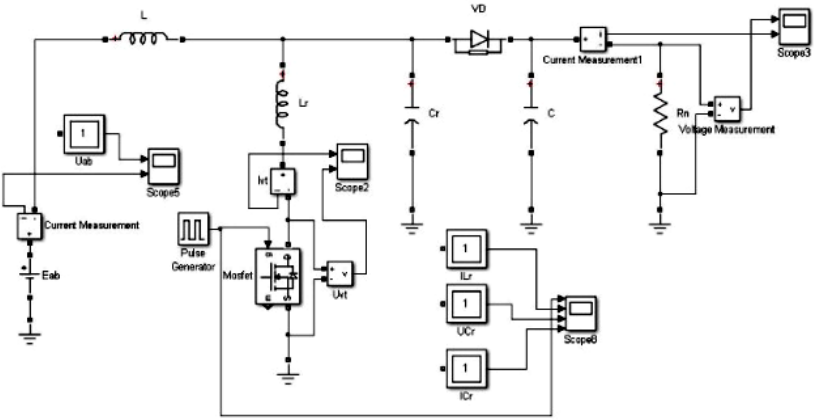


Рис. 3. Модель квазирезонансного преобразователя в среде MATLAB

Результаты моделирования преобразователя представлены на рис. 4, где *1* – сигнал управления транзисторным ключом, *2* – ток резонансной индуктивности, *3* – напряжение резонансной ёмкости, *4* – ток диода, *5* – напряжение на диоде.

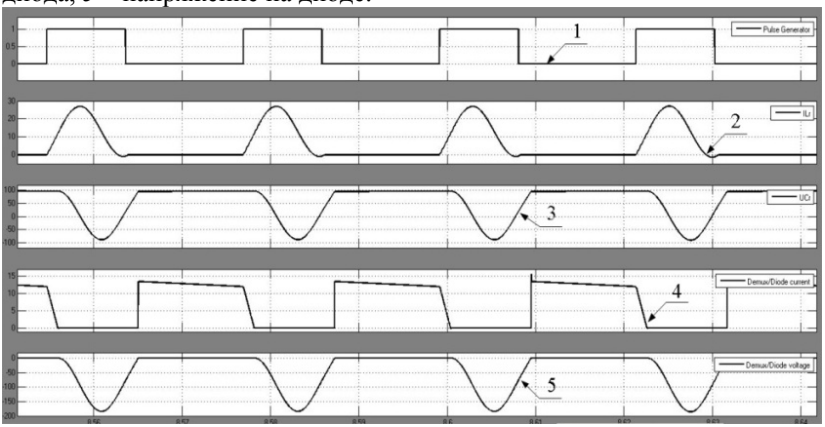


Рис. 4. Результаты моделирования

Как видно из рис. 4, полученные диаграммы совпадают с теоретическими. На рис. 5 представлены диаграммы работы транзисторного ключа преобразователя. Как видно из рис. 5, в момент закрытия ток транзистора не изменяется «скачком» и незначителен по величине. Выключение транзистора происходит в «мягком» режиме.

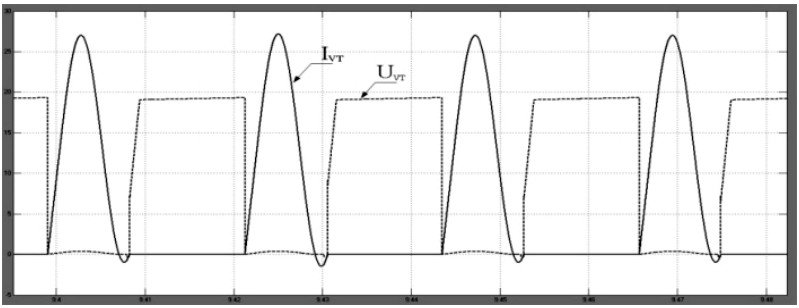


Рис. 5. Коммутационные процессы в транзисторном ключе

Как показано на рис. 5, при спаде тока до нулевого значения выброса тока не происходит из-за введённого в схему резонансного дросселя, ток которого не может измениться мгновенно [3]. На рис. 6 представлена диаграмма выходного напряжения.

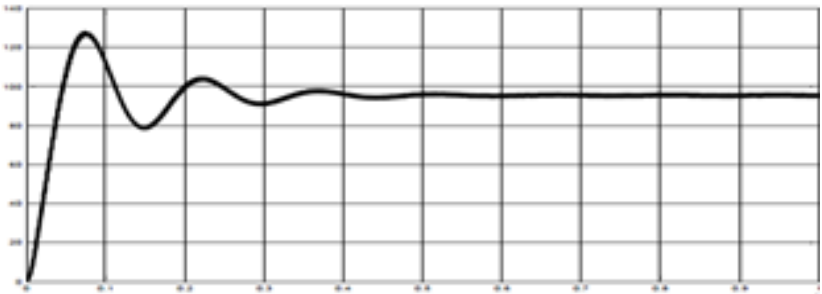


Рис. 6. Диаграммы выходного напряжения

Полученные диаграммы свидетельствуют о работоспособности и адекватности модели преобразователя. Следующим этапом исследования квазирезонансных преобразователей планируется количественный анализ коммутационных процессов.

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 и договора между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0182.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники: учеб. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. Ч. 2. 197 с.

2. *Hosseini S.H., Moradi R., Javidnia H.* A new general active snubber cell for DC/DC converters. Electrical Engineering Department. Faculty of Engineering. University of Tabriz. 51664. Tabriz-Iran.

3. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. 2-е изд., пер. и доп. М.: Изд. дом Додэка–XXI век, 2005. 384 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЕ STM32F4DISCOVERY

С.А. Деркач, студент ФЭТ

Научный руководитель Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru

Проект ГПО ПрЭ-1014 «Система энергообеспечения с заданными параметрами электрической энергии»

Рассмотрен цифровой ПИД-регулятор, разработан алгоритм работы микроконтроллера Stm32f407vgt6, получены регулируемые импульсы управления.

Для управления многофазными преобразователями постоянного напряжения используют специализированные ШИМ-контроллеры, такие как UC3875N, TPS40090PW (фирмы Texas Instruments) или IR3563A (International Recifier). В современных источниках питания особое внимание уделяется сбору информации о состоянии устройства, её обработке и передаче на сервер, чего обычный ШИМ-контроллер сделать не может.

В данной работе предлагается перенести функции ШИМ-контроллера на программируемый контроллер stm32f407vgt6 с ядром ARM Cortex-M4F [2]. Задача контроллера сводится к управлению силовой N-фазной частью, стабилизации выходного напряжения и отправке информации другому устройству (экрану). Блок-схема устройства показана на рис. 1. Импульсы управления, с точки зрения эффективности управления, должны быть сдвинуты во времени на T/N. Целостность периода должна сохраняться в заданных пределах.

Стабилизация выходного напряжения производится цифровым ПИД-регулятором. Выражение для расчета выходного сигнала ПИД-регулятора [1]:

$$Y_i = K \cdot E_i + \tau_д \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{изм}} + \frac{1}{\tau_и} \sum_{i=0}^{n} \delta_i \cdot \Delta t_{изм} ,$$

где K – коэффициент пропорциональной составляющей; E_i – рассогласование; $\tau_д$ – постоянная времени дифференцирования; ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1}; $\Delta t_{изм}$ – время между двумя соседними измерениями T_i и T_{i-1}; $\tau_и$ – постоянная времени интегрирования; $\Sigma\delta_i$ – накопленная в i-й момент времени сумма рассогласований.

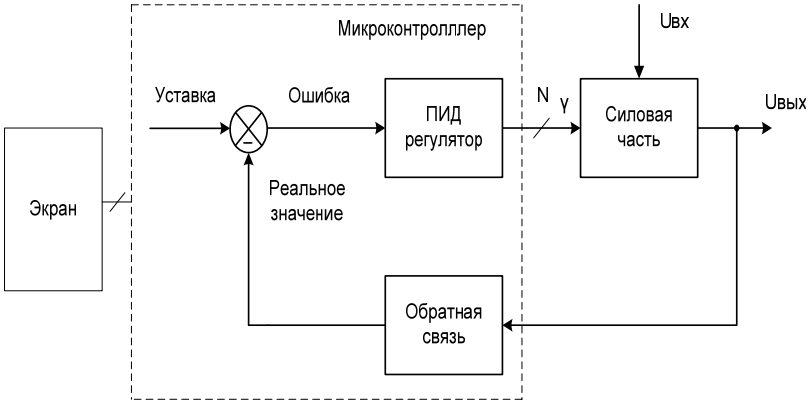


Рис. 1. Блок-схема устройства

Настройка ПИД-регулятора базируется на методе ручной настройки, основанной на правилах, изложенных в [1].

Разработан алгоритм работы микроконтроллера stm32f407vgt6 (рис. 2). При включении микроконтроллера происходит инициализация периферии (по умолчанию отключено тактирование). Следующим шагом является организация временных сдвигов импульсов управления. Затем запускается ШИМ, таймер для своевременного запуска АЦП и вывода информации. После оцифровывания данных вызывается функция ПИД-регулирования, в которой аналитически вычисляется текущая длительность импульса управления.

Работа выполнялась для обучения студентов и приобретения ими практических навыков. В результате был создан лабораторный макет (рис. 3) на базе отладочной платы stm32f4discovery7. Полученные импульсы (рис. 4) реализованы программно и регулируются ПИД-регулятором.

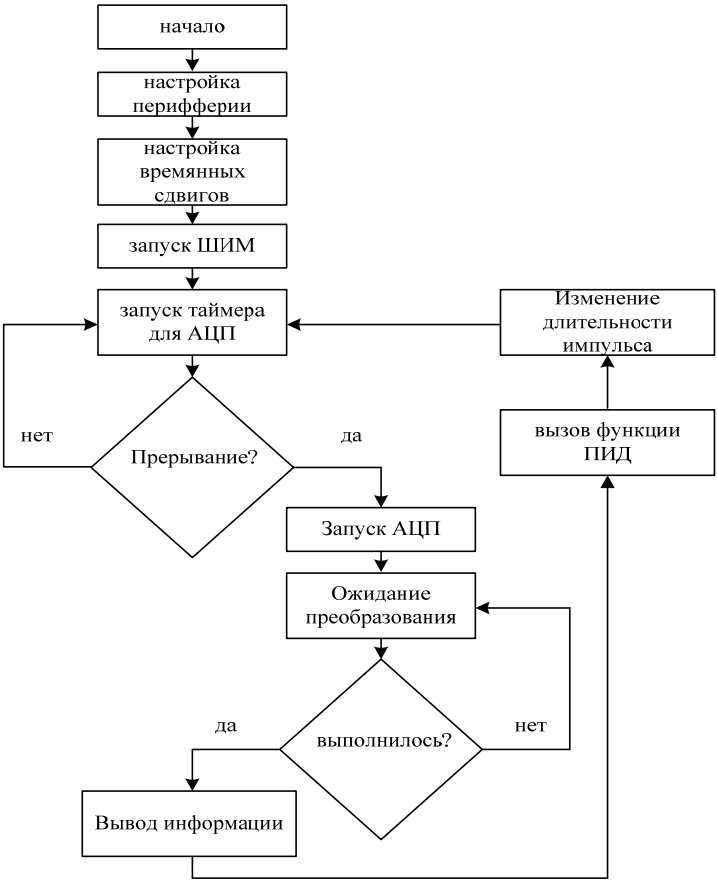


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера stm32f407vgt6

Рис. 3. Лабораторный макет

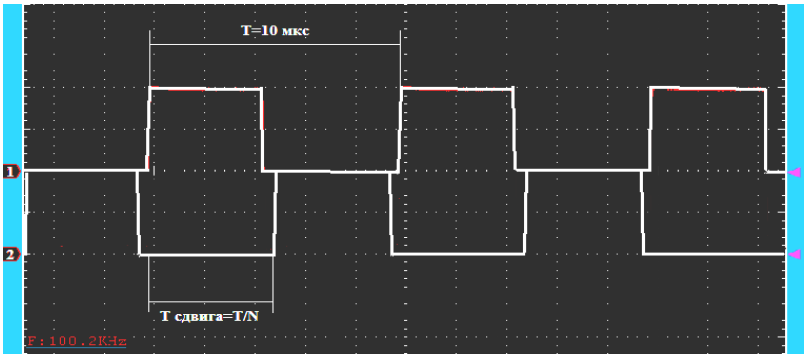


Рис. 4. Полученные импульсы

ЛИТЕРАТУРА

1. *Расчет* параметров ПИД-регулятора [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.polytech21.ru Заглавие с экрана (дата обращения: 09.03.2016).

2. *Материалы* сайта st.com [Электронный ресурс]. URL http://www.st.com Заглавие с экрана (дата обращения: 01.02.2016).

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С ЧИМ

С.И. Еньшин, студент каф. ПрЭ

Научные руководители Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, доцент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, lns@ie.tusur.ru
В.О. Оскирко, инженер
ИСЭ СО РАН, лаб. прикладной электроники, oskirkovo@gmail.com

Технология нанесения высококачественных тонких пленок и покрытий на разнообразные изделия чрезвычайно важна для электроники, оптики, машиностроения и других отраслей техники, включая автомобилестроение и строительство зданий.

До середины 70-х годов прошлого столетия тонкие слои наносились на подложки в вакууме в основном методом термического испарения исходного материала. Однако после создания промышленных магнетронных распылительных систем (МРС) ситуация в технологии тонких пленок изменилась. МРС заняли лидирующее положение в технологии тонкослойных покрытий из различных материалов [1]. Это в свою очередь потребовало создания источников питания для магнетронных распылительных систем.

Проведён анализ существующих схемотехнических решений и выделена классификация, разделяющая топологию инверторов на три основных типа: работающий в режиме «жесткой» коммутации, квазирезонансный, резонансный. Исходя из анализа, была выбрана топология резонансного инвертора с последовательным *LC*-контуром.

К недостаткам резонансных преобразователей относятся увеличенные амплитудные значения токов через полупроводниковые приборы и повышенные значения статических потерь мощности.

Однако благодаря близкой к синусоидальной форме напряжений и токов силовых ключей комплексно решаются многие проблемы, связанные с высокочастотным преобразованием энергии [2]. Например, такие как выделение большой пиковой мощности на кристалле транзистора при переключении, образование высокочастотных помех на фронтах переключения и т.д.

Разработано несколько узлов, входящих в состав ИП для МРС, выполнены расчёты, построена имитационная модель инвертора в среде PSIM, выполнена трассировка печатной платы в среде KiCad, проведен сравнительный анализ результатов моделирования и результатов, полученных экспериментальным путем.

Упрощенная схема силовой части ИП для МРС приведена на рис. 1 и состоит из следующих узлов: блок коммутации – *1*; сетевой выпрямитель – *2*; сетевой фильтр – *3*; мостовой инвертор, последовательный *LC*-контур, состоящий из дросселя $L_{рез}$, конденсатора $C_{рез}$ и трансформатора TV – *4*.

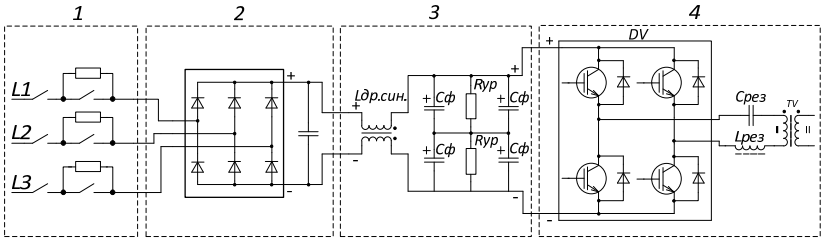


Рис. 1. Упрощенная схема силовой части ИП для МРС

Блок коммутации обеспечивает в момент включения источника плавный заряд полярных конденсаторов $C_ф$ большой емкости, входящих в сетевой фильтр, тем самым предотвращает возникновение ударного тока, который приводит к выходу из строя конденсаторов и сетевого выпрямителя.

Сетевой фильтр реализован на синфазном дросселе $L_{др.син}$ и на полярных конденсаторах большой ёмкости $C_ф$, включенных последова-

тельно-параллельно. Такое включение конденсаторов требует установки резисторов $R_{ур}$ для того, чтобы равномерно распределить напряжения между конденсаторами.

Мостовой инвертор реализован на транзисторном модуле DV, резонансном дросселе $L_{рез}$, резонансной ёмкости $C_{рез}$ и трансформаторе TV.

Осциллограммы тока *LC*-контура приведены на рис. 2, 3 при максимальной выходной мощности инвертора.

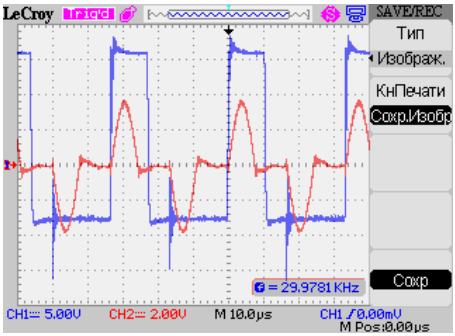


Рис. 2. Осциллограмма тока *LC*-контура

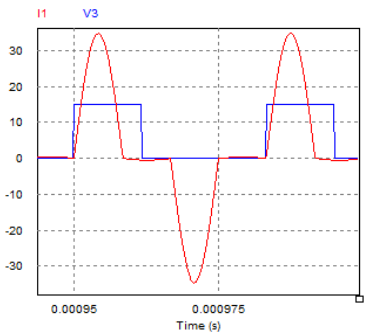


Рис. 3. Ток *LC*-контура в PSIM

Осциллограммы тока *LC*-контура в режиме короткого замыкания на вторичной обмотки трансформатора приведены на рис. 4, 5.

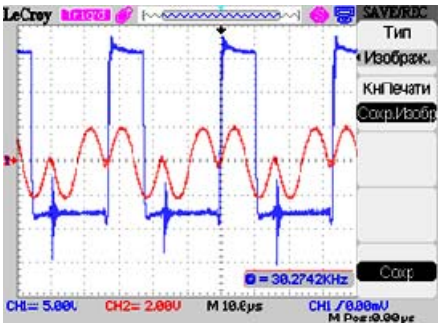


Рис. 4. Осциллограмма тока *LC*-контура

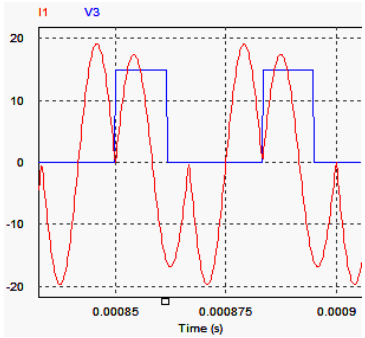


Рис. 5. Ток *LC*-контура в PSIM

Формула для расчёта резонансной емкости:

$$C_{рез} = P/U^2_C\ f,$$

где P – выходная мощность инвертора, задается с небольшим запасом, Вт; U_C – напряжение на резонансной емкости, равное двойному значению входного напряжения инвертора, В; f – частота работы инвертора, Гц.

Формула для расчёта общей резонансной индуктивности L_Σ:

$$L_\Sigma = \frac{T^2}{4\pi^2 C},$$

где T – период повторения импульсов управления, с.

Индуктивность резонансного дросселя найдем из соотношения

$$L_{рез} = L_\Sigma - L_S,$$

где L_S – индуктивность рассеяния трансформатора, Гн.

Инвертор промышленного образца представлен на рис. 6.

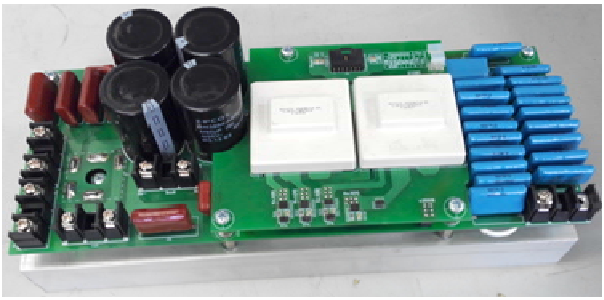


Рис. 6. Внешний вид инвертора в печатном монтаже

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузьмичев А.И.* Магнетронные распылительные системы. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.

2. *Легостаев Н.С.* Динамические свойства высокочастотных транзисторных преобразователей // Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. 97 с.

3. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Изд. дом «Додэка-XXI век», 2001. 384 с.

ПОЛУМОСТОВОЙ LLC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НИЗКИМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ

В.В. Игнатенко, студент, каф. ПрЭ

Научный руководитель А.Г. Юдинцев, зав. лаб. 14-го отд. НИИ АЭМ ТУСУРа, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ignatenko.vlas@gmail.com

В настоящее время в устройствах электроники в качестве источников питания применяются различные виды импульсных преобразователей. Увеличение рабочей частоты значительно уменьшает габариты пассивных компонентов, таких как трансформаторы и фильтры.

Однако импульсные процессы, происходящие в мощных преобразователях, неизбежно приводят к возникновению высокочастотных шумов и помех. Электромагнитные помехи, распространяясь по соединительным проводам, шинам, дорожкам печатных плат, обеспечивают неблагоприятный электромагнитный фон во всем изделии. Коммутационные процессы в импульсных преобразователях сопровождаются выделением на кристалле транзистора большой мощности за очень малые участки времени, что ведет к постепенной деградации кристалла. Возникает необходимость применения преобразователей с низкими динамическими потерями.

Одним из схемотехнических решений импульсного преобразователя с низкими динамическими потерями является резонансный *LLC*-преобразователь (рис. 1).

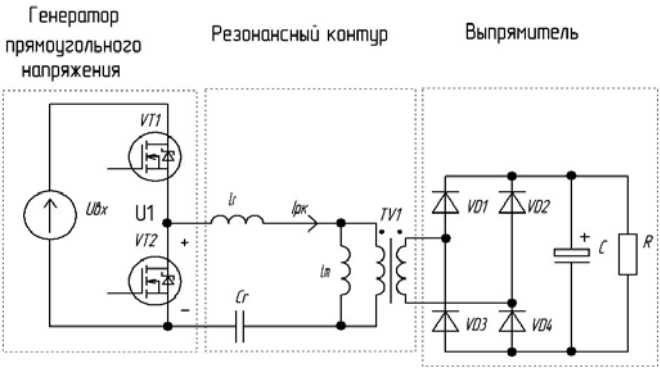


Рис. 1. Структурная схема *LLC*-преобразователя

Рисунок 1 показывает упрощенную схему *LLC*-преобразователя, где L_m – индуктивность намагничивания, действующая как шунтирующая индуктивность, L_r – резонансная индуктивность, C_r – резонансная емкость. Принцип работы, а также характеристики преобразователя подробно разобраны в работах Мелешина, Янга, Луо и др. [1–3]. В процессе исследования в НИИ АЭМ был собран макет *LLC*-преобра-зователя со следующими параметрами:

– входное напряжение – постоянное 48 В;

– выходное напряжение – постоянное 18 В;

– мощность нагрузки – 60 Вт;

– рабочая частота – 90 кГц.

В качестве силовых ключей используются MOSFET-транзисторы. Время паузы (dead time) для транзисторов инверторной стойки 450 нс. Результаты эксперимента представлены в виде осциллограмм (рис. 2–5).

Как видно из рис. 2, в начальный момент времени ток протекает в отрицательном направлении. При этом ток протекает через обратный диод MOSFET-транзистора и определяется током индуктивности L_m.

Ток резонансного контура (см. рис. 3) имеет форму, близкую к синусоидальной. Таким образом, улучшается гармонический состав тока за счет уменьшения влияния высших гармоник.

Как видно из рис. 4, после перехода тока индуктивности L_m через нуль ток контура начинает протекать через канал транзистора в условно-положительном направлении. При этом напряжение на транзисторе близко к нулю.

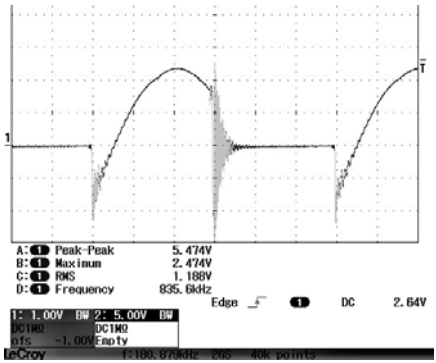
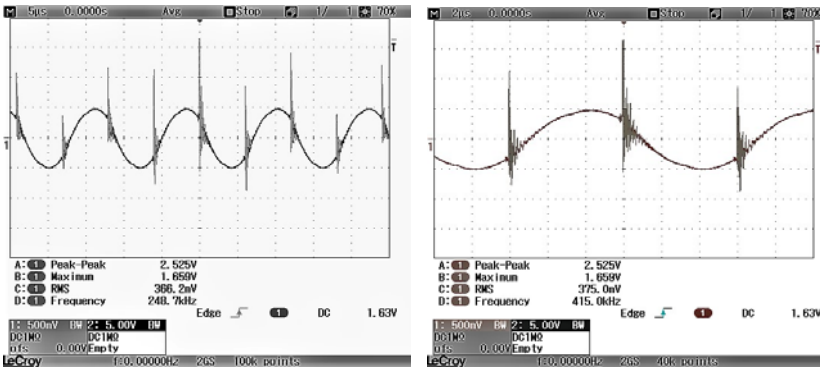


Рис. 2. Ток стока транзистора



а *б*

Рис. 3. Ток резонансного контура в разных временных масштабах – *а*, *б*

Таким образом, происходит включение транзистора при нуле напряжения ПНН (ZVS в зарубежной литературе). Производная напря-

жения сток – исток и тока стока отрицательна (напряжение спадает до нуля, а ток протекает через обратный диод в условно отрицательном направлении). В момент включения небольшая импульсная мощность выделяется на обратном диоде.

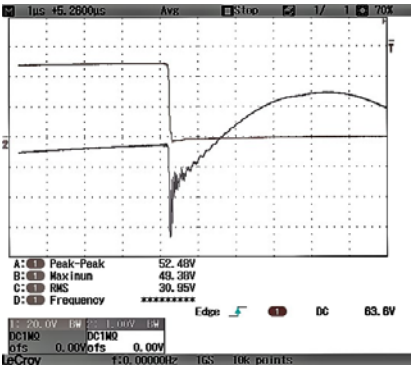


Рис. 4. Напряжение сток – исток и ток стока в момент включения транзистора

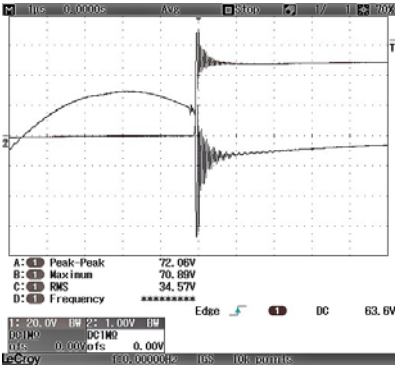


Рис. 5. Напряжение сток – исток и ток стока в момент выключения транзистора

В отличие от включения процесс выключения (см. рис. 5) происходит в более «жестких» режимах, но следует заметить, что это ток, при котором происходит выключение ниже амплитудного значения тока, следовательно, потери на выключение меньше, чем в импульсных преобразователях с «жесткой» коммутацией.

Таким образом, амплитуда тока, протекающего через обратный диод, и тока, при котором происходит выключение транзистора, зависит от индуктивности намагничивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мелешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. С. 438–445.

2. *Yang B.* Topology investigation of front end DC/DC power conversion for distributed power system. P. 95–141.

3. *Luo F.L., Ye H.* Advanced DC/DC converters (alk. paper) 1. DC-to-DC converters. 1973. II. Title. III. Series. C. 62–65.

МИКРОСХЕМЫ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

К.П. Калошин, Р.А. Проскурин. А.М. Юлдашев, студенты каф. ПрЭ
Научный руководитель А.В. Топор, зав. лабораторией,
ст. преподаватель каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, kirill95_@mail.ru
Проект ГПО ПрЭ-1602 «Компенсатор мощности
для светодиодной лампы»

Задача повышения коэффициента мощности сетевых статических преобразователей возникла еще в середине XX в. в связи с повышением удельной мощности нелинейных потребителей в сетях переменного тока, однако решение этой задачи происходило поэтапно по мере развития технологии силовых полупроводниковых приборов и систем управления преобразователями. С самого начала разработок обозначилось [3] два пути решения задачи:

1. Повышение коэффициента мощности внутренними средствами путем модификации схемы преобразователя или алгоритма переключения ключей.

2. Введение в электрическую сеть дополнительных устройств, подключенных на стороне переменного тока, – сетевых фильтров или кондиционеров сети.

Термин «коррекция коэффициента мощности» появился вначале для обозначения способа решения лишь в одной области силовой электроники – при создании устройств для питания радиоэлектронной аппаратуры малой мощности (до 1–2 кВт).

Стремление к улучшению массогабаритных показателей блоков питания радиоэлектронной аппаратуры, снижению стоимости, повышению технологичности привело к широкому использованию на входе блока питания выпрямителя с *C*-фильтром, который потребляет от сети ток короткими импульсами, расположенными вблизи экстремальных значений сетевого напряжения, и имеет в связи с этим крайне низкий коэффициент мощности (χ = 0,3–0,5).

Для борьбы с этой негативной тенденцией был принят ряд международных [2] и государственных [1] стандартов (в Российской Федерации), нормирующих гармонический состав токов, потребляемых нелинейными потребителями. Для выполнения требований стандартов, которые прямо запрещают применение выпрямителей с С-фильтрами мощностью более 50 Вт, были предприняты разработки, которые шли по двум указанным выше путям. Выпрямительные устройства с повышенным коэффициентом мощности стали называть выпрямителями с

коррекцией коэффициента мощности или просто **корректорами коэффициента мощности** (ККМ).

Задачей корректора коэффициента мощности является в идеале формирование синусоидального сетевого тока, синфазного напряжению сети. Способы построения ККМ весьма различны, и коррекция коэффициента мощности подразделяется на два вида:

1. Пассивная коррекция коэффициента мощности, достигаемая без введения дополнительных ключевых элементов или изменения алгоритма переключения существующих ключей, но посредством функционирования пассивных компонентов схемы. (К этому типу коррекции нередко относят замену *C*-фильтра выпрямителя *LC*-фильтром – техническое решение известное еще с 1930-х гг.).

2. Активная коррекция коэффициента мощности, которая достигается с помощью коммутации основных или дополнительных полупроводниковых ключей.

Устройства с активной коррекцией мощности по мере расширения номенклатуры силовых полупроводниковых приборов, а также микроэлектронных устройств управления получили преимущественное распространение, поскольку обладают лучшими массогабаритными, а нередко и стоимостными показателями. Среди устройств к активной коррекцией коэффициента мощности также выделяются два типа:

1. Устройства с коммутацией ключей на сетевой частоте.

2. Устройства с коммутацией ключей на повышенной частоте.

В 2011 г. компания International Rectifier представила новые микросхемы ККМ IR115xS взамен снятых с производства IR1150. Основным отличием ИМС ККМ компании IR от других представленных на рынке решений является особый, запатентованный компанией режим ОСС (One Cycle Control). Суть этого режима заключается в том, что решение, основанное на ОСС, не требует измерения линии переменного тока – вся необходимая информация для корректировки формы кривой тока и тем самым увеличения коэффициента мощности извлекается из постоянного напряжения на шине и из обратного тока. Такое решение позволяет упростить схемотехнику ККМ и ускорить разработку новых изделий. Другие производители ничем подобным похвастаться не могут.

В типичном источнике питания (1 кВт) решение, основанное на ОСС, уменьшает на 40% количество резисторов и конденсаторов, а также уменьшает на 50% площадь на печатной плате в секции ККМ. Помимо этого, линейка микросхем IR115xS содержит вывод OVP для защиты от перенапряжения, что обеспечивает дополнительную защиту для систем с высокой мощностью.

Алгоритм ОСС работает с использованием двух контуров управления: первый – медленный внешний контур – следит за выходным на-

пряжением; второй – быстрый внутренний – для слежения за током. Комбинация этих двух управляющих цепей позволяет амплитуде и огибающей входного тока быть пропорциональными и находиться в одной фазе с входным напряжением; при этом выходное напряжение конвертера остается на заданном уровне. Все это выполняется при условии работы в режиме неразрывных токов дросселя.

Применение корректора мощности IR1150S в схеме источника питания для светодиодных светильников позволяет получить улучшенные характеристики по электромагнитной совместимости, придать потребляемому от сети току синусоидальной формы (т.е. добиться снижения коэффициента гармоник), ограничить выходную мощность, а также обеспечить схеме защиту от короткого замыкания и от скачков или проседаний напряжения.

Основное противоречие, возникающее при применении ККМ для светодиодных светильников, заключается в том, что его выходное напряжение составляет 400–450 В, а для питания светодиодных светильников требуется пониженное напряжение источника питания (12–60 В). Это приводит к необходимости включать в схему дополнительный понижающий DC/DC-преобразователь. Целью проекта является разработка схемы корректора коэффициента мощности, совмещенного с понижающим преобразователем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ* Р 513.17–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Введ. 2002-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2000. 16 с

2. *МЭК* IEC 1000-3-2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения Введ. 1999-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 16 с.

3. *Чаплыгин Е.Е.* Однофазные корректоры коэффициента мощности и их модели [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://chaplyginyy.narod.ru/olderfiles/1/Odnofaznye_korrektory kojefficient-98259.doc

ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА ICE-BOX

А.В. Слободецкий, Н. Зальцман, студенты каф УИ,
Е Ким, магистрант каф. ПрЭ
Научный руководитель А.В. Литвинов, электроник каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, lenchik-2893@mail.ru
Проект ГПО ПрЭ-1603 «Система охлаждения персонального компьютера ICE-BOX»

Персональные компьютеры широко распространены в повседневной жизни от развлекательных мероприятий до образовательных, экономических и многих других и сфер. Основной «рабочей частью» персонального компьютера является системный блок. Для того чтобы повысить качество его работы и продлить срок службы оборудования, находящегося внутри его корпуса, нами предлагается создать герметичный корпус с внутренним теплообменом по принципу холодильных камер. Это позволит эффективнее отводить тепло с радиаторов и элементов, которые расположены внутри охлаждающей камеры. Такую систему охлаждения мы называем Ice-box.

Задача заключается в том, чтобы понизить рабочую температуру внутри системного блока путем эффективного охлаждения, основанного на принципе работы холодильных камер, что позволит увеличить срок службы и качество работы всей ПЭВМ в целом.

Система охлаждения по принципу холодильника будет состоять из компрессора, двух радиаторов (горячего и холодного) и платы управления для повышения эффективности работы системы в целом. Предполагается создать систему управления, которая будет отслеживать необходимые значения параметров температуры, взаимодействовать с программным обеспечением компьютера через USB-разъём на материнской плате. При этом электропитание платы управления предполагается от стандартного блока питания ПК. Система управления будет подстраивать работу теплообменного аппарата так, чтобы достичь заданной температуры на графическом или основном процессоре, отслеживая данные, получаемые по USB от материнской платы [1]. Кроме того, для обеспечения взаимодействия с операционной системой компьютера и стабилизации температуры внутри корпуса на заданном уровне предполагается написать драйвер ПО и установить современный микроконтроллер, например STM32, поддерживающий протокол USB [2].

В дальнейшем будет разработано приложение, которое позволит настраивать саму систему на работу внутри корпуса Ice-box. Если система будет расположена внутри корпуса Ice-box, то должен меняться

характер её работы по принципу управления скоростями вращения кулеров для более эффективного охлаждения и более качественной работы всей системы в целом. Так, например, обычная система настроена на среднюю температуру охлаждающей среды примерно 22 °C, а система, которая находится внутри Ice-box, будет настраиваться на 0 °C. Вся система будет представлена в виде 3D-модели, и пользователь сможет увидеть температуру на заданных точках с экрана компьютера. Предложенная нами система охлаждения позволит повысить срок службы и качество работы оборудования, находящего внутри корпуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Компьютерный* журнал. Режим доступа: http://inforecrut.ru/zhurnal/vypusk-19 свободный (дата обращения: 02.03.2016).

2. *Вальпа О.* Современные 32-разрядные ARM-микроконтроллеры серии STM32: блок резервных данных BKP // Современная электроника. 2014. № 3.

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИНДУКТОРА «ПЕЧАТАЮЩЕЙ» ГОЛОВКИ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ

Л.А. Корчуганов, Д.В. Ли, студенты каф. ПрЭ

Научные руководители: В.Д. Семенов, зав. каф. ПрЭ по НР, к.т.н.
В.А. Федотов, зав. лаб. ГПО

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, korchuganovleonid@gmail.com

3D-печать металлом представляет собой процесс изготовления трехмерного твердого объекта практически любой формы. Такие способы обработки материалов, как сверление, резка или фрезеровка, основаны на придании необходимой формы объекту из заготовки путем удаления «лишнего» материала. При этом для каждого вида металлообработки требуются определенные геометрические формы заготовок [1].

Технология 3D-печати металлом уже используется в машиностроении для создания единичных деталей, в медицине – для создания индивидуальных протезов, также печать металлом получила широкое применение в военной и космической промышленности [1].

Хорошим примером решения для 3D-печати металлом является струйный принтер, где расплавленный пластик выталкивается подающим материалом, при этом не требуется дополнительный механизм, подающий материал для печати. Для качественного нагрева металла удобно использовать индукционный нагрев, т.к. индукционный нагрев является наиболее эффективным способом передачи тепла в металл [2].

Особый интерес представляет индуктор, который является блоком для плавления металла. Представлен расчёт магнитной системы индуктора, с помощью которого происходит нагрев медной проволоки. Индуктор производит нагрев медного провода, проходящего со скоростью 10 мм/с через печатающую головку. Предварительные расчеты показывают, что для плавления медного провода диаметром 1 мм, длиной 10 мм за 1 с необходимо обеспечить мощность P = 114 Вт.

Для индуктивности индуктора с концентратором потока справедливо следующее выражение:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{S \cdot W \cdot B_m}{I}, \qquad (1)$$

где L – индуктивность индуктора, Ψ – потокосцепление, I – ток, S – площадь магнитопровода, W – число витков, B_m – магнитная индукция в сердечнике (и в зазоре).

Индуктивность индуктора с зазором, равным диаметру нагреваемого провода, можно представить в следующем виде:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_э \cdot W^2 \cdot S}{l_l}, \qquad (2)$$

где $\mu_э$ – эквивалентная магнитная проницаемость, W – число витков, l_l – диаметр провода обмотки (величина зазора).

Приравняв (1) к (2), получим следующее выражение:

$$W = \frac{l_l \cdot B_m}{I \cdot \mu_0 \cdot \mu_э}. \qquad (3)$$

Откуда видно, что число витков индуктора прямо пропорционально величине зазора и магнитной индукции в нем и обратно пропорционально току, проходящему по этим виткам магнитной проницаемости.

Рассчитаем количество витков W при следующих геометрических параметрах магнитопровода: a = 20 мм, b = 40 мм и δ = 30 мм, а также при B_m = 0,11 Т, а ток индуктора примем I = 10 А. Для наглядности ниже приведен рисунок магнитопровода (рис. 1).

Подставив данные значения в формулу (3), получим необходимое количество витков для обеспечения магнитной индукции B_m:

$$W = \frac{0{,}11 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3}}{1{,}257 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 14.$$

Выберем 14 витков, так как необходимо обеспечить магнитную индукцию B_m = 0,11 Т. Подставив все данные в формулу (2), произведем расчет индуктивности индуктора.

$$L = \frac{1{,}257 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 10^{-3} \cdot 14^2}{1{,}6 \cdot 10^{-3}} = 123 \text{ мГн}.$$

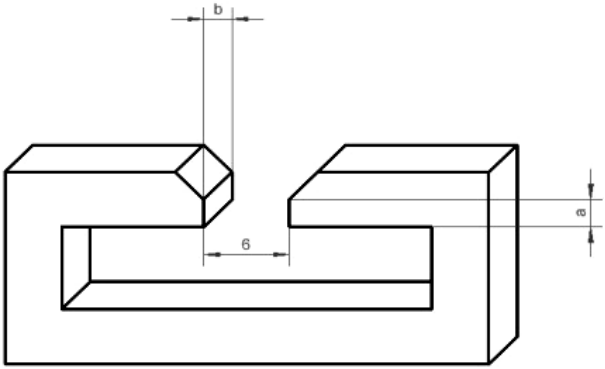


Рис. 1. Магнитопровод

Задавшись частотой тока f = 100 кГц, определим напряжение U по следующей формуле:

$$L = \frac{U}{\omega \cdot I}, \tag{4}$$

где $\omega = 2\pi f$ циклическая частота.

Выразив напряжение U из формулы (4), преобразуем ее в следующий вид:

$$U = \omega \cdot L \cdot I. \tag{5}$$

Подставив рассчитанные выше параметры, получим напряжение индуктора:

$$U = 1{,}257 \cdot 10^{(-6)} \cdot 123 \cdot 10^{(-6)} \cdot 10 = 773 \text{ В}.$$

Также, зная индуктивность индуктора и частоту, можем определить емкость резонансного контура по следующей формуле:

$$C = \frac{1}{L \cdot \omega^2}. \tag{3}$$

Подставив вычисленные выше данные, рассчитаем ёмкость индуктора:

$$C = \frac{1}{123 \cdot 10^{-6} \cdot (6{,}283 \cdot 10^5)^2} = 0{,}021 \text{ мкФ}.$$

Рассчитанные величины будут использоваться при проектировании печатной головки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Корчуганов Л.А.* Перспективы устройств трехмерной печати металлических конструкций // Научная сессия ТУСУР–2015. Томск, 2015. Т. 5. 316 с.
2. *Корчуганов Л.А.* Устройство 3D-печати металлических конструкций / Л.А. Корчуганов, Р.Г. Калинин, В.Д. Семенов, В.А. Федотов // Электронные средства и системы управления. 2015. №1. 201 с.
3. *Калинин Р.Г.* Прибор для снятия изоляции с проводов / Р.Г. Калинин, В.Д. Семенов, В.А. Федотов // Приборы и техника эксперимента. 2014. №1. 143 с.
4. *Карслоу Г.* Теплопроводность твердых тел: пер. со второго англ. изд. / Г. Карслоу, Д. Егер; ред. пер. А.А. Померанцев. М.: Наука, 1964. 487 с.
5. *Калинин Р.Г., Семенов В.Д., Федотов В.А.* Эффективность нагрева медного провода в зазоре индуктора поперечного магнитного поля для зачистки от лаковой изоляции // Доклады ТУСУРа. 2014. № 1 (31). С. 74–77.
6. *Калинин Р.Г.* Устройство индукционного нагрева для снятия изоляции с проводов: дис. … канд. техн. наук: 05.09.12. Томск, 2014. 171 с.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА НАГРУЗКИ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Д.А. Корольский, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель Г.Я. Михальченко, проф. каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Danmypro@sibmail.com

В настоящее время все чаще для освещения применяются светодиодные светильники, в которых используются полупроводниковые светоизлучающие диоды – светодиоды. Особенно часто они применяются в рабочих и офисных помещениях. Их преимущество по сравнению с другими типами освещения заключается в большем сроке службы, надежности и меньшем потреблении энергии. Современные светодиодные матрицы от мировых производителей при правильной эксплуатации способны проработать до 100000 ч [1]. Слабым звеном светодиодного светильника является его драйвер – устройство, преобразующее один вид энергии в другой, требуемый для питания светодиодов. Одним из самых ненадежных элементов, которые в них используются, является электролитический конденсатор. Из литературы [2] известно, что интенсивность отказов у электролитических конденсаторов в несколько раз больше, чем у керамических, и во много раз больше, чем у пленочных. К примеру, интенсивность отказов группы оксидно-электролитических конденсаторов отечественного производства

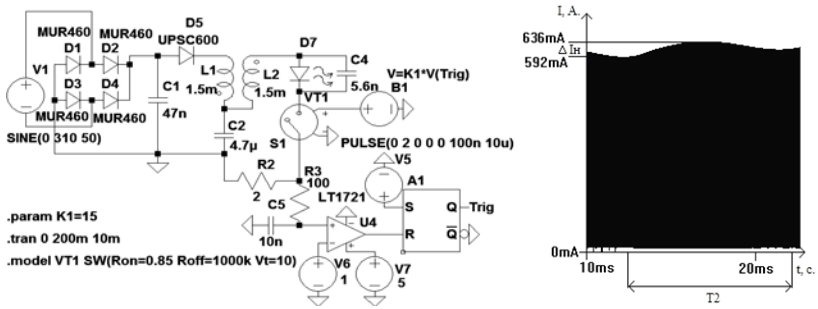
составляет $0{,}173 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, а у керамических на номинальное напряжение менее 1600 В – $0{,}0207 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Статистика также показывает, что чаще всего причина отказов светодиодных источников питания кроется в них. Обычное устранение электролитических конденсаторов приводит к тому, что в нагрузке появляются пульсации тока промышленной частоты, которые хоть и не заметны человеческому глазу, но приводят к быстрой утомляемости и головной боли.

На сегодняшний день известны некоторые методы построения импульсных преобразователей драйверов, позволяющие получить постоянный ток в нагрузке, в которых не используются электролитические конденсаторы. Все они имеют общий принцип работы – запас энергии в реактивных элементах в моменты, когда мгновенная входная мощность ниже средней передачи ее в нагрузку в остальные моменты времени.

В работах [3, 4] авторами предложены схемотехнические решения, позволяющие достичь снижения низкочастотной составляющей тока нагрузки без использования электролитических конденсаторов. Для оценки и сравнения параметров предложенных схем проведем их моделирование в среде LTSpice.

На рис. 1 показана модель первого источника питания, представленного в статье [3], на рис. 2 – модель второго источника, рассмотренного в статье [4]. Для всех случаев мощность в нагрузке составляет 25 Вт.

На рис. 1, *б* время T_2 – период низкочастотных колебаний тока нагрузки. В результате моделирования были получены следующие результаты: потребляемая мощность 28,7 Вт, мощность в нагрузке 25,3 Вт. КПД 90,13%. Амплитуда низкочастотных пульсаций тока 44 мА, при среднем токе 614 мА. Коэффициент пульсаций составляет 7,2%.



а *б*

Рис. 1. Модель первого источника питания в LTSpice (*а*) и его ток нагрузки (*б*)

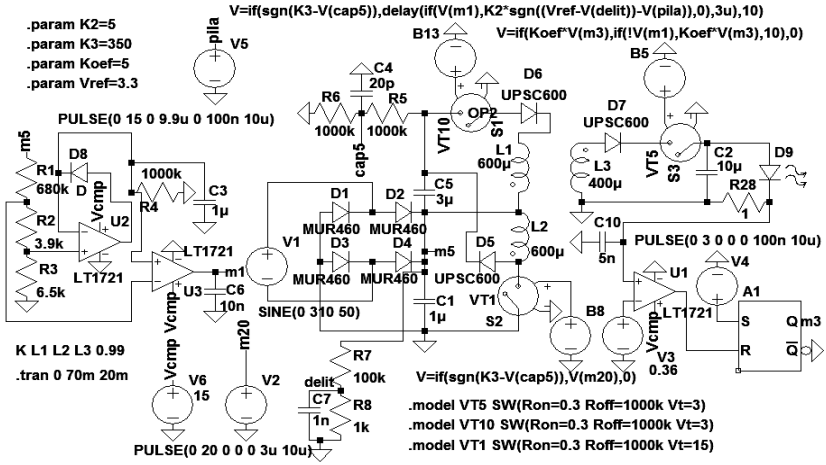
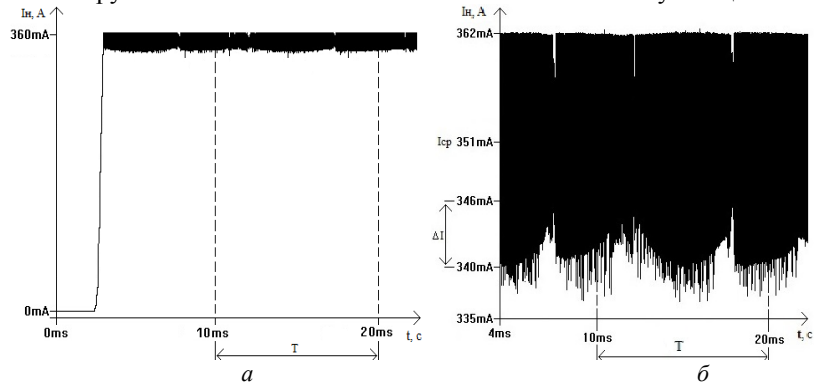


Рис. 2. Модель второго источника питания в среде LTSpice

В втором случае мощность в нагрузке составила 25,7 Вт, мощность потребляемая – 30,35 Вт. КПД 84,7%.

Из рис. 3 видим, что амплитуда низкочастотных пульсаций составляет 6 мА. При среднем токе нагрузки 351 мА коэффициент пульсации составляет 0,017, или 1,7%. Время *T* – период низкочастотных колебаний.

Второй источник питания по сравнению с первым при одной и той же мощности имеет более низкий КПД и требует большего количества компонентов в силовой части, что приводит к его удорожанию, однако позволяет сильнее уменьшить низкочастотную составляющую тока нагрузки и значительно снижает высокочастотные пульсации.



а *б*

Рис. 3. Временная диаграмма тока нагрузки второго источника питания (*а*) и ее увеличенный вид (*б*)

ЛИТЕРАУТАРА

1. *Сравнение* светодиодных ламп с люминесцентными, галогенными лампами накаливания [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://svetlix.ru/articles/lamps_comparison

2. *Надежность* электрорадиоизделий. Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.

3. *John C.W. Lam.* A High Power Factor, Electrolytic Capacitor-Less AC-Input LED Driver Topology With High Frequency Pulsating Output Current // IEEE Transaction Power Electronics. 2015. №2. С. 943–954

4. *Chen Wu.* Elimination of an Electrolytic Capacitor in AC/DC LED Driver With High Input Power Factor and Constant Output Current // IEEE Transaction Power Electronics. 2012. №3. P. 1598–1607.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНЫХ И ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

А.С. Литвинов, магистрант каф. ПрЭ

Научный руководитель А. Н. Плеснивый, нач. лаб. 374

АО «НПЦ Полюс»

г. Томск, ТУСУР, fllyber@mail.ru

В значительной степени срок активного существования космических аппаратов (КА) зависит от возможностей системы его электропитания и, в частности, от эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей, обеспечивающих работу КА на теневых участках орбиты. Сложность выбора аккумуляторной батареи (АБ) и обеспечения требуемых энергетических характеристик обусловлены электрохимической природой аккумуляторов и сильной зависимостью их характеристик от условий эксплуатации: количества циклов заряда-разряда, температуры, методов контроля и защиты от перезаряда и переразряда.

Для космических аппаратов очень важной является проблема снижения массы системы электроснабжения (СЭС), составляющей до 10–15% от массы КА и увеличивающейся с увеличением его срока активного существования.

Продолжительное время использовались никель-водородные аккумуляторы для КА, но с развитием и усовершенствованием бортовой аппаратуры выросло и их энергопотребление, в связи с чем появился вопрос о необходимости исследования более энергоемких аккумуляторов в качестве вторичного источника питания бортовой сети.

Рассмотрим преимущества и недостатки современных аккумуляторных батарей. Они характеризуются не только плотностью энергии, но также и сроком службы, степенью саморазряда и рабочей температурой.

В таблице [4] приведены сравнительные характеристики современных типов аккумуляторных батарей. На рис. 1–4 [2, 3] изображены графики зарядных и разрядных характеристик никель-водородного и литий-ионного аккумуляторов с различными температурными условиями.

Сравнительная характеристика современных типов аккумуляторов

Характеристики	Типы аккумуляторных батарей			
	NiCd	NiMH	NiH2	Li–ion
Энергетическая плотность, Вт/кг	45–80	60–120	60–80	110–130
Число циклов заряд/разряд до снижения емкости на 80%	1500	300–500	2000–3000	500–1000
Напряжение на элементе, В	1,25	1,25	1,25	3,6
Время быстрого заряда, ч	1	2…4	–	2…4
Допустимый перезаряд	Средний	Низкий	Средний	Очень низкий
Саморазряд за месяц при комнатной температуре, %	20	30	20–30	10
Диапазон рабочих температур, °С	–40–60	–20–60	–20–30	–20–60

Исходя из данных таблицы и графиков, наиболее лучшие показатели предоставляют литий-ионные аккумуляторы. Их электрохимическая эффективность, представляющая собой объединение высоких технологий создания объемного пористого положительного электрода и углеродных матриц отрицательных электродов, позволяет практически вдвое увеличить плотность энергии по сравнению с никель-водородными аккумуляторами.

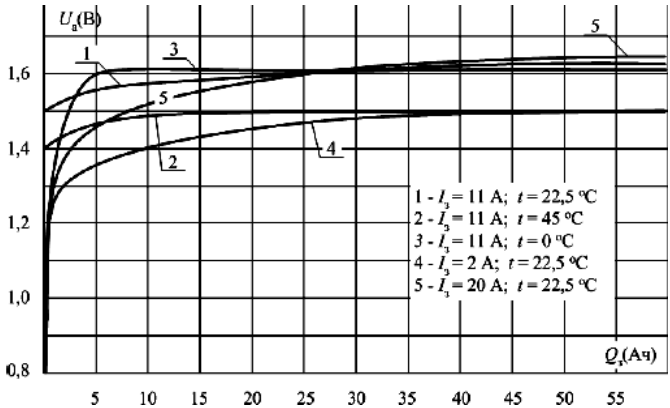


Рис. 1. Зарядные характеристики никель-водородного аккумулятора

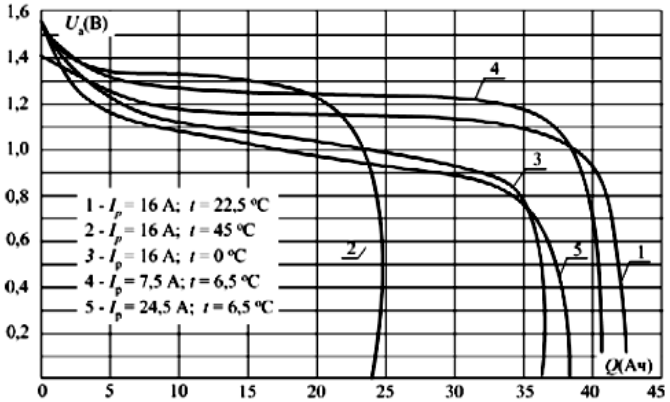


Рис. 2. Разрядные характеристики никель-водородного аккумулятора

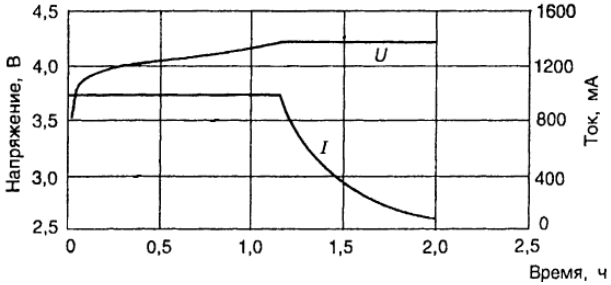


Рис. 3. Зарядные характеристики литий-ионного аккумулятора

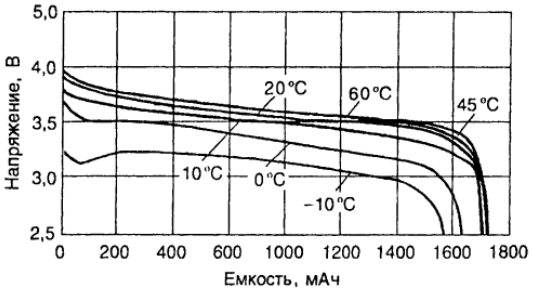


Рис. 4. Разрядные характеристики литий-ионного аккумулятора

Снижение массы литий-ионных АБ составляет более 40% по сравнению с никель-водородными АБ. Дополнительное снижение массы в системе электропитания КА можно получить из-за меньшего тепловыделения и большего КПД, т.е. уменьшения площади солнечных батарей и радиаторов системы терморегулирования.

Однако применение литий-ионных аккумуляторов в СЭС КА предполагает применение специфических режимов контроля, управле-

ния и эксплуатации, обеспечиваемых энергопреобразующей аппаратурой СЭС – зарядно-разрядными устройствами АБ, экстремальными регуляторами мощности солнечной батареи, объединенными в комплексы автоматики и стабилизации системы электропитания КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Варламов Р.Г., Варламов В.Р.* Малогабаритные источники тока: Справочник. М.: Радио и связь, 1988. 80 с.

2. *Лукьяненко М.В.* Энергетическая модель никель-водородных аккумуляторов // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2005. Вып. № 4.

3. *Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б.* Герметичные химические источники тока: Оборудование для испытаний и эксплуатации: справочник. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. 264 с.

4. *Хрусталев Д.А.* Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003. 224 с.

ВЫХОДНЫЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.О. Оскирко, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф., к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Институт сильноточной электроники СО РАН,

oskirkovo@gmail.com

Развитие магнетронных технологий напыления покрытий в последние десятилетия тесно связано с использованием среднечастотного импульсного электропитания (1–350 кГц). [1]. Одно из основных достоинств импульсного электропитания магнетронных распылительных систем (МРС) заключается в способности предотвращать возникновение электрических дуг в процессе магнетронного распыления. Предотвращение дуг осуществляется путем компенсации зарядов, накапливаемых на поверхности диэлектрических слоев и провоцирующих образование микропробоев.

В работах [2, 3] приведено подробное описание импульсного биполярного источника питания на основе формирователя асимметричных биполярных импульсов повышенной частоты (ФБИ, рис. 1), позволяющего предотвращать возникновение электрических дуг в процессе магнетронного распыления.

В настоящей работе приведены результаты аналитического и экспериментального исследования ФБИ, направленного на получение его теоретических и реальных выходных регулировочных характеристик при работе с МРС. В результате аналитического исследования ФБИ

было получено выражение (1), отражающее зависимость между коэффициентом преобразования выходного напряжения ФБИ и относительной длительностью отрицательного импульса:

$$K_u(\gamma_-, \gamma_d) = \frac{k - \gamma_-(k-1) - \gamma_d}{\gamma_-}, \qquad (1)$$

где K_u – коэффициент преобразования выходного напряжения, равный отношению среднего значения напряжения в течение отрицательного импульса к напряжению накопительной емкости C_1; γ_- – относительная длительность выходного отрицательного импульса; γ_d – относительная длительность интервала d, характеризующего зависимость между основными интервалами периода формирования импульсов.

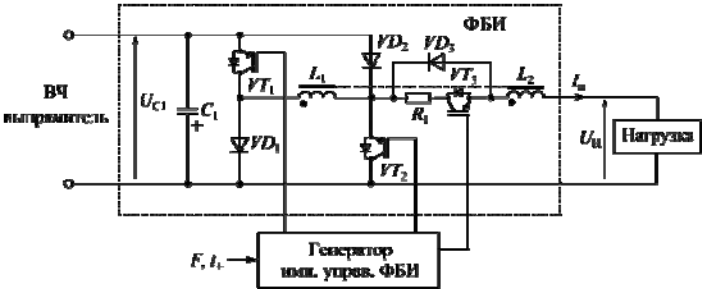


Рис. 1. Схема ФБИ №1

Для получения экспериментальных характеристик ФБИ была собрана экспериментальная установка на основе вакуумной установки ВНУК-5 [4] и протяженная МРС APEL-ML-1000 с титановым катодом размером 1000×120×10 мм [5]. Процесс распыления производился в атмосфере аргона при давлении 0,2 Па ($1{,}5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.) и расходе аргона примерно (100 мл/мин).

В процессе эксперимента измерялись напряжение емкости C_1, напряжение и ток на выходе ФБИ. Для исследования формы выходных импульсов ФБИ был выбран режим стабилизации напряжения на C_1 на уровне 300 В. Длительность положительного импульса регулировалась в диапазоне от 3 до 10 мкс, а частота – в диапазоне от 1 до 50 кГц. На рис. 2 приведены осциллограммы выходных импульсов напряжения тока и мощности ФБИ при частоте импульсов 50 кГц и различной длительности положительного импульса.

Как показано на осциллограмме импульсов выходного тока ФБИ, в начале отрицательного импульса образуется выброс, обусловленный высокой проводимостью разрядного промежутка во время формирования катодного слоя у поверхности мишени магнетрона. Длительность

выброса составляет приблизительно 1,5 мкс. За счет паразитной индуктивности первоначальный выброс тока приводит к последующему выбросу выходного напряжения.

После завершения процесса формирования катодного слоя величина выходного тока спадает до значения, которое зависит от остаточной концентрации плазмы в разрядном промежутке.

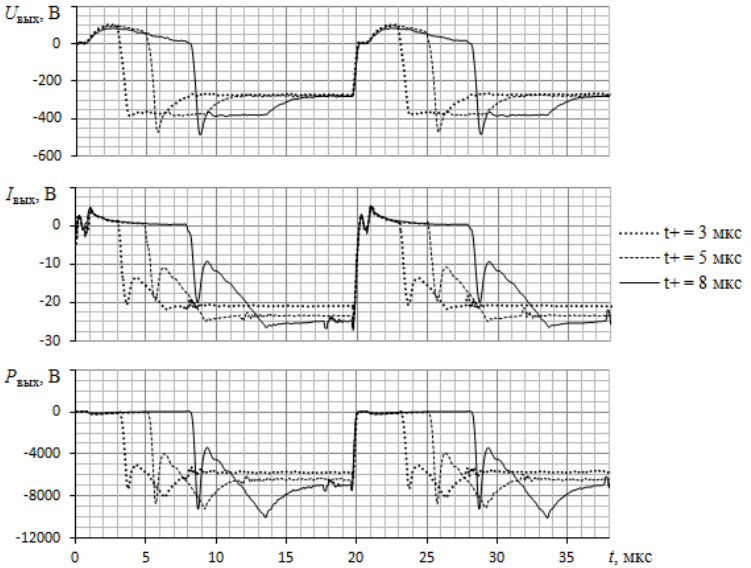


Рис. 2. Осциллограммы выходных импульсов ФБИ при работе с МРС

К разрядному промежутку прикладывается повышенное напряжение 370–380 В, которое способствует быстрому восстановлению плазмы в разрядном промежутке и росту выходного тока. Из рис. 2 видно, что выходной ток на интервале восстановления плазмы увеличивается с постоянной скоростью. Поскольку величина тока в начале интервала восстановления плазмы зависит от длительности положительного импульса, то и время восстановления плазмы также зависит от неё. При увеличении длительности положительного импульса от 3 до 8 мкс время восстановления плазмы увеличивается от 2,5 до 5 мкс.

После того, как рост разрядного тока прекращается, происходит плавное снижение выходного напряжения ФБИ в течение 2,5 мкс до уровня 280–290 В.

Из осциллограммы импульсов выходной мощности видно, что во второй половине интервала восстановления плазмы формируется выброс, который позволяет скомпенсировать снижение выходной мощности в первой половине. В результате средняя мощность в течение

начального интервала отрицательного импульса примерно равна средней мощности разряда в установившемся режиме.

В начале положительного импульса формируется всплеск выходного тока, обусловленный всплеском электронного тока. Положительное напряжение достигает своего максимума спустя 2,5 мкс после начала положительного импульса. Далее напряжение на выходе ФБИ плавно спадает.

На рис. 3 приведены регулировочные характеристики ФБИ, полученные аналитически, экспериментально и с помощью моделирования.

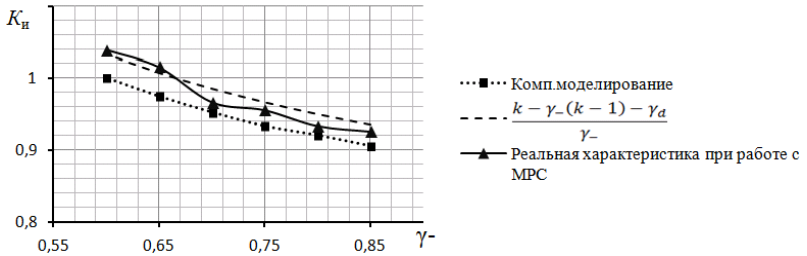


Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая выходные регулировочные характеристики ФБИ при работе с МРС

Отклонение реальной регулировочной характеристики ФБИ от расчетных характеристик не превышает 4%, что доказывает достоверность выражения (1), полученного в результате аналитического исследования. Переходные процессы, протекающие во время формирования отрицательного импульса и обуславливающие нелинейный характер МРС, не оказывают существенного влияния на выходную регулировочную характеристику формирователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузьмичев А.И.* Магнетронные распылительные системы. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления / А.И. Кузьмичев. Киев: Аверс, 2008. 244 с.

2. *Оскирко В.О.* Модульный биполярный источник питания для мощных ионно-плазменных установок / В.О. Оскирко, Н.С. Сочугов, А.П. Павлов // ПТЭ. М.: МАИК, 2014, № 5. С. 85.

3. *Оскирко В.О.* Исследование формирователя биполярных импульсов для питания магнетронных распылительных систем / В.О. Оскирко, В.Д. Семенов, А.П. Павлов // Доклады ТУСУРа. 2015. № 3(17). С. 39–45.

4. *Описание* вакуумной установки для нанесения покрытий на рулонные материалы ВНУК-5. ООО «Прикладная электроника» [Электронный ресурс]. URL: http://apelvac.com/catalog/53/index.html (дата обращения: 15.02.2016).

5. *Описание* протяженной магнетронной распылительной системы с планарным прямоугольным катодом APEL-ML-1000. ООО «Прикладная электроника» [Электронный ресурс]. URL: http://apelvac.com/catalog/ 35/index.html (дата обращения: 15.02.2016).

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПИТАНИЕМ ОТ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

Г.М. Шевченко, А.В. Тен, студенты каф. ПрЭ

Научный руководитель Д.О. Пахмурин, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, pdo@ie.tusur.ru

Проект ГПО-0901 «Аппаратно-программный комплекс для реализации локальной гипертермии»

Одним из вариантов лечения раковых опухолей является локальная гипертермия. Медицинская гипертермия – это вид термотерапии, основанный на контролируемом, временном повышении температуры тела, отдельного органа или части органа, пораженного патологическим процессом, свыше 39 °С до 44–45 °С.

На данный момент в комплексе локальной гипертермии «Феникс-2» используется питание системы стабилизации температуры от импульсного источника напряжения (ИИН). Главным недостатком питания системы от ИИН является низкий диапазон сопротивлений нагревательного элемента. Для устранения данной проблемы был разработан импульсный источник тока (ИИТ). Кроме того, питание системы током является более предпочтительным и эффективным с точки зрения подавления нелинейности, чем питание напряжением [1].

Расчёт системы стабилизации температуры производился на основе электротепловой аналогии. Процесс переноса тепла (тепловой энергии) и переноса электрического заряда подобны. В самом деле, электрический ток I (поток зарядов) согласно закону сохранения заряда течёт из одной области в другую, причем плотность потока заряда пропорциональна градиенту потенциала grad φ. Электрический заряд может накапливаться в локальной области соответственно ее электрической емкости; тепловой поток запасается в теплоемкости локальной области и т.д. Указанная физическая общность приводит к подобию математического описания процессов переноса тепла и заряда или, как принято называть, в электротепловой аналогии [2].

Каждая область, заключенная между изотермическими поверхностями, описывается своими тепловым сопротивлением и теплоемкостью. Для реализации на данном этапе электротепловой модели иглы нам потребуется пять RC-звеньев, соответствующих следующим изотермическим поверхностям: R1C1 – медь нагревательного элемента, R2C2 – термопаста MX-4, R3C3 – сталь (внутренняя игла), R4C4 – физиологический раствор (0,9% раствор NaCl), R5C5 – сталь (кожух нагревателя). В качестве измерительного сегмента используется мост Уитстона.

На рис. 1 представлена структурная схема системы регулирования температуры от источника тока.

Рис. 1. Структурная схема

Рабочий ток при питании от ИИТ находится аналогично, что и в случае с ИИН. Различие методов питания заключается в том, что напряжение на плечах измерительного моста будет равно напряжению питания, а в случае с ИИТ ток на плечах не равен току питания.

На рис. 2 приведена модель в программной среде MATlab.

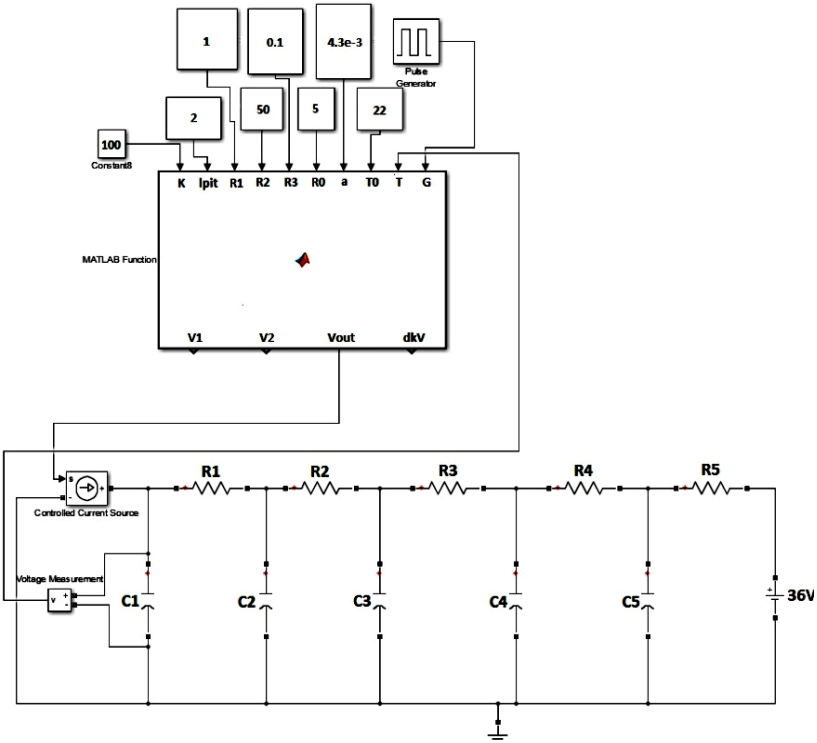


Рис. 2. Модель стабилизации температуры от источника тока в MATlab

Для пояснения принципа работы целесообразно представить внутреннее содержание блока MATLAB Function. Чтобы система выходила на заданную температуру, была написана программа, которая имитирует мост Уитстона и изменение выходного сопротивления меди с температурой. Источник напряжения 36 В имитирует температуру тела, и каждый конденсатор настроен на начальное напряжение 22 В, что позволяет задать комнатную температуру. Константы слева представляют собой заданные параметры значений тока питания, сопротивлений и т.д. Параметры среды (теплоёмкость и тепловое сопротивление) рассчитываются в соответствии с её физическими параметрами (теплопроводность, теплоемкость, размеры и т.д.).

На рис. 3 и 4 изображены временные диаграммы с питанием от источника напряжения и источника тока.

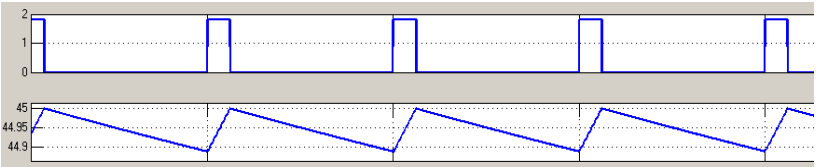


Рис. 3. Осциллограмма зависимости напряжения от времени звена R1C1 ИИТ во время установившегося режима

Рис. 4. Осциллограмма зависимости напряжения от времени звена R1C1 ИИН во время установившегося режима

Из полученных диаграмм следует, что построенная система стабилизации температуры справляется со своей задачей, так как температура изотермической поверхности меди растёт линейно и при достижении 45° остается постоянной. На основании графиков можно сделать вывод, что RC-звенья рассчитаны корректно. Время выхода на стабилизованную температуру у ИИТ и ИИН расходится на сотые доли секунды. Медицинская сталь 12Х18Н10Т (кожух) нагревается дольше, чем медь, из-за низкого коэффициента теплопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ялышев А.У.* Измерительные мосты переменного или постоянного тока [Электронный ресурс]. http://www.freepatent.ru/patents/2171473.

2. *Тугов Н.М.* Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; под ред. В.А. Лабунова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПОРТА

С.В. Сидоров, студент каф. ПрЭ

Научный руководитель Д.О. Пахмурин, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ssv_vs@mail.ru

При создании различных электронных устройств зачастую необходимо управление данным устройством при помощи персонального компьютера (ПК).

Одним из самых удобных для подключения внешних устройств, интерфейсом ПК является RS-232C (COM-порт) [1]. При отсутствии физического COM-порта можно использовать микросхемы преобразователей интерфейсов – CP210X [2], FT232 [3] и др. При присоединении данных микросхем к разъему USB [4] в системе появляется виртуальный COM-порт, с которым работают аналогично аппаратному RS-232C.

В связи с тем, что для обработки принятой информации необходимо некоторое количество времени, большие скорости работы последовательного порта не целесообразны.

Для определения скорости, превышение которой не способствует уменьшению времени передачи информации, будем передавать между двумя последовательными портами пакеты данных на различных скоростях. Эти пакеты данных состоят из 10 информационных байт и 2 байт контрольной суммы (CRC) [5]. Передачу одного пакета передачи информации разделим на 4 этапа:

На первом этапе вычисляется CRC и данные передаются в буфер передатчика последовательного порта.

На втором этапе программа ожидает конца приема пакета.

На третьем этапе данные считываются из буфера последовательного порта.

На четвертом этапе вычисляется CRC и принимается решение о корректности принятого пакета.

Были измерены средние значения времён для каждого этапа – t_1, t_2, t_3, t_4, а также общее время передачи t массива, состоящего из 10000 байт, при различных скоростях работы последовательного порта. Данные приведены в таблице.

Результаты эксперимента

v, кб/с	64	51,2	38,4	19,2	9,6	4,8	2,4
t, с	6,9	7,4	8,4	8,4	18,8	31,5	52,3
t_1, мс	1	1	1	1	1	1	1
t_2, мс	5	5	6	6	17	29	49
t_3, мс	0	0	0	0	0	0	0
t_4, мс	0	0	0	0	0	0	0

Как можно увидеть из вышеприведенной таблицы основную часть времени занимает второй этап. Так как определение конца пакета производится на основании временного интервала, свести данное время к нулю не представляется возможным.

Зависимость скорости работы порта от общего времени передачи массива информации приведена на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость времени передачи пакета от скорости последовательного порта

Как можно видеть, имеется два отрезка:

– до скорости 19,2 кб/с. Время передачи уменьшается при увеличении скорости работы порта;

– после 19,2 кб/с. Время передачи остается неизменным при увеличении скорости работы порта.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что оптимальной скоростью работы последовательного порта является скорость 19200 б/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сидоров С.В.* Организация связи между компьютером и контроллером аппаратно-программного комплекса для реализации метода локальной гипертермии // Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск, 2015.

2. *Single-chip* USB to UART bridge [Электронный ресурс] // Silicon Laboratories: URL: https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/CP2102-9.pdf (дата обращения: 08.03.2016).

3. *FT232R* – USB UART IC [Электронный ресурс] // Future Technology Devices International: [сайт]. URL: http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm (дата обращения: 08.03.2016).

4. *Интерфейс* USB: описание и основы устройств сопряжения [Электронный ресурс] // Электронный портал kazus: [сайт]. URL: http://kazus.ru/articles/415.html (дата обращения: 08.03.2016).

5. *Williams R.N.* A painless guide to CRC error detection algorithms. 1993.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОВЫШАЮЩЕГО НПН ПРИ ПИТАНИИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB

С.С. Тюнин, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ., к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tyunin.tss@yandex.ru

Задача исследования работы повышающего преобразователя от солнечной батареи (БС) усложняется тем, что для ее решения необходимо построить, как адекватную модель БС, так и модель повышающего НПН. При этом реальная БС имеет ряд параметров, изменяющихся от освещённости, температуры, времени (деградация БС). Часто разработчику необходимо изменять по ходу моделирования эти параметры.

В [1] подробно рассмотрена математическая модель солнечной батареи, которая построена по трем основным точкам вольт-амперной характеристики: $I_{кз}$ – значение тока короткого замыкания, U_{xx} – значение напряжения холостого хода, $I_{опт}$, $U_{опт}$ – значения тока и напряжения оптимума (точка максимальной мощности). Также в [1] представлены зависимости всех значений вышеперечисленных точек от степени освещённости, температуры БС, деградации с течением времени. На основании данных [1] построена математическая модель БС и преобразователя, представленная на рис. 1.

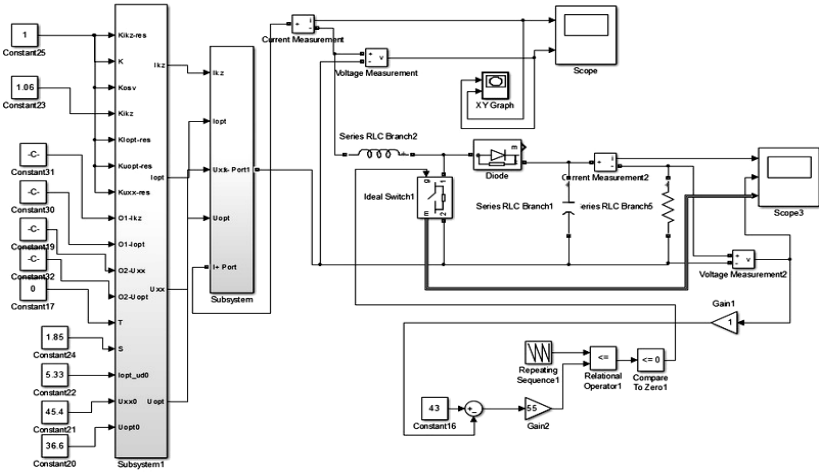


Рис. 1. Модель БС в программном пакете MATLAB Simulink

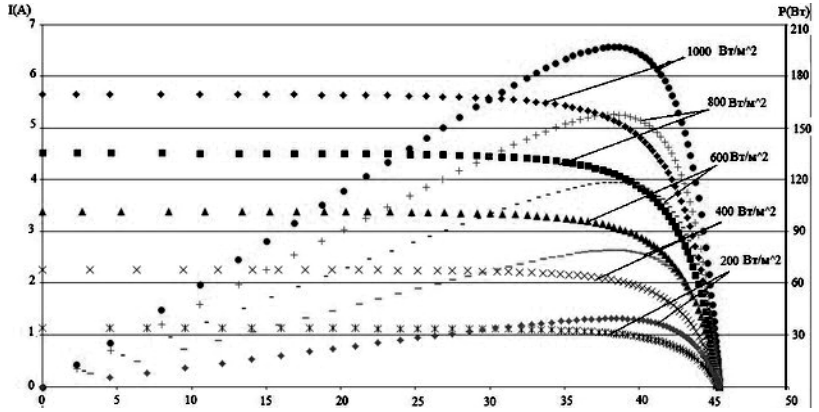
В качестве входных параметров модели БС используются три группы: коэффициенты деградации БС; коэффициенты влияния темпе-

ратуры на ток и напряжение БС; значения токов и напряжений при нормальных условиях ($T = 25$ °С и коэффициенте деградации 95%).

В силу ограниченного объёма данной статьи мы не приводим подробное построение модели БС в развернутом виде, ограничившись лишь указанием на изменяемые параметры для БС.

Адекватность модели докажем сравнением вольт-амперных (ВАХ) и вольт-ваттных характеристик (ВВтХ), которые представлены производителем [2] для модели БС «STP195S-24/AD+», с характеристиками, полученными при моделировании (рис. 2, *а*, *б*).

Из приведённых графиков можно заключить, что полученная модель адекватна по выходному току, но расходится по напряжению холостого хода на 3 В, что в практических расчетах вполне допустимо. В принципе это расхождение можно убрать, однако при этом сильно усложнится модель.



а

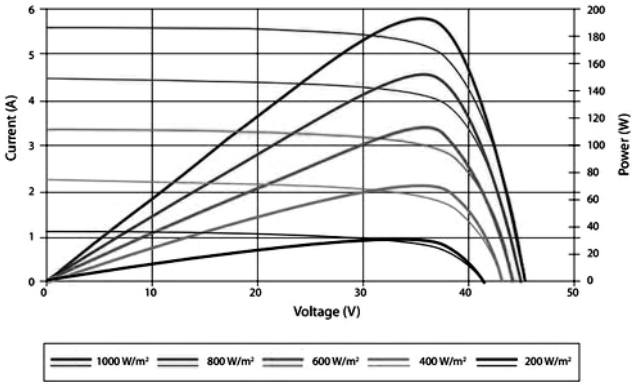


Рис. 2. ВАХ и ВВтХ БС: *а* – характеристики модели; *б* – характеристики, заявленные производителем

Подключив к модели БС НПН повышающего типа в режиме стабилизации напряжения, получим осциллограммы, тока и напряжения БС, представленные на рис. 3.

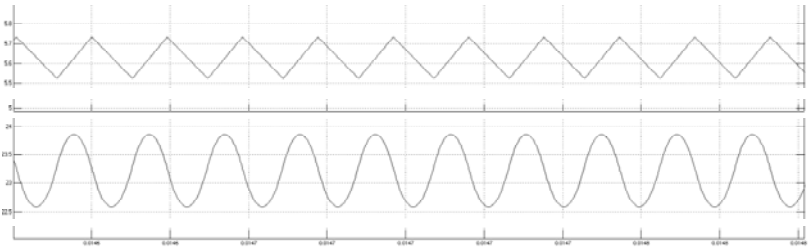


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на выходе БС

По результатам моделирования совместной работы преобразователя и БС можно отметить, что напряжение БС при работе НПН имеет пульсацию 1,2 В при пульсации тока дросселя НПН 0,11 А, что недопустимо при эксплуатации БС и говорит о необходимости установки входного фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Раушенбах Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 353 с.
2. *STP195S-24/AD+* Watt monocrystalline solar module. Date sheet [Электронный ресурс]. Suntech-режим доступа: http://helios-resource.ru/solar_panels.files/STP195S_24Ad+_ER-H4_Connector.pdf
3. *Романенко А.С.* Резервированная аппаратура регулирования и контроля системы электропитания малого космического аппарата: дис. … канд. техн. наук. Томск, 2013.

СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА-ДЕФЕКТОСКОПА С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ STL ФАЙЛА

И.М. Васильев, аспирант кафедры ПМЭ

Научный руководитель П.В. Сорокин, доцент НИТПУ, к.т.н.

г. Томск, НИТПУ, asiliev_ivan91@mail.ru

На сегодняшний день в любом промышленном производстве существует проблема брака в изделиях. Зачастую при выполнении всех требуемых норм качества изготовления существует вероятность того, что полученный продукт не будет соответствовать заявленным требованиям качества. Маленький дефект на поверхности или внутри изделия может привести к большим затратам и плачевным последствиям,

поэтому чтобы избежать лишних затрат и сохранить репутацию компании, изготовители уделяют большое внимание на выявление этих дефектов и недопущения недоброкачественных изделий в оборот [1–5]. На сегодняшний день существует множество способов определения наличия дефекта:

• Метод отклонения от номинала. В этом методе один или несколько физических параметров сравниваются с известными или рассчитанными номинальными значениями параметров доброкачественной детали. При таком методе удается выявить только наличие дефекта, а его размеры и положение в детали останутся неизвестными. Данный метод прост и не требует больших затрат ресурсов и времени, однако он не даст нам никакой информации о местоположении дефекта.

• Метод получения одной проекции. Этот метод заключается в исследовании детали лишь в одной проекции, т.е. мы увидим все дефекты лишь с одной стороны и, как и в прошлом методе, не сможем определить точное местоположение дефекта в объемной детали.

• Метод измерения в нескольких координатах. В данном методе объект рассматривается с нескольких сторон, после чего полученные данные синхронизируются, и получается единая модель детали. Путем увеличения количества рассматриваемых проекций, мы можем значительно увеличить точность определения положения дефектов в детали. Данная работа посвящена методу измерения в нескольких координатах, т.к. этот метод позволяет получить более полную информацию о дефектах детали. Для того чтобы получить информацию не только о наличии, но и о положении дефекта в детали, нужна точная привязка координат дефекта к параметрам детали. Для этого, в свою очередь, нужно организовать систему позиционирования измерительного элемента, позволяющую определить местоположение датчика относительно детали. Возможные варианты осуществления системы позиционирования измерительного элемента в многокоординатных сканерах:

• Механическая система. Принцип работы такой системы заключается в том, что датчик перемещается вдоль специально выставленных стоек посредством управления двигателями. Координаты датчика определяются путем считывания шагов двигателя в том или ином направлении.

• Передвигающийся манипулятор. Особенностью данной системы позиционирования является возможность передвижения всей системы с датчиком по самой детали, а не перемещение датчика вдоль неё. Координаты датчика определяются количеством оборотов колес или специального считывающего ролика в ту или иную сторону. Такая система позиционирования может применяться для нахождения дефектов в деталях простой формы, например рельса или трубы.

• Система ультразвуковой триангуляции. Данный метод основан на обнаружении волн, испускаемых тремя заранее установленными ультразвуковыми датчиками, и определении относительных координат положения по полученному датчиком ультразвуковому сигналу. Подразумевается, что распространение ультразвуковой волны будет фиксироваться через вибрацию, переданную деталью. Алгоритм расчета координат от полученной величины зависит от измеряемой поверхности. Метод обладает следующим рядом достоинств: наглядность построения карты дефектов, работа в реальном времени, возможность самостоятельно уделять особое внимание проблемным местам. Недостатки – сложность алгоритма получения координат, невозможность работы в автоматическом режиме, а также зависимость скорости ультразвука от температуры.

• Оптическое позиционирование (оптический трекинг). Работа систем оптического трекинга основана на том же принципе, что и стереоскопическое зрение человека. Поскольку человек видит двумя глазами, он способен определить, на каком расстоянии находится объект и как он ориентирован. Для построения оптической системы трекинга используют, как правило, от 2 до 24 видеокамер, работающих в ИК-диапазоне, и пассивные ИК-отражатели (или активные ИК-маячки), располагаемые на объектах, положение и ориентацию которых нужно определить.

• Электромагнитное позиционирование. При электромагнитном позиционировании измеряется сила магнитного поля. Магнитное поле возникает в результате пропускания тока через электромагнитную катушку. Ток, проходящий через катушку, превращает ее в электромагниты, что позволяет определить ее позицию и ориентацию в пространстве. Такая система плохо работает вблизи любых металлических объектов и устройств, способных повлиять на электромагнитное поле. Достоинства систем электромагнитного позиционирования: хорошая точность измерения координат и углов, не требуется трудоемкая калибровка при наличии специально подготовленного помещения, работает в отсутствие прямой видимости.

В моей работе использована механическая система позиционирования, а также сделана лабораторная установка для практических испытаний, способная сканировать объекты с общей площадью 2×2 метра и точностью позиционирования измерительного элемента 1 мм. В дальнейшем предполагается повышение точности за счет использования других двигателей и редукторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агранат Б.А.* Основы физики и техники ультразвука. М., 1987. 214 с.

2. *Козловский Е.* Искусство позиционирования // Вокруг света. М., 2006. № 12 (2795). С. 204–280.

3. *Каршаков Е.В.* Задача калибровки электромагнитной системы относительного позиционирования // УБС. 2012. № 37. С. 250–268.

4. *Савицкий С.С.* Методы и средства неразрушающего контроля: электрон. учеб.-метод. пособие. Минск, 2012. 54 с.

5. *Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х. и др.* Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. М., 2008. 153 с.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГРУЗКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н.П. Винтоняк, аспирант каф. ПРЭ

Научные руководители: В.А. Федотов, зав. лаб. ГПО,
В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, nic-nic91@yandex.ru

Ежегодно в мировой промышленности выпускаются сотни тысяч автоматических выключателей различной мощности, которые используются практически в любой сфере деятельности человека. Одной из основных характеристик автоматического выключателя является ток мгновенного расцепления [1], проверяемый путем короткого замыкания. При испытаниях (прогрузке) автоматических выключателей, в зависимости от их мощности, ток короткого замыкания варьируется от тысяч до десятков тысяч ампер. Наихудшим условием для расцепления контактов автоматического выключателя является работа на постоянном токе, т.к. при его протекании нет моментов спада напряжения до нуля, что увеличивает время дугового разряда [2].

Большинство существующих испытательных комплексов предназначено для прогрузки автоматических выключателей переменного тока и способны генерировать ток до 30 кА в течение 0,5 с, а также производить измерение времени срабатывания автоматических выключателей [3–7].

Несмотря на то, что для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока существует несколько испытательных комплексов [8–9] и мощных источников питания [10], они не позволяют проверить большинство защитных характеристик автоматических выключателей [11], т.к. не способны генерировать ток свыше 10 кА.

На кафедре промышленной электроники ТУСУРа по заказу НИ ТПУ был разработан испытательный комплекс для прогрузки автома-

тических выключателей постоянного тока 26 кА с выходной мощностью 104 кВт (рис. 1).

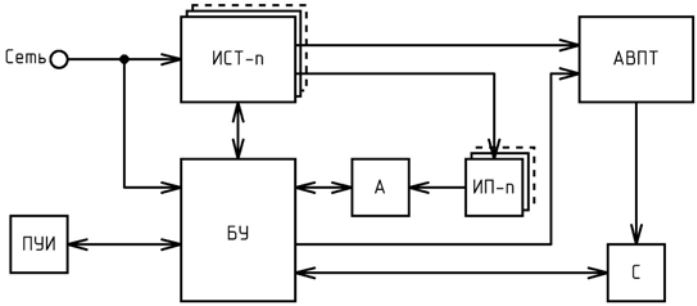


Рис. 1. Структурная схема испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока

В состав испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока входит семь импульсных стабилизаторов тока с микропроцессорной системой управления (ИСТ-n) [2], включенных параллельно, семь цифровых измерительных преобразователей (ИП-n), подключенных параллельно к одному цифровому амперметру (А), цифровой секундомер (С), пульт управления и индикации (ПУИ) и блок управления (БУ), соединённый с ИСТ-n, А и С по цифровому интерфейсу связи. Измерительные преобразователи, секундомер и амперметр входят в Государственный реестр средств измерения РФ.

Испытание автоматического выключателя постоянного тока (АВПТ) проводится следующим образом. С помощью пульта управления и индикации оператор задает необходимые ток и время прогрузки АВПТ. Блок управления равномерно делит ток прогрузки АВПТ между задатчиками импульсных стабилизаторов тока. В момент запуска испытаний блок управления выдает синхронизирующий сигнал, который запускает импульсные стабилизаторы тока. Сигналы измерительных преобразователей складываются и поступают в амперметр. Блок управления считывает показания амперметра и при достижении тока прогрузки заданного значения выдает сигнал запуска секундомеру через дополнительные контакты АВПТ. В момент срабатывания АВПТ его силовые и дополнительные контакты размыкаются, ток прогрузки спадает до нуля, а сигнал запуска перестает поступать на секундомер. Блок управления регистрирует максимальный ток АВПТ (с помощью амперметра) и время его срабатывания (с помощью секундомера) и передает эти данные на пульт управления и индикации.

Разработанный испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока позволяет проверять защитные характеристики АВПТ в диапазоне токов до 26 кА без ограничений по времени, а за счет модульной структуры и адаптивной цифровой системы управления позволяет расширить диапазон тока прогрузки путем увеличения количества параллельно работающих импульсных стабилизаторов тока. В отношении аналогов разработанный испытательный комплекс выигрывает по степени автоматизации измерений защитных характеристик АВПТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ* Р 50345–2010. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Введ. 2012-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2012.

2. *Винтоняк Н.П.* Программное обеспечение ячейки испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянным током / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Электронные средства и системы управления. 2015. Ч. 1. С. 217–221.

3. *EuroSMC* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://eurosmc.su/catalog.php?sid=3, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

4. ООО «ИнтерМикс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.intermix.su/pages_61/index.html, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

5. «НПФ ЭНЕРГОСТРОЙ» uptr_mz_manual.pdf [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.npf-energostroy.ru/uptr_mz_manual.pdf, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

6. *Сатурн-М* и Сатурн-М1 (новое поколение) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rza.ru/catalog/novinki/saturn-m-i-saturn-m1-novoe-pokolenie.php, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

7. *РЕТОМ-30кА* – испытательный комплекс / НПП «Динамика» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dynamics.com.ru/production/retom-30ka/#1, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

8. *РЕТОМ-30кА* – испытательный комплекс / НПП «Динамика» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dynamics.com.ru/production/retom-30ka/#3, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

9. *EuroSMC* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://eurosmc.su/catalog.php?id=10, свободный (дата обращения: 18.03.2016).

10. *Сакавов Т.Р.* Обзор источников постоянного тока для прогрузки автоматических выключателей / Т.Р. Сакавов, Н.П. Винтоняк, Р.Г. Калинин // Научная сессия ТУСУР–2015. 2015. Т. 3. С. 76–79.

11. *ГОСТ* 2585–81. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Введ. 1983-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1983.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРНЫХ ЯЧЕЕК

И.М. Журавлев, студент

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, iv_zhuravlev@mail.ru

Современная тенденция перехода от двигателей внутреннего сгорания к гибридным и электродвигателям в машиностроении обуславливает постоянный рост количества аккумуляторных батарей, которые периодически нуждаются в процессе заряда-разряда. Для этого необходимо мощное зарядно-разрядное устройство, так как батареи электромобиля имеют большую емкость и должны пройти цикл разряд-заряд довольно быстро. С учетом миниатюризации и встраивания оборудования в готовое изделие, т.е. автомобиль, важную роль начинают играть такие параметры, как удельная мощность (Вт/кг) и массогабаритные показатели. Таким образом, можно сформулировать основные требования к проектированию зарядного устройства для электромобиля: увеличение выходной мощности, КПД и снижение массы, габаритов и различного рода потерь энергии.

На текущий момент подавляющее количество зарядных (рис. 1) и разрядных устройств (рис. 2) выполняются на основе непосредственных преобразователей напряжения [1]. Это позволяет упростить систему управления и работать без промежуточного преобразования энергии, что повышает КПД схемы.

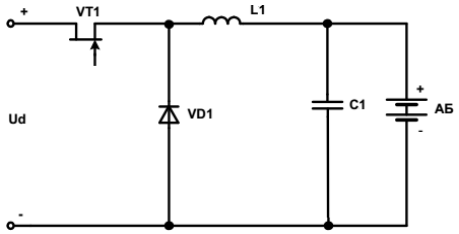


Рис. 1. Зарядное устройство на основе понижающего НПН

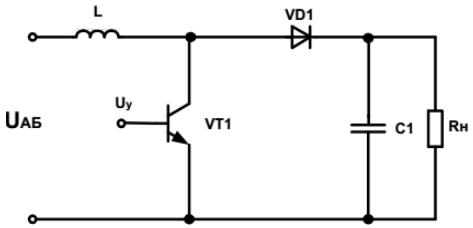


Рис. 2. Разрядное устройство на основе повышающего НПН

Однако НПН позволяют проводить энергию только в одну сторону, что увеличивает массогабаритные показатели, т.к. в этом случае необходимы два отдельных устройства. Схемотехнически ЗУ и РУ можно выполнить не двумя отдельными блоками, а в виде единого совмещенного блока, на основе инверторной ячейки. Совмещенное зарядно-разрядное устройство, состоящее из двух инверторов и резонансного контура, указано на рис. 3.

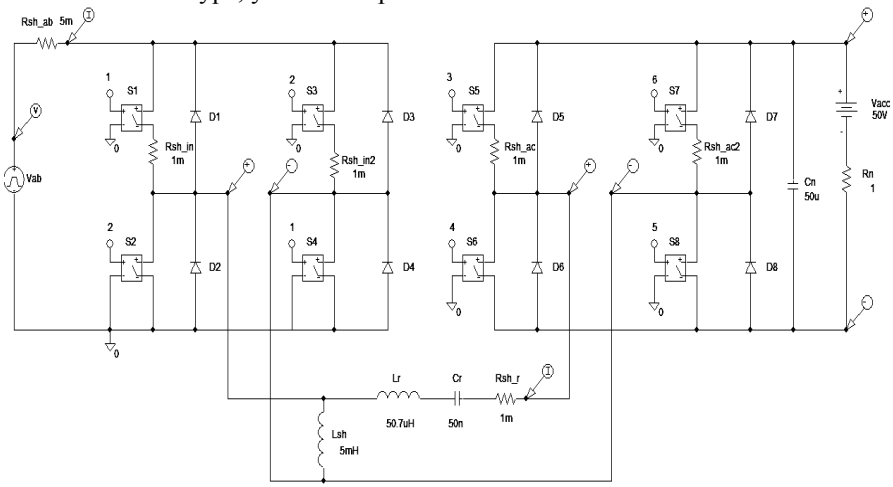


Рис. 3. Совмещенное зарядно-разрядное устройство на основе инверторных ячеек

Размеры и соответственно масса силовой части инвертора зависят от частоты работы. Увеличение частоты источников, при этом вызывало некоторые ограничения, обусловленные принципами работы транзистора в ключевом режиме. Во время переходных процессов выделяется большое количество тепла, увеличивающееся с ростом рабочей частоты. Таким образом, увеличение частоты приводит, с одной стороны, к уменьшению массы и габаритов, а с другой – к увеличению динамических потерь и как следствие к снижению КПД.

Одним из возможных способов решения задачи снижения потерь на переключение является использование квазирезонансных инверторов с переключением транзисторов при нулевом напряжении. Практическая реализация этой идеи – это автономный инвертор с фазовой либо частотной модуляцией.

Основными плюсами совмещенной схемы является возможность передачи энергии в обоих направлениях, а также возможность работы как в повышающем, так и понижающем режиме. КПД подобных схем может доходить до 97% в прямом направлении (режим заряда) и до

96% в обратном (режим разряда) [2]. Минусы схемы – это более сложное управление по сравнению с непосредственными преобразователями напряжения, а также высокие динамические потери, которые составляют до 30% всех потерь в устройстве [3].

В заключение можно сказать, что как в России, так и за рубежом схема на основе двух инверторных ячеек привлекает всё больший интерес. Несмотря на большие сложности в управлении, данная схема позволяет получить сравнимый КПД, но с меньшей массой и габаритами, а также обладает большей гибкостью в использовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кобзев А.В., Коновалов Б.И., Семенов В.Д.* Энергетическая электроника: учеб. пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010. 164 с.

2. *Stefan Waffler, Johann W. Kolar, Senior Member*. A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bidirectional Buck + Boost Converters. IEEE Transactions on power electronics: 2009. Vol. 24, № 6, June.

3. *Dianbo Fu.* Topology Investigation and System Optimization of Resonant Converters. Blacksburg, Virginia, February 4, 2010.

ПОДСЕКЦИЯ 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Шарангович С.Н.**, проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;*
*зам. председателя – **Буримов Н.И.**, зав. УНЛ СВЧ микроэлектроники, доцент каф. ЭП, к.т.н.*

ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ

Ю.В. Ряполова, ассистент каф. РЭТЭМ,
К.А. Неверовский, Е.О. Постолова, магистранты каф. ЛИСТ,
К.Н. Афонин, магистрант каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ТПУ, Pa3z@mail.ru
Проект ГПО РЭТЭМ-1501 «Изготовление и испытание макетов светодиодных излучающих элементов»

Современные системы освещения разрабатываются с применением высокоэффективных и надёжных источников света, которыми являются светодиодные лампы. [1, 2]. Такие лампы изготавливаются на основе светодиодных излучающих элементов ленточного типа (СИЭ). Высокая температура пагубно влияет на характеристики светодиода такие, как световой поток, срок службы. Предварительное моделирование позволяет предотвратить данные проблемы.

Целью данной работы является моделирование тепловых характеристик лампы на основе светодиодных излучающих элементов ленточного типа.

Тепловое моделирование. Разрабатываемая светодиодная нить была смоделирована в программном комплексе SolidWorks. Далее в данной программе был произведен тепловой расчет светодиодного излучающего элемента.

Исходные данные:

Подложка сделана из алюминия, светодиоды прикреплены к подложке с помощью коммерческого клея. Все данные, необходимые для расчета, приведены в таблице.

В дальнейшем был произведен тепловой расчет. Расчет был проведен при температуре окружающей среды, равной 25 °C, без наличия

конвекции. В результате теплового моделирования получили температуру на кристалле в диапазоне от 53 до 54 градусов.

Физические параметры материалов

Тип материала	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Плотность, кг/м^3	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
p-тип GaN	1,3	6150	490 при t = 350 К 778,8 при t = 300 К
p-тип AlGaN			
Активная область			
n-тип GaN			
n-тип GaN			
Сапфир	30	3950	778,8 при t = 300 К
Клей	0,2	1100	2150 при t = 300 К
Люминофор			
Алюминий	237	2688,9	902 при t = 300 К

По итогам расчета можно сделать вывод о том, что СИЭ нагревается в пределах нормы. При дальнейшем моделировании, учитывая полученные результаты, можно разработать конструкцию, позволяющую снизить температуру.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках прикладных научных исследований RFMEFI57714X0061.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Солдаткин В.С.* Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин и др. // Доклады ТУСУРа. 2015. №3. С. 55–61.

2. *Гончарова Ю.С.* Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады ТУСУРа. 2013. № 2 (28). С. 51–53.

ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ

Ю.В. Ряполова, ассистент каф. РЭТЭМ,
К.А. Неверовский, , Е.О. Постолова, магистранты каф. ЛИСТ,
К.Н. Афонин, магистрант каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ТПУ, Pa3z@mail.ru
Проект ГПО РЭТЭМ-1501 «Изготовление и испытание макетов светодиодных излучающих элементов».

Проблема повышения эффективности использования электрической энергии для целей освещения является актуальной [1, 2]. На данный момент наиболее перспективными источниками света являются

лампы на основе светодиодных излучающих элементов ленточного типа (СИЭ). Такие лампы имеют сферическое светораспределение (КСС), однако вопросы моделирования световых характеристик решены не окончательно.

Целью данной работы является моделирование световых характеристик лампы на основе светодиодных излучающих элементов ленточного типа.

Моделирование СИЭ. При проектировании СИЭ необходимо решить два вопроса: обеспечить высокую световую эффективность – провести световое моделирование для выбора оптимального по критерию равномерности светораспределения лапы расположения кристаллов СИЭ.

В данной работе было проведено моделирование конструкции СИЭ с помощью программного продукта LightTools для трех вариантов расположения светодиодных кристаллов. Подложка в программе была создана в форме прямоугольника, а также для нее были заданы отражающие свойства, присущие металлам. Программными средствами было рассчитано распределение силы света. Расчет проведен для плоскости, параллельной осевой линии подложки в ее геометрическом центре.

Для двух вариантов расположения кристаллы (на одной прямой и в шахматном порядке) обладают наибольшим значением светового потока и распределением излучения в пространстве, что и формирует практически идентичные КСС. Вариант под № 3 (расположение кристаллов на краях подложки) имеет меньшее значение светового потока, что связано с тем, что поток при таком построении менее концентрированный, не ограничен по краям металлической подложкой.

Исследование светодиодной лампы. Цель эксперимента: сконструировать лампу на основе светодиодных нитей таким образом, чтобы добиться равномерного распределения светового потока. Поставленная задача осуществлялась изменением угла наклона источников света. СИЭ в нижней части опорной конструкции припаивались в одном положении, а в верхней части припаивались к разным точкам контакта (положение 1 – на контакте вблизи опорной конструкции; положение 2 – посередине контакта; положение 3 – на конце контакта). Был собран опытный образец, состоящий из четырех СИЭ, опорной конструкции и колбы.

На рис. 1 представлены графики распределения силы света опытных образцов светодиодных ламп в меридианальной плоскости, полученные путем измерения на гониофотометре.

Из графика видно, что первое положение СИЭ, в которых светодиоды расположены по одной прямой, позволяет добиться наиболее равномерного распределения света.

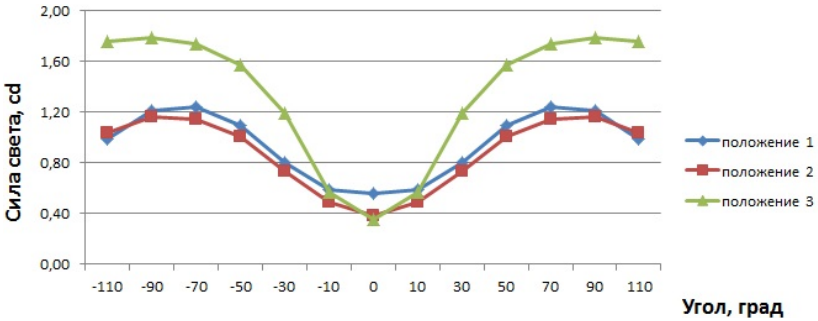


Рис. 1. Графики распределения силы света светодиодной лампы, измеренной на гониофотометре

По результатам проделанной работы видно: чтобы добиться наиболее равномерного распределения света, нужно расположить СИЭ в положение 2.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках прикладных научных исследований RFMEFI57714X0061.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Солдаткин В.С.* Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин и др. // Доклады ТУСУРа. 2015. № 3. С. 55–61.

2. *Гончарова Ю.С.* Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады ТУСУРа. 2013. № 2 (28). С. 51–53.

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛАКА КО-859, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОПОРОШКАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

А.С. Бахтаулова, магистр каф. ПрЭ

Научный руководитель М.М. Михайлов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, membrana2010@mail.ru

Среди связующих для терморегулирующих покрытий кремнийорганические лаки нашли наибольшее применение как наиболее стабильные к действию заряженных частиц и квантов солнечного ультрафиолета. Однако и в этих связующих – лаках при длительных сроках орбитального полета космических аппаратов (КА) образуется достаточно большое количество дефектов и центров поглощения, которые приводят к увеличению коэффициента поглощения (α_s) и изменению излучательной способности (ε), в результате чего нарушается тепловой

баланс, повышается температура и уменьшается срок активного существования КА. Одним из способов увеличения радиационной стойкости покрытий является создание стоков для релаксации дефектов. Пример такого способа – модифицирование связующих – лаков наночастицами оксида кремния. Выбор нанопорошков оксида кремния обусловлен высоким значением его ширины запрещенной зоны и относительно высокой радиационной стойкостью.

Термо- и водостойкость кремнийорганических лаков вместе с их отличными электроизоляционными свойствами и устойчивостью к пробою в электрических полях позволяет применять их в изоляции свечей авиадвигателей, в радио- и рентгеновском оборудовании, антеннах, переключателях, системах зажигания судовых двигателей, аккумуляторных батареях и электрических кабелях [1, 2].

Целью настоящей работы было исследование, направленное на определение оптимальных условий модифицирования нанопорошками диоксида кремния для создания связующих – лаков с высокой стабильностью оптических свойств к действию заряженных частиц.

Эксперимент. Модифицирование лаков нанопорошком SiO_2 осуществляли следующим образом: нанопорошки диоксида кремния (0,5; 1; 3 мас. %) диспергировали в растворителе, полученный раствор смешивали с необходимым количеством лака КО-859 при помощи магнитной мешалки до получения гомогенной массы. Смесь наносили на алюминиевые подложки из сплава АМГ-6 диаметром 28 мм, глубиной 2 мм, после чего сушили при комнатной температуре в течение 24 ч. Приготовленные образцы закрепляли на предметном столике установки – имитаторе космического пространства «Спектр-1», получали вакуум не хуже 10^{-5} Па, регистрировали спектры диффузного отражения ($\rho_{\lambda 0}$) в диапазоне 360–2000 нм по точкам с шагом 10–200 нм в зависимости от значимости и информативности различных областей спектра [3]. Затем образцы облучали флюенсом электроном (0,5; 1; 1,55)$\cdot 10^{-16}$ см$^{-2}$ с энергией 30 кэВ и регистрировали спектры после облучения ($\rho_{\lambda ф}$) на месте облучения образцов. Рассчитывали разностные спектры диффузного отражения ($\Delta\rho_{\lambda}$) вычитанием спектров облученных покрытий ($\rho_{\lambda ф}$) из соответствующих спектров до облучения ($\rho_{\lambda 0}$):

$$\Delta\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda 0} - \rho_{\lambda ф}.$$

Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (α_s) рассчитывали как среднеарифметическое из 22 значений коэффициента отражения покрытий в точках, взятых на равноэнергетических участках спектра излучения Солнца. Изменение интегрального коэффициента поглощения после облучения покрытий электронами ($\Delta\alpha_s$) определяли вычитанием значений после облучения ($\alpha_{s ф}$) из значений до облучения (α_{s0}).

Результаты и их обсуждение. В таблице представлены результаты расчета изменения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения $\Delta\alpha_s$ от концентрации нанопорошка SiO_2 в связующем на основе кремнийорганического лака после облучения электронами (E = 30 кэВ, Ф = $0{,}5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$, Ф = $1\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ и Ф = $1{,}55\cdot10^{16}$ см$^{-2}$).

Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения $\Delta\alpha_s$

С, мас. %	$\Delta\alpha_s$		
	Ф = $0{,}5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$	Ф = $1\cdot10^{16}$ см$^{-2}$	Ф = $1{,}55\cdot10^{16}$ см$^{-2}$
0	0,062	0,103	0,156
0,5	0,036	0,075	0,085
1	0,037	0,074	0,085
3	0,015	0,038	0,069

Расчеты показали, что радиационная стойкость кремнийорганического лака, модифицированного нанопорошком SiO_2, увеличивается в 1,83 раза: $\Delta\alpha_s$ = 0,156 для немодифицированного лака, $\Delta\alpha_s$ = 0,085 для модифицированного лака оптимальной концентрацией 0,5 мас. % (рис. 1). При дальнейшем увеличении концентрации наночастиц радиационная стойкость также увеличивается, но незначительно.

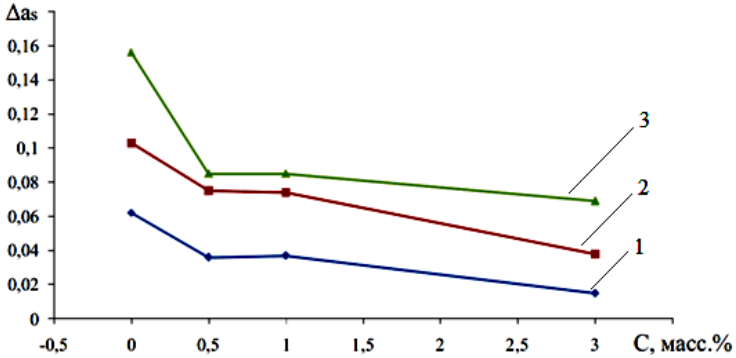


Рис. 1. Зависимость изменения интегрального коэффициента поглощения $\Delta\alpha_s$ от концентрации нанопорошка SiO_2 в связующем на основе кремнийорганического лака после облучения электронами (E = 30 кэВ, Ф = $0{,}5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ (*1*), Ф = $1\cdot10^{16}$ см$^{-2}$ (*2*), Ф = $1{,}55\cdot10^{16}$ см$^{-2}$(*3*))

Заключение

1. Проведены исследования влияния модифицирования на радиационную стойкость лака КО-859.

2. Установлено, что введение малых концентраций (0,5–3 мас. %) нанопорошков SiO_2 в связующие для терморегулирующих покрытий

на основе кремнийорганического лака КО-859 способствует увеличению его радиационной стойкости. Оптимальной является концентрация наночастиц 0,5 мас. %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Молотова В.А.* Промышленное применение кремнийорганических лакокрасочных покрытий. М., 1978.

2. *Соболевский М.В.* Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. М., 1975 .

3. *Косицын Л.Г., Михайлов М.М., Кузнецов Н.Я., Дворецкий М.И.* Установка для исследования спектров диффузного отражения и люминесценции твердых тел в вакууме // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 4. С. 176−180.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИЗ ОБЛАСТЕЙ СИНЕГО И ЗЕЛЕНОГО СПЕКТРА

А.Д. Безпалый, А.О. Верхотуров, магистранты

Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, id_alex@list.ru, verhoturov.ao@gmail.com, shandarov@hotmail.com

За почти 40 лет развития квантовой оптики в качестве сред для генерации и управления характеристиками оптического излучения опробованы сотни кристаллов [1]. Ниобат лития ($LiNbO_3$) является одним из наиболее широко применяемых на практике кристаллов благодаря уникальному набору оптических свойств [2]. Значительный интерес представляет фоторефрактивный эффект, благодаря которому в кристаллических материалах возможно формирование оптически индуцированных волноводных элементов.

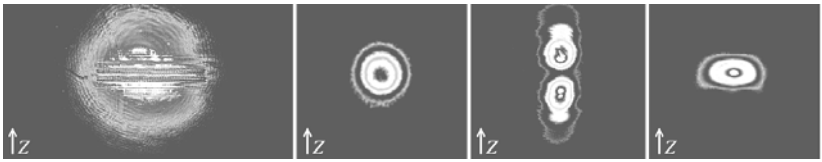
Целью данной работы является исследование поточечного формирования и сравнение характеристик волноводно-оптических структур в образцах $LiNbO_3$:Cu лазерным излучением из областей синего и зеленого спектра.

Оптические волноводы формировались путем поточечного экспонирования поверхности $LiNbO_3$ *Y*-среза с размерами 30×3×15 мм^3 по осям *X*×*Y*×*Z* при смещении образца относительно светового пучка. Между экспонированными областями в виде узких полосок, ориентированными в направлении оси *X*, формировался канальный оптический волновод. Источниками излучения послужили YAG:Nd^{3+} и полупроводниковый лазеры, работающие в непрерывном режиме на длинах

волн λ = 532 нм и λ = 450 нм соответственно при интенсивности $I = 35$ Вт/см^2.

Далее исследовались картины светового поля при оптическом зондировании фокусированным и нефокусированным пучками He-Ne лазера с длиной волны λ = 633 нм и мощностью ~100 мкВт.

Рисунок 1, *а* иллюстрирует результаты зондирования экспериментального образца параллельным световым пучком с диаметром 0,7 мм в области наведенной волноводной структуры. Две параллельные темные полосы в центральной части картины соответствуют экспонированным на λ = 532 нм областям с пониженным показателем преломления. Светлая полоса между ними – волноводная область. Картины светового поля при зондировании образца в направлении оси *Y* световым пучком с диаметром 70 мкм в оптически однородной области (см. рис. 1, *б*), в области полоски с пониженным показателем преломления (см. рис. 1, *в*) и в области волновода (см. рис. 1, *г*) иллюстрируют значительное изменение показателя преломления в экспонированных областях.



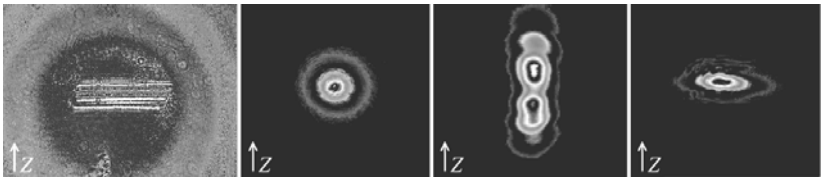
а *б* *в* *г*

Рис. 1. Световые картины, полученные при оптическом зондировании области, экспонированной на длине волны λ = 532 нм: *а* – параллельный пучок в области наведенной структуры; *б* – фокусированный пучок в оптически однородной области; *в* – пучок зондирует экспонированную область; *г* – пучок между экспонированными полосками

По аналогии, описанной выше, зондировалась структура, сформированная лазерным излучением с длиной волны λ = 450 нм, световые картины которой изображены на рис. 2, *а–г*.

В оптически однородной области световая картина имеет круговую симметрию (см. рис. 2, *б*), но эта симметрия не сохраняется при зондировании образца в оптически неоднородных областях: пучок, наведенный на экспонированную полоску, разделяется (см. рис. 2, *в*), а в области между полосками – локализуется (см. рис. 2, *г*).

Таким образом, эксперименты показали возможность формирования волноводно-оптических структур в $LiNbO_3$, путем поточечного экспонирования на длинах волн λ = 532 нм и λ = 450 нм. Топология таких структур определяется изменением пути светового пятна на поверхности образца и может быть достаточно сложной.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Световые картины, полученные при оптическом зондировании области, экспонированной на длине волны λ = 450 нм: *а* – параллельный пучок в области наведенной структуры; *б* – фокусированный пучок в оптически однородной области; *в* – пучок зондирует экспонированную область; *г* – пучок между экспонированными полосками

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект № 3.878.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блистанов А.А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: учеб. пособие для вузов / А.А. Блистанов. М.: МИСИС, 2000. 432 с.

2. *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.

ACCOUNTING FOR RESIDUAL GLOW IN HYBRID SYSTEMS BASED ON EOC

K.A. Borodina, S.A. Sorokina, students,
M.P. Boronenko, leading engineer of the Department of physico-chemistry of processes and materials
Khanty-Mansiysk, Ugra State University, m_boronenko@ugrasu.ru

The use of opto-electronic systems with electron-optical converters in scientific experiments [1, 2], is connected with the problem of low sensitivity at high speed shooting and low exposure. For some measurement of fast processes, the residual glow is the main limiting factor [3, 4] .In measurements of thermal parameters of slow processes that use it, the afterglow can be removed with the help of miniature lamps brief (5–10 seconds) backlit screen [6, 7]. The solution to this problem for a high-speed experiment without changing the hardware of the ECO were not found.

The experimental setup and algorithm. Experimental stand, which is composed of following equipment (fig. 1): high-speed camera, optical bench, a tripod, a quartz reactor, a table with adjustable tilt.

In order to reduce the error introduced afterglow, it is necessary to subtract contributions. Suppose we measure the brightness I_1 of the first frame. I_{01}, I_{02} -brightness without afterglow. The recorded signal is the sum of:

$$I_1 = I_{\text{nois}} + I_{01}.$$

Then the next frame I_2 because of the afterglow phosphor:

$$I_2 = I_{\text{nois}} + I_{02} + I_{1\text{res}},$$

afterglow decay law is determined experimentally. Contribution μ to the afterglow of the next frame is determined from the graph.

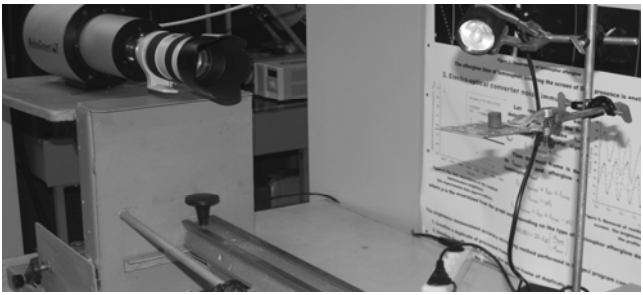


Fig. 1. The experimental setup

$$I_{1\text{res}} = \mu I_1,$$

$$I_2 = I_{\text{nois}} + I_{02} + I_{1\text{res}} - \mu I_1.$$

where the damping coefficient μ-afterglow. Let the observed amplitude of the signal exceeds the background in N times. The signal can be represented by

$$I(N) = m \cdot I_{\text{nois}} \cdot \exp(-a \cdot N).$$

Signal is reduced by a factor e for 1/0.36. Thus, the lifetime of the afterglow three frames. The main contribution to the afterglow of 3 frames. For simplicity, assume that the amplitude of the field across the same signal. Then the signal/noise ratio:

$$SNR(dB) = 20 \cdot \lg\left(\frac{k \cdot I_{\text{nois}} \cdot \exp(-0{,}36 \cdot 0) + m \cdot I_{\text{nois}} \cdot \exp(-0{,}36 \cdot N)}{I_{\text{nois}} + m \cdot I_{\text{nois}} \cdot \exp(-0{,}36 \cdot N)}\right).$$

Any image can be described by a set Inois, I, IPS(N). Feedback based on the estimation of the ratio of the amplitude of the signal *In* the pixel to the amplitude of the signal in the same pixel in the previous frame I_{n-1}. Based on the comparison of selected factor b residual glow.

$$I_{PS}(N) = I \cdot \exp(-a \cdot N) = I \cdot b.$$

The value of the amplitude of the signal of the next frame in the same pixel is calculated by the formula:

$$I(N) = I_n - b \cdot I_{n-1}.$$

Let the currently registered signal In the pixel with coordinates (x,y). If the ratio is greater than one, then this new signal. Then the coefficient is $b = 1$, $N = 0$. When you move to the next frame in the memory cell «0» signal is automatically reset into the cell «1». The ratio of the signals stored as

«d». Sometimes a very weak signal. Then the ratio of the signal more than the previous, but less than 1. If you need high accuracy, supplemented by comparison algorithm. The resulting ratio should not exceed d.

The application of optoelectronic systems for studies of SHS. The use of optoelectronic systems to study the SHS can be measured: the time of heat generation and heat, the speed of propagation of the combustion front, etc. There is also an opportunity to assess the size and times of the phases. Figure 2 shows the SHS [3–5] combustion process. The frames obtained using the optoelectronic system. Pixel-by-pixel processing of data will make the results more accurate. The application of optoelectronic systems to measure the rate of heating will help to solve important tasks of nanotechnology.

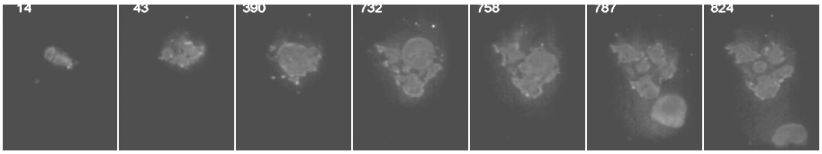


Fig. 2. SHS sequence of frames

Thus, the calibration should find the mean value of the calibration range of several consecutive frames

Conclusions. The application of optoelectronic systems for research, very informative. However, existing methods of removing residual emission electron-optical converter contain flaws. In order to more accurately measure the need to: per-pixel processing and feedback. The proposed algorithm helps to select the correction factor for each pixel. Investigations were carried out with the support of RFFI grant 15-42-00106 r_ural_a.

REFERENCES

1. *Boronenko M.P., Gulyaev P.Yu., Seregin A.E., Poluhina K.G.* // Journal of Physics Conference Series 2015. 643. 012028.

2. *Boronenko M.P., Gulyaev P.Yu., Seregin A.E., Bebiya A.G.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. 93. 012021.

3. *Lisitsyn V.M., Valiev D.T., Oleshko V.I., Tupitsyna I.A., Polisadova E.F., Andryuschenko L.A., Yakubovskaya A.G., Lisitsyna L.A., Vovk O.M.* 2014. Journal of Luminescence. 153. 130.

4. *Gulyaev P.Yu., Kotvanova M.K., Pavlova S.S., Sobol E.N., Omelchenko A.I.* 2012 // Nanotechnologies in Russia. 7. 127.

5. *Gulyaev P.Yu., Cui H., Gulyaev I., Milyukova I.* 2015. High Temperatures. 44. 83.

6. *Loktev M.J., Abanin V.A., Savin V.F., Ermolaev D.A., Suranov A.Y.* // IEEE 2nd Russia school and seminar on fundamental problems of micro/nanosystems technologies (MNST). 2010. 26.

7. *Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Jordan V.I.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. 81. 012041.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОПТИЧЕСКОГО УЗЛА

А.Н. Бурьянова, студентка каф. ЭП

Научный руководитель В.И. Быков, доцент каф. физики, к.ф.м.н.

г. Томск, ТУСУР, nastena_2604@mail.ru

Проект ГПО ЭП-1104 «Установка для измерения электрооптического коэффициента в кристаллах КТР и ниобата лития»

К бесконтактному методу измерения физических величин интерес увеличивается с каждым годом. Интерферометрический метод наиболее важный, так как является прямым методом. Лазерные интерферометры, реализующие преобразование фазовой модуляции света в модуляцию его интенсивности, позволяют измерять механические колебания отражающих поверхностей с высокой точностью, а также измерять изменения коэффициента преломления.

Принцип их действия основан на интерференции двух когерентных пучков, один из которых является опорным, а другой – измерительным. В современных двухлучевых интерферометрах используются лазерные источники, обладающие высокой временной и пространственной когерентностью – необходимыми условиями для получения качественной интерференционной картины. Лазерный интерферометр Майкельсона предназначен в основном для получения информации о характеристиках движения различных тел: перемещения, скорости и ускорения. В лазерных интерферометрах Майкельсона происходит сравнение изменения оптического пути для измерительного пучка с длиной волны лазера. Этим достигается высокая точность измерений. Интенсивность интерференционной картины при двухлучевой интерференции изменяется по закону

$$I_1 = I_2 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2 \cos(4\frac{\pi}{\lambda}\Delta x)}\ ,$$

где $I_1 I_2$ – интенсивности входного и выходного сигнала; λ – длина волны лазера; Δx – геометрическая разность хода лучей; $2\Delta x$ – оптическая разность хода с учетом двойного прохождения луча [1, 2].

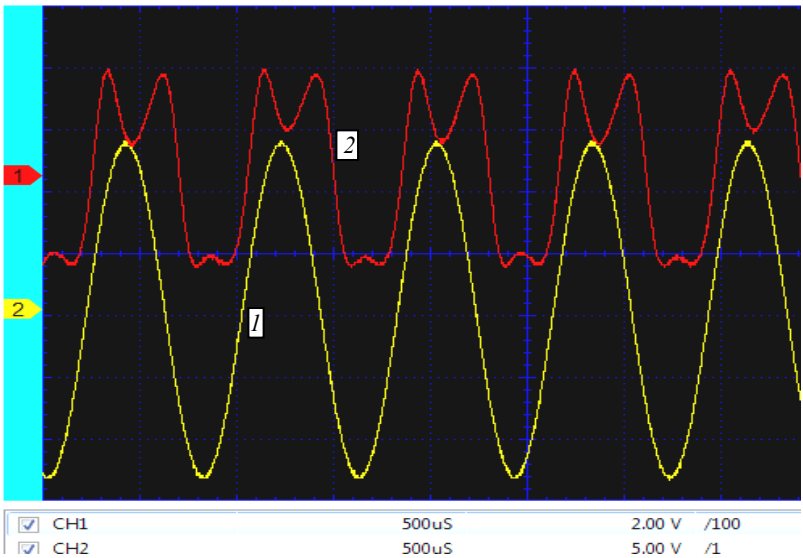
Фазовую модуляцию света обеспечивают оптические элементы, в основе которых лежит зеркало. В качестве движителя можно использовать катушку индуктивности, или емкость (пьезокерамический). Прикладывая переменное напряжение можно перемещать зеркало, используя его как модулятор. В рассматриваемой установке объектом исследований являлся оптический узел на базе пьезокерамики, представляющий собой тонкостенный цилиндр, на торце которого закреплено зеркало. Выбор цилиндрической формы пьезокерамического эле-

мента обеспечивает плоскопараллельное перемещение зеркала с минимальными искажениями.

Целью работы являлось исследование частотных свойств оптического узла на основе пьезокерамики. При этом оптический узел использовался в качестве одного из плеч интерферометра Майкельсона. В экспериментах измерялась передаточная функция оптического узла (т.е. соотношение смещения зеркала к приложенному напряжению) для различных частот. Амплитуда колебаний зеркала зависит от собственных механических частот оптического узла. Методика эксперимента заключается в измерении амплитуды колебаний интенсивности интерференционной картины, в зависимости от величины модуляционного сигнала, подаваемого на пьезокерамику, при различных частотах модуляции. В качестве преобразователя светового сигнала в электрический использовался фотодиод. Электрический сигнал, подаваемый с фотоприемника, регистрировался с помощью осциллографа.

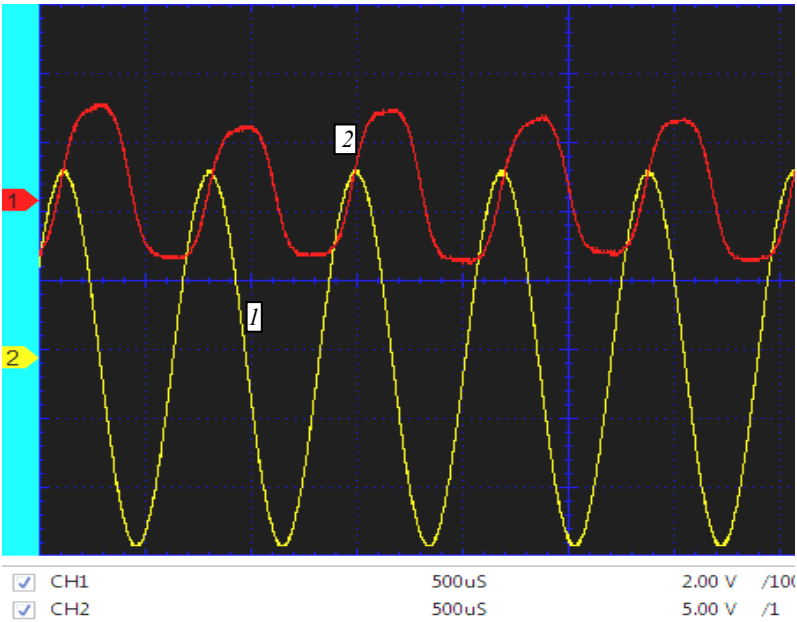
С помощью интерферометра Майкельсона наблюдаем отклики амплитудно-частотных характеристик оптического узла на частоте от 0,7–200 кГц [3, 4].

На рис. 1 приведены осциллограммы, полученные на разных частотах: *а* – 130 кГц, *б* – 1,4 кГц.



а

Рис. 1 (начало)



б

Рис. 1 (окончание). Осциллограммы на частоте: *а* – 130 кГц; *б* – 1,4 кГц

На рис. 1 обозначен сигнал приложенного напряжения с генератора – *1*, *2* – сигнал с интерферометра Майкельсона. Для данного узла были определены резонансные частоты, при которых максимальный отклик сигнала наблюдался на частоте 130 кГц, минимальный – на частоте 1,4 кГц. Данный оптический узел может быть использован при разработке адаптивных интерферометров – измерителей малых перемещений, а также в интерферометре Майкельсона с оптической отрицательной обратной связью, используемой для устранения влияния вибраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лансберг Г.С.* Оптика / Г.С. Лансберг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.

2. *Погребной А.М.* Волновая оптика / А.М. Погребной, Т.П. Погребная, Г.И. Пузырева // Волновая оптика: метод. указания по физике для студентов. ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2007. 80 с.

3. *Коломийцов Ю.В.* Интерферометры / Ю.В. Коломийцов. Л.: Машиностроение, 1976. 299 с.

4. *Шишловский А.А.* Прикладная физическая оптика / А.А. Шишловский. М.: Физмат, 1961. 822 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ GaN/InGaN – САПФИР

Д.А. Демидова, О.Ф. Зодорожный, А.Ж. Алимбаева, Е.В. Москвитина, студенты каф. ЭП

Научные руководители: В.В. Щербина, ст. преподаватель, к.ф.-м.н., М.В. Бородин, научный сотрудник каф. ЭП

г. Томск, ТУСУР, demidova1994da@mail.ru

Кристалл нитрида галлия является одним из самых перспективных оптоэлектронных материалов. Спектр применения кристаллов очень широкий, они используются для изготовления светодиодов сине-зеленой области видимого спектра, светодиодов ближнего ультрафиолетового диапазона, а также кристаллы хорошо используются в СВЧ-электронике диодов Шоттки, транзисторов [1, 2].

В настоящем сообщении представлены результаты исследования характеристик эпитаксиальной структуры GaN/InGaN на подложке из сапфира в диапазоне волн 633–810 нм.

Волноводные характеристики структур «GaN/InGaN – сапфир» исследовались с использованием призм связи из для лазерного излучения с длинами волн λ = 632,8 и 810 нм. Для исследования характеристик проводились оптические измерения эффективных показателей преломления волноводных ТЕ-мод и показателя преломления подложки методом призменного ввода-вывода излучения. Возбуждение соответствующей волноводной моды в видимом диапазоне фиксировалось по максимуму интенсивности ее *m*-линии, выводимой из волновода выходной призмой связи. В результате исследования были зафиксированы возбуждения в волноводе ТЕ-мод, эффективные показатели преломления которых приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Эффективные показатели преломления для ТЕ-мод на длине волны 632,8 нм

Мода TE_p	TE_0	TE_1	TE_2	TE_3	TE_4	TE_5
n_p^*	2,350	2.345	2,337	2,327	2,313	2.297
Мода TE_p	TE_6	TE_7	TE_8	TE_9	TE_{10}	TE_{11}
n_p^*	2,277	2,255	2,230	2,200	2,169	2,131

В ходе исследования экспериментально была получена волноводная генерация второй гармоники для накачки с длиной волны 810 нм. Использовалось излучение с длительностью импульса 10 нс и энергией 200 мкДж, которое с помощью призмы ввода из рутила возбуждало в исследуемой структуре волноводные ТЕ-моды.

Таблица 2

Эффективные показатели преломления для ТЕ-мод на длине волны 810 нм

Мода TE_p	TE_0	TE_1	TE_2	TE_3	TE_4	TE_5
n_p^*	2,295	2,290	2,278	2,262	2,239	2,213
Мода TE_p	TE_7	TE_8	TE_9	TE_{10}		
n_p^*	2,142	2,100	2,053	1,997		

Показатели преломления были найдены с помощью ВКБ-метода [3], проведенный численный анализ показал, что показатель преломления аппроксимируется функцией

$$n(y) = n_s + \frac{\Delta n}{2}\left[1 - \mathrm{th}\left(\frac{y-h}{d}\right)\right],$$

где n_s – показатель преломления сапфировой подложки; Δn – разность между показателем преломления основного слоя структуры GaN/InGaN и n_s. Параметр d характеризует толщину переходного слоя между подложкой и основным слоем, и параметр h соответствует глубине локализации середины переходного слоя, отсчитываемой от границы с покровной средой. На длине волны 810 нм эти параметры имели значения n_s = 1,747, Δn = 0,585, h = 4330 нм и d = 425 нм.

В результате была построена зависимость профиля показателя преломления планарной волноводной структуры GaN/InGaN на сапфире и эффективных показателей преломления ТЕ-мод от номера моды для длины волн 810 нм (рис. 1).

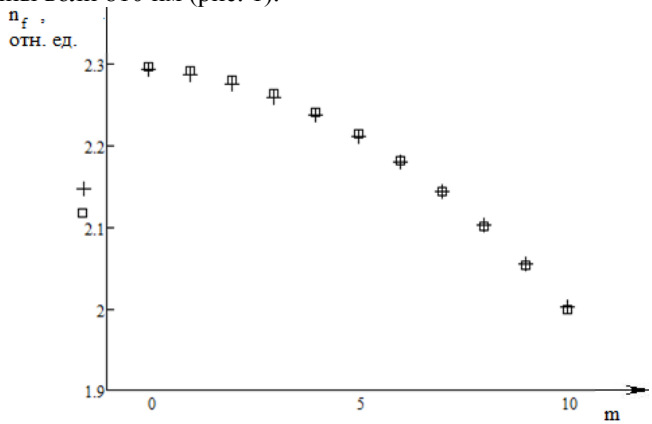


Рис. 1. Зависимость профиля показателя преломления планарной волноводной структуры GaN на сапфире и эффективных показателей преломления ТЕ-мод, рассчитанных по методу ВКБ (крестики), и экспериментальных для длины волны 810 нм от номера моды m

Таким образом, показано, что планарные структуры «GaN/InGaN – сапфир» обладают хорошими волноводными свойствами и перспективны для реализации нелинейных преобразований лазерного излучения в широкой спектральной области.

Авторы благодарят А.А. Колегова (Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. У.И. Забабахина, Снежинск) за предоставление образца структуры для исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zhang H.Y., He X.H., Shih Y.H. et al.* Waveguide study and refractive indices of GaN:Mg epitaxial films // Opt. Lett. 2013. Vol. 21, № 19. P. 1529–1531.

2. *Rosenberg A., Carter M.W., Casey J.A. et al.* GaN-Based Photonic Crystals and Integrated Optics, in Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies. Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CTuAA6.

3. *Волноводная* оптоэлектроника / под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1991. 575 с.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗОНДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

С.Ю. Дикусар, аспирант каф. наносистем и оптотехники

Научный руководитель Д.В. Чесноков, доцент каф. наносистем и оптотехники, к.т.н.

г. Новосибирск, СГУГИТ, Lddik401@yandex.ru

На сегодняшний день для использования в робототехнике интенсивно развивается направление разработки различных сенсоров, в том числе систем технического зрения. В данной работе решается проблема создания контактных микросенсорных многофункциональных устройств современного интеллектуального робототехнического комплекса, предназначенных для экспрессного определения в реальном масштабе времени физических и химических особенностей объектов окружающей среды.

В данной работе поставлена цель разработать принципы создания оптико-спектральных зондов исследования окружающей среды, основанных на контактной интерференционной спектрометрии реального масштаба времени. Также решается проблема создания мобильных датчиков, осуществляющих обмен полученными данными по радиоканалу. Новизна работы заключается в создании многофункционального универсального в использовании сенсорного устройства, позволяюще-

го исследовать контактным методом объекты окружающей среды, химические и биологические субстанции, в том числе живые организмы изнутри в процессе их жизнедеятельности, по оптическим параметрам, т.е. не нанося повреждений. Сенсорный модуль по своим возможностям может заменить работу биохимической лаборатории, позволяя проводить спектроскопические исследования внутренних органов без взятия образцов их тканей, в процессе их жизнедеятельности. При совмещении модуля с робототехническими системами последние наделяются сенсорными функциями, расширяющими спектральный диапазон систем технического зрения.

В процессе исследования были изготовлены ряд экспериментальных образцов оптико-спектральных зондов, основанных на контактной интерференционной спектрометрии реального масштаба времени. Была разработана лабораторная методика исследования с их помощью объектов окружающей среды, химических и биологических субстанций, в том числе живых организмов изнутри в процессе их жизнедеятельности, только по оптическим параметрам – то есть, не нанося повреждений. Основой сенсорной части зонда служит планарный волновод, полученный с методом напыления. Работа чувствительной части зонда основана на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения. Также было написано программное обеспечение, позволяющее использовать оптико-спектральный зонд как встраиваемую систему для робототехнических комплексов. Разработаны графический интерфейс для удобного управления комплексом и алгоритм определения характеристик анализируемого вещества по рассеянному излучению. При проведении экспериментов использовались универсальные робототехнические комплексы IE-POP-BOT XT и IE-Robopica. В процессе разработки были задействованы среда программирования Matlab и Arduino.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМЫХ ВОЛНОВОДНЫХ КАНАЛОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ ФПМ-ЖК МАТЕРИАЛАХ

И.А. Викулина, К.О. Гусаченко, Д.И. Дудник, студенты, А.О. Семкин, аспирант каф. СВЧиКР

Научный руководитель С.Н. Шарангович, зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, a.o.semkin@gmail.com

Сформированные в фотополимеризующихся композициях волноводные каналы для оптического и терагерцового излучения в послед-

нее время вызывают большой интерес у исследователей [1–4 и др.]. Перспективным представляется создание управляемых световодов, условиями распространения света в которых можно управлять путем внешнего воздействия, например электрического поля. Одним из возможных решений данной задачи является голографическая запись волноводных каналов в фотополимерной композиции, содержащей жидкие кристаллы.

В данной работе приведена теоретическая модель голографического формирования системы управляемых волноводных каналов в фотополимерно-жидкокристаллической (ФПМ-ЖК) композиции.

Рассмотрим падение двух плоских монохроматических волн E_0 и E_1 под углами θ_0 и θ_1 на образец ФПМ-ЖК (рис. 1, *а*). Процесс голографического формирования волноводных каналов описывается системой кинетических уравнений (СКУ), записанных для концентрации мономера и показателя преломления, учитывающих вклад фотополимеризационного и диффузионного механизмов в формирование структуры [5–7].

Решение задачи записи будем искать в виде суммы пространственных гармоник [7]:

$$M(\tau,\mathbf{r})=\sum_{j=0}^{H} M_j(\tau,z)\cos(j\mathbf{K}_1\mathbf{r}),\ n(\tau,\mathbf{r})=n_{st}+\sum_{j=0}^{H} n_j(\tau,z)\cos(j\mathbf{K}_1\mathbf{r}),\quad (1)$$

где $M_j(\tau,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} M(\tau,\mathbf{r})\cos(j\mathbf{K}_1\mathbf{r})\,d(\mathbf{K}_1\mathbf{r})$;

$n_j(\tau,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} n(\tau,\mathbf{r})\cos(j\mathbf{K}_1\mathbf{r})\,d(\mathbf{K}_1\mathbf{r})$ – амплитуды гармоник концентрации мономера и показателя преломления соответственно; n_{st} – значение показателя преломления ФПМ-ЖК при $\tau=0$, $\tau=t/T_m$ – относительное время; T_m – характерное время диффузии компонент ФПМ-ЖК; $\mathbf{K}_1$ – вектор решетки, соответствующий первой гармонике концентрации мономера; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор.

Решение СКУ для произвольной степени нелинейности процесса записи и произвольного количества записывающих пучков приведено в [7]. В случае высокой степени нелинейности возможно формирование такого профиля показателя преломления в ФПМ-ЖК, при котором будет выполняться волноводный режим распространения света в материале. Нелинейность записи достигается за счет изменения соотноше-

ния вклада фотополимеризационного и диффузионного механизмов в процесс формирования фотонной структуры. На рис. 1, *б* приведен профиль показателя преломления для соотношения характерных времен полимеризации и диффузии $T_p / T_m = 0{,}25$ и соотношения амплитудных коэффициентов $\delta n_p / \delta n_i = 0{,}3$ с учетом 7 высших гармоник без учета поглощения света.

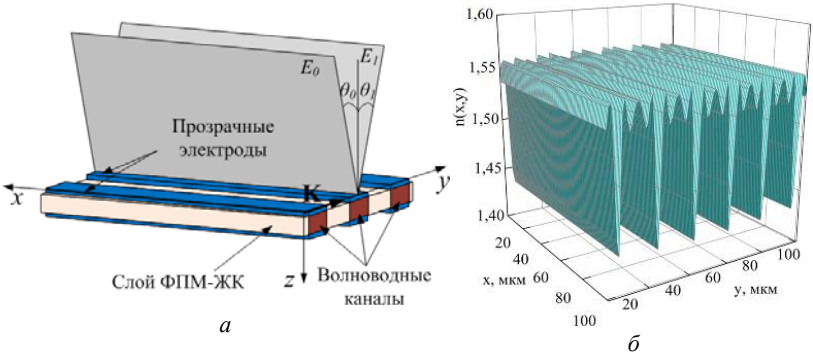


Рис. 1. Голографическое формирование системы волноводных каналов: *а* – геометрия записи, *б* – расчетный профиль показателя преломления

Записанной системой волноводных каналов можно управлять путем воздействия внешнего электрического поля на отдельные волноводы. Данная возможность реализуется нанесением системы электродов на поверхности стеклянных пластин, как показано на рис. 1. Подача напряжения на отдельные электроды позволяет «выключать» волноводы, менять период волноводной структуры и т.д.

Воздействие электрического поля на образец приводит к тому, что в области записанного волновода показатель преломления больше не изменяется и условия волноводного распространения излучения не выполняются.

Таким образом, в работе разработана теоретическая модель голографического формирования в образце ФПМ-ЖК системы управляемых внешним электрическим полем волноводных каналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части Госзадания (работа № 3.878.2014/K).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вдовин В.А.* Оптический синтез световодов из фотополимеров / В.А. Вдовин, А.Л. Лонин, С.Н. Менсов // Журнал технической физики. 2001. Т. 1, №7. С. 67–71.

2. *McEwan I.* A High Performance Optical Photo-Polymer for Planar Lightwave Curcuits / I. McEwan, N. Suyal, X. Li, F. Tooley // Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components (Cat.No.02EX595). 2002. P. 133–139.

3. *Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В.* Об эффективности оптической стыковки световодов в фотополимеризующейся композиции // Квантовая электроника. 2007. №9. С. 881–884.

4. *Baylor M.-E. et al.* Monolithic integration of optical waveguide and fluidic channel structures in a thiol-ene/methacrylate photopolymer // OPTICAL MATERIALS EXPRESS. 2012. Vol. 2, №11. P. 1548–1555.

5. *Довольнов Е.А.* Нелинейная модель записи и считывания голографических дифракционных решеток пропускающего типа в поглощающих фотополимерах. 1. Теоретический анализ / Е.А. Довольнов, С.Н. Шарангович // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48, № 5. С. 56–63.

6. *Довольнов Е.А.* Нелинейная модель записи и считывания голографических дифракционных решеток пропускающего типа в поглощающих фотополимерах. 2. Численное моделирование и эксперимент / Е.А. Довольнов, С.Н. Шарангович // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48, № 7. С. 85–92.

7. *Миргород В.Г.* Нелинейная модель многопучковой записи голографических фотонных структур в поглощающих фотополимерных композитах / В.Г. Миргород, Е.А. Довольнов, С.Н. Шарангович // Доклады ТУСУРа. 2007. №2(16).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ ПУЧКОВ

А.А. Еремеева, студентка, В.М. Шандаров, проф., д.ф-м.н.

Научный руководитель В.Г. Круглов, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, eremeeva_yatsan@mail.ru

Проведено исследование формирования бесселеподобных пучков с использованием линзы и непрозрачного экрана с двумя щелями. Было получено бесселеподобное распределение и выявлено влияние расстояния между щелями на картину бесселеподобного распределения.

Бесселевы пучки [1] обладают двумя основными отличительными свойствами, которые выделяют их среди других лазерных пучков, это:

1) вся энергия сконцентрирована в центральной части пучка;
2) способность самовосстанавливаться.

В данной работе был исследован метод формирования бесселеподобного пучка с использованием двояковыпуклой линзы с фокусным расстоянием 11 см и непрозрачного экрана с двумя щелями шириной 100 мкм каждая. Расстояние между щелями изменялось от 100 до 300 мкм.

На рис. 1 представлена установка для формирования бесселеподобных пучков.

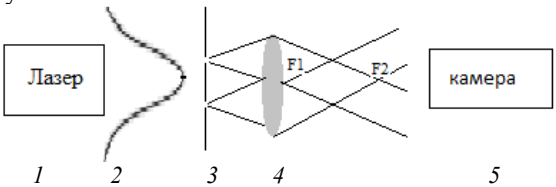


Рис. 1 . Установка для формирования бесселеподобного пучка с помощью двояковыпуклой линзы: *1* – He-Ne лазер; *2* – Гауссов пучок; *3* – непрозрачный экран с двумя щелями шириной 100 мкм каждая; *4* – двояковыпуклая линза с фокусным расстоянием 11 см; *5* – ПЗС-камера

Источником светового излучения в экспериментальной установке служит He-Ne лазер (*1*) с длиной волны λ = 633нм (мощность излучения ~1 мВт). Луч лазера (Гауссов пучок), проходя через непрозрачный экран с двумя щелями (*3*), расщепляется на две когерентные волны, которые падают на двояковыпуклую линзу (*4*). Часть пучка, прошедшая через верхний клин, отклоняется вниз, а часть пучка, прошедшая через нижний клин, отклоняется вверх, образуя область перекрытия двух волн, в которой можно наблюдать бесселеподобый эффект. С помощью ПЗС-камеры (*5*) изучается распределение интенсивности светового поля.

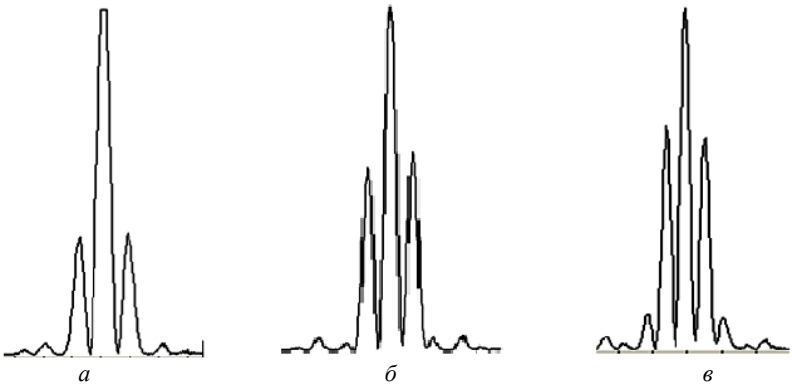


Рис. 2. Полученное распределение интенсивности для непрозрачного экрана с расстоянием между щелями: *а* – 100 мкм; *б* – 200 мкм; *в* – 300 мкм. Изображения получены на расстоянии 1 см от фокуса линзы

По полученным изображениям на рис. 2 видно, что эффективно использовать непрозрачный экран с расстоянием между щелями 100

мкм. Это подтверждает и то, что при смещении ПЗС-камеры в продольном направлении до 8 см сохраняется бесселе-подобное распределение, при этом для расстояния между щелями 200 мкм бесселеподобное распределение не наблюдается уже при смещении видеокамеры свыше 3 см, а для 300 мкм – свыше 1,5 см.

В дальнейшем планируется исследование формирования и распространения бесселеподобных пучков в кристалле ниобата лития.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пятницкий Л.Н.* Волновые бесселевы пучки // Фундаментальная и прикладная физика. 2012. С. 18–61.

2. *Mcgloin D., Dholakia K.* Bessel beams: diffraction in a new light // Contemporary Physics. January–February 2005. Vol. 46, № 1. С. 15–28.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Т.Л. Григорян, студент, А.В. Дроздов, аспирант каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, perin.anton@gmail.com

Проект ГПО СВЧиКР-1602 «Разработка метода формирования и исследование фотонных волноводных структур в кристаллических материалах»

Основной целью работы являлась разработка программы, которая может использоваться в учебных целях или как основа для реализации более специфических задач.

Существует несколько методов компьютерной визуализации изображений, например: растеризация, рей-кастинг, трассировка пути, трассировка лучей.

Метод трассировки лучей состоит в том, что для каждого пикселя на изображении рендер проводит прямой луч от глаза наблюдателя (камеры) до элемента выводимой сцены. Первое пересечение используется для определения цвета пикселя как функции пересекаемой поверхности элемента. Также необходимо определить освещение пикселя, что требует проведения вторичных лучей (в отличие от первичных лучей, которые определяют видимость разных объектов, составляющих сцену). В итоге мы получаем несколько типов лучей [1].

Более подробно рассмотрим алгоритм обратной трассировки лучей. Представим, что некоторая плоскость – это окно, а за окном какая-то сцена. Цвет каждого пикселя на мониторе – это цвет луча, который выходит из глаза, проходит через этот пиксель и сталкивается со сценой. Чтобы узнать цвет пикселя, нужно через этот пиксель пропус-

тить луч и узнать, где этот луч сталкивается со сценой. Отсюда название алгоритма: ray-tracing – трассировка лучей [2].

Для этого необходимо реализовать функцию, которая по координатам луча (двум точкам в пространстве) – вычисляет цвет поверхности, куда этот луч попадает. Рассмотрим три случая, необходимые нам, которые описаны в интернет-источнике [3] и схематично показаны на рис. 1.

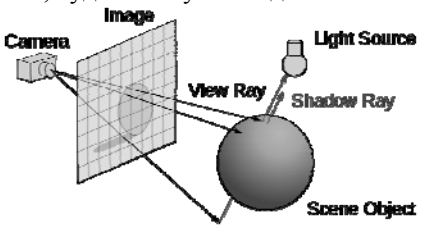


Рис. 1. Пояснение принципа работы алгоритма обратной трассировки лучей

В итоге была разработана программа, производящая визуализацию изображения по методу трассировки лучей. Основным преимуществом данного метода является его фотореалистичность, возможность рендеринга гладких объектов без аппроксимации. Вычислительная сложность метода слабо зависит от сложности сцены, так как рассчитывается определенное количество лучей, которые не зависят от объектов, находящихся на сцене. Результат работы программы показан на рис. 2.

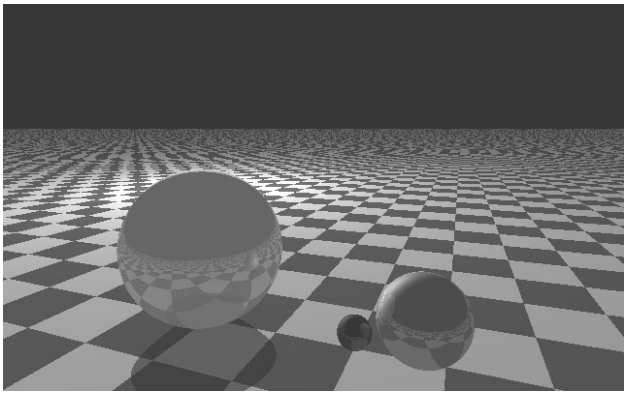


Рис. 2. Результат работы алгоритма обратной трассировки лучей

ЛИТЕРАТУРА

1. *Никулин Е.А.* Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

2. *Джеф Проузис.* Как работает компьютерная графика. СПб.: Питер, 2008. 654 с.

3. *Tom's Hardware.* Метод трассировки лучей против растеризации: новое поколение графики? // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.thg.ru /graphic/ray_tracing_rasterization/onepage.html (дата обращения: 23.04.2015).

СВЕТОДИОДНАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ПОДСВЕТКА ЛЕДОВОГО КАТКА

Р.Ф. Кудрявцев, И.С. Банщикова,
О.С. Дмитриенко, студенты каф. РЭТЭМ
Научные руководители: В.И.Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.,
В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР
Проект ГПО РЭТЭМ-1603 «Океанский светодиодный светильник»

Разработка управляемой светодиодной подсветки ледового катка является перспективной и актуальной для РФ. На территории РФ насчитывается всего лишь несколько подобных воплощенных в жизнь проектов (Москва, ВДНХ; Санкт-Петербург, парк Горького). На данный момент наиболее перспективными источниками света для подсветки катка являются источники света на основе светодиодов (СД). Низкая температура и давление льда пагубно влияют на характеристики источников света, такие как световой поток, срок службы, надежность, жесткость конструкции. Герметизированная светодиодная лента наиболее эффективно справляется с этими проблемами. Также светодиодные ленты имеют преимущество над остальными источниками света благодаря простоте управления.

Целью данной работы является разработка управляемой светодиодной подсветки ледового катка.

Задачи проекта: аналитический обзор литературы, патентов, аналогичных проектов. Провести тепловое и оптическое моделирование. Определить конструкцию макета. Выбрать, какие материалы будут использоваться для комплектующих. Собрать макет и провести эксперимент.

Описание системы (светодиодной управляемой подсветки ледового катка): блок питания, контроллер, соединительные провода и разъёмы. Это минимальный набор комплектующих для нашего проекта.

В качестве контроллера будет использоваться аппаратное средство STM 32 Discovery, оно позволяет с легкостью приступить к выполнению задачи по управлению светодиодной подсветкой. Микроконтроллеры на STM 32 Discovery используют отдельные аппаратные программаторы. Печатный узел STM 32 Discovery довольно просто коммутируется с ПК через USB или microUSB.

Блок питания питается от сети 220 В, питание на светодиодную ленту подается 5 В. Соединительные провода коммутируются, как показано на рис. 1.

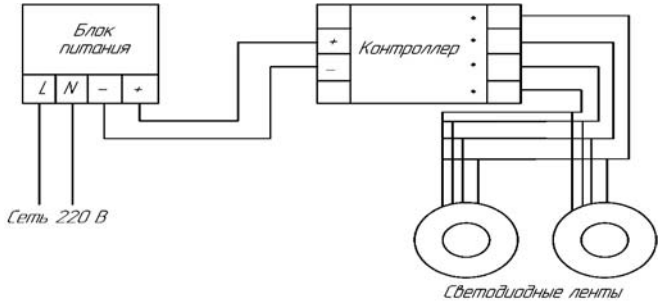


Рис. 1. Система светодиодной управляемой подсветки ледового катка

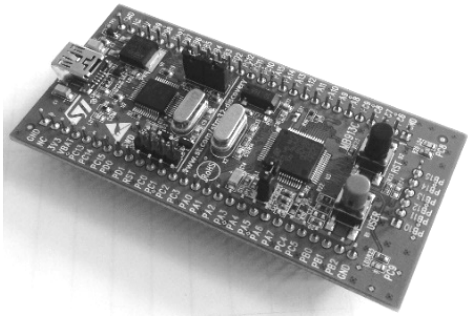


Рис. 1. Печатный узел STM 32 – Discovery

Таким образом, выбрана и обоснована система управляемой светодиодной подсветки льда. Дальнейший эксперимент поможет проверить и оценить предложенную систему в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новая* линия: классификация светодиодных лент, инструкция по монтажу, область применения [Электронный ресурс]. Режим доступа http://nlperm.com (дата обращения: 14.03.16).

2. *STM32:* STM32 Discovery [Электронный ресурс]. Режим доступа http://www2.st.com/content/st_com/en.html (дата обращения: 15.03.16).

3. *You Tube:* Создание LED подсветки катка парка Горького [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.youtube.com/watch?v=hGaWwkyQxEs (дата обращения: 15.03.16).

АМПЛИТУДНЫЕ ТРАНСПАРАНТЫ – ОДИН ИЗ ПУТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

И.А. Асафов, П.К. Сафронова, К.А. Грицук, студенты
Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, mailto:safkonik@sibmail.com

Бездифракционные и квазибездифракционные волновые пучки, к которым относят пучки Бесселя и пучки Эйри [1], привлекают повышенное внимание исследователей в связи с особыми свойствами:

1) сохранение амплитудного и фазового распределения при распространении, т.е. «сопротивление» дифракционному воздействию;

2) концентрация основной части энергии волнового поля в центральной части;

3) быстрое восстановление волнового поля пучка после прохождения им препятствия, соизмеримого с поперечным размером пучка.

Целью данной работы является изучение распределения интенсивности светового излучения при прохождении через одномерный амплитудный транспарант и степени соответствия полученных световых картин распределениям, характерным для бесселевых пучков. Для получения бесселеподобных пучков могут использоваться схемы с амплитудными и фазовыми транспарантами, роль которых в некоторых случаях играют конические линзы (аксиконы) [1–3], но наиболее просто реализуются те, которые основаны на дифракции света на амплитудных транспарантах.

На рис. 1 представлена схема использованной экспериментальной установки. Источником излучения служил He-Ne лазер (*1*) с длиной волны излучения $\lambda = 0{,}63$ мкм. Его луч с диаметром ~1 мм проходил через амплитудный транспарант (*2*), удаленный на 13 см от лазера. Исследовались две области транспаранта, образованные парами прямоугольных щелей в непрозрачном экране. Ширина щелей в первом случае составляла 0,6 мм, во втором – 0,2 мм, а ширина непрозрачной части между ними равнялась 0,1 мм. Распределение интенсивности света в интерференционных картинах на расстоянии от транспаранта 75,5 см сканировалось фотодиодом (*3*) со щелевой диафрагмой. Фототок, генерируемый фотодиодом, измерялся с помощью цифрового миллиамперметра (*4*).

Роль амплитудного транспаранта в экспериментах играла стеклянная пластина с изображением щелей, полученных фотоспособом. Предварительные измерения показали, что величина оптического пропускания темных областей такого транспаранта значительно ниже, чем для транспарантов, полученных на прозрачной пленке путем печати на лазерном принтере.

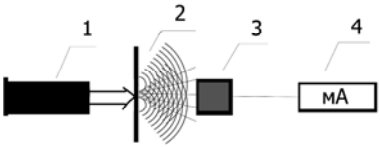


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – He-Ne лазер; *2* – амплитудный транспарант; *3* – фотодиод; *4* – цифровой миллиамперметр

Фотографии дифракционных световых картин в области их сканирования фотодиодом, соответствующие прохождению света через разные системы прозрачных щелей, представлены на рис. 2.

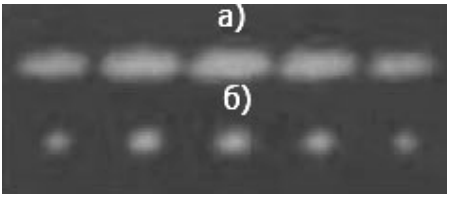
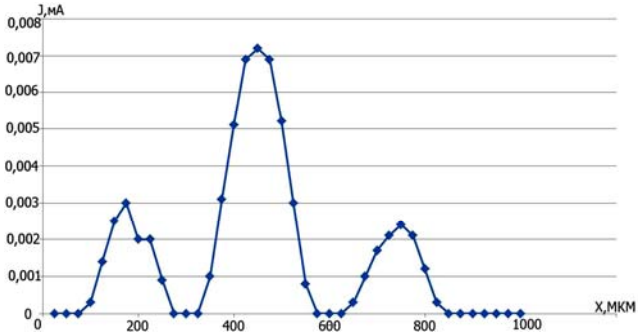
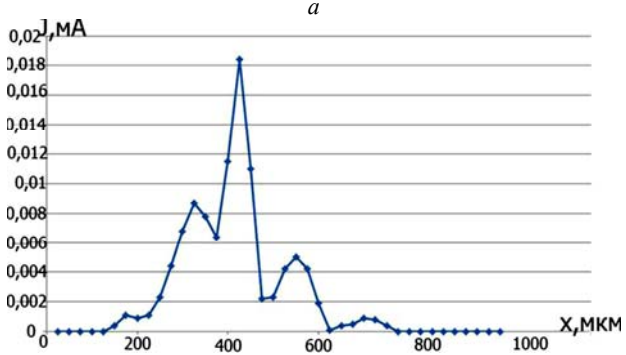


Рис. 2. Дифракционные картины светового поля, соответствующие дифракции светового пучка на первой структуре транспаранта (*а*) и второй структуре (*б*)



а



б

Рис. 3. Распределение интенсивности света в дифракционных картинах, полученных при прохождении излучения He-Ne лазера:
а – через систему широких щелей; *б* – через систему узких щелей

Распределения интенсивности света в данных картинах иллюстрируются зависимостями фототока от положения фотодиода, представленными на рис. 3.

Можно видеть, что интенсивности разных дифракционных максимумов существенно различаются. Хотя теоретические значения интенсивности центрального и первых боковых максимумов в бесселевых пучках отличаются примерно в 6 раз, а в наших экспериментах лишь в 2,5 раза, применение амплитудных транспарантов для генерирования одномерных бесселеподобных пучков можно считать перспективным.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пятницкий Л.Н.* Волновые бесселевы пучки. М.: Физмалит, 2012. 399 с.
2. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
3. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. М.: Высш. школа, 1978. 384 с.

ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР $LiNbO_3$:Cu, СФОРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИФФУЗИЕЙ МЕДИ

А.И. Татьянников, студент, К.М. Мамбетова, аспирант каф. ЭП
Научный руководитель С.М. Шандаров, зав. каф. ЭП, проф., д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, stanislavshandarov@gmail.com

Кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) благодаря высоким электрооптическим свойствам и фоточувствительности представляют собой эффективную фоторефрактивную среду для динамической голографии [1]. Сильные электрические поля, формируемые в кристаллах ниобата лития благодаря фотогальваническому, пироэлектрическому и пьезоэлектрическому эффектам, являются в настоящее предметом исследований с целью создания твердотельных источников электронных пучков и рентгеновского излучения [2–4] и устройств для манипулирования микро- и наночастицами [5]. Легирование переходными металлами позволяет значительно увеличить фоторефрактивные параметры кристалла [1]. Диффузионное легирование, по сравнению с традиционным способом легирования путем добавления примеси в исходную шихту, имеет важное преимущество – возможность регулирования концентрации примеси. Целью данной работы является отработка технологии легирования пластин ниобата лития ионами меди путем диффузии из металлических пленок и исследование оптически управляемого фор-

мирования в полученных структурах распределений поля пространственного заряда с предельными значениями электрической напряженности.

В экспериментах использовались оптически полированные пластины конгруэнтного ниобата лития, имеющие размеры 1×5×9 мм^3 по осям *X*, *Y* и *Z* соответственно. Процесс диффузии Cu в $LiNbO_3$ включал несколько этапов: нанесение пленки Cu толщиной от 300 до 600 нм на оптически полированную поверхность образцов *X*-среза различными методами: термическим испарением в вакууме, комбинацией ионной имплантации и магнетронного распыления, а также золь-гель-синтезом. Затем проводились нагрев образцов со скоростью 6,5 К/мин до температуры 1000 ºС в трубчатой электропечи, отжиг при данной температуре в алундовой ампуле в течение 8–9 ч и последующее охлаждение. Стадия отжига проводилась в окислительной атмосфере.

Полученные образцы $LiNbO_3$:Cu имели равномерную светло-коричневую окраску. Из измерений пропускания на спектрофотометре СФ-56 рассчитывались спектральные зависимости коэффициента поглощения образцов. Это позволило оценить концентрацию в образцах ионов Cu^{2+} и Cu^{+}, перезарядка которых и определяет фотовольтаические и фотопроводящие свойства легированных медью кристаллов ниобата лития.

Методика эксперимента по исследованию динамики роста амплитуды поля пространственного заряда фоторефрактивных голограмм в кристаллах $LiNbO_3$:Cu была аналогична описанной в [7]. Голографическая решетка формировалась по двухпучковой схеме с использованием излучения одночастотного твердотельного лазера с длиной волны λ_w = 532 нм. Считывание фоторефрактивной решетки осуществлялось световым пучком лазерного диода с длиной волны λ_r = 655 нм и выходной мощностью P_{ir} = 6 мВт в геометрии дифракции Брэгга. С помощью двух фотодиодов и цифровых микроамперметров типа В7-40/1 измерялись мощности прошедшего через кристалл ниобата лития считывающего пучка от лазерного диода и пучка, дифрагированного на записываемой решетке. Сигналы с микроамперметров фиксировались компьютерной системой обработки данных, позволявшей изучать динамику изменения мощностей прошедшего и дифрагированного пучков в процессе экспериментов.

С использованием известных соотношений, приведенных, в частности, в работе [7], временная эволюция амплитуды $E_m(t)$ первой пространственной гармоники поля пространственного заряда может быть выражена через дифракционную эффективность $\eta(t)$ в следующем виде:

$$E_m(t) = \frac{2\lambda_r \cos\theta_B^{red\ \text{in}\pi}}{\pi d n_0^3 r_{eff}} \arcsin\sqrt{\eta(t)}\ , \qquad (1)$$

где $\theta_B^{red\ \text{in}\pi}$ – угол Брэгга для считывающего пучка внутри образца; n_0 и r_{eff} – обыкновенный показатель преломления кристалла и его эффективная электрооптическая постоянная, учитывающая дополнительный пьезоэлектрический вклад в фоторефрактивный отклик, и d – толщина образца $LiNbO_3$:Cu . Результаты расчета зависимостей $E_m(t)$, полученных из представленных выше данных, показаны на рис. 1.

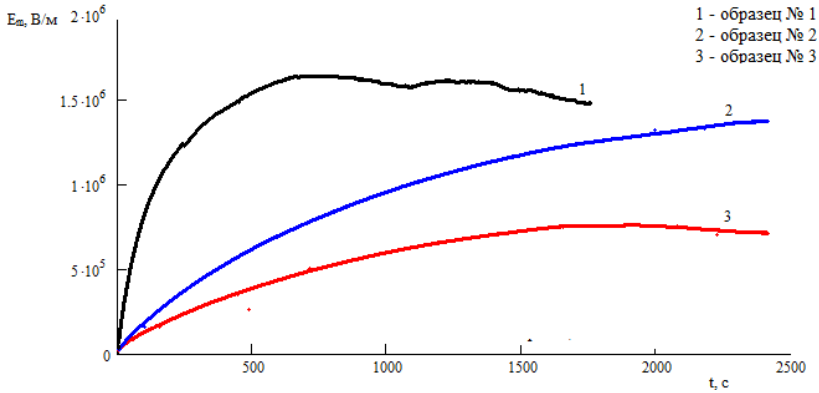


Рис. 1. Динамика роста амплитуды поля пространственного заряда фоторефрактивных голограмм в образцах $LiNbO_3$:Cu

Таким образом, проведенные в настоящей работе эксперименты показали, что при диффузионном легировании медью подложек конгруэнтного ниобата лития из металлических пленок, сформированных термовакуумным напылением, а также комбинацией ионной имплантации и магнетронного распыления, максимальная концентрация двукратно ионизированной примеси меди равна $4{,}967\times10^{25}$ и $1{,}597\times10^{25}$ $м^{-3}$, соответственно. Из данных по дифракционной эффективности голограмм, регистрируемой лазерным пучком с длиной волны 655 нм, получено, что амплитуда поля пространственного заряда в образцах № 1 и № 2 достигает значений 16,3 и 13,6 кВ/см. Диффузионное легирование из оксидного слоя, полученного золь-гель-синтезом, привело к формированию в кристалле фоторефрактивной голограммы с дифракционной эффективностью 3,7% и напряженностью поля 0,75 кВ/см, что связано с малой достигнутой концентрацией ионов Cu^{2+} и Cu^{+}.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блистанов А.А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000. 431 с.

2. *Geuther Jeffrey A., Danon Yaron.* Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals // J. Appl. Phys. 2005. №97, 074109.

3. *Gil Travish, Felix J. Rangel., Mark A. Evans et al.* Addressable flat-panel x-ray sources for medical, security, and industrial applications // Proc. SPIE 8502, Advances in X-Ray / EUV Optics and Components VII, 85020L. October 15, 2012.

4. *Gall B.B., Kovaleski S.D., VanGordon J.A. et al.* Investigation of the Piezoelectric Effect as a Means to Generate X-Rays // IEEE T. Plasma Sci. 2013. №41(1). P. 106–111.

5. *Jubera M., García-Cabañes A., Olivares J., Alcazar A., and Carrascosa M.* Particle trapping and structuring on the surface of $LiNbO_3$:Fe optical waveguides using photovoltaic fields / Optics Letters. 2014. Vol. 39, № 3.

6. *Peithmann K., Hukriede J., Buse K., Krätzig E.* // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 61, № 7. 4615 p.

7. *Mambetova K.M., Smal' N.N., Shandarov S.M. et al.* Formation Dynamics of Transmission Holograms in Lithium Niobate Crystals Doped by Copper Through High-Temperature Diffusion. Radiophysics and Quantum Electronics. January, 2015. Vol. 57, Nos. 8, P. 603–609.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

И.А. Трушников, А.В. Инюшов, студенты

Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, trushnikov@mail.ru

Основной целью данной работы является исследование возможностей формирования бесселеподобных световых пучков при использовании амплитудных транспарантов. Такие пучки могут использоваться как в физических экспериментах, так и в технологических целях [1–3].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Она включает полупроводниковый лазер (*1*) с длиной волны излучения λ = 635 нм и диаметром выходного пучка 3 мм; амплитудные транспаранты (*2*) с одномерной или двумерной конфигурацией (размер щели 200 мкм, расстояние между центрами щелей 800 мкм); фотоприемник (*3*) на столике с прецизионным перемещением и микроамперметр (*4*).

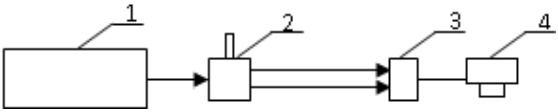
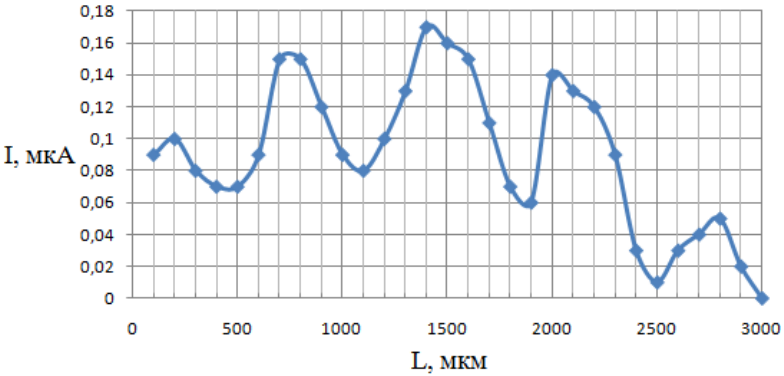


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В экспериментах исследовались распределения интенсивности света при прохождении лазерного пучка через одномерный (две параллельные щели в экране) и двумерный (концентрическая прозрачная полоска в непрозрачном экране) амплитудные транспаранты. Такие распределения интенсивности в фокальной области цилиндрической (в первом случае) и сферической (во втором случае) линз сравнивались с ожидаемыми распределениями для одномерных и двумерных бесселевых пучков. На рис. 2 и 3 представлены некоторые экспериментальные результаты.



I - значения фототока в экспериментальных точках

L - расстояние прецизионного перемещения столика с фотоприемником

Рис. 2. График распределения интенсивности света в случае транспаранта с двумя щелями

Рисунок 2 иллюстрирует распределение интенсивности света на расстоянии 90 см от одномерного амплитудного транспаранта, выполненного путем лазерной печати на прозрачной пленке. Ширина каждой из щелей составляла в этом случае 200 мкм при расстоянии между их центрами 800 мкм.

Рисунок 3 соответствует фотографии световой картины на белом экране, расположенном на расстоянии 70 см от амплитудного транспаранта. Данный транспарант представлял собой прозрачную концентрическую полоску с шириной 200 мкм и диаметром 1100 мкм на непрозрачном фоне. Транспарант создан также путем лазерной печати на прозрачной пленке.

Можно видеть, что в том и другом случаях картины распределения интенсивности света имеют интерференционный характер.

Проведенные эксперименты показали, что с помощью обычной лазерной печати на офисных принтерах, используя пленочные носите-

ли, сложно получить качественные амплитудные транспаранты. Поэтому при проведении дальнейших исследований для создания таких транспарантов предполагается использовать методы лазерной гравировки и фотолитографии.

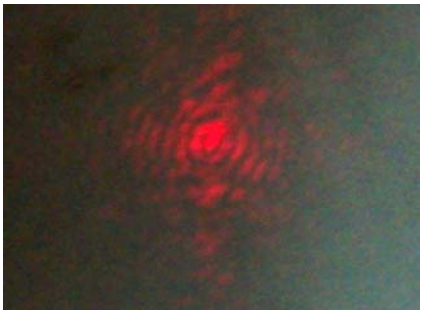


Рис. 3. Картина распределения интенсивности в случае транспаранта с концентрической щелью

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
2. *Пятницкий Л.Н.* Волновые бесселевы пучки. М.: Физматлит, 2012. 399 с.
3. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. М.: Высш. школа, 1978. 384 с.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

О.Т. Важинский, студент, И.А. Паргачёв, инженер
ООО «Кристалл Т», К.С. Важинская, студентка
Научный руководитель Л.Я. Серебренников, доцент каф. ЭП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, silver47@mail.ru

Электрооптические модуляторы (ЭОМ) получили широкое применение в качестве внутрирезонаторных модуляторов добротности и фазовращательных элементов. Принцип работы подобного рода устройств заключается в наведении искусственной анизотропии под действием внешнего электрического поля [1]. Для различных кристаллических материалов величина напряжения, необходимая для внесения разности фаз двух волн, равной π, варьируется от единиц до десятков киловольт и зависит от рабочей апертуры кристаллических элементов и длины волны. Стоит отметить, что возможность использования данных приборов в информационных системах и комплексах ставит необходимость повышения рабочей частоты управляющих высоковольтных сигналов. Таким образом, разработка высоковольтных драйверов

для ЭОМ с высокой частотой повторения сигналов является актуальной задачей [2].

Интерфейс разработанного прибора позволяет использовать его в автоматизированных лазерных системах, т.е. управление устройством осуществляется с помощью электрических сигналов. Данная особенность позволяет реализовать тонкую подстройку выходных параметров драйвера (уровень напряжения и частоту повторения), используя обратную связь, например температурную или оптическую. Высокое напряжение регулируется в диапазоне от 1200 до 3000 В, рабочая частота ограничена 20 кГц, фронт высоковольтного импульса составляет 20 нс.

Блок-схема разработанного драйвера приведена на рис. 1. Формирование высокого напряжения осуществляется блоком *1*, представляющим собой генератор Кокрофта–Уолтона [3]. Блок транзисторных высоковольтных ключей (VT3–VT4), реализован в виде двух цепочек последовательно включенных MOSFET транзисторов, работающих в асинхронном режиме: при поступлении управляющего импульса с блока управления *2* соответствующее плечо коммутирует нагрузку к высокому потенциалу (на схеме +ВН) или на общую шину. Для коммутации высоковольтных ключей используется гальваническая развязка, представляющая собой планарные трансформаторы. Сигнал управления на трансформатор поступает через блок коммутирующих транзисторов VT1–VT2.

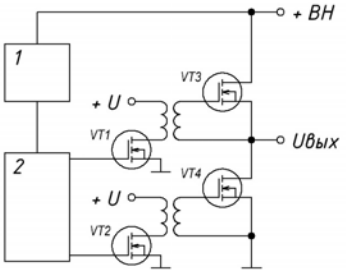


Рис. 1. Блок-схема разработанного устройства: *1* – блок генератора высокого напряжения; *2* – блок управления; +*U* – напряжение питания трансформатров; +ВН – высокое напряжение; $U_{вых}$ – выходное напряжение

Для исследования параметров высоковольтного импульсного драйвера к его выходу подключаются последовательно соединенные электрооптический затвор и высокоомный резистор, выполняющий роль делителя напряжения. Временные параметры и уровни напряжений регистрируются осциллографом. На рис. 2 представлена осциллограмма переднего фронта высоковольтного импульса.

Разработанный высоковольтный импульсный драйвер для электрооптических затворов способен генерировать уровень высокого напряжения до 3 кВ, обладает временными и частотными параметрами,

удовлетворяющими требованиям большинства производителей лазерной техники, и используется для управления электрооптическими затворами, основанными на кристалле RKTP.

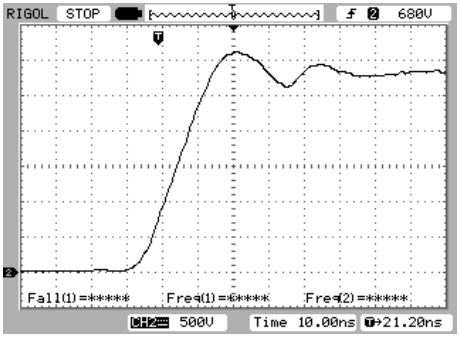


Рис. 2. Осциллограмма переднего фронта высоковольтного импульса

Научно-исследовательская работа проводилась на производственной базе компании ООО «Кристалл Т».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ярив А.* Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; пер. с англ. М.: Мир, 1987. С. 297–327.

2. *Rutten Thomas Paul, Wild Neville Reg, Veitch Peter John.* Fast rise time, long pulse width, kilohertz repetition rate Q-switch driver // Review of Scientific Instruments. 2007.

3. *Tamuri A.R., Bidin N., Daud Y.M.* High voltage power supply for electro optics applications // IJRRAS. 2010. № 3 (2). P. 143–147.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СИНЕГО И ЗЕЛЕНОГО СПЕКТРА

А.О. Верхотуров, магистрант, А.Д. Безпалый, магистрант

Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) обладает уникальными свойствами, которые нашли широкое применение в интегральной и нелинейной оптике [1]. Голографическая запись интенсивным лазерным излучением способна формировать фазовые дифракционные решетки, а также более сложные структуры, что представляет значительный интерес в создании оптоэлектронных и полностью оптических элементов фотоники [2].

Целью данной работы является исследование формирования и характеристик одномерных фазовых дифракционных элементов в фоторефрактивном $LiNbO_3$ оптическим методом при различном лазерном излучении, с использованием одномерных амплитудных транспарантов.

Фазовые дифракционные решетки формировались в кристаллическом образце $LiNbO_3$ *Y*-среза с размерами 13×2×8 мм^3 по осям *X*×*Y*×*Z*, легированном комбинацией ионов Fe и Cu. Источниками излучения использовались полупроводниковый лазер (длина волны света λ = 450 нм) и YAG:Nd^{3+} лазер с удвоением частоты, работающий в непрерывном режиме (длина волны света λ = 532 нм). Использовалось лазерное излучение одной мощности порядка 20 мВт. Это позволит сравнить характеристики, полученные излучением на разных длинах волн света. Поляризация соответствовала в обоих случаях обыкновенной волне в кристалле.

Дифракционные элементы в кристаллическом образце можно сформировать, используя разные оптические схемы: двухпучковая голографическая схема, однолучевая схема с использованием амплитудного транспаранта (АТ), а также проекционная оптическая схема, где есть возможность масштабирования изображения амплитудного транспаранта на кристаллический образец ниобата лития. Использование АТ позволяет обеспечить профиль показателя преломления дифракционных элементов, близкий к ступенчатому [3]. В экспериментах по формированию дифракционных элементов использовалась однолучевая оптическая схема непосредственно у поверхности образца. Данная схема позволяет формировать дифракционные элементы более стабильно, по сравнению с двухлучевой оптической схемой.

В качестве АТ использовалась дифракционная решетка с пространственным периодом 40 мкм на поверхности стандартной пластины фотошаблона. Она получена путем вакуумного напыления пленки хрома (Cr) и последующей фотолитографии. Ширина полосок Cr и расстояние между ними одинаковы (20 мкм). Экспериментальная схема по формированию дифракционных элементов представлена на рис. 1.

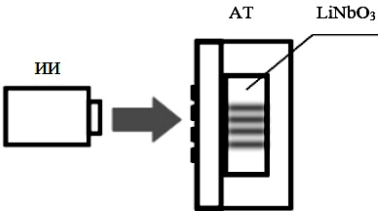


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ИИ – источник излучения, АТ – амплитудный транспарант, $LiNbO_3$ – кристалл ниобата лития

В процессе формирования фоторефрактивных решеток для оценки их параметров использовался метод дифракции света. Относительная

интенсивность дифракционных максимумов измерялась с помощью фотодиодов. При использовании различных источников излучения, для записи дифракционных элементов, учтена разная чувствительность фотодиодов.

С помощью АТ в кристаллическом образце формировалась фазовая дифракционная решетка с величиной пространственного периода 40 мкм. На рис. 2 представлены экспериментальные значения дифракционной эффективности, которые получены при использовании двух источников излучения (532 и 450 нм). Время экспонирования кристалла в обоих случаях составило 30 мин, а мощность лазерного излучения – 20 мВт.

Можно видеть, что время формирования структуры при такой мощности составляет около 5 мин для полупроводникового лазера с λ = 450 нм, а для YAG:Nd^{3+} лазера с длиной волны 532 нм – порядка 15 мин, при этом величина изменения показателя преломления в экспонированной области достигает максимума. Максимальное значение полученной дифракционной эффективности для YAG:Nd^{3+} лазера на 50% больше, чем у полупроводникового.

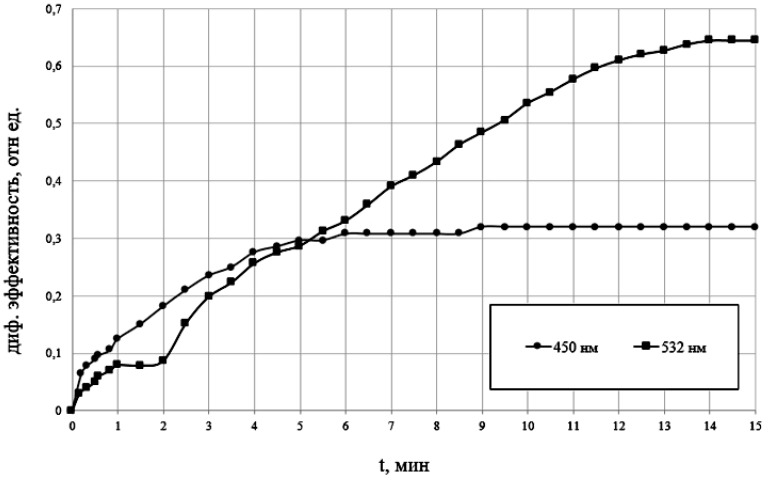


Рис. 2. Экспериментальные зависимости дифракционной эффективности фазовой решетки от времени формирования при разных источниках излучения

Таким образом, экспериментально продемонстрировано формирование одномерных структур в фоторефрактивном кристалле ниобата лития. Показано, что при одинаковых параметрах записи на разных длинах волн лазерного излучения имеем различные характеристики дифракционных элементов.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.

2. *Тренихин П.А., Козорезов Д.А., Хаунхорст К. и др.* Линейная и нелинейная дифракция световых пучков в фоторефрактивных фотонных решетках и сверхрешетках в ниобате лития // Доклады ТУСУРа. 2010. Т. 22, №2. С. 84–87.

3. *Davydov S.A., Trenikhin P.A., Shandarov V.M., et al.* // Physics of wave phenomena. 2000. Vol. 18, № 1. P. 1–6.

ПРОПУСКАЮЩИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В ФОТОПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

К.В. Волченко, С.А. Кругляков, студенты,
А.О. Семкин, аспирант каф. СВЧиКР
Научный руководитель С.Н. Шарангович, зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, a.o.semkin@gmail.com

В настоящее время оптические элементы на основе дифракционных решеток находят самое широкое применение в различных устройствах. В связи с этим поиск перспективных материалов, позволяющих управлять их оптическими свойствами, представляется весьма актуальным.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований фотополимерно-жидкокристаллического (ФПМ-ЖК) композиционного материала на предмет возможности формирования в нем пропускающих голографических дифракционных структур (ПГДС). Произведена оценка влияния концентрации жидкого кристалла на дифракционную эффективность записанных ПГДС, а также показана анизотропия оптических свойств материала.

Экспериментальные образцы изготавливались в Новосибирском институте органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН. Компонентный состав предполимерной композиции приведен в таблице. Она состоит из фотополимеризующейся части [1] и жидкого кристалла (ЖК).

Указанные компоненты смешивались в органических растворителях до получения гомогенного раствора, затем полученная композиция методом полива наносилась на стеклянную подложку, высушивалась и накрывалась второй стеклянной подложкой. Ранее [2] была показана

возможность записи ПГДС в сходном по составу ФПМ-ЖК при концентрации молекул ЖК, не превышающей 40% объема композиции. В связи с этим в данной работе концентрация ЖК в экспериментальных образцах составила 20, 25, 30, 35% объема. Кроме этого, была приготовлена контрольная композиция, не содержащая ЖК. Запись ПГДС проводилась по классической двухпучковой схеме линейно поляризованным лазерным излучением с длиной волны 633 нм (в области максимума поглощения красителя). Мощность записывающих пучков не превышала 2 мВт.

Состав предполимерной композиции

Наименование вещества	Назначение	Концентрация, % об.
4-Пентил-4'-бифенилкарбонитрил (5CB)	Жидкий кристалл	20–35
Акрилоилморфолин	Мономер	30–40
1,4-бис(акрилоил)пиперазин	Сшивающий мономер	5–10
Метиленовый голубой	Краситель	0,05–0,1
6-этокси-2-меркаптобензотиазол	Со-инициатор	1–5
1-(4-гидроксифенил)-1Н-тетразол-тиол	Со-инициатор	1–5
Поливинилацетат	Полимерная матрица	40–60

После завершения процесса записи при падении лазерного излучения на ПГДС на выходе наблюдалась картина дифракции Брэгга с двумя яркими максимумами излучения. Под дифракционной эффективностью (ДЭ) ПГДС η в данной работе будем понимать отношение интенсивности дифрагировавшего в первый порядок пучка к сумме интенсивностей дифрагировавшего I_d и прошедшего I_t пучков:

$$\eta = \frac{I_d}{I_d + I_t}. \qquad (1)$$

Считывание ПГДС проводилось линейно поляризованным лазерным излучением с изменяющимся углом поляризации. На рис. 1, *а* приведены результаты анализа зависимости ДЭ ПГДС от концентрации молекул ЖК в образце. Считывание проводилось пучком с той же поляризацией, на которой производилась запись. На рис. 1, *б* приведена зависимость ДЭ ПГДС от угла поляризации падающего излучения (концентрация молекул ЖК – 25% об.).

На рис. 1, *б* сплошной линией показана теоретическая кривая, рассчитанная аналогично [3]:

$$\eta = \eta_s + \left(\eta_p - \eta_s\right) \cdot \cos^2 \alpha, \qquad (2)$$

где η_s – максимальное значение ДЭ (для *s*-поляризации); η_p – минимальное значение ДЭ (для *p*-поляризации); α – угол поворота плоскости поляризации считывающего пучка.

Из рис. 1, *а* видно, что введение в композицию жидкого кристалла влияет на дифракционную эффективность ПГДС. При этом ДЭ падает с ростом количества молекул ЖК [2]. Наиболее высокой ДЭ удалось добиться при концентрации ЖК в 25% объема. Данный факт качественно соответствует результатам [2].

Анализ рис. 1, *б* показывает, что ДЭ записанной ПГДС зависит от поляризации считывающего излучения, что говорит об анизотропии оптических свойств материала [3]. Наблюдаются два максимума в области 90° и 270° (запись ПГДС велась при 90°), а также два минимума в области 0° и 180°. Известно [3 и др.], что при низкой концентрации жидкого кристалла в образце формируются «капли» ЖК с преимущественной ориентацией молекул в них, что и обуславливает оптическую анизотропию материала.

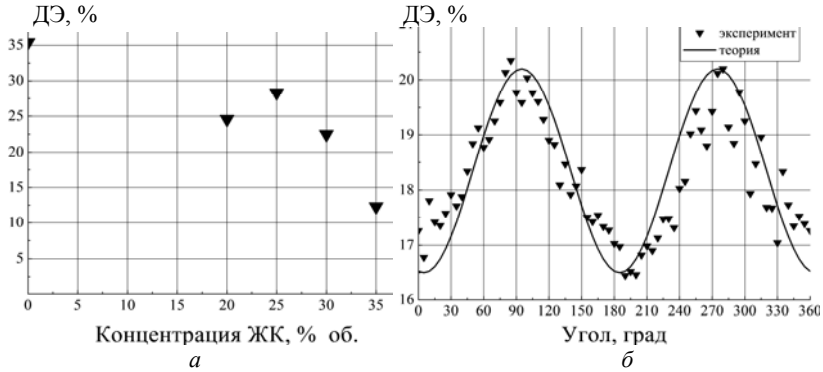


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности ГДС от концентрации молекул ЖК (*а*) и угла поляризации считывающего излучения (*б*)

Таким образом, нами получен ФПМ-ЖК материал, в котором возможна запись ПГДС. Материал характеризуется формированием капель ЖК с преимущественной ориентацией молекул, что обуславливает анизотропию его оптических свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части Госзадания (проект № 3642) и проектной части (проект № 3.878.2014/K).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пат.* 2 222 038 РФ, МПК 7G 03H 1/02 A, 7G 03C 1/053 B, 7G 03F 7/027 B, 7C 08L 39/06 B, 7C 08L 29/14 B. Фотополимерная композиция для записи голограмм / В.В. Шелковников и др. (РФ). 2004.

2. *Семкин А.О., Шарангович С.Н., Васильев Е.В., Шелковников В.В.* Экспериментальное исследование формирования и считывания неоднородных голографических ФПМ-ЖК структур // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2015. №4. С. 154304-1–154304-3.

3. *Sutherland R.L. et al.* Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. II. Experimental investigations // J. Opt. Soc. Am. B. 2002. Vol. 19, № 12. P. 3004–3012.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

К.В. Заичко, студент, А.О. Семкин, аспирант каф. СВЧиКР

Научный руководитель В.И. Ефанов, проф. каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, zaichkokv@gmail.com

Тенденция применения оптического волокна (ОВ) в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСПИ) и устройствах, работающих в условиях повышенной радиации, вызвали массу исследований радиационно-оптических явлений в кварцевых ОВ, поскольку при воздействии ионизирующего излучения происходит увеличение оптических потерь вплоть до утраты прозрачности ОВ.

Целью данной работы является определение оптимального химического состава волоконного световода для применения в устройствах и системах, работающих в космическом пространстве.

В настоящее время наиболее распространенными являются одномодовые волоконные световоды с сердцевиной и оболочкой из легированного или нелегированного кварцевого стекла. Диапазон рабочих длин волн таких световодов составляет 0,78…1,9 мкм. Заготовки для них изготавливают по методу химического осаждения кварцевого стекла из смеси исходных газообразных реагентов. Разработаны и хорошо известны различные технологические процессы, реализующие этот метод: MCVD, FCVD, VAD, OVD, PCVD и SPCVD [1, 2]. После создания заготовок световоды изготавливают из них методом вытягивания. В процессе вытягивания наносят защитное покрытие. В результате ОВ состоит из сердцевины, оболочки на основе кварцевого стекла и защитного покрытия.

По данным исследования [3] основную роль в снижении качества передачи информации по ОВ в условиях космического пространства играют радиационные эффекты за счет воздействия на элементы ОВ протонов космических лучей и электронов, входящих в состав корпускулярного излучения Солнца и захваченных магнитным полем Земли.

При воздействии данных излучений в волоконном световоде возникает радиационно-наведенное поглощение (РНП) света. Эффект РНП объясняется тем, что в материале световода образуются радиационные центры окраски (РЦО), поглощающие распространяющийся по ОВ свет.

В настоящее время известны три механизма РНП, влияющие на распространение светового сигнала в ближнем ИК-диапазоне, подавление которых и означало бы повышение радиационной стойкости волокна.

Повышения радиационной стойкости световода можно достичь путём изменения химического состава легирующих примесей [4, 5].

В [4] показан метод повышения радиационной стойкости волоконного световода на основе кварцевого стекла с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла за счет его насыщения молекулярным водородом и облучения гамма-излучением. В процессе гамма-излучения атомы водорода подавляют возникновение РЦО. После облучения сетка стекла не содержит предшественников РЦО. В результате волоконный световод приобретает свойства повышенной радиационной устойчивости.

В источнике [5] описана технология изготовления кварцевых световодов, легированных фтором, позволяющая снизить содержание атомов хлора в стекле (атомы более химически активного фтора замещают атомы хлора). Из-за малого количества хлора в сетке стекла сердцевины уменьшается влияние первого механизма РНП. Кроме того, в световоде из-за наличия фтора в стекле подавлен третий механизм РНП. По результатам исследования волоконный световод обладает повышенной радиационной стойкостью**.**

Таким образом, повышения радиационной устойчивости волоконного световода (подавления всех трех механизмов РНП) предположительно можно достичь путём легирования кварцевого стекла фтором [5] и методом воздействия гамма-излучения [4].

Применение таких волоконных световодов в условиях повышенного уровня ионизирующего излучения в космическом пространстве представляется наиболее целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nagel S.R, MacChesney J.B., Walker K.L.* An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1982. Vol. 18, № 4. P. 459–476.

2. *Dianov E.M., Golant K.M., Kurkov A.S. et al.* Low-hydrogen silicon oxynitride optical fibres prepared by SPCVD / Journal of Lightwave Technology. 1995. T. 13, №7. P. 1471–1474.

3. *Перминов С.В.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8, № 9. – С. 40–44.

4. *Пат.* 744067 США МПК G02B 6/00 B2 «RADIATION RESISTANT SINGLE-MODE OPTICAL FIBER AND METHOD OF MANUFACTURING THEREOF», опубл. 21.10.2008.

5. *Пат.* 5267343 США МПК G02B 6/00, G02B 6/02, C03C 25/60; C03C 25/62 «Enhanced radiation resistant fiber optics», опубл. 30.11.1993 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТА С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Е.А. Дмитриев, Е.А. Березина, В.А. Крадько, студенты, В.Ю. Рябченок, аспирант каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧ и КР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, perin.anton@gmail.com

Проект ГПО СВЧиКР-1602 «Разработка метода формирования и исследование фотонных волноводных структур в кристаллических материалах»

В настоящее время фоторефрактивный кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) находит широкое применение в нелинейной оптике и волноводной фотонике [1]. В связи с распространением материала задача определения зависимости фоторефрактивных свойств от изменения температуры является актуальной. Ранее при изучении картин распределения интенсивности фокусированного светового пучка на выходной плоскости образца ниобата лития при комнатной температуре была выявлена неоднородность интенсивности протекания фоторефрактивного эффекта (ФРЭ) вдоль оптической оси, ярко выраженная на гранях кристалла [2]. Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости времени компенсации линейного и нелинейного дифракционного уширения светового поля от интенсивности протекания ФРЭ.

В экспериментах используется нелегированный кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) с размерами 4×10×4 мм^3 вдоль осей *X*, *Y*, *Z* соответственно. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для экспонирования использовалось излучение твердотельного лазера YAG:Nd^{3+} в режиме удвоения частоты с длиной волны излучения λ = 532 нм и выходной мощностью до 50 мВт. Поляризация света соответствует необыкновенной волне в кристалле. Световой пучок фокусировался на входную грань образца и распространялся в кристалле вдоль оси *Y*.

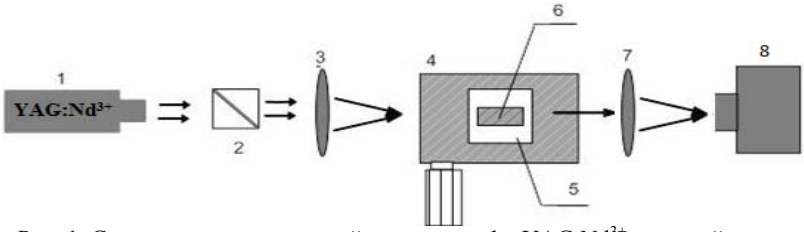


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – $YAG:Nd^{3+}$ с длиной волны излучения λ = 532 нм; *2* – светоделительный кубик; *3* – фокусирующая линза; *4* – микрометрический столик; *5* – элемент Пельтье; *6* – образец нелегированного кристалла $LiNbO_3$; *7* – изображающая линза; *8* – АЛП

Эксперимент проводился при комнатной температуре, а также при нагреве образца с помощью элемента Пельтье, обеспечивающего однородный (или почти однородный) нагрев кристалла до температуры 70 °С. Мощность экспонирующего излучения 0,5 мВт. Поляризация света соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Для настройки фокальной плоскости линзы с входной гранью кристалла используется светоделительный кубик. Картины распределений световых полей, соответствующих изображениям с входной и выходной плоскостей кристалла, проецировались на анализатор лазерных пучков изображающей линзой.

В данной работе было исследовано время эффекта компенсации нелинейной и линейной дифракций в зависимости от времени протекания ФРЭ.

На рис. 2 представлены графики зависимости ширины пучка вдоль оптической оси от времени протекания ФРЭ для трех точек, расположенных на расстоянии 0,25 мм друг от друга при одновременном включении нагрева.

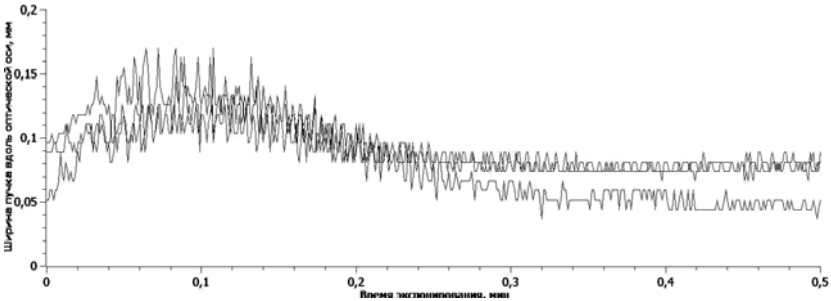


Рис. 2. График зависимости ширины пучка от времени при одновременном протекании пироэлектрического и фоторефрактивного эффектов

На рис. 3 представлены результаты исследования времени компенсации нелинейной и линейной дифракций при включении нагрева спустя $t = 10$ с после начала экспонирования.

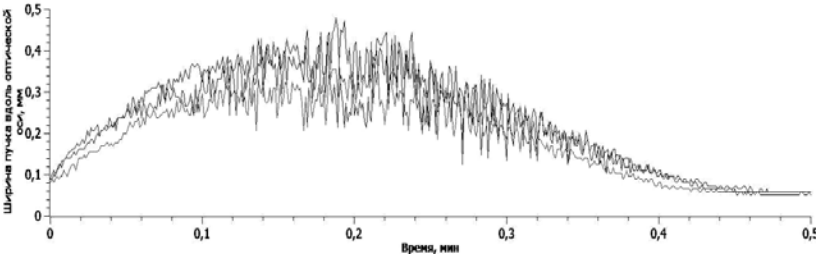


Рис. 3. График зависимости ширины пучка от времени при включении пироэлектрического и фоторефрактивного эффектов с $t = 10$ с

В результате работы было выявлено различие времени эффекта компенсации линейной и нелинейной дифракций в зависимости от времени протекания ФРЭ. По полученным данным можно сказать, что время протекания ФРЭ влияет на время его компенсации. Для сравнения среднее время компенсации для первого случая $t_1 = 22$ с, а для второго $t_2 = 26$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Korkishko Yu.N., Fedorov V.A.* Structural phase diagram of $LiNbO_3$ waveguides: the correlation between optical and structural properties // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 1996. P. 187–196.

2. *Дмитриев Е.А., Березина Е.А., Крадько В.А. и др.* Исследование пространственной неоднородности фоторефрактивных свойств кристалла ниобата лития // V Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 380–381.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ, ОБРАЗОВАННЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ В КРИСТАЛЛАХ $LiNbO_3$

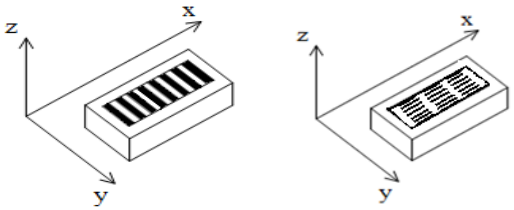
А. Андрианова, магистрантка каф. ЭП,
Г. Большанин, магистрант каф. СВЧиКР,
И.К. Казак, А.Ю. Яковлева, студентки каф. СВЧиКР
г. Томск, ТУСУР, MandelAE@svch.rk.tusur.ru
Проект ГПО СВЧиКР-1505 «Исследование периодических доменных структур в электрооптических кристаллах»

Периодические доменные структуры в электрооптических кристаллах представляют интерес для реализации эффектов квазисин-

хронного нелинейно оптического взаимодействия и управления параметрами лазерного излучения [1–3]. Дифракция света на такой доменной структуре в линейном режиме является информативным методом испытания ее качества.

В данном сообщении мы приводим результаты экспериментального исследования дифракции света на периодической доменной структуре в кристаллах ниобата лития. Исследуемые кристаллы ниобата лития, легированные MgO ($LiNbO_3$: 5% MgO) Z-среза с периодическим чередованием доменных стенок вдоль оси *X*, были разработаны в ООО ЛАБФЕР. Период доменной структуры первого кристалла составлял 6,89 мкм, период второго кристалла – 9,43 мкм. Первый образец имел размеры 10×3×1 мм, второй образец имел размеры 5×10×1 мм вдоль осей *X*, *Y*, *Z* соответственно.

Схема расположения периодических структур для первого и второго кристаллов представлена на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Расположение оптических осей кристалла $LiNbO_3$:
а – первый кристалл; *б* – второй кристалл

Мы экспериментально исследовали изотропную дифракцию световых пучков на периодических доменных структурах. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

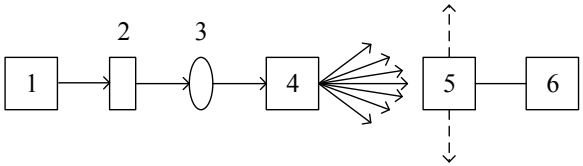


Рис. 2. Схема установки для измерения интенсивности дифракционных порядков: *1* – полупроводниковый лазер ($\lambda_{изл}$ = 655 мкм), *2* – поляроид, *3* – цилиндрическая линза, *4* – кристалл $LiNbO_3$, *5* – передвигающийся фотодиод, *6* – микроамперметр

Излучение лазера с длиной волны 655 нм формировалось линзой (*3*) и направлялось вдоль оси *Z* кристалла $LiNbO_3$ (*4*). Поляризация

падающего на кристалл излучения задавалась поляроидом (*2*). Интенсивность света в дифракционных максимумах регистрировалась с помощью фотодиода (*5*) и подключенного к нему микроамперметра (*6*).

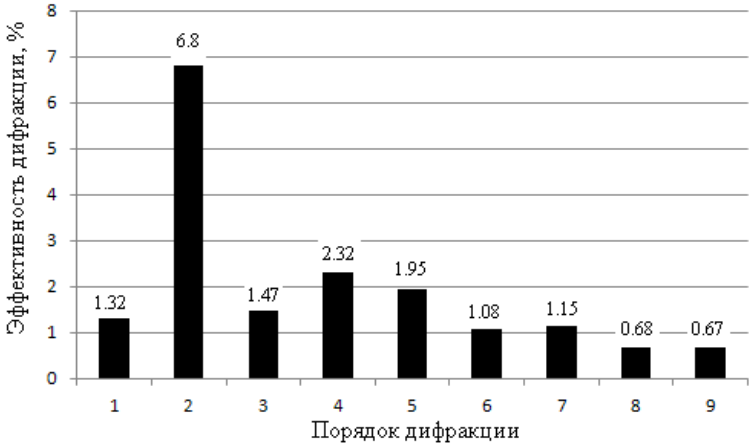


Рис. 3. Распределение эффективности света в дифракционных максимумах. Свет поляризован вдоль оси *Y* кристалла. Образец №1

В экспериментах наблюдалась изотропная дифракция со многими максимумами. Результаты измерений интенсивности в дифракционных максимумах для обоих образцов приведены на рис. 3 (образец 1) и рис. 4 (образец 2) .

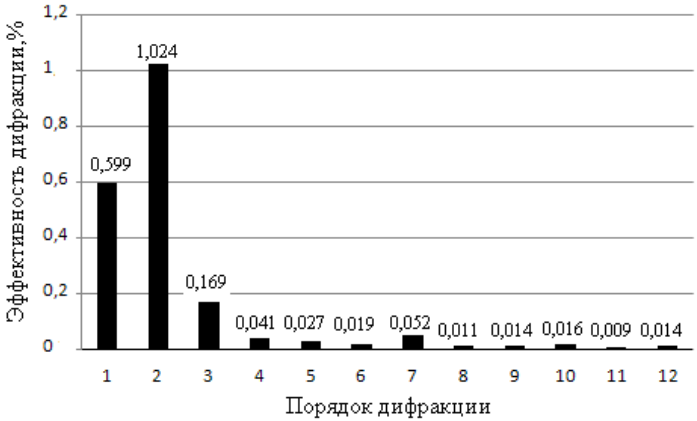


Рис. 4. Распределение эффективности света в дифракционных максимумах. Свет поляризован вдоль оси *Y* кристалла. Образец №2

Наличие дифракционных порядков выше первого свидетельствует о несинусоидальном профиле решетки [4], созданной в кристалле ниобата лития. Распределение света в дифракционных максимумах свидетельствует о нелинейности сформированной в кристалле дифракционной решетки.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Byer R.L.* Quasi-phase-matched nonlinear interactions and devices // J. Nonlinear Opt. Phys. Mater. 1997. № 6. 549 p.

2. *Houe M., Townsend P.D.* An introduction to methods of periodic poling for second-harmonic generation // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. № 28. 1747 p.

3. *Myers L.I., Eckardt R.C., Fejer C.C. et al.* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled $LiNbO_3$ // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. № 12. 2102 p.

4. *Александровский А.Л., Глико О.А., Наумова И.И., Прялкин В.И.* Линейная и нелинейная дифракционные решетки в монокристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. №7. 657 с.

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Газизов Т.Р.**, зав. каф. ТУ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕМ-КАМЕРЕ

Я.В. Балахнина, магистрант каф. ТУ,
А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов, аспиранты каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, balakhnina_yana@bk.ru
Проект ГПО ТУ-1501 «Межвузовский проект»

Тенденции развития современных электронных устройств (повышение частот спектра используемых сигналов и рост вычислительной производительности) приводят к увеличению интенсивности воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на человека. В мире науки и по сей день не теряет интереса вопрос о последствиях воздействия ЭМИ на биологические объекты, в частности на человека. Мнения по этому вопросу разделяются, и в связи с недостаточностью экспериментальных доказательств радиочастотные электромагнитные поля (ЭМП) классифицированы как «возможно канцерогенные для человека» [1].

Известно, что воздействие ЭМИ высокой частоты неизбежно сопровождается повышением температуры в области воздействия. При температурах, превышающих физиологический диапазон конкретных биологических объектов, неизбежно повреждение клеток [2]. Высокие температуры приводят к денатурации ферментов, нарушению обменного равновесия, а также гибели организмов посредством обезвоживания. Раньше считалось, что действие ЭМИ исключительно тепловое, однако некоторые исследования показали, что есть и нетермические эффекты при их воздействии [3, 4]. Поэтому особое внимание во время проведения экспериментов по воздействию ЭМП на живые объекты необходимо уделять контролю температуры.

В настоящее время в ТУСУРе реализован экспериментальный макет климатической экранированной ТЕМ-камеры, предназначенной

для биомедицинских исследований [5], однако еще не разработан модуль контроля температуры. Цель работы – провести обзор теплоизмерительных методов и датчиков, позволяющих регистрировать изменение температуры в объекте под воздействием ЭМП в ТЕМ-камере.

Основные методы измерения температуры можно разделить на две группы: контактная и бесконтактная термометрия [6]. При контактной термометрии необходим тепловой контакт между датчиком и средой измерения, при бесконтактной достаточно измерений собственного теплового или оптического излучения без непосредственного контакта со средой измерения. В связи с тем, что размеры объектов при исследовании влияния ЭМП очень малы (клеточные монослои и суспензии), контактные измерения малопригодны, так как зонд датчика может влиять на температурное поле контролируемого объекта. Диапазон измерений температур бесконтактными датчиками составляет от –100 до +3000 °С, при этом используют следующие виды датчиков:

– Волоконно-оптические датчики, работа которых основана на физических воздействиях (температура, давление, сила натяжения) на оптоволокно, при этом локально изменяются характеристики пропускания света и, как следствие, изменяются характеристики сигнала обратного отражения. В основе измерительных систем на основе оптоволоконных датчиков используется сравнение спектров и интенсивностей исходного лазерного излучения и излучения, рассеянного в обратном направлении, после прохождения по оптоволокну.

– Радиометрические датчики измеряют температуру по собственному тепловому излучению тел, что позволяет измерять температуру поверхности на расстоянии (инфракрасные датчики). Разновидностью радиометрии является тепловидение, которое включает преобразование температурного поля в телевизионное изображение.

– Пирометрические датчики измеряют температуры самосветящихся объектов: пламени, плазмы (делятся на радиационные, яркостные и цветовые).

Наибольший интерес для дальнейшей проработки имеют волоконно-оптические и радиометрические датчики. Характеристики некоторых бесконтактных датчиков приведены в таблице. Так, видно, что метод неконтактной термометрии представлен достаточно широким кругом датчиков, которые могут быть применены для измерения температуры исследуемого в ТЕМ-камере объекта. Для того чтобы сделать окончательный выбор в пользу того или иного датчика, необходимо провести более тщательное сравнение параметров представленных образцов, в том числе по типу используемого материала корпуса, совместимости с конструкцией ТЕМ-камеры, стоимости.

Характеристики бесконтактных датчиков [7–13]

Датчик	Диапазон температур, °С	Расстояние до объекта, мм
Инфракрасные датчики		
Thermalert CI (Raytek)	0 – 500 (±1)	0–1200
Thermalert MI (Raytek)	–40 – 600 (±1)	0–500
Thermalert GP (Raytek)	–18 – 538 (±1)	0–1000
CT LT (Optris GmbH)	–50 – 975 (±1)	0–1100
VTIR1816 (Vigor Tech.)	–20 – 300 (±2)	от 10
ES1B (Omron)	10 – 70 (±0,4)	2–60
PyroCouple (Calex Elect. Lim.)	–20 – 500 (±1)	0–200
PyroUSB (Calex Elect. Lim.)	–40 – 1000 (±1)	0–200
Волоконно-оптические датчики		
Luxtron STR (LumaSense Tech.)	–25 – 330 (±0,5)	–
OSMT – 313 (НЦВО – Фотоника)	–70 – 300 (±0,6)	–

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект 14-19-01232) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Baan R. et al.* Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields // The Lancet Oncology, July 2011. Vol. 12, № 7. P. 624–626.

2. *Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К.* Экология. Особи, популяции и сообщества: В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 667 с.

3. *Velizarov S., Raskmark P., Kwee S.* The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal // Bioelectrochem. bioenerg. 1999. Vol. 48, № 1. P. 177–180.

4. *Teodori L. et al.* Exposure of cells to static magnetic field accelerates loss of integrity of plasma membrane during apoptosis // Cytometry. 2002. Vol. 49, № 3. P. 113–118.

5. *Komnatnov M.E., Gazizov T.R.* Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing // Proc. of the IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO). London. Great Britain, December 2014. P. 1–4.

6. *Козлов М.Г.* Метрология и стандартизация: учеб. М.; СПб.: Петербургский институт печати, 2001. 372 с.

7. *Инфракрасные* датчики температуры [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sensor.ru/catalog/datchiki_temperatury/131 (дата обращения: 18.03.2016).

8. *Optris* GmbH: продукция [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.optris.com/optris-ct-lt (дата обращения: 18.03.2016).

9. *VTIR1816* Infrared Thermometer [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.vigordigital.com/the/html/?11.html (дата обращения: 18.03.2016).

10. *Infrared* Thermosensor ES1B [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ia.omron.com/products/family/1516/specification.html (дата обращения: 18.03.2016).

11. *Infrared* Temperature Sensors [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.calex.co.uk/product/temperature-measurement/infrared-temperature-sensors (дата обращения: 18.03.2016).

12. *Luxtron* Probes & Accessories [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.lumasenseinc.com/EN/products/fluoroptic-temperature-sensors/fot-and-gaas-probes/luxtron-probes-accessories.html (дата обращения: 18.03.2016).

13. *Датчики* температуры волоконно-оптические –70 – +300 ºС [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.forc-photonics.ru/ru/sensor_systems/temperature%20sensors/1/121 (дата обращения: 18.03.2016).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ БИОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ В ТЕМ-КАМЕРЕ

Е.В. Бебякина, магистрант каф. ТУ,
А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов, аспирант каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, fskatya@gmail.com
Проект ГПО ТУ-1503 «Разработка устройств для испытаний на ЭМС»

В последние десятилетия наблюдается интенсивный рост числа устройств, использующих беспроводные системы связи. В настоящий момент в науке нет четкого ответа на вопрос о том, является ли электромагнитное излучение (ЭМИ) опасным для биологических объектов (БО), в частности для человека. Именно поэтому последствия воздействия ЭМИ на организм требуют тщательного изучения [1]. Устройством, которое позволяет оценить влияние электромагнитного поля (ЭМП) на электронные устройства, является ТЕМ-камера [2]. В настоящее время конструкции ТЕМ-камер совершенствуются, что позволяет проводить более широкий круг исследований, в том числе в области биофизики и биомедицины. Так, в ТУСУРе идут работы по созданию ТЕМ-камеры, позволяющей исследования влияния ЭМИ на БО [3]. Однако при проведении ряда расчётов и имитационного моделирования поглощения электромагнитной энергии (SAR) БО было обнаружено влияние медицинского стекла на результаты из-за вносимой неоднородности [4]. Поэтому актуален поиск более подходящей лабораторной посуды для проведения исследований. Цель работы – представить результаты моделирования SAR БО с использованием чаш Петри из различных материалов и с различной толщиной стенок.

Для моделирования в качестве материала чаш Петри использовались стекло и оргстекло, параметры (относительная диэлектрическая проницаемость (ε_r), плотность (ρ), теплопроводность (K), теплоёмкость (C), удельная проводимость (σ)) которых приведены в табл. 1. Толщина стенок 0,25; 0,5; 1 мм.

Таблица 1

Характеристики материала чаш Петри

Материал	ε_r	ρ, кг/м^3	K , Вт/К/м	С, кДж/К/кг	σ, См/м
Стекло	4,82	2230	1,1	0,75	0
Оргстекло	3,6	1190	0,2	1,3	0,02

В качестве БО использовались кровь, сердце, хрящевая и мозговая ткани, которые помещались как в одиночную чашу Петри, так и по методу «чаша в чаше» [5]. Результаты, полученные аналитически [4] и моделированием SAR БО с использованием различных источников воздействия (диполь и ТЕМ-камера), без и с использованием чаш Петри, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения SAR (мВт/кг) БО

Конфигурация	Материал	Толщина стенок, мм	Мозговая ткань	Кровь	Сердце	Хрящевая ткань
Аналитика	–	–	18,9	14,1	8,93	7,9
Диполь / без стекла	–	–	17,7	20,3	17,5	19,7
Диполь / чаша Петри	Стекло	1	11,9	14,3	12,2	13,1
		0,5	15,4	18,1	15,7	17,1
		0,25	15	17,4	14,9	16,7
	Оргстекло	1 мм	17,2	20,1	17,3	19
		0,5	16,9	19,6	17	18,7
		0,25	15,9	18,2	15,8	17,6
Диполь / «чаша в чаше»	Стекло	1	7,21	11	9,01	7,58
		0,5	10,9	17,2	14,2	11,3
		0,25	16,9	25,5	27,9	17,7
	Оргстекло	1	10,1	14,7	12,2	10,5
		0,5	14,5	22,5	18,7	15,2
		0,25	21,3	34	22,4	22,3
ТЕМ-камера	–	–	18,6	24	20,4	18,9

Из табл. 2 видно, что результаты моделирования при воздействии ЭМП от диполя и в ТЕМ-камере близки. Также данные показывают, что результаты, полученные при моделировании воздействия ЭМП на БО в чаше Петри из оргстекла, ближе к результатам моделирования без чаш Петри и в ТЕМ-камере. Наиболее предпочтительными для исследования воздействия ЭМП являются медицинская посуда из оргстекла, имеющая наименьшее влияние на распределение SAR и позволяющая достичь его значений, близких к полученным во время моделирования воздействия без чаш Петри и в ТЕМ-камере. Отметим, что

при использовании метода «чаша в чаше» и толщине стенки 0,25 мм (наименьшей) чаши Петри достигается наибольшее значение SAR.

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект 14-19-01232) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Busygina A.V., Komnatnov M.E., Matveyenko O.A.* Problems of investigations in the sphere of electromagnetic fields impact on biological objects // Сиб. науч. мед. жур. 2016. Т. 36, № 1. P. 48–54.

2. *Crawford M.L.* Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1974. Vol. EMC-16, № 4. P. 189–195.

3. *Komnatnov M.E., Gazizov T.R.* Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing // Proc. of the IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on RF and Wireless Techn. for Biomed. and Healthcare Applic. (IMWS-BIO). London, Dec. 2014. P. 1–3.

4. *Бебякина Е.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е.* Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-ячейке: матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 25–27 ноября 2015. Томск: В-Спектр, 2015. Ч. 2, С. 9–13.

5. *Schuderer J. et. al.* In Vitro exposure systems for RF exposures at 900 MHz // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2004. Vol. 52, № 8. P. 2067–2075.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПЭМИ ПУТЕМ ОБРАЩЕНИЯ К EEPROM МОНИТОРА ПО ИНТЕРФЕЙСУ I2C

В.И. Цимбол, студент

Научный руководитель И.С. Антясов, ассистент каф. БИС

г. Челябинск, ЮУрГУ, antyasov@gmail.com

Современные устройства отображения (мониторы, телевизоры, ТВ-панели, проекторы и т.д.) для поддержки технологии Plug and Play [1] используют EDID (Extended Display Identification Data) [2], представляющий собой стандарт формата данных VESA, который содержит базовую информацию об устройстве и его возможностях. Данная информация хранится в EEPROM [3] устройства и может быть получена посредством протокола DDC/CI (Display Data Channel Command Interface) [4] через интерфейс I2C [5], реализованный во всех современных видеоинтерфейсах подключения устройств отображения (VGA, DVI, HDMI).

Вышеописанные данные послужили толчком к началу исследования возможностей генерирования побочных электромагнитных излу-

чений (далее – ПЭМИ) путем передачи по интерфейсу I2C каких-либо данных в рамках технологии «мягкий» ПЭМИН (SoftTempest) [6].

Интерфейс I2C представляет собой последовательную шину данных для связи интегральных схем, использующую две двунаправленные линии: SDA (данные) и SCL (тактирование), подтянутые к напряжению питания и управляемые через открытый коллектор либо открытый сток. Стандартные уровни напряжений: +3,3 В или +5 В, однако допускаются и другие. Скорость передачи данных по интерфейсу составляет от 100 кбит/с до 3,4 Мбит/с [5].

Процедура обмена начинается и заканчивается формированием состояний СТАРТ и СТОП. Каждый бит данных передается за один такт, каждые 8 бит данных завершаются специальным битом подтверждения, выставляемым на линию SDA принимающей стороной. Приемник выставляет низкий уровень сигнала на данную линию при успешном приеме байта. На рис. 1 представлен пример передачи байта 0×D0 (11010000) с полученным в ответ битом подтверждения.

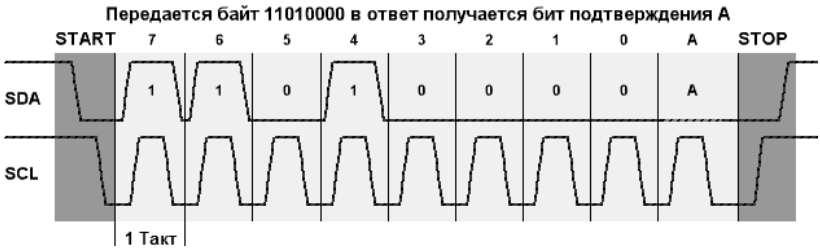


Рис. 1. Пример передачи байта 0×D0 по интерфейсу I2C

Для генерирования ПЭМИ необходимо передавать через интерфейс данные, способствующие формированию меандра на линии SDA. Опытным путем было установлено, что наибольший уровень ПЭМИ достигается при отправке последовательности байт 0×AA.

Для практической реализации были разработаны две программы на языке C++: для операционных систем (далее ОС) семейства Windows (Vista, 7, 8, 10) и Linux.

Программа для ОС Windows использует функции WinAPI Monitor Configuration Functions [7]. Для отправки данных по интерфейсу I2C используются функции протокола ACCESS.bus [8]. В ходе работы программа осуществляет постоянную отправку последовательности байт: 0×6E 0×50 0×84 0×03 0×AA 0×AA 0×AA CRC, инициируя установку регистра 0xAA настроек монитора в значение 0×AAAA.

Программа на ОС Linux использует функции ядра, описанные в заголовочном файле i2c-dev.h [9]. В ходе работы программа осуществ-

ляет постоянную отправку последовательности из 32 байт 0×AA, инициируя перезапись содержимого EEPROM.

Выполняемые программами операции не нарушают работоспособность монитора, являются абсолютно скрытыми от пользователя.

Измерения проводились на альтернативной площадке с использованием монитора ViewSonic VX924, подключенного через VGA кабель с выведенными под осциллограф C1-94M и анализатор спектра ZetLab Zet 017-U2 линиями SDL, SCL и GND. Для обнаружения ПЭМИ использовался токосъемник «Лониир ТА-203» и анализатор спектра R&S ESL 3.

Замеры ПЭМИ, генерируемых программой для ОС Windows, не дали каких-либо четко оформленных результатов. Аналогичные замеры для программы на ОС Linux выявили наличие небольшого уровня ПЭМИ. На рис. 2 представлена спектрограмма, полученная от анализатора спектра ZetLab при подключении к линиям SDL и GND.

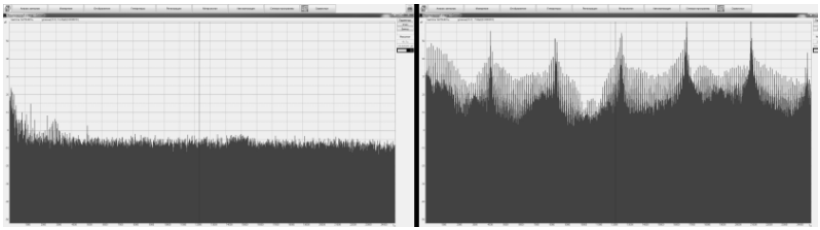


Рис. 2. Результаты, полученные с анализатора спектра ZetLab: отсутствие данных на линии SDL (слева), передача последовательности байт 0×AA (справа)

На рис. 3 представлены спектрограммы, полученные с токосъемника и анализатора спектра R&S.

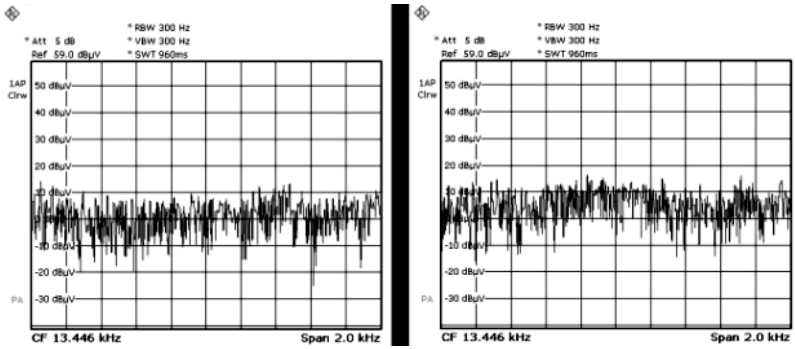


Рис. 3. Результаты, полученные с анализатора спектра R&S: отсутствие данных на линии SDL (слева), передача последовательности байт 0×AA (справа)

Результаты измерений

f, Гц	$E_ш$, дБмВ	$E_{с+ш}$, дБмВ
17880	44,14	48,6
22338	44,48	48,2
35564	44,11	44,6
44455	48,91	50,1

Результаты измерений с указанием частот излучения ПЭМИ приведены в таблице.

В качестве дальнейшего пути исследования выбрана доработка разработанного ПО с целью увеличения уровня генерируемых ПЭМИ с последующей реализацией скрытого канала утечки информации в рамках технологии «мягкий ПЭМИН».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Plug* and Play Design Specification for IEEE. Microsoft Corporation, 1997. 10 p.
2. *VESA* Enhanced Extended Display Identification Data Standard. Video Electronics Standards Association, 2000. 32 p.
3. *ROM*, EPROM, and EEPROM technology. Integrated circuit engineering corporation, 2010. 15 p.
4. *VESA* DDI/CI Standart. Video Electronics Standards Association, 1998. 43 p.
5. *UM10204.* I2C-bus specification and user manual. Rev. 6 – 4 April 2014. NXP Semiconductors, 2014. 64 p.
6. *Антясов И.С.* Программно-техническая реализация технологии «мягкий» ПЭМИН / И.С. Антясов, А.В. Сафонов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2015. №3 (17). С. 8–11.
7. *Windows* Dev Center. Monitor Configuration Functions. https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd692964%28v=vs.85%29.aspx
8. *ACCESS.bus* Specifications Version 3.0. – ACCESS.bus Industry Group, 1995. 193 p.
9. *The Linux* Kernel Archives. https://www.kernel.org/doc/Documentation/i2c/dev-interface

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ V-ТИПА

А.В. Демаков, студент каф. РТС, О.С. Каймонов, аспирант каф. ТУ, Т.Т. Газизов, директор Института прикладной информатики ТГПУ, к.т.н.

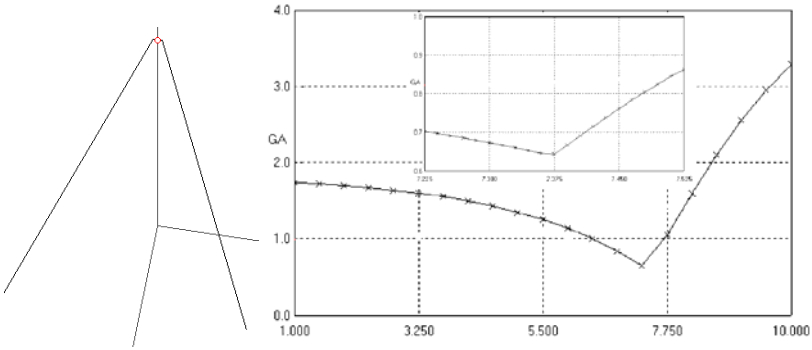
г. Томск, ТУСУР, vandervals@inbox.ru

Коротковолновые антенны широко применяются для связи на дальние расстояния. К недостаткам такого типа антенн можно отнести узкополосность, что делает их непригодными при работе в широком диапазоне частот. В работе [1] представлен подход к использованию полосозаграждающих фильтров (ПЗФ) в структуре антенны и показано, что их применение в качестве антенных нагрузок позволяет значи-

тельно расширить диапазон рабочих частот. Данный подход взят за основу при совершенствовании антенны V-типа, при эксплуатации которой были выявлены сложности в осуществлении связи на определенных частотах [2]. Однако перед оптимизацией антенны необходимо провести тщательное моделирование существующей конструкции.

Цель данной работы – представить результаты предварительного моделирования антенны V-типа.

Антенна V-типа представляет собой два провода (лучи антенны), имеющие общую точку крепления вверху на мачте и фиксируемые внизу при помощи растяжек (рис. 1, *а*). Такой вид антенн широко используется благодаря простоте конструкции, малой парусности и быстрой разворачиваемости.



а *б*

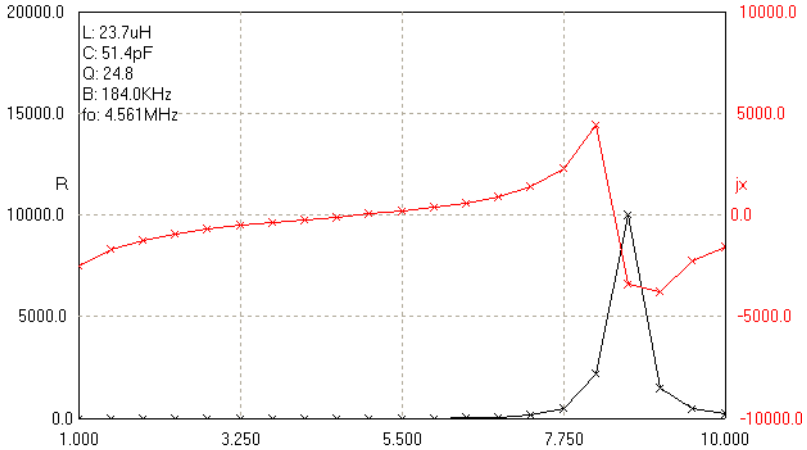
Рис. 1. Модель (*а*) и частотная зависимость КУ (*б*) антенны

Параметры исходной антенны: длина луча – 16 м, высота мачты – 18 м, угол между мачтой и лучом – 41°, угол между лучами в плоскости земли – 65°. В программе MMANA построена модель антенны и выполнен расчёт в диапазоне частот 1–10 МГц её основных характеристик: входного импеданса, коэффициента усиления (КУ) и диаграмм направленности (ДН).

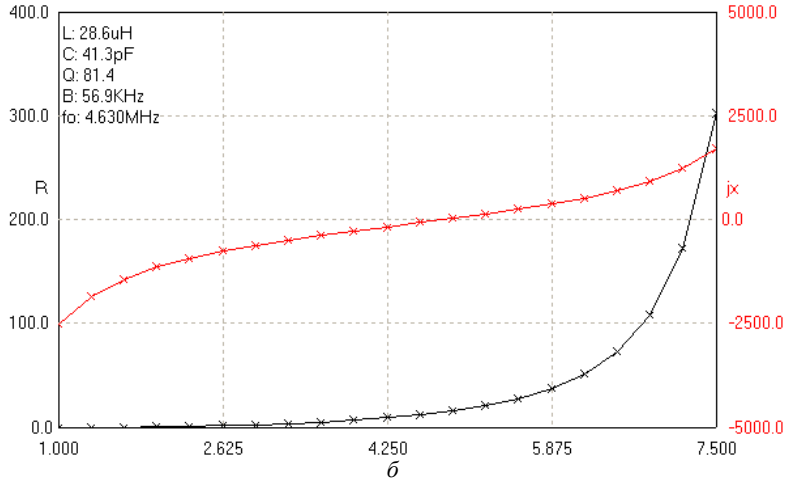
Частотная зависимость входного импеданса антенны показана на рис. 2, *а*. На частотах вблизи 8 МГц наблюдается резкое возрастание активной составляющей входного сопротивления антенны, в то время как на других частотах оно мало, что приводит к рассогласованию антенны с питающим фидером (рис. 2, *б*).

Частотная зависимость КУ в направлении максимума излучения показана на рис. 1, *б*. Она варьируется от 0,6 до 3,3. ДН для ряда частот показаны на рис. 3. В начале исследуемого диапазона частот ДН антенны в горизонтальной плоскости имеет форму «восьмерки», тогда

как с ростом частоты она принимает всенаправленную форму, в вертикальной плоскости всенаправленная форма ДН при повышении частоты начинает искажаться (рис. 3).



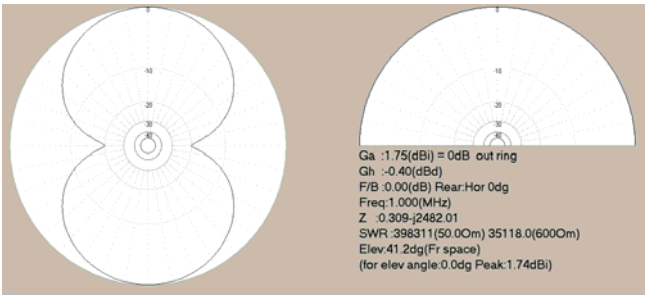
а



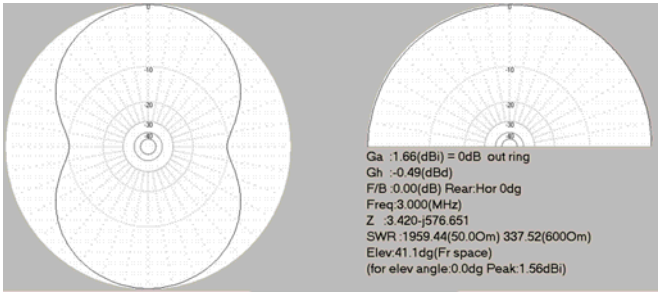
б

Рис. 2. Частотная зависимость входного импеданса (Ом, МГц) антенны в диапазонах: *а* – 1–10 МГц; *б* – 1–7,5 МГц

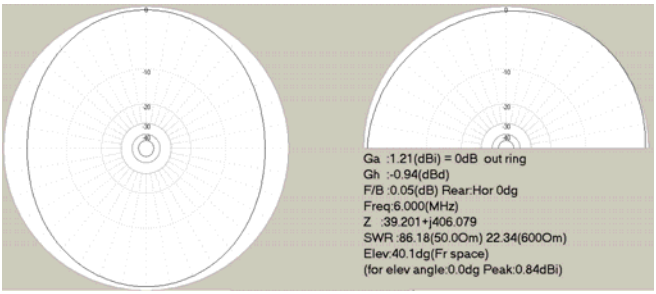
На основе полученных в данных требуется внести изменения в конструкцию антенны для улучшения её характеристик, что является необходимым шагом перед выполнением оптимизации структуры антенны с помощью ПЗФ.



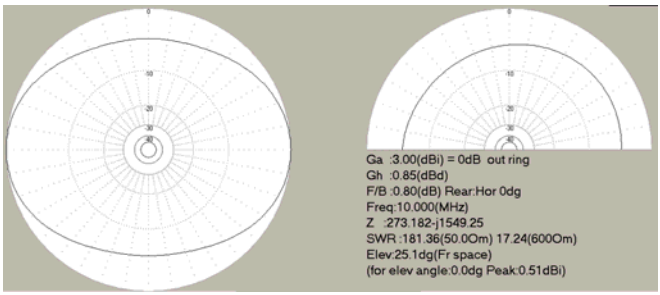
а



б



в



г

Рис. 3. ДН антенны на частотах: *а* – 1; *б* – 3; *в* – 6; *г* – 10 МГц

Работа выполнена в рамках государственного задания № 8.1802.2014/К Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Газизов Т.Т.* Синтез оптимальных проводных антенн. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2013. 120 с.

2. *Каймонов О.С., Газизов Т.Т.* Новый подход к обеспечению бесперебойной КВ-радиосвязи в системе МЧС России // Матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 25–27 ноября 2015. Томск: В-Спектр, 2015. Ч. 2. С. 30–33.

АНАЛИЗ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА ДВУХКАСКАДНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧАЕМЫХ ЭМИССИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.В. Дмитренко, магистрант каф. ТУ, Т.Т. Газизов, директор Института прикладной информатики ТГПУ, к.т.н.

Научный руководитель А.М. Заболоцкий, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ilyadmitren@mail.ru

Межвузовский проект ГПО ТУ 15-01

В настоящее время повышается интерес к новым методам и средствам ослабления излучаемых эмиссий бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА). Согласно [1], на некоторых частотах необходимо обеспечить подавление ниже общего уровня вплоть до 40 дБ. В этой связи представляют интерес пассивные устройства, в частности, основанные на модальной фильтрации [2]. Ранее были исследованы частотные отклики однокаскадных модальных фильтров (МФ) с торцевой связью (ТС), с активным и пассивным проводниками на одной стороне подложки и опорным на другой (треугольный), с лицевой связью (ЛС) [3]. Предварительные исследования показали, что двухкаскадные предпочтительные однокаскадных МФ (рис. 1).

Цель работы – выполнить анализ частотного отклика двухкаскадных МФ для подавления излучаемых эмиссий БА КА. Для этого необходимо построить геометрические модели МФ, обеспечить согласование с радиочастотным трактом и рассчитать его параметры. Затем надо вычислить частотные отклики МФ (зависимости модуля выходного напряжения МФ от частоты гармонического воздействия источника ЭДС с амплитудой 1 В) для случаев без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектриках, а также с учетом частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости материала подложки. Поперечные сечения исследуемых структур приведены на рис. 2.

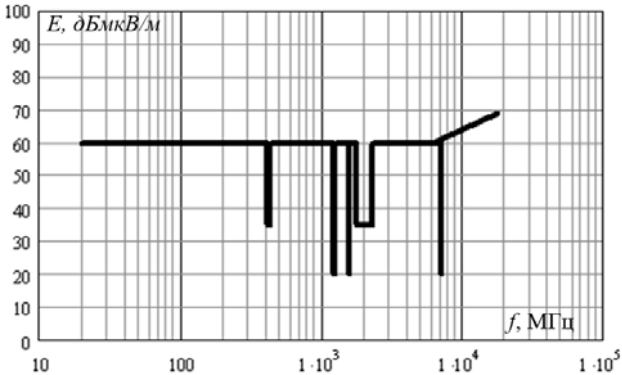


Рис. 1. Требования к уровню излучаемых эмиссий по [1]

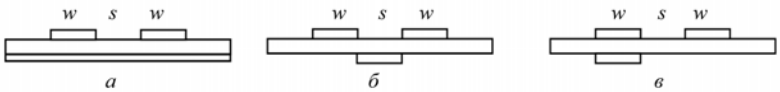


Рис. 2. Поперечные сечения МФ: *а* – с ТС; *б* – треугольного; *в* – с ЛС

Материалом подложки для каждой структуры выбран стеклотекстолит фольгированный двусторонний (толщина стеклотекстолита 0,25 мм, толщина фольги 105 мкм, $\varepsilon_r = 5{,}4$). Схема включения фильтров изображена на рис. 3.

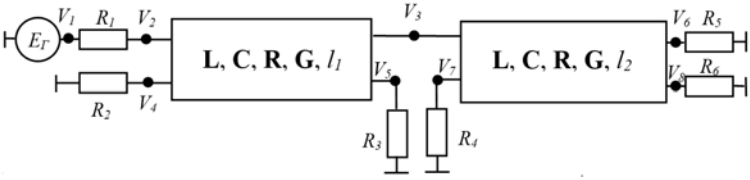


Рис. 3. Схема включения двухкаскадного МФ

Моделирование выполнялось в системе TALGAT [4]. Для каждой структуры выбраны ширина проводников w и расстояние между ними s для согласования с 50-омным трактом (при моделировании полагалось, что $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 50$ Ом). Длины отрезков линии рассчитаны по формуле

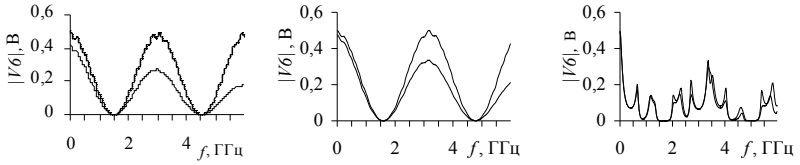
$$l = \frac{1}{2f\,|\tau_e - \tau_o|},$$

где f – частота, на которой осуществляется подавление; $|\tau_e - \tau_o|$ – модуль разности погонных задержек четной (е) и нечетной (о) мод. Для подавления сигнала выбрана частота 1,5 ГГц как рабочая для глобальных систем позиционирования. Параметры МФ сведены в таблицу.

Далее вычислены частотные отклики МФ без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектриках (рис. 4).

Параметры МФ

Параметры	Структура					
	ТС		Треугольный		ЛС	
L, нГн/м	298 103	103 298	303 91	91 303	574,4 513,3	513,3 578,9
C, пФ/м	127,8 –25,6	–25,6 127,8	125,2 –15,3	–15,3 125,2	425,1 –409	–409 424,7
Z_e, Ом	64,83		59,85		265,45	
Z_o, Ом	36,67		38,83		8,84	
$(Z_eZ_o)^{0,5}$, Ом	48,76		48,2		48,08	
τ_e, нс/м	5,32		6,578		4,105	
τ_o, нс/м	6,2		5,457		7,26	
$\Delta\tau$, нс/м	0,886		–1,121		3,155	
w, мм	0,35		1		2	
s, мм	0,15		0,4		0,9	
$l_1 = l_2$, мм	358		283		101	



а *б* *в*

Рис. 4. Частотные отклики МФ: *а* – ТС; *б* – с треугольный; *в* – ЛС без учета (--) и с учетом (–) потерь в проводниках и диэлектриках

Анализ частотных откликов показал, что в случае без учета потерь сигнал подавляется полностью, а в случае с учетом потерь достичь полного подавления не удается, так как четная и нечетная моды не компенсируются полностью из-за различного влияния потерь на них. Ослабление на частоте 1,5 ГГц для двухкаскадных МФ ТС, треугольного, ЛС составляет –68,6, –75,5, –82,2 дБ, а для однокаскадных –31,2, –46, –48,5 дБ соответственно. Поэтому можно сделать вывод, что использование двухкаскадных МФ позволяет более эффективное подавление: оно практически удваивается, но с поправкой на влияние потерь.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда по проекту 14-19-01232 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *AIAA* S-121-2009 Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems / American Institute of Aeronautics and Astronautics [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.booksfiles.org/xiazai/AIAA_S_121_2009_pre.pdf, свободный (дата обращения: 16.12.2015).

2. *Заболоцкий А.М.* Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 151 с.

3. *Дмитренко И.В., Заболоцкий А.М.* Анализ частотного отклика модальных фильтров для подавления излучаемых эмиссий бортовой аппаратуры космического аппарата // Доклады ТУСУРа. 2015. № 4(38). С. 151–153.

4. *Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р.* Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады ТУСУРа. 2015. № 2(36). С. 45–50.

ВЛИЯНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА И МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С TVS-СБОРКОЙ НА ФОРМУ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА СЕТИ ETHERNET

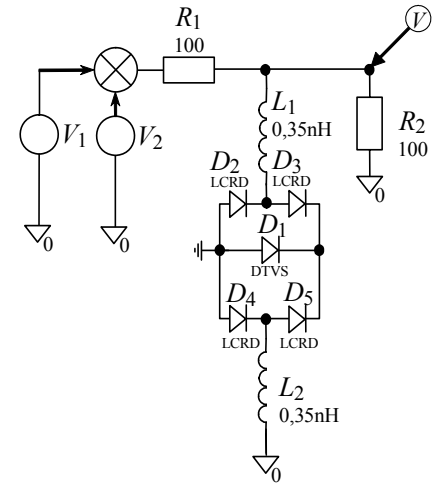
К.Э. Джанбаев, магистрант, каф. ТУ,
А.М. Заболоцкий, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, k.dzhanbaev@gmail.com

В настоящее время технология Ethernet является одной из наиболее широко используемых для создания сетей передачи данных. Однако на процесс передачи данных могут влиять сверхкороткие импульсы (СКИ), которые могут приводить к уничтожению и искажению или блокированию информации [1, 2]. Поэтому необходимы устройства защиты. Так, в работе [3] рассмотрены схемы устройств защиты, состоящие из модального фильтра (МФ) и TVS-сборки, а также показаны достоинства и особенности их совместного использования для защиты оборудования сети Fast Ethernet. Однако не показано, как изменится форма полезного сигнала при воздействии СКИ на порты оборудования и при использовании МФ с TVS-сборкой.

Цель работы – моделирование влияния СКИ и МФ с TVS-сборкой на форму полезного сигнала сети Fast Ethernet.

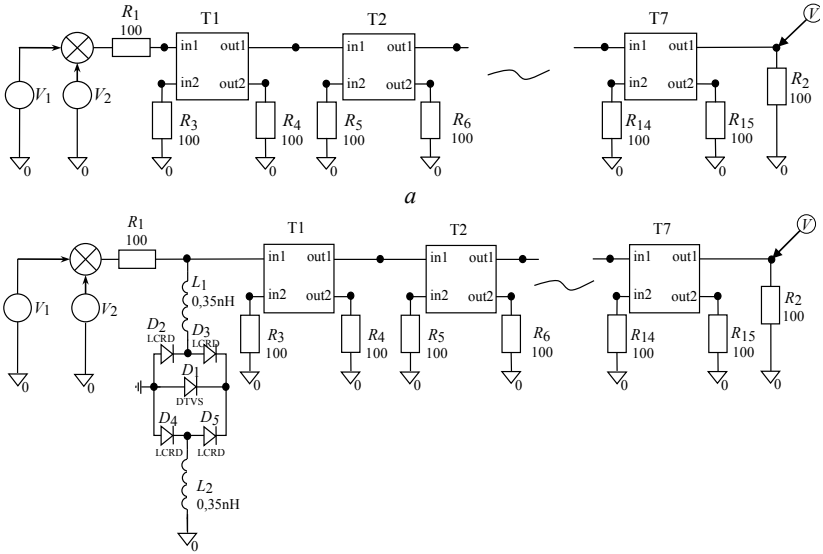
Моделирование выполнено с помощью Spice-анализа. Схемы из [3] представлены на рис. 1 и 2, где V_1 – источник полезного сигнала; V_2 – источник СКИ. Полезный сигнал имеет трапецеидальную форму, а его напряжение изменяется в диапазоне от +1 до –1 В. Длительность импульса по уровню 0,5 равна 8 нс, а нарастания и спада – 3,75 нс [4]. СКИ представлен в виде одиночного импульса с ЭДС 10 В и длитель-

ностями по уровню 0,5, равными 30 и 350 пс. Сопротивления резисторов на схемах равны 100 Ом [3].



При исследовании рассматривалось 3 варианта расположения СКИ на полезном сигнале: 1) на вершине импульса; 2) в начале спада; 3) между импульсами.

Рис. 1. Схема, состоящая из эквивалентных схем источников V_1 и V_2, сумматора и TVS-сборки LC03-3.3



а

б

Рис. 2. Схемы с МФ без (*а*) и с (*б*) TVS-сборкой

Результаты моделирования для узла, обозначенного значком , представлены на рис. 3: рис. 3, *а*, *б* – для рис. 1; рис. 3, *в*, *г* – для рис. 2, *а*; рис. 3, *д*, *е* – для рис. 2, *б*.

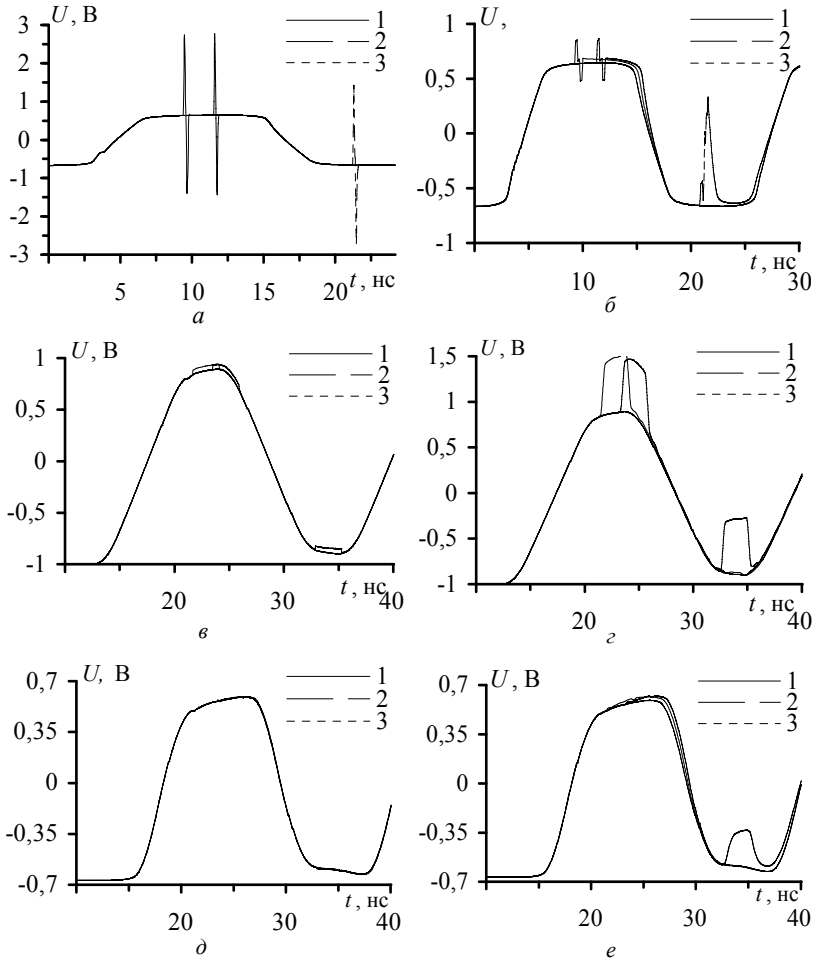


Рис. 3. Формы напряжения при 30 пс (слева) и 350 пс (справа) для разных вариантов расположения СКИ

Из рис. 3, *а* видно, что после TVS-сборки для всех вариантов подмешивания СКИ наблюдается двухполярная помеха (из-за падения напряжения на паразитной индуктивности TVS-сборки) амплитудой в 4,3 раза меньше относительно исходной. Этой помехой полезный сигнал фактически разбивается на два импульса. На рис. 3, *б* амплитуда СКИ уменьшается в 44,6 раза относительно исходной для вариантов 1 и 2, а для варианта 3 наблюдается однополярный СКИ с амплитудой в 10 раз меньше.

Использование только МФ (рис. 3, *в*, *г*) приводит к уменьшению амплитуды СКИ в 250 раз при длительности импульса 30 пс и в 16,6 раза – 350 пс. Видно, что на рис. 3, *в* амплитуда результирующего сигнала составляет 0,92 В, а длительности нарастания и спада уменьшились на 4,4%. Из рис. 3, *г* видно, что амплитуда результирующего сигнала составляет 1,5 В, а длительности нарастания и спада уменьшились на 4,8%.

Совместное использование TVS-сборки и МФ (рис. 3, *д*) приводит к полному подавлению СКИ, а амплитуда СКИ для варианта 3 уменьшилась в 16,6 раза (рис. 3, *е*). На рис. 3, *д* амплитуда результирующего сигнала составляет 0,6 В, а длительность нарастания и спада уменьшились на 3,5%. Также на рис. 3, *е* амплитуда результирующего сигнала составляет 0,6 В, а длительность нарастания и спада уменьшилась на 6%.

Таким образом, совместное использование МФ и TVS-сборки приводит к наименьшему влиянию их и СКИ на форму полезного сигнала в сети Fast Ethernet.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сахаров К.Ю.* Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев и др. // Технологии ЭМС. 2006. №3 (18). С. 36–45.

2. *Киричек Р.В.* Исследование влияния сверхкоротких электромагнитных импульсов на процесс передачи данных в сетях Ethernet: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2011. 174 с.

3. *Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Самотин И.Е.* Модальный фильтр с TVS-сборкой для защиты сети Fast Ethernet // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2(22). С. 160–163.

4. *Булаев М.А.* Особенности физического уровня стандарта Fast Ethernet / М.А. Булаев, Бурлаков К.Ю., Демин К.В. и др. // Конфидент. 2002. № 4, 5. С. 44–53.

КОНСТРУКТИВ БЛОКА МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СЕТИ ETHERNET 100 BASE-T

В.В. Кропотов, магистрант каф. ТУ, Т.Т. Газизов, директор Института прикладной информатики ТГПУ, к.т.н.

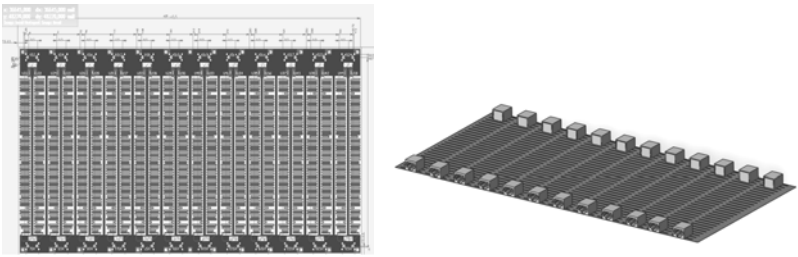
г. Томск, ТУСУР, mrkro199@gmail.com

Большая часть современных информационных систем основана на применении телекоммуникационной инфраструктуры локальных вы-

числительных сетей (ЛВС), поэтому актуально обеспечение их устойчивого функционирования в условиях воздействия различных деструктивных факторов. Особое внимание уделяется защите оборудования, использующего технологии семейства Ethernet от воздействия сверхкороткого импульса [1]. Так, для защиты портов Ethernet разработаны новое устройство, состоящее из модального фильтра (МФ) и TVS-сборки LC03-3.3 [2], и конструктив блока МФ для защиты портов Ethernet 100 Base-T, в котором МФ находятся на отдельных печатных платах (ПП) [3]. Однако данный конструктив обладает недостатками, например, сложно крепление ПП внутри него.

Цель работы – разработка конструктива блока МФ, располагаемых на одной ПП.

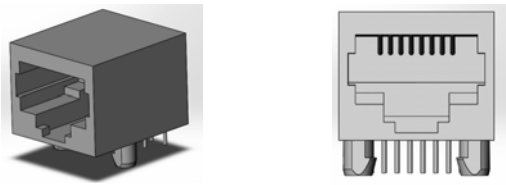
Большая часть телекоммуникационного оборудования размещается в 19» шкафах, поэтому данный факт учитывался при разработке. Так, в Altium Designer разработана ПП соответствующей ширины с расположенными на ней семикаскадными МФ (рис. 1, *а*). Для разработки конструктива в системе SolidWorks создана модель этой ПП (рис. 1, *б*). Параметры модели: длина – 208 мм; ширина – 425 мм; высота – 14 мм; количество МФ – 12.



а *б*

Рис. 1. Модель ПП с семикаскадными МФ в Altium Designer (*а*) и SolidWorks (*б*)

Разъем 8P8C (рис. 2) взят из библиотеки SolidWorks. Параметры: ширина – 15,3 мм; длина – 17,7 мм; высота – 12,7 мм, количество соединителей – 24.



а *б*

Рис. 2. Соединитель 8P8C: изометрия – *а*; вид спереди – *б*

Затем разработаны дизайн и детали конструктива блока (рис. 3).

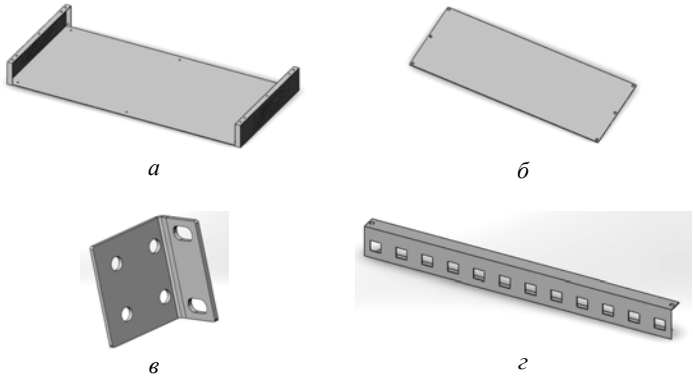


Рис. 3. Детали конструктива: корпус – *а*; крышка – *б*; крепление – *в*; панель – *г*

Конструктив блока МФ представлен на рис. 4. В конструктиве блока размещена ПП с семикаскадными МФ. Входы расположены на передней панели, а выходы – на задней. Параметры конструктива: длина – 210 мм; ширина – 440 мм; высота – 14 мм (1U); количество МФ – 12. Для крепления ПП внутри блока имеется 26 втулок, расположенных вблизи соединителей 8P8C.

Для наглядного представления разработанного конструктива в SolidWorks выполнен процесс получения изображения по созданной модели блока модальной фильтрации (рендеринг) (рис. 5).

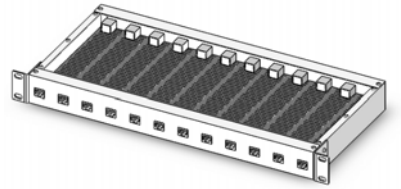


Рис. 4. Конструктив блока модальных фильтров

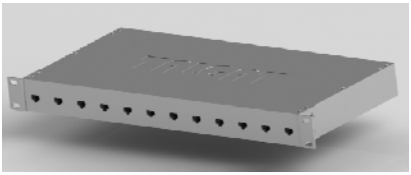


Рис. 5. Рендеринг конструктива

Таким образом, разработан конструктив блока МФ для защиты 12 портов Ethernet 100 Base-T, который может быть смонтирован в стандартные 19» телекоммуникационные шкафы. При его монтаже не требуется особых изменений в существующих структурированных кабельных системах.

Расчет модальных фильтров выполнен за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01232) в ТУСУРе, разработка конструктива блока модальной фильтрации для сети Ethernet 100 Base-T выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобразования РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Байдин Ф.Н., Ларионов С.М.* Преднамеренные силовые электромагнитные воздействия // Испытания на устойчивость технических средств охраны: 9-й Междунар. симпозиум по ЭМС и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург, 13–16 сентября 2011 г. СПб., 2011.

2. *Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.* Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 151 с.

3. *Кропотов В.В., Куксенко С.П.* Блок модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XI Междунар. науч.-практ. конф. (25–27 ноября 2015 г.): в 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2015. С. 36–39.

АЛГОРИТМ ПЕРЕНУМЕРАЦИИ В СИСТЕМЕ TALGAT

Евг.В. Лежнин, магистрант каф. АСУ,
Руст.Р. Газизов, студент каф. БИС
г. Томск, ТУСУР, zlvlezhnin@gmail.com

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на этапе разработки выполняется имитационное моделирование, для повышения эффективности которого необходимо уменьшать его вычислительные затраты. Большим ресурсом для этого является ускорение решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Часто на практике возникает необходимость многократного решения СЛАУ, например, при параметрической оптимизации большого числа параметров, что требует больших вычислительных затрат [1].

Система TALGAT – программный комплекс для моделирования задач ЭМС с помощью различных методов, в том числе посредством квазистатического анализа [2]. Для его выполнения вычисляются матрицы электростатической и электромагнитной индукции на основе данных о проводниках и диэлектриках дискретизированной модели исследуемой структуры. Для расчёта этих матриц необходимо решить СЛАУ вида $\mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{v}$, где $\mathbf{S}$ – плотная и квадратная матрица, $\boldsymbol{\sigma}$ – искомый вектор, дающий распределение плотности заряда на границах модели, а $\mathbf{v}$ – вектор из задаваемых потенциалов на сегментах модели. Порядок

N матрицы **S** складывается из количества сегментов на границах проводник–диэлектрик (Nc) и диэлектрик–диэлектрик (Nd), а элементы матрицы вычисляются из параметров этих сегментов. Существующая реализация алгоритма расчёта элементов матрицы **S** не позволяет оптимально выполнить решение СЛАУ при многократном изменении произвольного участка модели. Поэтому возникла необходимость разработки и реализации алгоритма изменения номеров сегментов модели (перенумерации). Перенумерация позволяет выделить многократно изменяемые сегменты модели и формировать матрицу **S** с учётом изменения параметров этих сегментов.

Цель данной работы – представить результаты по разработке алгоритма перенумерации сегментов в системе TALGAT.

Матрица **S** без использования перенумерации представляет собой блоки, разделённые по типу сегментов, используемых при вычислении её элементов (рис. 1, *а*). При использовании перенумерации элементы делятся на блоки в зависимости от того, изменяется ли элемент матрицы при многовариантном анализе. Количество неизменяемых элементов далее обозначается как N_s. Таким образом, при использовании перенумерации элементы матрицы **S**, описывающие часто изменяющиеся сегменты, располагаются в последних строках и столбцах матрицы **S** (рис. 1, *б*).

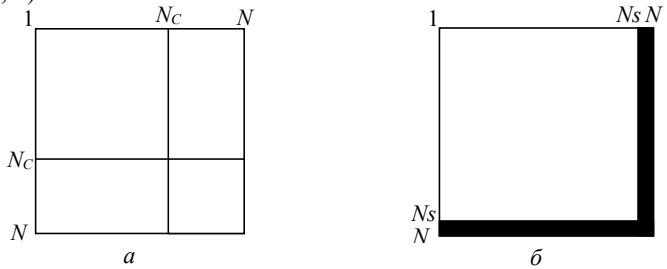


Рис. 1. Структура матрицы СЛАУ: без перенумерации (*а*); с перенумерацией (*б*); чёрным выделены изменяемые элементы матрицы

Для организации перенумерации доработана реализация функции формирования матрицы **S** с учётом заданного списка сегментов так, чтобы не происходило изменение её структуры. Для этого с помощью ассоциативного массива задаётся соответствие между номерами «старых» сегментов и «новых». Этот массив используется при формировании матрицы **S**, а также при решении СЛАУ. Пользователи могут определить сегменты для перенумерации с помощью команды CHANGE_NUMERATION(conf, *r*), которая изменяет конфигурацию conf, формируя ассоциативный массив соответствий сегментов, ис-

пользуя информацию об участке структуры r, параметры которого требуется оптимизировать.

Алгоритм перенумерации протестирован на нескольких микрополосковых структурах. В ходе тестирования сравнивались матрицы электростатической и электромагнитной индукции. В результате получено совпадение этих матриц при использовании перенумерации и без неё. Для наглядности далее продемонстрирована работа алгоритма на примере микрополосковой линии при изменении высоты полоски t (рис. 2). На рис. 3, *а* и *б* приведены матрицы **S** при t = 1 и 1,5 мм соответственно. Матрицы, полученные после использования перенумерации, показаны на рис. 3, *в*, *г*. Видно, что при использовании перенумерации неизменяемые элементы матрицы всегда находятся в левом верхнем блоке матрицы.

Рис. 2. Поперечное сечение микрополосковой линии

$$\begin{pmatrix} \mathit{8{,}2} & 1{,}2 & 5{,}4 & 1{,}2 & \mathit{1{,}2} & \mathit{1{,}2} \\ 4{,}4 & 5{,}6 & 6{,}0 & 0{,}7 & 4{,}2 & 0{,}8 \\ 5{,}4 & 1{,}7 & 12 & 1{,}7 & 1{,}8 & 1{,}8 \\ 4{,}5 & 0{,}7 & 6 & 5{,}6 & 0{,}8 & 4{,}2 \\ \mathit{-0{,}6} & 0{,}1 & -1 & 0{,}1 & \mathit{-10{,}5} & \mathit{-0{,}2} \\ \mathit{0{,}6} & -0{,}1 & 1 & -0{,}1 & \mathit{0{,}2} & \mathit{-8{,}3} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathit{8{,}2} & 1{,}8 & 4{,}5 & 1{,}8 & \mathit{1{,}2} & \mathit{1{,}2} \\ 4{,}2 & 7{,}6 & 6{,}4 & 1{,}3 & 3{,}9 & 0{,}8 \\ 4{,}5 & 2{,}9 & 13{,}3 & 2{,}9 & 1{,}8 & 1{,}8 \\ 4{,}2 & 1{,}3 & 6{,}4 & 7{,}6 & 0{,}8 & 3{,}9 \\ \mathit{-0{,}6} & 0 & -1{,}1 & 0{,}1 & \mathit{-10{,}5} & \mathit{-0{,}2} \\ \mathit{0{,}6} & -0{,}1 & 1{,}1 & 0 & \mathit{0{,}2} & \mathit{-8{,}3} \end{pmatrix}$$

а *б*

$$\begin{pmatrix} \mathit{8{,}2} & \mathit{1{,}2} & \mathit{1{,}2} & 1{,}2 & 5{,}4 & 1{,}2 \\ \mathit{-0{,}6} & \mathit{10{,}5} & \mathit{-0{,}2} & 0{,}1 & -1 & 0{,}1 \\ \mathit{0{,}6} & \mathit{0{,}2} & \mathit{-8{,}3} & -0{,}1 & 1 & -0{,}1 \\ 4{,}5 & 4{,}2 & 0{,}8 & 5{,}6 & 6{,}0 & 0{,}7 \\ 5{,}4 & 1{,}8 & 1{,}8 & 1{,}7 & 12 & 1{,}7 \\ 4{,}5 & 0{,}8 & 4{,}2 & 0{,}7 & 6 & 5{,}6 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathit{8{,}2} & \mathit{1{,}2} & \mathit{1{,}2} & 1{,}8 & 4{,}5 & 1{,}8 \\ \mathit{-0{,}6} & \mathit{10{,}5} & \mathit{-0{,}2} & 0 & -1{,}1 & 0{,}1 \\ \mathit{0{,}6} & \mathit{0{,}2} & \mathit{-8{,}3} & -0{,}1 & 1{,}1 & 0 \\ 4{,}2 & 3{,}9 & 0{,}8 & 7{,}6 & 6{,}4 & 1{,}3 \\ 4{,}5 & 1{,}8 & 1{,}8 & 2{,}9 & 13{,}3 & 2{,}9 \\ 4{,}2 & 0{,}8 & 3{,}9 & 1{,}3 & 6{,}4 & 7{,}6 \end{pmatrix}$$

в *г*

Рис. 3. Матрица **S**: без (*а*, *б*) и с (*в*, *г*) перенумерацией при t = 1 и 1,5 мм (значения неизменяемых элементов показаны курсивом)

В дальнейшем предполагаются работы по созданию графических средств для удобства пользователя при выполнении оптимизации параметров структуры. Так, перенумерация будет производиться автоматически на основе заданных пользователем параметров оптимизации.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания № 8.1802.2014/К Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Суровцев Р.С.* Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. … канд. техн. наук. Томск, 2015.

2. *Куксенко С.П.* Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45–50.

МОДУЛЬ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ТЕМ-КАМЕРЫ

М.Е. Комнатнов, аспирант каф. ТУ, А.В. Осинцев, магистрант каф. АОИ, А.А. Собко, магистрант каф. ТУ

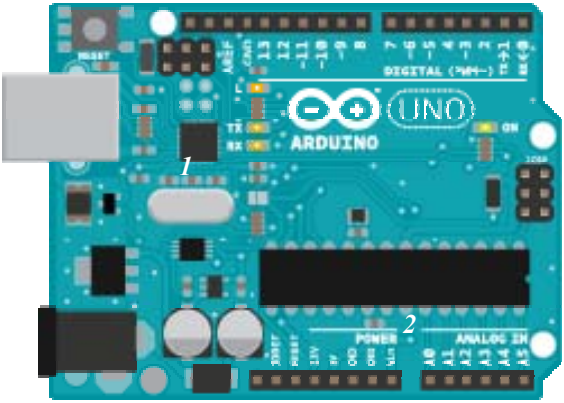
г. Томск, ТУСУР, kubenet@gmail.com

В научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» ТУСУРа разрабатывается климатическая экранированная ТЕМ-камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний радиоэлектронных средств [1–4]. Программное обеспечение (ПО) ТЕМ-камеры разделено по функциональным модулям (главный, пульта управления, дисплея, работы с температурными датчиками, работы с элементами Пельтье, пропорционального интегрально-дифференциального регулятора, SPI, UART) [5]. За передачу информации от ТЕМ-камеры к персональному компьютеру (ПК) отвечает модуль UART. Однако данный вид связи подвержен помехам и имеет ряд ограничений как по скорости передачи данных, так и по практической реализации [6]. Наиболее распространенным интерфейсом связи между различными видами устройств является интерфейс USB, позволяющий организовать передачу данных между устройствами разного класса [7].

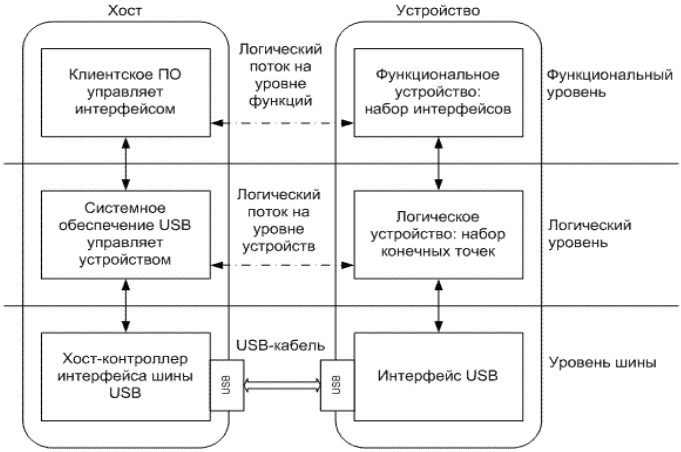
Цель работы – разработка программного модуля связи, обеспечивающего передачу данных между платой управления климатической экранированной ТЕМ-камерой и персональным компьютером по интерфейсу USB.

В качестве испытательной платформы выбрана свободно распространяемая аппаратно-программная платформа для прототипирования радиоэлектронных средств Arduino UNO [8]. В ней расположены два микроконтроллера (МК) (рис. 1, *а*). Первый (интерфейсный) отвечает

за организацию передачи данных. На втором (основном) находится ПО, выполняющее обработку данных.



а



б

Рис. 1. Отладочная плата Arduino UNO (*1*, *2* – МК) (*а*) и абстрактные уровни стека USB (*б*)

USB-устройства, относящиеся к классу human interface devices (HID) [6], примечательны тем, что для их работы в большинстве операционных систем (ОС) содержатся стандартные драйверы для работы с HID-устройством: (клавиатура, мышь, джойстик). Работа шины USB состоит из ведущего и ведомых устройств, а передача информации между ними происходит согласно стеку USB (рис. 1, *б*). В интерфейсном МК отсутствует аппаратная реализация USB интерфейса, поэтому

для организации связи необходимо запрограммировать два МК. На одном будет программная реализация USB-интерфейса, а на другом – ПО, отправляющее команды и данные на ПК. Для МК семейства AVR существует открытая библиотека LUFA, разработанная по лицензии Массачусетсского технологического института, что позволяет её использовать в разработке как коммерческого, так и свободного ПО для USB-устройств, основанных на МК AVR [9]. При разработке ПО для основного МК использовалась библиотека HIDKeyboard, в которой доступны функции работы с клавиатурой, программные события нажатия клавиш и передача текстовой информации [10].

Таким образом, разработан USB-модуль на основе аппаратно-программной платформы Arduino UNO, с помощью которой программно реализовано USB-устройство, что позволяет передавать данные от МК к ПК без разработки дополнительного ПО и драйверов. При подключении к ПК, устройство автоматически определяется в ОС Windows 7 как HID-устройство и посредством стандартных системных драйверов ОС позволяет организовать прием команд и данных от Arduino UNO. На основе результатов работы планируется переход к следующему этапу разработки: реализации в плате пульта управления терморегулятором модуля работы USB-интерфейса, что позволит расширить функциональные возможности терморегулятора и организовать взаимодействие программного модуля USB с ПО на ПК.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пат.* 2558706 РФ. Климатическая экранированная камера / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. (РФ). Заявка № 2014103639. Заявл.: 3.02.2014; опубл.: 08.07.15.

2. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р.* Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов // Техника радиосвязи. 2014. №3(23). С. 84–91.

3. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р.* О совместных климатических и электромагнитных испытаниях // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 39–45.

4. *Komnatnov M.E., Gazizov T.R.* Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing // Proc. of the IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on RF and Wireless Techn. for Biomed. and Healthcare Applic. (IMWS-BIO). London, Dec. 2014. P. 1–3.

5. *Осинцев А.В., Комнатнов М.Е.* Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XI Междунар. науч.-практ. конференции: в 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2015. С. 55–59.

6. *Магда Ю.С.* Программирование последовательных интерфейсов. М.: БХВ-Петербург, 2009. 304 с.

7. *USB* Class Codes [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.usb.org/ developers/defined_class (дата обращения: 5.03.2016).

8. *Arduino* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.arduino.cc (дата обращения: 1.03.2016).

9. *Библиотека* LUFA [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.fourwalledcubicle.com/ LUFA.php

10. *Библиотека* HIDKeyboard [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mitchtech.net/arduino-usb-hid-keyboard/ (дата обращения: 2.02.2016).

ОБЗОР ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

М.Е. Комнатнов, аспирант каф. ТУ, А.В. Осинцев, магистрант каф. АОИ, А.А. Собко, магистрант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, kubenet@gmail.com

В научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» ТУСУР разрабатывается климатическая экранированная ТЕМ-камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний радиоэлектронных средств [1–4]. В задачи программного обеспечения (ПО) ТЕМ-камеры входит обслуживание и контроль работы большого количества различных устройств (датчики температуры, жидкокристаллический дисплей, обмен данными между микроконтроллерами (МК) по интерфейсу SPI, обмен данными с компьютером по интерфейсу UART, управление термоэлектрическими элементами Пельтье (ЭП), программный пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор), работа которых реализована в программных модулях [5]. Поскольку работа модулей по большей части происходит независимо друг от друга и с различной частотой вызовов во время работы терморегулятора, возникает необходимость выполнения большого количества задач, используя детерминирование по времени, достигая эффекта псевдопараллелизма [6]. В частности, при использовании многофазного управления питанием ЭП сигналом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) возникла необходимость в дополнительном ПО. Управление ЭП должно происходить с высокой скоростью и детерминированным периодом по времени, без влияния работы со стороны остальных модулей, исключая возможность варьирования длительности сигналов управления питанием ЭП [7]. Для этого необходима операционная система реального времени (ОСРВ).

Цель работы – провести обзор операционных систем реального времени, подходящих по аппаратным требованиям к реализации в плате управления климатической экранированной ТЕМ-камеры.

ОСРВ предназначена для организации выполнения задач в рамках определенного промежутка времени. Требования к работе ОСРВ, защищенности и отказоустойчивости описываются в соответствующем стандарте ОСРВ сферы применения (авиация, автомобилестроение, оборонная промышленность и пр.). Различают ОС жесткого (hard real-time) и мягкого (soft real-time) реального времени, отличие первой от второй заключается в том, что первом случае задача должна отработать строго за отведенный ей период времени, иначе произойдет отказ, что повлечет сбой в работе системы, второй случай допускает небольшие отклонения по времени выполнения задачи.

Наиболее популярными ОСРВ для 8-разрядных МК семейства AVR на текущий момент являются: FreeRTOS, scmRTOS, tinyOS, mRTOS, uc/OS, uRTOS [8–13]. ОСРВ представляет собой набор модулей, состоящих из нескольких компонентов (ядро ОС, диспетчер задач, менеджер памяти, порты (настройки и функции для работы с аппаратной частью определенного МК), драйверы и библиотеки наиболее распространенных устройств, а также системные API, служащие для облегчения проектирования интерфейса пользователя, обращаясь к службам ОСРВ), спроектированных по определенной архитектуре. Основные характеристики ОСРВ представлены в таблице. В плате управления терморегулятором используются МК ATmega 2560, в которых доступно 256 Кб ПЗУ и 8 Кбайт ОЗУ [14], что допускает возможность применения ОСРВ, приведенных ранее в терморегуляторе.

Характеристики ОСРВ

ОСРВ	ОЗУ (Кбайт)	Лицензия	Язык	Среда разработки
FreeRTOS	5	Модифицированная лицензия GPL	Си, ассемблер	Keil, IAR, GCC
scmRTOS	0,5	MIT	C++	Keil, IAR, GCC
tinyRTOS	0,5	GPLv3	nesC	Keil, IAR, GCC
mRTOS	4	Open-Source	Си	CodeVisionAVR
uc/OS	5	GPL с дополнением	Си	IAR, Keil, GCC
uRTOS	2	GPL с дополнением	Assembler	GCC, AVR Studio

В результате проделанной работы проведен обзор ОСРВ, способных работать в плате управления климатической экранированной ТЕМ-камеры. На основе результатов работы планируется переход к следующему этапу разработки, а именно реализации управления терморегулятором посредством ОСРВ, что позволит расширить функциональные возможности терморегулятора и повысит надежность работы ТЕМ-камеры.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р.* Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов // Техника радиосвязи. 2014. №3(23). С. 84–91.

2. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р.* О совместных климатических и электромагнитных испытаниях // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 39–45.

3. *Komnatnov M.E., Gazizov T.R.* Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing Proc. of IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014). London, 2014. P. 1–3.

4. *Патент* РФ на изобретение № 2558706. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Климатическая экранированная камера. Заявка № 2014103639. Приоритет изобретения 3.02.2014.

5. *Осинцев А.В., Комнатнов М.Е.* Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2015. С. 55–59.

6. *Академия* Intel: Введение в разработку приложений для встроенных систем на платформе Intel Atom [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.intuit.ru/studies/courses/11076/1101/lecture/17411

7. *Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Собко А.А., Демаков А.В.* Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора // Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО–2016). Рязань [принято в печать].

8. *µC/OS-III* HW-RTOS [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.micrium.com/rtos/ucosiii/overview/ (дата обращения: 02.01.2016).

9. *mRTOS* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.programmersclub.ru/ (дата обращения: 02.01.2016).

10. *FreeRTOS* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.freertos.org/

11. TinyRTOS [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/pdf/tinyos-programming.pdf (дата обращения: 02.01.2016).

12. *scmRTOS* users manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://scmrtos.sourceforge.net/User_Manual (дата обращения: 05.03.2016).

13. *uRTOS* событийная операционная система реального времени с вытесняющей многозадачностью для микроконтроллеров AVR [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://we.easyelectronics.ru/os-rtos/urtos-sobytiynaya-operacionnaya-sistema-realnogo-vremeni-s-vytesnyayuschey-mnogozadachnostyu-dlya-mikrokontrollerov-avr.html (дата обращения: 02.02.2016).

14. *Atmel* ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (дата обращения: 05.03.2016).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОРПУСОМ С АПЕРТУРАМИ

М.Е. Комнатнов, аспирант каф. ТУ,
Р.В. Рубченков, А.А. Иванов, студенты каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, aktiv-man@mail.ru

На начальной стадии проектирования радиоэлектронных средств необходим предварительный анализ эффективности экранирования (ЭЭ) корпусом [1], на основе которого возможны рекомендации по расположению, размерам и количеству апертур в стенках корпуса. Предварительная оценка может быть выполнена при помощи упрощенных методов расчета ЭЭ. Так, известен метод, основанный на теории линий передачи, в котором ЭЭ выражается функцией, зависящей от частоты источника плоской электромагнитной волны (ЭМВ), геометрических размеров корпуса и апертуры [2]. Метод ограничен центральным расположением апертуры в корпусе, что снижает возможности анализа ЭЭ.

Комбинированный метод расчета [3] является более универсальным, что позволяет получить зависимости ЭЭ как для одной, так и для массива апертур. При этом требуется вычисление коэффициента связи

$$C_{ma}=\frac{\int_{x_0}^{x_0+1}\int_{y_0}^{y_0+w}\cos(\pi ny/b)\cos(n(y-y_0)\pi/w)\sin(\pi mx/a)\sin(\pi(x-x_0)m/l)dxdy}{XY}, \quad (1)$$

требующее численного интегрирования.

Цель данной работы – получение аналитической формулы для вычисления коэффициента связи согласно (1).

Особенность комбинированного метода заключается в учете коэффициента связи между корпусом и апертурой, что позволяет получить частотную зависимость ЭЭ с произвольным расположением апертуры в стенке корпуса со стороны падения плоской ЭМВ. В ходе работы получено аналитическое выражение коэффициента связи при условии распространения волны TE_{10} в волноводе:

$$C_{ma}=\left[\frac{\cos\left(\pi\cdot\left(\frac{Y}{a}+\beta\right)\right)}{a-l}-\frac{\sqrt{\cos^2\left(\pi\cdot\left(\frac{Y}{a}-\beta\right)\right)}}{a+l}\right]\cdot\frac{a\cdot l^2}{\pi\cdot X\cdot Y}\cdot\sqrt{\sin^2\left(\frac{\pi\cdot w\cdot(a-l)}{2\cdot a\cdot l}\right)}, \quad (2)$$

где X, Y – координаты центра апертуры; a – ширина стенки корпуса; l, w – ширина и высота апертуры в стенке корпуса; коэффициент $\beta=(X-Y)/l-0{,}5$. Значения начала апертуры x_0 и y_0 выражены через $X–l/2$ и $Y–w/2$ соответственно.

На основе (2) вычислены частотные зависимости ЭЭ корпусом (для точки в центре корпуса) с различным расположением апертуры в стенке корпуса (рис. 1, *а*) при падении на неё плоской ЭМВ. При помощи метода из [3], выражения (2), а также систем TALGAT (реализующей метод [2]) [4] и CST MWS (электродинамическое моделирование) выполнено сравнение частотных зависимостей ЭЭ корпусом размерами $a = d = 300$ мм, $b = 120$ мм, с толщиной стенок $t = 1$ мм и апертурой w=l=80 мм (рис. 2). Результаты, полученные по (2) при $w = 5$ мм, $l = 100$ мм и расположении апертуры в разных местах, а также с помощью TALGAT и CST MWS (только при центральном расположении апертуры), представлены на рис. 3.

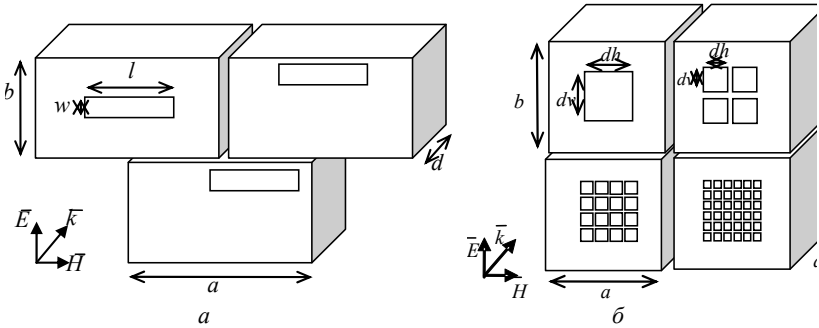


Рис. 1. Модели корпусов: с различным расположением апертуры в стенке корпуса при падении на неё плоской ЭМВ (*а*); с массивами апертур (*б*)

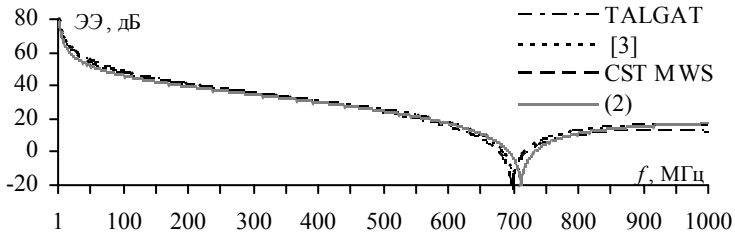


Рис. 2. Сравнение частотных зависимостей ЭЭ корпусом, вычисленных разными методами

Далее выполнены вычисления для массивов 1×1, 2×2, 4×4, 6×6 апертур общей площадью $S = 6400$ мм^2 при $a = d = b = 300$ мм (см. рис. 1, *б*). Геометрические размеры апертур ($dv = dh$, мм) для массива: 1×1 – 80; 2×2 – 40; 4×4 – 20; 6×6 – 13,5. На рис. 4 представлены полученные зависимости согласно (2) и в системе TALGAT (для массива 1×1, расположенного в центре). Видно, что результаты согласуются. Разность значений не превышает 20 дБ.

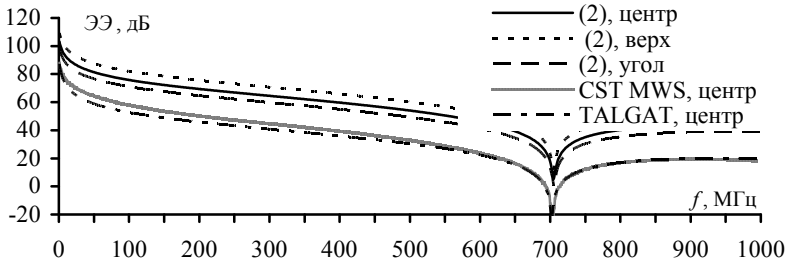


Рис. 3. Частотные зависимости ЭЭ корпусом при различном расположении апертуры

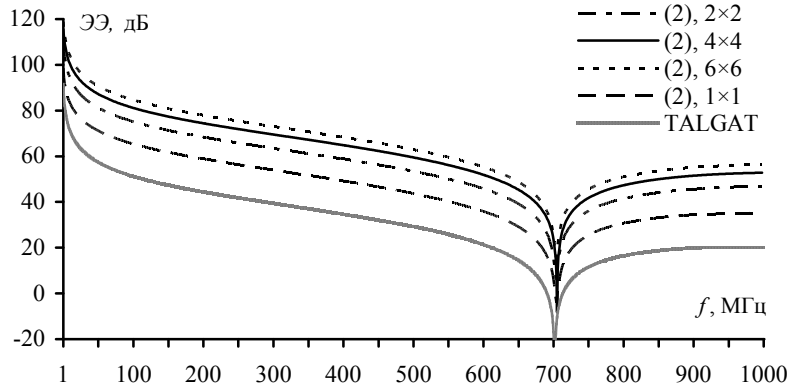


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ корпусом с массивом для разных апертур

Таким образом, получено аналитическое выражение для вычисления коэффициента связи между корпусом и апертурой, с использованием которого выполнены вычисления частотных зависимостей ЭЭ корпусом с апертурой. Поведение частотных зависимостей ЭЭ, полученных при помощи системы TALGAT и полученного выражения, согласуется, а различие составляет не более 20 дБ, что связано с неточностью вычисления сопротивления апертуры Z_{ap} в приведенных [3] выражениях, которое значительно отличается от значения Z_{ap} в [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Дементьев А.С.* Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, №9/2. С. 89–92.

2. *Thomas D.W.P. et al.* Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. May 2001. Vol. 43, Iss. 2. P. 161–169.

3. *Belkacem F.T. et al.* Combined model for shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with apertures // IET Sci. Meas. Technol., 2011. Vol. 5, Iss. 3. P. 88–95.

4. *Куксенко С.П.* Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45–50.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ

М.А. Самойличенко, магистрант каф. ТУ, Т.Т. Газизов, директор Института прикладной информатики ТГПУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, 1993mary@mail.ru

Как показала многолетняя практика эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) различного назначения, все острее встает вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), которая является важным фактором, влияющим на функционирование всей аппаратуры. Особое внимание следует уделить мощным преднамеренным электромагнитным импульсам наносекундного и субнаносекундного диапазонов, поскольку они способны проникнуть в различную РЭА и вывести ее из строя [1].

Подходящим средством защиты от сверхкоротких импульсов (СКИ) является модальный фильтр (МФ) [2]. Основная идея модальной фильтрации заключается в использовании модального разложения, например в отрезках полосковых линий или плоского кабеля [3]. Существенными достоинствами таких устройств защиты являются небольшая масса и высокая надежность, что делает перспективным их применение в РЭА. Они также могут отличаться радиационной стойкостью и дешевизной, а в случае кабеля, еще и массовым применением. Ранее были исследованы, например, однокаскадный МФ с лицевой связью, МФ на основе гибкого печатного кабеля, но у каждого из них есть свои недостатки. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты. Так, в ходе предварительных исследований было предложено расположить пассивный проводник в вырезе опорной плоскости.

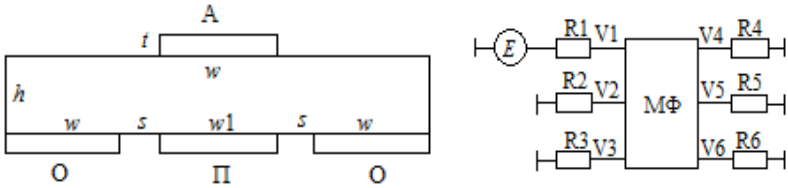
Цель данной работы – выполнить моделирование такой конструкции МФ.

Для достижения поставленной цели необходимо: построить геометрическую модель поперечного сечения исследуемой структуры,

составить схему включения МФ, вычислить матрицы погонных коэффициентов электростатической (**C**) и электромагнитной (**L**) индукции, векторы погонных задержек мод (**τ**), а также сигнал на входе и выходе активной линии при воздействии СКИ.

Вычисление параметров и форм сигнала выполнено с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT [4]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Поперечное сечение исследуемой структуры представлено на рис. 1, *а*, а схема включения МФ – на рис. 1, *б*. Параметры структуры: длина l = 1 м, ширина активного (А) и пассивного (П) проводников w = 0,5 мм, расстояние между проводниками s = 0,4 мм, толщина диэлектрика h = 0,1 мм, толщина проводников t = 0,105 мм. Диэлектрический материал стеклотекстолит (ε_r = 5) выбран из-за его широкого применения для печатных плат и дешевизны.



а *б*

Рис. 1. Поперечное сечение (*а*) и схема включения (*б*) МФ.
Проводники: О – опорный, А – активный, П – пассивный

Далее представлены полученные значения.

$$\mathbf{C}=\begin{pmatrix} 2.60e-010 & -2.49e-010 & -5.38e-012 \\ -2.49e-010 & 2.60e-010 & -5.41e-012 \\ -5.56e-012 & -5.59e-012 & 1.55e-010 \end{pmatrix}, \text{ Ф/м;}$$

$$\mathbf{L}=\begin{pmatrix} 9.91e-007 & 9.01e-007 & 6.42e-007 \\ 9.01e-007 & 9.90e-007 & 6.42e-007 \\ 6.41e-007 & 6.41e-007 & 1.28e-006 \end{pmatrix}, \text{ Гн/м; } \boldsymbol{\tau}=\begin{pmatrix} 6.75 \\ 3.73 \\ 3.61 \end{pmatrix}, \text{ нс/м.}$$

На вход МФ подается импульс с амплитудой – 2 В, время нарастания – 150 пс, ширина импульса – 200 пс, спад – 150 пс. Для согласования МФ взято R1 = R2 = R4 = R5 = 50 Ом, а для соединения крайних проводников – R3 = R6 = 0,001 Ом. Результат моделирования сигнала на входе и выходе МФ показан на рис. 2. Видно трехкратное подавление входного сигнала.

Таким образом, выполнено моделирование МФ, полученного путем выреза пассивного проводника в опорной плоскости микрополосковой линии. Оно показало, что такой МФ имеет перспективы дальнейшего использования, так как амплитуда импульса на выходе в 3 раза меньше, чем на входе. Таким образом, используя пассивный про-

водник в опорной плоскости, в дальнейшем могут быть созданы другие структуры, обеспечивающие еще большее подавление СКИ на выходе линии.

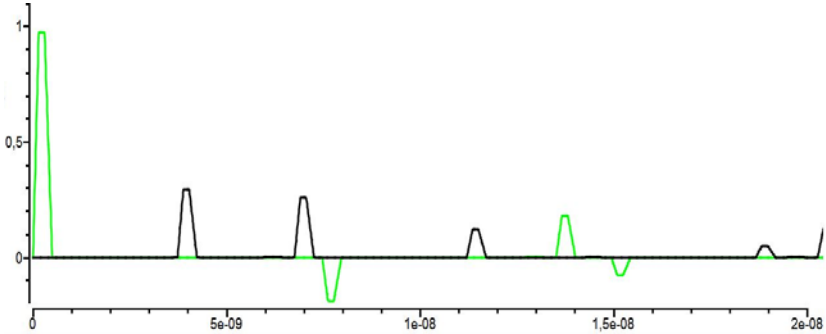


Рис. 2. Формы сигнала (В, с) на входе и выходе активной линии МФ

Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гизатуллин Р.М.* Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 142 с.

2. *Gazizov T.R., Zabolotsky A.M.* New approach to EMC protection // Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. Munich, Germany, 2007. September 24–28. P. 273–276.

3. *Заболоцкий А.М.* Модальная фильтрация в отрезках кабелей силового питания / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин // 15-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф., Казань, 9–10 ноября 2007 г. Казань, 2008. С. 189–191.

4. *Куксенко С.П.* Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45–50.

МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ БЛОКА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.Р. Шарафутдинов, аспирант, П.Е. Орлов, м.н.с. каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР

Создавая радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) для космических аппаратов (КА), уделяют большое внимание резервированию и электромагнитной совместимости. Используя модальное разложение сигнала в отрезках связанных линий, называемое модальной фильтрацией (МФ) [1], и избыточность холодного резервирования, можно осуществить модальное резервирование печатных плат (ПП) [2-5]. Однако реализация модального резервирования в реальной РЭА не рассматривалась. Между тем это актуально для резервируемой РЭА КА, например системы автономной навигации (САН).

Цель работы – реализация модального резервирования в САН КА.

В качестве исходной взята ПП цифровой обработки сигнала (ЦОС) САН КА (рис. 1). Применялись два типа МФ: с лицевой и торцевой связью.

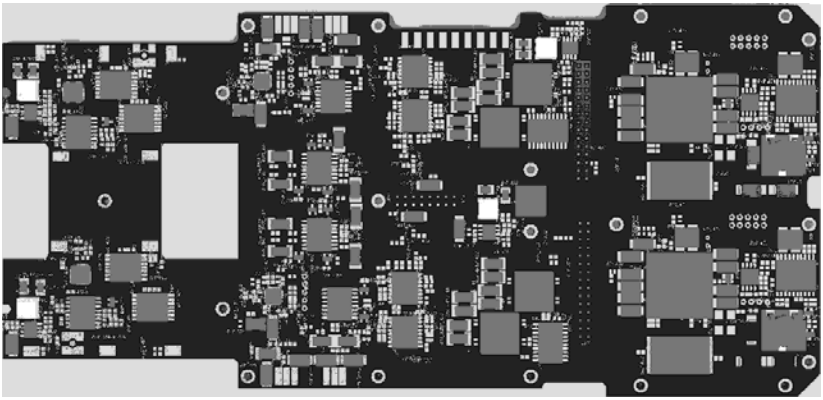
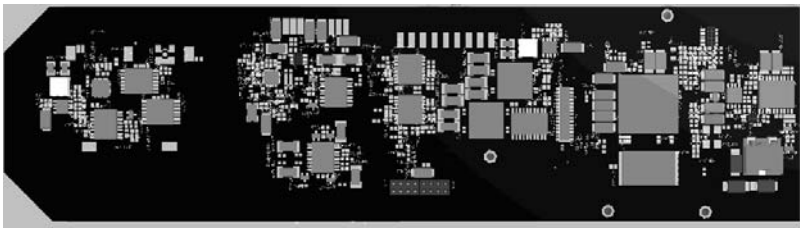


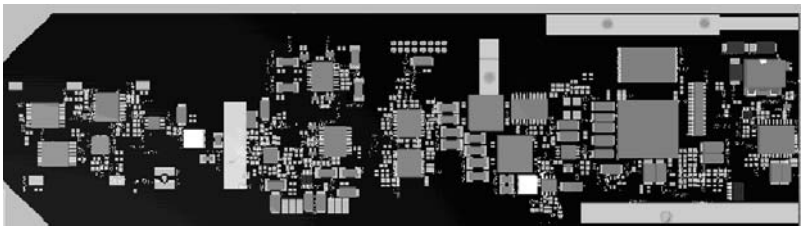
Рис. 1. Исходная ПП ЦОС (вид сверху)

Работа по реализации МФ на ПП проводилась впервые, и уже на этапе её компоновки было выявлено, что для реализации МФ целесообразно компоновать радиоэлектронные компоненты попарно и попарно симметрично. В первом случае надо располагать резервируемые и резервирующие компоненты максимально близко друг к другу на одной стороне ПП, во втором – на противоположных. Компоновка первым способом эффективна, если ПП содержит малое количество компонентов, и нет ограничения по её площади. В случае ПП ЦОС

второй способ более предпочтителен и ведет к рациональному размещению компонентов (рис. 2).



а



б

Рис. 2. ПП ЦОС с модальным резервированием: вид сверху (*а*), снизу (*б*)

Для реализации лицевой МФ потребовалось введение дополнительных слоев, что усложнило структуру ПП. Однако двухстороннее размещение компонентов на разных сторонах ПП позволило уменьшить её площадь более чем в полтора раза (281×75,5 мм вместо 260×125 мм). Длины участков трасс (*l*) с реализованной торцевой и лицевой МФ сведены в таблицу. Общая длина на 22 связанных линиях лицевой МФ составила 1597 мм. Для торцевой МФ удалось реализовать только 9 связанных линий общей длиной 273 мм.

Длина (мм) участков трасс с МФ (№ – номер участка)

Лицевая МФ								Торцевая МФ			
№	*l*	№	*l*	№	*l*	№	*l*	№	*l*	№	*l*
1	157	7	57	13	57	19	78	1	32	7	20
2	86	8	87	14	101	20	22	2	33	8	15
3	173	9	78	15	112	21	31	3	28	9	61
4	46	10	52	16	115	22	45	4	49		
5	50	11	20	17	20			5	23		
6	82	12	64	18	64			6	12		

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы. Попарно симметричное расположение элементов вследствие

удобства зеркальной трассировки резервируемой и резервной цепей, в большей мере способствует реализации лицевой МФ, чем торцевой. Чем выше плотности компоновки и трассировки ПП и чем больше на ПП асимметричных элементов с высокой интеграцией выводов, тем сложнее реализовать МФ. В то же время, чем больше дискретных симметричных элементов, протяженных цепей и слоев ПП, тем проще реализовать МФ.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01232) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gazizov T.R., Zabolotsky A.M.* New approach to EMC protection. Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. Munich, Germany, 2007. September 24–28. P. 273–276.

2. *Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Заболоцкий А.М., Буичкин Е.Н.* Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Доклады ТУСУРа. 2015. № 3 (37). С. 129–131.

3. *Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P.* New concept of critical infrastructure strengthening // Proc. of the 13th Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics. Sept. 23–29, 2015, Rhodes. Greece. P. 1–3.

4. *Орлов П.Е., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Буичкин Е.Н.* Новая концепция повышения помехозащищённости цепей с резервированием бортовой аппаратуры космических аппаратов // Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики: Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция, 5–6 июня, Благовещенск: тезисы докладов. Самара: СГАУ, 2015. С. 97–99.

5. *Gazizov T.R., Orlov P.E., Buichkin E.N.* Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections // Proc. of Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON). Moscow, Russia, 2016. May 27–28.

ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРОМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ТЕМ-КАМЕРЫ

М.Е. Комнатнов, аспирант, А.А. Собко, магистрант каф. ТУ, А.В. Осинцев, магистрант каф. АОИ

г. Томск, ТУСУР, alexfreetibet@gmail.com

При работе интегральных схем, на пределах рабочего температурного диапазона, возрастает риск отказа функционального узла или блока аппаратуры. Поэтому необходимо исследовать компонентную базу на стадии проектирования, а моделирование проводить, используя современные математические модели компонентов, которые учитывают условия их эксплуатации в мощных полях теплового и электромагнитного излучений [1]. В работе [2] представлен облик клима-

тической экранированной камеры, предназначенной для испытания электронной компонентной базы на электромагнитную совместимость с одновременным контролируемым воздействием климатических условий окружающей среды. В основе идеи создания климатической экранированной камеры лежит интеграция ТЕМ-камеры в климатическую камеру. Контроль за температурой и точечный нагрев или охлаждение стенок ТЕМ-камеры обеспечивает внешняя система контроля температуры.

Как правило, терморегуляторы содержат микроконтроллер (МК) с программной реализацией пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, температурный датчик (ТД) и термоэлектрический модуль – элемент Пельтье (ЭП), посредством которого поддерживается необходимая температура испытываемого объекта. Подобные устройства обеспечивают высокую точность поддержания температуры [3]. Для контроля температуры ТЕМ-камеры необходимо управление большим количеством ЭП, в связи с чем возникла необходимость в создании платы управления (ПУ), способной управлять большим количеством ЭП с возможностью работы как напрямую, через инструменты ввода и вывода, так и с персонального компьютера.

Цель работы – разработка платы управления терморегулятором климатической экранированной ТЕМ-камеры.

Разработанная структурная схема терморегулятора состоит из двух узлов: ПУ и ТЕМ-камеры с располагаемыми на ней ЭП и температурными датчиками (ТД) (рис. 1).

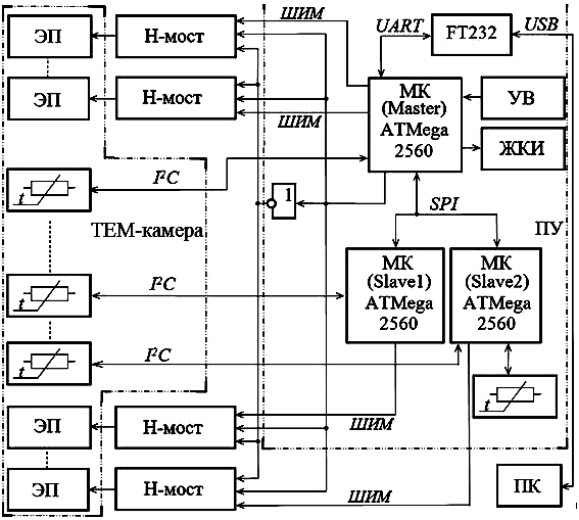
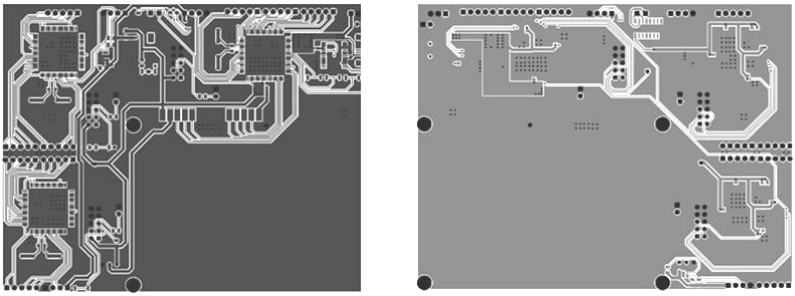


Рис. 1. Структурная схема терморегулятора

Управление ЭП осуществляется через Н-мосты сигналами с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), формируемыми ПУ, состоящей из ведущего и двух ведомых МК (ATMega2560), каждый из которых имеет по 15 выводов аппаратного ШИМ-сигнала. Также на ПУ имеется инвертирующий буфер HEF4049 для инвертирования токов протекания через каждый ЭП в зависимости от режима работы камеры (нагрев, охлаждение). Информация о текущем состоянии терморегулятора отображается на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ). Контроль температуры на поверхности ТЕМ-камеры и на ПУ осуществляется цифровыми ТД (MAX31725).

Управление терморегулятором может осуществляться одним из двух способов: непосредственно с ПУ, посредством устройства ввода (УВ) либо через персональный компьютер. Ввод требуемого и вывод текущего значений температуры поверхности ТЕМ-камеры осуществляется через ПУ посредством модуля UART (FT232). Данные о температуре поступают от нескольких ТД, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры между ЭП, и связанных между собой посредством интерфейса I^2C. Топология двухслойной печатной платы (ПП) разработана с учетом паразитных электромагнитных связей между печатными трассами (минимизация пересечений трасс, находящихся на разных слоях ПП под углом 90° и устранение лицевой связи на большом протяжении) и представлена на рис. 2. В особенности это касается управляющих трасс с сигналами ШИМ, идущих на выход устройства для управления ЭП. Трассы выведены к соединителям, располагаемым по краям ПП. Выполнена минимизация габаритов ПП с учетом практичного расположения элементов ввода/ вывода информации, таких как ЖКИ и переключатели.



а *б*

Рис. 2. Топология ПП на слоях Top (*а*) и Bottom (*б*)

Таким образом, разработана печатная плата, на базе которой создано устройство управления терморегулятором, показанное на рис. 3.

В устройстве программно реализован ПИД-регулятор. Работа ПУ показала возможность управления большим количеством ЭП и достижения температур от +2 до +125 °С. Данный диапазон получен при комнатной температуре без радиаторного блока на ЭП, поэтому отрицательные температуры не достигались.

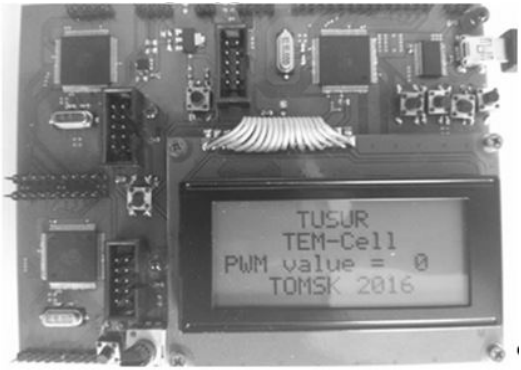


Рис. 3. Макет пульта управления терморегулятором

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комнатнов М.Е.* Обоснование целесообразности проведения совместного испытания на электромагнитные и температурные воздействия бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата // Молодежь. Техника. Космос: сб. тр. VI ОМНТК. СПб.: БГТУ, 2014. С. 46–48.

2. *Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р.* Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов // Техника радиосвязи. 2014. Т. 23, №3. С. 84–91.

3. *Jun-hong Y., Xi-yan B.* High-precision temperature control system based on PID algorithm // Int. Conf. on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). 2010. Vol. 12. P. 568–571.

ОЦЕНКА АРИФМЕТИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

А.В. Веселовский, магистрант каф. ТУ,
Р.С. Суровцев, аспирант каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, weselalex93@mail.ru

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является неотъемлемой частью проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), которое часто основано на численных методах, сводящих решение поставленной задачи к решению системы линейных алгебраи-

ческих уравнений (СЛАУ). От умения эффективно решать СЛАУ в большой степени зависит возможность математического моделирования сложных процессов с применением современных компьютеров. Для решения СЛАУ с плотной матрицей применяются прямые методы, такие как метод исключения Гаусса, или его версия, основанная на LU-разложении исходной матрицы. Вычислительные затраты данных методов пропорциональны N^3 (N – порядок матрицы), что неприемлемо при необходимости многократных вычислений с изменяющейся матрицей. Существуют случаи, при которых изменение некоторого параметра моделируемой структуры приводит к изменению определенной части элементов матрицы СЛАУ, например при изменении относительной диэлектрической проницаемости материала подложки полосковой структуры изменяется часть элементов главной диагонали. Тогда подходящим методом для решения СЛАУ является блочная версия LU-разложения. Априорно оценить эффективность его применения позволяют аналитические оценки. Так, в работе [1] получены оценки сложности блочного LU-разложения на M-кратное вычисление емкостных матриц при изменении диэлектрической проницаемости диэлектрика. Однако сравнение этих оценок с вычислительными показало необходимость их корректировки.

Цель работы – оценка арифметической сложности блочного LU-разложения с учетом программной реализации для многократного вычисления емкостных матриц полосковых структур.

При анализе полосковых структур требуется решение СЛАУ вида $\mathbf{S\Sigma} = \mathbf{V}$, где $\mathbf{S}$ – квадратная и плотная матрица порядка N; $\mathbf{V}$ – матрица размера $N \times N_{\mathrm{COND}}$; $\mathbf{\Sigma}$ – искомая матрица размера $N \times N_{\mathrm{COND}}$; N_{COND} – количество проводников в исследуемой структуре (не считая опорного). Для оценки эффективности применения блочного LU-разложения рассмотрим матрицу $\mathbf{S}$, которая имеет вид

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix},$$

где блоки размера $\mathbf{A}$ – $N_C \times N_C$; $\mathbf{B}$ – $N_C \times N_D$; $\mathbf{C}$ – $N_D \times N_C$; $\mathbf{D}$ – $N_D \times N_D$; N_C – количество подобластей проводник-диэлектрик и N_D – диэлектрик–диэлектрик.

Для ясности дальнейшего изложения приведем алгоритм вычисления M-емкостных матриц $\mathbf{C}$ (алгоритм 1) [1]. В табл. 1 приведены полученные значения арифметической сложности шагов алгоритма с учетом (учитывались все операции: сравнение, присваивания, инкремент, сумма, разность, умножение, деление) и без учета программной реализации согласно [1].

Таблица 1

Оценка арифметической сложности (Q) блочного LU-разложения без и с учетом программной реализации

№ шага	Арифметическая сложность без учета программной реализации	Арифметическая сложность с учетом программной реализации	Кол-во повторов
5	$Q_5 = \frac{8}{3}N_C^3 - \frac{3}{2}N_C^2 - \frac{1}{6}N_C$	$Q_5 = \frac{20}{3}N_C^3 + 5N_C^2 + \frac{35}{6}N_C - 2$	1
6	$Q_6 = N_D N_C \left(2N_C - 1\right)$	$Q_6 = 5N_D^2 N_D + 4N_C N_D + 3N_C + 1$	1
7	$Q_7 = 2N_C N_D^2$	$Q_7 = 5N_D^2 N_C + 9N_D^2 + 6N_D + 2$	1
9	$Q_9 = N_C N_{\mathrm{COND}} \left(2N_C - 1\right)$	$Q_9 = 5N_C^2 N_{\mathrm{COND}} + 4N_C N_{\mathrm{COND}} + 3N_C + 1$	1
10	$Q_{10} = 2N_C N_D N_{\mathrm{COND}}$	$Q_{10} = 5N_D^2 N_{\mathrm{COND}} + 9N_D N_{\mathrm{COND}} + 6N_D + 2$	1
14	$Q_{14} = \frac{8}{3}N_D^3 + N_D^2\left(2N_{\mathrm{COND}} - \frac{3}{2}\right) + N_D\left(N_{\mathrm{COND}} - \frac{1}{6}\right)$	$Q_{14} = \frac{20}{3}N_D^3 + 5N_D^2\left(1 + N_{\mathrm{COND}}\right) + N_D\left(N_{\mathrm{COND}} + \frac{53}{6}\right) - 1$	M
15	$Q_{15} = 2N_C N_D N_{\mathrm{COND}}$	$Q_{15} = 5N_C N_{\mathrm{COND}} N_D + 9N_C N_{\mathrm{COND}} + 6N_C + 2$	M

Алгоритм 1. Вычисление M-емкостных матриц

1 Присвоить $\mathbf{C}=0$
2 Для k от 1 до M
3 Если $k=1$
4 Вычислить элементы матрицы $\mathbf{S}_1$ и сохранить элементы главной диагонали блока $\mathbf{D}$ в матрице $\mathbf{Diag}_1$
5 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_1^{-1}$
6 $\mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_1\mathbf{B}_1$
7 $\mathbf{D}_1 = \mathbf{D} - \mathbf{C}_1\mathbf{B}_1$
8 Вычислить элементы матрицы воздействий $\mathbf{V}$
9 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{A}_k\mathbf{V}_0$ (размеры блоков $\mathbf{X}_0$ и $\mathbf{V}_0$ – $N_C \times N_{\mathrm{COND}}$)
10 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{V}_1 - \mathbf{C}_k\mathbf{X}_0$ (размеры блоков $\mathbf{X}_1$ и $\mathbf{V}_1$ – $N_D \times N_{\mathrm{COND}}$)
11 Иначе
12 $\mathbf{S}_k = \mathbf{S}_1$
13 $\mathbf{D}_k = \mathbf{D}_k + \mathbf{Diag}_k$
14 $\mathbf{\Sigma}_{1k} = \mathbf{D}_k^{-1}\mathbf{X}_1$
15 $\mathbf{\Sigma}_{0k} = \mathbf{X}_0 - \mathbf{B}_k\mathbf{\Sigma}_{1k}$
16 Вычислить элементы емкостной матрицы $\mathbf{C}_k$
17 Вычислить элементы матрицы $\mathbf{Diag}_{k+1}$
18 Увеличить k

Количественные и полученные вычислительно оценки ускорения (относительно последовательного разложения) вычисления M емкостных матриц за счет использования блочного LU-разложения без учета и с учетом программной реализации при $N = 1000$, выполненные для $N_C = 900$ и $N_{\mathrm{COND}} = 10$, приведены в табл. 2.

Таким образом, получены оценки числа арифметических операций алгоритма вычисления M емкостных матриц, основанного на блочном LU-разложении с учетом программной реализации. Скорректирована аналитическая оценка возможного ускорения от использования блочного разложения. Однако уточнение оказалось несущественным. Так, ускорение в 134 раза (для $N_C/N = 0{,}9$, $M = 1000$, $N_{\mathrm{COND}} = 1$) без учета программной реализации сократилось до 133 раз при его учете. Отсюда можно сделать вывод, что учет программной реализации не имеет существенного влияния на аналитическую оценку ускорения. Далее было выявлено, что опции оптимизации программного кода компилятора, используемого для создания приложения, влияют на ускорение. Так, при отключении оптимизации получено, что ускорение, полученное вычислительным путем (для $N_C/N = 0{,}9$, $M = 1000$, $N_{\mathrm{COND}} = 10$), существенно ближе (86,9) к полученному аналитически (101). С включенной оптимизацией ускорение составляет 46,8.

Таблица 2

Оценка ускорения решения СЛАУ за счет использования алгоритма 1 при $N = 1000$, $N_C = 900$ и $N_{\mathrm{COND}} = 10$

Способ оценки	M									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Без учета	26,3	44,6	58,2	68,8	76,8	76,8	83,4	88,9	97,5	101
С учетом	25,5	43,3	56,3	66,3	74,2	80,6	85,8	90,3	94,1	97,3
Вычислительно	7,4	14,4	18,0	24,1	30,0	34,7	37,3	42,9	45,6	46,8

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 8.1802.2014/К) при поддержке гранта РФФИ (14-29-09254).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р.* Аналитическая оценка вычислительных затрат на решение СЛАУ при многократном вычислении емкостной матрицы в диапазоне изменения диэлектрической проницаемости диэлектриков // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2014. Т. 428. С. 196–207.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 2
ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1
ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – **Еханин С.Г.**, проф. каф. КУДР, доцент, д.ф.-м.н.;*
*зам. председателя – **Романовский М.Н.**, доцент каф. КУДР, доцент, к.т.н.*

М.Д. Джаныбеков, Д.В. Бударагин
МНОГОЦЕЛЕВОЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ УСТРОЙСТВО ПОДАЧИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ 21

А. Коленко, Р. Шарабудинов, Т. Елистратова
АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ 23

В.С. Кунегин, О.-Ш.Р. Дабаев, Ю.А. Баранова
О МИНИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИЙ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП 26

А.Е. Зуева, М.О. Лазарева, Э.В. Максимова
ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРЯМОЙ ВАХ (В ОБЛАСТИ МИКРОТОКОВ) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ИСПЫТАНИЙ СИД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ РАБОЧИХ ТОКОВ 29

Э.В. Максимова, А.Е. Зуева, М.О. Лазарева
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ПЛОТНОСТЯХ РАБОЧЕГО ТОКА .. 31

В.С. Солдатов, А.А. Бояхчян, К.В. Оверчук, А.А. Уваров
РАЗРАБОТКА БРАСЛЕТА-МОНИТОРА АРИТМИИ 34

А.Е. Зуева, М.О. Лазарева, Э.В. Максимова
УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД 37

А.С. Комюстюрова, Е.Ю. Киселева, М.С. Куцов
УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕДУРЫ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ 40

ПОДСЕКЦИЯ 2.2
РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Лощилов А.Г.**, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена», к.т.н.;*
*зам. председателя – **Убайчин А.В.**, с.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.*

И.И. Александров, С.П. Караульных
ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗРАЗЪЕМНЫХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СВЯЗЬЮ 43

Е.В. Алексеев, Г.Г. Жук, А.В. Убайчин
РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА НА ОСНОВЕ НУЛЕВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ. 46
А.М. Дружков
АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРАХ 50
Д.С. Ермаков
ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕПЛЕНИЙ ДЛЯ СТЕНДА СБОРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖГУТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ 53
В.Д. Фисюк
БЛОК АНАЛОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 56
Д.А. Иванов, Р.А. Хуснутдинов, Г.Д. Марданов
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ 58
В.М. Кобзев
АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕМЕНТАМ NFC-АНТЕННЫ МАТРИЧНОГО ТИПА 61
А.А. Кондрашов, И.М. Макаров
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ 65
В.В. Ковалев
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ СВЧ 67
А.Ю. Меркушев, Ю.В. Шульгина
АКУСТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ПОЛОСТИ 70
Д.В. Петенёв, А.А. Бомбизов
АНАЛИЗАТОР ШУМА ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 73
И.Ю. Поляков, П.С. Любутин, С.В. Панин
ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОЛЯ ВЕКТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПО НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ В МЕТОДЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ. 76
Н.Ю. Рудый
ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ТОЛЩИНЫ ПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ 79
Е.С. Семенов
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СШП РАДИОЛОКАТОРА 81
Д.В. Шерстюк, А.М. Умаров, А.Е. Здрок
РАЗРАБОТКА ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА АДДИТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ 85

С.П. Шкарупо, А.Ю. Олисовец
СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА 88
А.Л. Старостин, Ю.В. Шульгина
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ 90
О.Ю. Терентьева, Ю.В. Шульгина
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 93
А.М. Умаров
УСТРОЙСТВО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ПЕЧАТИ 96
Г.Г. Жук, Е.В. Алексеев, А.В. Убайчин
РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ 99
Д.О. Зятьков
ЕМКОСТНЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ МАГНИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ 102

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Троян П.Е.**, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.;*
*зам. председателя – **Смирнов С.В.**, проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

А.И. Альбеков, А.С. Молчанов
МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ПОНИЖЕННОЙ РАЗМЕРНОСТИ 104
И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин
О ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ 106
А.А. Чистоедова
ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО НАРУШЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОШАБЛОННЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ 109
Т.Х. Фам
ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОЯВЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ 112
И.В. Федин, Е.В. Ерофеев
СИЛОВЫЕ ДИОДЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ 115

В.В. Голенкина
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА
$LACa_3Fe_5O_{12}$ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ 118
А.Р. Кадыров, В.Н. Легостаев, А.М. Лебединский, Е.А. Смолянский, А.Л. Лаук
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Al-Si-N
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ 121
В.В. Каранский, Е.В. Саврук, А.Ю. Лобажевич
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОЭДС
МАРГАНЕЦ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ 124
А.В. Казаков, В.Н. Макаров, А.В. Медовник
ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ УСКОРЯЮЩЕГО
ПРОМЕЖУТКА ФОРВАКУУМНОГО ИМПУЛЬСНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ 126
К.В. Короткова
ИЗМЕНЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ 129
И.А. Лысенко, Д.Д. Зыков
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ФОТОРЕЗИСТЕ
И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ 132
А.П. Молева, Р.А. Соколова
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА p–n-ПЕРЕХОДА, ПОЛУЧЕННОГО
МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ 135
С.Г. Нагайчук, Д.П. Аргунов, П.А. Змановский
ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ МЕМРИСТОРНОГО ТИПА
НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА НАНОМЕТРОВОЙ
ТОЛЩИНЫ 136
И.В. Пилипец
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ 139
А.А. Попов
ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ
НА КОЭФФИЦИЕНТ ОПТИЧЕСКОГО ВЫВОДА СВЕТА
ИЗ КРИСТАЛЛА GaN 142
И.А. Рыбалко
ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА
СЕРЕБРО–ЛАТУНЬ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ-ТРАКТА
С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА 144
Т.В. Сигута
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС КЛЮЧА 147

П.Е. Сим, Л.Э. Великовский, В.В. Скубо, Ю.Н. Поливанова
БЫСТРЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К AlGaN/GaN HEMT НА ПОДЛОЖКАХ SIC 150
Д.В. Синельников
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ Au-Al НА КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДКАХ КРИСТАЛЛА И ТРАВЕРСОВ ВНЕШНИХ ВЫВОДОВ 153
Р.А. Соколова, А.П. Молева
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕНТА ВЫХОДА ГОДНЫХ ПО ДОБРОТНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ 157
А.П. Андрейчик, Р.И. Степанов, И.Ю. Бакеев, А.С. Климов
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ФОРВАКУУМНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ..... 160
Е.А. Сваровский
ДЕТЕКТОР ПОЛЯ..... 163
М.И. Воротников, Н.И. Зудова, Ю.С. Жидик
ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК ITO..... 166
Е.И. Зайцева, Е.О. Ипатова
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ ПЛЕНКА-ПОДЛОЖКА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ..... 168
А.А. Зенин, И.Ю. Бакеев, А.Н. Николаенко
О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТОКА ПО СЕЧЕНИЮ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В ФОРВАКУУМЕ 170
М.И. Воротников, Н.И. Зудова, Ю.С. Жидик
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ, НА ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА..... 172

ПОДСЕКЦИЯ 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Михальченко Г.Я.**, директор НИИ ПрЭ, проф., д.т.н.;*
*зам. председателя – **Семёнов В.Д.**, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.*

В.В. Анисимов, Н.В. Калиновский, Б.А. Давыдов
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ EPSON MOVERIO BT-200 175
И.М. Журавлев
ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА 177

И.М. Журавлев
ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ 179
В.В. Старостенко, А.В. Шарафеев, Р.В. Ермоленко, М. Алькова
СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА ПО ПРИНЦИПУ ТЕПЛООБМЕННЫХ КАМЕР 182
В.В. Анисимов, Н.В. Калиновский, Б.А. Давыдов
ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И МОНИТОРИНГ СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ 183
В.И. Апасов
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ 186
А.В. Асадчий
СОХРАНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ 188
Д.Б. Бородин, В.Д. Семёнов
КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНЗИСТОРЕ ПРИ РАБОТЕ НА АКТИВНО-ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ БЕЗ НУЛЕВОГО ДИОДА ... 191
Д.Б. Бородин, В.А. Кабиров
КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ В НУЛЕ ТОКА 195
С.А. Деркач
ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЕ STM32F4DISCOVERY 200
С.И. Еньшин
ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С ЧИМ 203
В.В. Игнатенко
ПОЛУМОСТОВОЙ LLC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НИЗКИМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ 206
К.П. Калошин, Р.А. Проскурин, А.М. Юлдашев
МИКРОСХЕМЫ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА 210
А.В. Слободецкий, Н. Зальцман, Е. Ким
ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА ICE-BOX 213
Л.А. Корчуганов, Д.В. Ли
РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИНДУКТОРА «ПЕЧАТАЮЩЕЙ» ГОЛОВКИ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ 214
Д.А. Корольский
АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА НАГРУЗКИ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ 217
А.С. Литвинов
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНЫХ И ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ 220
В.О. Оскирко
ВЫХОДНЫЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ..... 223
Г.М. Шевченко, А.В. Тен
СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПИТАНИЕМ ОТ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА..... 227
С.В. Сидоров
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПОРТА 230
С.С. Тюнин
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОВЫШАЮЩЕГО НПН ПРИ ПИТАНИИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB 232
И.М. Васильев
СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА-ДЕФЕКТОСКОПА С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ STL ФАЙЛА 234
Н.П. Винтоняк
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГРУЗКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА 237
И.М. Журавлев
ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРНЫХ ЯЧЕЕК 240

ПОДСЕКЦИЯ 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Шарангович С.Н.**, проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.*
*зам. председателя – **Буримов Н.И.**, зав. УНЛ СВЧ микроэлектроники, доцент каф. ЭП, к.т.н.*

Ю.В. Ряполова, К.А. Неверовский, Е.О. Постолова, К.Н. Афонин
ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ 243
Ю.В. Ряполова, К.А. Неверовский, Е.О. Постолова, К.Н. Афонин
ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ..... 244
А.С. Бахтаулова
РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛАКА КО-859, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОПОРОШКАМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ 246

А.Д. Безпалый, А.О. Верхотуров
ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ИЗ ОБЛАСТЕЙ СИНЕГО
И ЗЕЛЕНОГО СПЕКТРА 249
K.A. Borodina, S.A. Sorokina, M.P. Boronenko
ACCOUNTING FOR RESIDUAL GLOW IN HYBRID SYSTEMS
BASED ON EOC 251
А.Н. Бурьянова
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ
ОПТИЧЕСКОГО УЗЛА 254
Д.А. Демидова, О.Ф. Зодорожный, А.Ж. Алимбаева, Е.В. Москвитина
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ
ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ GaN/InGaN – САПФИР 257
С.Ю. Дикусар
РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНЫХ
ЗОНДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 259
И.А. Викулина, К.О. Гусаченко, Д.И. Дудник, А.О. Семкин
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО
ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМЫХ
ВОЛНОВОДНЫХ КАНАЛОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ
ФПМ-ЖК МАТЕРИАЛАХ 260
А.А. Еремеева, В.М. Шандаров
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ ПУЧКОВ 263
Т.Л. Григорян, А.В. Дроздов
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ
ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ 265
Р.Ф. Кудрявцев, И.С. Банщикова, О.С. Дмитриенко
СВЕТОДИОДНАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ПОДСВЕТКА
ЛЕДОВОГО КАТКА 267
И.А. Асафов, П.К. Сафронова, К.А. Грицук
АМПЛИТУДНЫЕ ТРАНСПАРАНТЫ – ОДИН ИЗ ПУТЕЙ
ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ
СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ 269
А.И. Татьянников, К.М. Мамбетова
ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР
$LiNbO_3$:Cu, СФОРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ДИФФУЗИЕЙ МЕДИ 271
И.А. Трушников, А.В. Инюшов
ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ БЕССЕЛЕПОДОБНЫХ
СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ 274
О.Т. Важинский, И.А. Паргачёв, К.С. Важинская
РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДРАЙВЕРА
ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ 276

А.О. Верхотуров, А.Д. Безпалый
ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
СИНЕГО И ЗЕЛЕНОГО СПЕКТРА 278
К.В. Волченко, С.А. Кругляков, А.О. Семкин
ПРОПУСКАЮЩИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ
СТРУКТУРЫ В ФОТОПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ
КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ 281
К.В. Заичко, А.О. Семкин
СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА 284
Е.А. Дмитриев, Е.А. Березина, В.А. Крадько, В.Ю. Рябченок
ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОТЕКАНИЯ
ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТА С УЧЕТОМ ВКЛАДА
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 286
А. Андрианова, Г. Большанин, И.К. Казак, А.Ю. Яковлева
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ,
ОБРАЗОВАННЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ
В КРИСТАЛЛАХ $LiNbO_3$ 288

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Газизов Т.Р.**, зав. каф. ТУ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

Я.В. Балахнина, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕМ-КАМЕРЕ 292
Е.В. Бебякина, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ЭНЕРГИИ БИОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ В ТЕМ-КАМЕРЕ 295
В.И. Цимбол
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ПЭМИ ПУТЕМ ОБРАЩЕНИЯ К EEPROM МОНИТОРА
ПО ИНТЕРФЕЙСУ I2C 297
А.В. Демаков, О.С. Каймонов, Т.Т. Газизов
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ V-ТИПА 300
И.В. Дмитренко, Т.Т. Газизов
АНАЛИЗ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА ДВУХКАСКАДНЫХ
МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧАЕМЫХ
ЭМИССИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА 304

К.Э. Джанбаев, А.М. Заболоцкий
ВЛИЯНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА И МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С TVS-СБОРКОЙ НА ФОРМУ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА СЕТИ ETHERNET 307
В.В. Кропотов, Т.Т. Газизов
КОНСТРУКТИВ БЛОКА МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СЕТИ ETHERNET 100 BASE-T.....310
Евг.В. Лежнин, Руст.Р. Газизов
АЛГОРИТМ ПЕРЕНУМЕРАЦИИ В СИСТЕМЕ TALGAT 313
М.Е. Комнатнов, А.В. Осинцев, А.А. Собко
МОДУЛЬ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ТЕМ-КАМЕРЫ 316
М.Е. Комнатнов, А.В. Осинцев, А.А. Собко
ОБЗОР ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....319
М.Е. Комнатнов, Р.В. Рубченков, А.А. Иванов
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОРПУСОМ С АПЕРТУРАМИ 322
М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов
МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ.....325
В.Р. Шарафутдинов, П.Е. Орлов
МОДАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ БЛОКА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....328
М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев
ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРОМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ТЕМ-КАМЕРЫ.....330
А.В. Веселовский, Р.С. Суровцев
ОЦЕНКА АРИФМЕТИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ 333

Научное издание

Материалы
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2016»

25–27 мая 2016 г., г. Томск

В шести частях

Часть 2

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Издательство «В-Спектр».
Сдано на верстку 20.04.2016. Подписано к печати 20.05.2016.
Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Печать трафаретная. Печ. л. 21,9.
Тираж 100 экз. Заказ 12.

ТУСУР. г. Томск, пр. Ленина, 40. к. 205, т. 70-15-24
(записано 600 CD-дисков с электронными версиями всех частей сборника
для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Издательство «В-Спектр».
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24, т. 49-09-91
E-mail: bvm@sibmail.com