



Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники



**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**

**ВЫБИРАЙ БУДУЩЕЕ,
ВЫБИРАЙ ТУСУР!**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129
Телефон/Факс: (3822) 900-100

E-mail: onir@main.tusur.ru
Сайт: <http://tusur.ru/>

Информационный центр абитуриента: abiturient.tusur.ru



TUSUR

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2017

Посвящена 55-летию ТУСУРа



**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
10–12 мая 2017 г. (в восьми частях)**

Часть 3

г. Томск

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

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2017

Материалы
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2017»,
посвященной 55-летию ТУСУРа

10–12 мая 2017 г., г. Томск

В восьми частях

Часть 3

В-Спектр
2017

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

Н 34

Н 34 Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 3. – 176 с.

ISBN 978-5-91191-353-3

ISBN 978-5-91191-356-4 (Ч. 3)

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 автоматизированных 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

ISBN 978-5-91191-353-3

ISBN 978-5-91191-356-4 (Ч. 3)

© Том. гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2017

**Международная
научно-техническая конференция
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2017»,
посвященная 55-летию ТУСУРа
10–12 мая 2017 г.**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Шелупанов А.А. – председатель Программного комитета, ректор ТУСУРа, директор Института системной интеграции и безопасности, председатель правления Томского профессорского собрания, проф., д.т.н.;
- Мешеряков Р.В. – заместитель председателя Программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. БИС, проф., д.т.н.;
- Агеев Е.Ю., начальник научного управления, к.и.н.;
- Бабур-Карателли 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.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС, к.т.н.;
- Грик Н.А., зав. каф. ИСР, проф., д.и.н.;
- Давыдова Е.М., декан ФБ, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.;
- Демидов А.Я., зав. каф. ТОР, доцент, к.ф.-м.н.;
- Дмитриев В.М., зав. каф. МиСА, проф., д.т.н.;
- Дробот П.Н., доцент каф. УИ, к.ф.-м.н.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР, доцент, д.ф.-м.н.;
- Заболоцкий А.М., доцент каф. ТУ, к.т.н.;
- Зариговская Н.В., доцент каф. ЭМИС, к.ф.-м.н.;
- Исакова А.И., доцент каф. АСУ, доцент, к.т.н.;
- Карателли Д., PhD (Sapienza University of Rome), технический директор компании «The Antenna Company Nederland B.V.»;
- Карташев А.Г., проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н.;
- Катаев М.Ю., проф. каф. АСУ, д.т.н.;
- Коцубинский В.П., зам. зав. каф. КСУП, доцент каф. КСУП, к.т.н.;
- Лоцилов 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 ТУСУРа, проф., д.т.н.;
- Михальченко Г.Я., директор НИИ ПрЭ, проф., д.т.н.;
- Мицель А.А., проф. каф. АСУ, д.т.н.;
- Мозгунов А.В., начальник ОНИР;
- Озеркин Д.В., декан РКФ, доцент, к.т.н.;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ, доцент, к.филос.н.;
- Пустынский И.Н., проф. каф. ТУ, заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н.;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР НГТУ, д.т.н., г. Новосибирск;

- Семенов Э.В., проф. каф. РЗИ, доцент, д.т.н.;
- Сенченко П.В., декан ФСУ, доцент каф. АОИ, к.т.н.;
- Суслова Т.И., декан ГФ, зав. каф. ФиС, проф., д.филос.н.;
- Троян П.Е., зав. каф. ФЭ, проректор по учебной работе, проф., д.т.н.;
- Хаминов Д.В., зав. каф. ТП, зам. декана ЮФ, к.и.н.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КИБЭВС, д.т.н.;
- Шарангович С.Н., проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;
- Шарыгин Г.С., проф. каф. РТС, д.т.н.;
- Шостак А.С., проф. каф. КИПР, д.т.н.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

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.

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, доцент, к.т.н.

Подсекция 1.3. Радиотехника. Председатель секции – Семенов Эдуард Валерьевич, проф. каф. РЗИ, доцент, д.т.н.; зам. председателя – Артищев Сергей Александрович, м.н.с. СКБ «Смена», к.т.н.

Подсекция 1.4. Радиолокация. Председатель секции – Масалов Евгений Викторович, проф. каф. КИПР, проф., д.т.н.; зам. председателя – Кривин Николай Николаевич, ст. преподаватель каф. КИПР, к.т.н.

Подсекция 1.5. Аудиовизуальная техника, цифровое телерадиовещание и информационный сервис. Председатель секции – Пустынский Иван Николаевич, проф. каф. ТУ, д.т.н.; зам. председателя – Костевич Анатолий Геннадьевич, доцент каф. ТУ, к.т.н., с.н.с.

Подсекция 1.6. 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 1.7. Робототехника. Председатель секции – Шурыгин Юрий Алексеевич, первый проректор, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.; зам. председателя – Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, к.т.н.

Подсекция 1.8. 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, доцент, к.т.н.

Секция 2. Электроника и приборостроение

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

Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры. Председатель секции – Лошилов 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, проректор по УР, зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.; зам. председателя – Смирнов Серафим Всеволодович, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

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 – Шارانгович Сергей Николаевич, проф., зав. каф. СВЧКР, к.ф.-м.н.; зам. председателя – Перин Антон Сергеевич, доцент каф. СВЧКР, к.т.н.

Подсекция 2.6. Электромагнитная совместимость. Председатель секции – Заболоцкий Александр Михайлович, доцент каф. ТУ,

к.т.н.; зам. председателя – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Подсекция 2.7. Светодиоды и светотехнические устройства. Председатель секции – Туев Василий Иванович, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.; зам. председателя – Вилисов Анатолий Александрович, проф. каф. РЭТЭМ, д.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.; зам. председателя – Суханов Александр Яковлевич, доцент каф. АСУ, к.т.н.

Подсекция 3.2. Распределённые информационные технологии и системы. Председатель секции – Сенченко Павел Васильевич, декан ФСУ, доцент каф. АОИ, к.т.н.

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, доцент, к.ф.-м.н.; зам. председателя – Колотаев Илья Владимирович, разработчик ООО «СибирьСофтПроект».

Подсекция 3.5. Вычислительный интеллект. Председатель секции – Ходашинский Илья Александрович, проф. каф. КИБЭВС, д.т.н.; 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.; зам. председателя – Нариманова Гуфана Нурлабековна, зав. каф. УИ, доцент, к.ф.-м.н.

Подсекция 3.8. Разработка программного обеспечения. Председатель секции – Гордиевских Вячеслав Валерьевич, генеральный директор ООО «СибирьСофтПроект»; зам. председателя – Зариковская Наталья Вячеславовна, доцент каф. ЭМИС, к.ф.-м.н.

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

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 – Конев Антон Александрович, 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.

Подсекция 4.3. Экономическая безопасность. Председатель секции – Кузьмина Елена Александровна, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.; зам. председателя – Глухарева Светлана Владимировна, ст. преподаватель каф. КИБЭВС.

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.; 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, к.т.н.; зам. председателя – Григорьева Марина Викторовна, доцент каф. АСУ, к.т.н.

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

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

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, доцент каф. ИСР, к.и.н.

Подсекция 5.6. Правовые проблемы современной России. Председатель секции – Хаминов Дмитрий Викторович, зав. каф. ТП, зам. декана ЮФ, к.и.н.; зам. председателя – Суслов Андрей Александрович, ст. преподаватель каф. ТП

Секция 6. Экология и мониторинг окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности. Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н.; 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 ОНП.

Секция 8. Postgraduate and Master Students' Research in Electronics and Control Systems. (Секция на английском языке). Председатель секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, доцент, к.филос.н.; зам. председателя – Менгардт Елена Рудольфовна, доцент каф. ИЯ, Морозова Елена Ирисметовна, ст. преподаватель каф. ИЯ.

Адрес оргкомитета:

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40,

ГОУ ВПО «ТУСУР»

Научное управление (НУ), к. 205

Тел.: 8-(382-2) 701-524

E-mail: nstusur@main.tusur.ru

- 1-й том – 1-я секции (подсекции 1.1 – 1.8);
- 2-й том – 2-я секция (подсекции 2.1 – 2.4);
- 3-й том – 2-я секция (подсекции 2.5 – 2.7);
- 4-й том – 3-я секция (подсекции 3.1 – 3.5);
- 5-й том – 3-я секция (подсекции 3.7 – 3.9);
- 6-й том – 4-я и 5-я секции (подсекции 4.1 – 4.3 и 5.1, 5.2)
- 7-й том – 5-я секция (подсекции 5.3 – 5.6);
- 8-й том – 6-я, 7-я, 8-я секции.

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 типоназваний 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 с 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 энергоучета 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 талантливые 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 приоритетные 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.



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 промышленные 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.

СЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель секции – Шарангович С.Н., проф.,
зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;
зам. председателя – Перин А.С., доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.*

ДИФРАКЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

*Г.И. Большанин, магистрант; И.К. Казак, Т.М. Кансейтов,
О.В. Крылевский, А.Ю. Яковлева, студенты каф. СВЧиКР
Научный руководитель А.Е. Мандель, проф. каф. СВЧиКР, д.т.н.
Томск, ТУСУР, MandelAE@svch.rk.tusur.ru
Проект ГПО СВЧиКР-1505 «Исследование периодических доменных
структур в электрооптических кристаллах»*

Формирование периодических доменных структур (ПДС) в сегнетоэлектрических кристаллах, предназначенных для спектральных преобразований и модуляции лазерного излучения, может сопровождаться присутствием вариаций размеров доменов, наличием случайных и периодических ошибок в положениях доменных границ и другими отклонениями от идеальной меандровой формы, ухудшающими их характеристики [1]. Эффективным неразрушающим методом определения параметров и контроля качества ПДС является дифракция света на такой структуре [2–4].

В настоящем сообщении представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований изотропной дифракции света на сформированной в кристалле ниобата лития методом электрической переполаризации ПДС со 180-градусными доменными стенками, параллельными кристаллографическим осям Z и Y .

При теоретическом рассмотрении возмущений компоненты тензора диэлектрической проницаемости кристалла $\Delta\epsilon_{22}(x)$ электрическими и упругими полями ПДС использовались результаты работы [2] и считалось, что две периодические системы стенок с поляризацией, изменяющейся вдоль координаты x с $-P_S$ на P_S и с P_S на $-P_S$, могут

иметь пространственный сдвиг, отличающийся от половины периода ПДС $\Lambda/2$ на некоторую величину $\pm\Delta x$. Другим отличием рассматриваемой ПДС от идеальной может быть большее значение электрической поляризации $P_{zV} = |P_s| + P_D$ в областях кристалла, не подвергнутых переполаризации, относительно ее величины $P_{zR} = -|P_s| + P_D$ в переполаризованных областях, связанным с наличием электрической поляризации P_D , создаваемой точечными дефектами в нестехиометрических кристаллах [5].

Анализ показывает, что картина изотропной дифракции света на такой идеальной структуре должна содержать дифракционные максимумы только четных порядков.

В экспериментах по исследованию изотропной дифракции света использовался образец с тремя ПДС, изготовленный в ООО ЛАБФЕР в монокристаллической пластине LiNbO_3 : 5% MgO методом переполаризации во внешнем электрическом поле. Период доменных структур имел значение $\Lambda = 9,43$ мкм, а их доменные стенки были перпендикулярными оси X кристалла и параллельными плоскости YZ . Световой пучок в экспериментах распространялся вдоль оси Z кристалла и был поляризован вдоль оси Y .

Как следует из приведенных в таблице экспериментальных данных, интенсивность дифракционных максимумов нечетных порядков отлична от нуля, что свидетельствует о неидеальности исследуемой ПДС. Характерно, что максимумы ± 1 -го порядка по интенсивности в 3 раза уступают максимумам ± 2 -го порядка, а интенсивности максимумов ± 7 -го порядка существенно превосходят таковые для дифракционных порядков с $m = \pm 4, \pm 5, \pm 6$ и ± 8 .

**Относительные интенсивности дифракционных максимумов
при изотропной дифракции**

m	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
I_m/I_0 , эксперимент	1	3,0 $\cdot 10^{-3}$	9,4 $\cdot 10^{-3}$	2,1 $\cdot 10^{-3}$	2,3 $\cdot 10^{-4}$	1,4 $\cdot 10^{-4}$	9 $\cdot 10^{-5}$	4,6 $\cdot 10^{-4}$	9 $\cdot 10^{-5}$	5,5 $\cdot 10^{-5}$
I_m/I_0 , расчет, $N_i = 19$	1	3,0 $\cdot 10^{-3}$	9,5 $\cdot 10^{-3}$	1,5 $\cdot 10^{-3}$	1,8 $\cdot 10^{-4}$	2,4 $\cdot 10^{-4}$	6,3 $\cdot 10^{-7}$	4,8 $\cdot 10^{-5}$	5,1 $\cdot 10^{-6}$	5,4 $\cdot 10^{-6}$

Проведенные численные расчеты показали, что характерной особенностью амплитуд светового поля в дифракционных порядках для рассматриваемой граничной задачи является наличие сильных осцилляций, пространственный период которых вдоль координаты z

уменьшается с ростом модуля поперечной составляющей волнового вектора $K_x = |m|(2\pi/\Lambda)$. В то же время размер рабочей области ПДС вдоль оси Z обычно не совпадает с толщиной пластины d , в которой она формируется электрической переполяризацией [2]. Поэтому при численном моделировании нами подбиралось значение эффективной длины взаимодействия d_{eff} , при котором расчетные значения относительной дифракционной эффективности I_m/I_0 в низших дифракционных порядках для максимального числа учитываемых собственных мод периодической структуры $N_i = 19$ удовлетворительно соответствовали экспериментальным данным.

Результаты численных расчетов относительной дифракционной эффективности I_m/I_0 для ПДС представлены в таблице для числа учитываемых собственных мод периодической структуры $N_i = 19$.

Сравнение результатов проведенных расчетов с экспериментальными данными показывает, что при учете 19 блоховских мод они количественно удовлетворительно согласуются для дифракционных порядков с номерами от $m = -4$ до $m = +4$. Качественно характер изменения интенсивности с ростом номера порядка дифракции, полученный в расчетах, в основном соответствует таковому для экспериментальных данных. Исключение составляют большие интенсивности в порядках с $m = \pm 5$ и $m = \pm 9$, по сравнению с интенсивностью в порядках с $m = \pm 4$ и $m = \pm 8$, соответственно, полученные из расчета. Наблюдаемые количественные различия в экспериментальных и расчетных данных могут быть связаны с неоднородностью исследуемой ПДС по координате z , аналогичной наблюдаемой ранее авторами [2] для ПДС с пространственным периодом $\Lambda = 6,89$ мкм, сформированной в пластине MgO:LiNbO_3 с толщиной $d = 1$ мм.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках госзадания на 2017 г. (проект № 3.8898.2017/БЧ) и РФФИ (проект № 16-29-14046)

ЛИТЕРАТУРА

1. Fejer M.M., Magel G.A., Jundt D.H., Byer R.L. // IEEE J. Quantum Electron. – 1992. – Vol. 28. – PP. 2631–2654.
2. Shandarov S.M., Mandel A.E., Smirnov S.V. et al. // Ferroelectrics. – 2016. – Vol. 496. – PP. 134–142.
3. Müller M., Soergel E., Buse K. et al. // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97, №4. – P. 044102.
4. Kösters M., Hartwig U., Woike T. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88. – P. 182910.
5. Gopalan V., Dierolf V., Scrymgeour D.A. // Annu. Rev. Mater. Res. – 2007. – Vol. 37. – PP. 449–489.

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА ПРИ ЗАСВЕТКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 532 НМ

Д.В. Ралко, А.А. Гуляева, Р.В. Мезенцев, студенты каф. ЭП

Томск, ТУСУР, dari-23@mail.ru

Проект ГПО ЭП-1203 «Исследование термоиндуцированных явлений в кристаллах силленитов»

Особенностью кристаллов титаната висмута ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) является сильный фотохромный эффект, заключающийся в обратимых изменениях в оптическом поглощении при экспозиции излучением из видимой области спектра [1].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований изменений в оптическом поглощении кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, регистрируемых как на длине волны $\lambda_e = 532$ нм, так и в спектральном диапазоне 430–1100 нм при его засветке непрерывным лазерным излучением с длиной волны 532 нм.

В экспериментах использовался образец кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ толщиной $d = 1,1$ мм. В ходе эксперимента образец подвергался засветке непрерывным лазерным излучением $\lambda_e = 532$ нм с интенсивностью света на входной грани кристалла ~ 20 мВт/см². Спектры оптического пропускания для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ регистрировались как до, так и непосредственно после облучения кристалла, а также в процессе темновой релаксации.

На рис. 1, *а* представлены экспериментальные спектральные зависимости коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ для спектрального диапазона 430–1100 нм, измеренные для исходного состояния кристалла (кривая 1), после его облучения непрерывным лазерным излучением (кривая 2) и на этапе релаксации (кривая 3). Получено, что облучение непрерывным лазерным излучением в течение 15 мин (экспозиция ~ 18 Дж/см²) приводит к увеличению оптического поглощения кристалла в спектральном диапазоне 430–900 нм (кривая 2, рис. 1, *а*).

На рис. 1, *б* показаны спектральные зависимости изменений в оптическом поглощении $\Delta\alpha(\lambda)$, полученные вычитанием экспериментальных данных для зависимостей 1 и 2 (кривая 1, рис. 1, *б*) и для зависимостей 1 и 3 (кривая 2, рис. 1, *б*). Максимальное увеличение оптического поглощения после облучения кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ наблюдается на длине волны 500 нм (кривая 1, рис. 1, *б*), а его величина $\Delta\alpha_m$ достигает значения $\sim 6,2$ см⁻¹ для исходного состояния $19,5$ см⁻¹ на этой длине волны. Величина наведенных изменений уменьшается при выдержке кристалла в темновых условиях при комнатной температуре

(кривая 2, рис. 1, б). Через 10 мин после облучения на длине волны 500 нм величина $\Delta\alpha_{m2}$ имеет значение $\sim 2,7 \text{ см}^{-1}$.

Экспериментальные данные по влиянию излучения с длиной волны 532 нм на спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ качественно согласуются с результатами исследования динамики оптического поглощения на данной длине волны. Динамика изменения коэффициента поглощения в процессе облучения кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ непрерывным лазерным излучением ($\lambda_e = 532 \text{ нм}$) в течение

времени 400 с (экспозиция 8 Дж/см^2) представлена на рис. 2. Сразу после засветки лазерным излучением наблюдается быстрый рост $\Delta\alpha$ в первые 20 с. За время $\sim 150 \text{ с}$ с момента начала облучения изменение в оптическом поглощении достигает максимальных значений $\Delta\alpha_{\text{есв}} \sim 7 \text{ см}^{-1}$ и далее не изменяется в процессе облучения лазерным излучением. После выключения лазерного излучения в момент времени $t = 400 \text{ с}$ наблюдается уменьшение изменения коэффициента поглощения до значения 5 см^{-1} в течение времени 100 с.

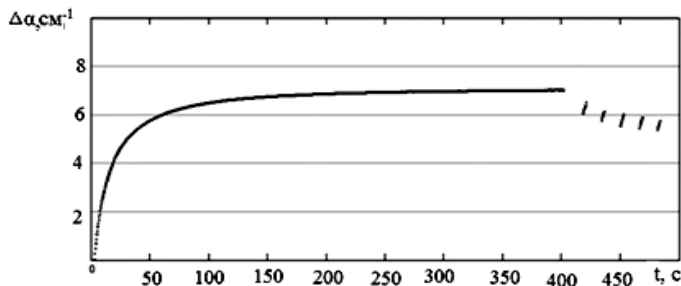


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента поглощения света в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при засветке лазерным излучением с длиной волны 532 нм и в процессе темновой релаксации

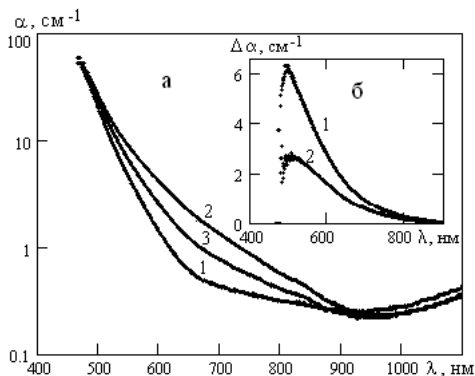


Рис. 1. Спектральные зависимости оптического поглощения (а): 1 – до облучения; 2 – после облучения непрерывным излучением ($\lambda_e = 532 \text{ нм}$); 3 – через 10 мин после засветки и его наведенных изменений (б) в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

При проведении экспериментов по динамике оптического поглощения на длине волны $\lambda_e = 532$ нм нами была обнаружена зависимость величины изменения коэффициента поглощения от ориентации кристалла относительно падающего на него лазерного излучения. За начальное было выбрано положение кристалла в держателе при проведении эксперимента по фотоиндуцированному поглощению. Кривая 1 на рис. 3 показывает изменение коэффициента поглощения кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ в начальном положении в процессе его облучения лазерным излучением ($\lambda_e = 532$ нм). В следующем эксперименте входная грань кристалла была повернута на угол 90° относительно оси луча лазера. Изменение коэффициента поглощения для этого положения образца демонстрирует кривая 2 на рис. 3. При положении входной грани кристалла под углом 45° относительно оси луча лазера величина изменения в оптическом поглощении меньше (кривая 3, рис. 3), чем $\Delta\alpha$ для двух перпендикулярных положений.

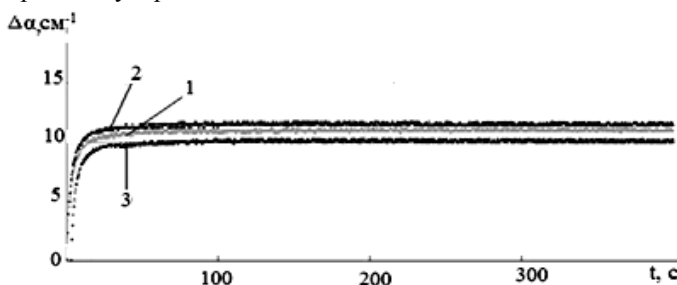


Рис. 3. Динамика изменения коэффициента поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при засветке лазерным излучением с длиной волны 532 нм при различных положениях образца

Таким образом, получено, что облучение кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ непрерывным лазерным излучением с длиной волны $\lambda_e = 532$ нм приводит к увеличению оптического поглощения кристалла в спектральном диапазоне 430–900 нм. Максимальное увеличение оптического поглощения наблюдается на длине волны 500 нм. В темновых условиях при комнатной температуре происходит релаксация коэффициента поглощения к исходному состоянию.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках госзадания на 2017 г. (проект № 3.8898.2017/БЧ) и РФФИ (проект №16-29-14046).

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю., Кистенева М.Г. и др. // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 11. – С. 1027–1032.

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ЗАПИСЫВАЮЩИХ ПУЧКОВ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

И.А. Викулина, К.О. Гусаченко, Д.И. Дудник, студенты;

А.О. Семкин, ассистент

Научный руководитель С.Н. Шарангович, зав. каф. СВЧМКР, к.ф.-м.н.

Томск, ТУСУР, каф. СВЧМКР, drinza10@gmail.com

*Проект ГПО СВЧМКР-1603 «Исследование волноводных фотонных
структур в фотополимерных жидкокристаллических структурах»*

В настоящее время интегральные оптические элементы на основе систем дифракционных решеток и волноводных каналов находят самое широкое применение. В связи с этим актуальным представляется поиск и исследование материалов, в которых возможно формирование подобных структур. Возможность голографического формирования электрически управляемой системы волноводных каналов с квази-прямоугольным профилем показателя преломления в композиционных фотополимерно-жидкокристаллических материалах была ранее теоретически обоснована в [1]. В основе разработанной модели лежит представление изменения показателя преломления материала в виде ряда Фурье по пространственным гармоникам и определение амплитуд этих гармоник.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния угла падения записывающих пучков на гармонический состав формируемой структуры в фотополимерных материалах (ФПМ).

Формирование голографических дифракционных структур (ГДС) производилось по симметричной схеме, методом импульсной записи [2] в образцах фотополимерной композиции, изготовленной в НИОХ СО РАН [3], двумя линейно поляризованными пучками гелий-неонового лазера (длина волны 633 нм, суммарная мощность пучков – 1 мВт, диаметр поперечного сечения ~2 мм). Экспериментальные образцы представляли собой тонкую (~70 мкм) пленку ФПМ, нанесенную на стеклянную подложку. После завершения процесса записи при падении лазерного излучения на ГДС на выходе наблюдалась картина дифракции с набором ярких максимумов излучения. Схема экспериментальной установки по записи и считыванию ГДС приведена на рис. 1.

Считывание ГДС производилось путем измерения величины фототока фотодиодов установки при падении на ГДС одного пучка излучения (см. рис. 1).

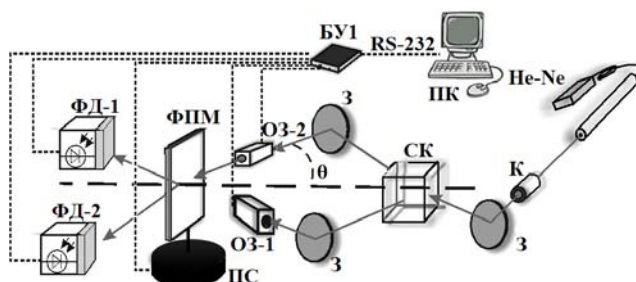


Рис. 1. Схема экспериментальной установки считывания ГДС с изменяющимся углом падения: He-Ne – лазер; К – коллиматор; З – зеркало; СК – светодетальный кубик; ОЗ-1,2 – оптические затворы; ПС – поворотный столик; ФПМ – экспериментальный образец; ФД-1,2 – фотодиоды; БУ-1 – блок управления; ПК – персональный компьютер

Для определения зависимости амплитуд первых двух гармоник показателя преломления от угла падения записывающих пучков были проведены измерения дифракционной эффективности (ДЭ) ГДС по формуле

$$\eta = \frac{I_d}{I_d + I_t} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где η – дифракционная эффективность; I_d – интенсивность дифрагировавшего пучка; I_t – интенсивность прошедшего пучка.

Для первой гармоники ГДС измерения проводились сразу после записи. Для второй гармоники путем вращения поворотного столика (ПС на рис. 1) устанавливался такой угол падения считывающего излучения, который соответствовал бы выполнению условий дифракции Брэгга на второй гармонике. Затем производились измерения фототока фотодиодов для соответствующих максимумов. Соотношение дифракционных эффективностей, полученных для дифракции на первой и второй гармониках одних и тех же структур, для разных углов падения записывающих пучков приведено на рис. 2, а.

Как видно из рис. 2, а, с увеличением угла падения записывающих пучков снижается интенсивность дифрагировавшего на второй гармонике пучка. Это связано с тем, что с увеличением угла падения уменьшается период структуры, что приводит к росту скорости диффузионных процессов и формированию структуры, близкой к гармонической [1, 2].

Дифракционная эффективность и величина изменения показателя преломления связаны известным выражением Когельника [4]:

$$\Delta n = \frac{\lambda \cos \theta}{\pi d} \cdot \arcsin(\sqrt{\eta}), \quad (2)$$

где θ – угол Брэгга; d – толщина образца.

Таким образом, из соотношения ДЭ для двух гармоник (см. рис. 2, *а*) можно рассчитать соотношение их амплитуд (см. рис. 2, *б*).

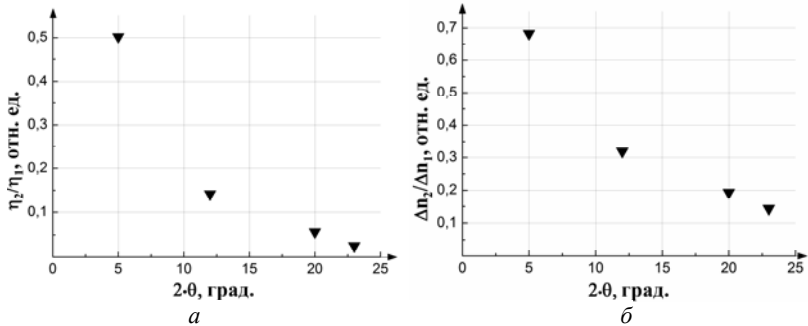


Рис. 2. Зависимость отношения: *а* – ДЭ второй гармоники к ДЭ первой гармоники и *б* – их амплитуд от угла падения записывающих пучков

В работе [1] показано, что именно увеличение амплитуд высших пространственных гармоник обуславливает квазипрямоугольный вид профиля показателя преломления структуры. Таким образом, в данной работе экспериментально показана возможность голографического формирования в ФПМ структур, которые потенциально могут быть использованы как система волноводных каналов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках госзадания на 2017 г. (проект № 3.1110.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Semkin A.O., Sharangovich S.N.* Theoretical model of controllable waveguide channels system holographic formation in photopolymer-liquid crystalline composition // *Physics Procedia*. – 2017. – Vol. 86. – P. 181–186.
2. *Довольнов Е.А., Миргород В.Г., Пен Е.Ф., Шарангович С.Н., Шелковников В.В.* Импульсная запись пропускающих и отражающих голографических дифракционных решеток в поглощающих фотополимерах. – Ч. 2: Численное моделирование и эксперимент // *Известия вузов. Физика*. – 2007. – Т. 53, №4. – С. 34–39.
3. *Пат. 2222038* Российская Федерация, Фотополимерная композиция для записи голограмм/Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН. – №2002100510/04; заявл. 08.01.02; опубл. 20.01.04.
4. *Kogelnik H.* Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // *The Bell System Technical Journal*. – 1969. – PP. 2909–2947.

**ДИНАМИКА ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
СВЕТА В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА,
ЛЕГИРОВАННОМ АЛЮМИНИЕМ, ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
ПАКЕТОМ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

***Т.Д. Токмашев, Д.В. Соколов, С.Г. Пашелов, студенты;
В.Г. Дю, аспирант каф. ЭП***

*Научный руководитель С.М. Шандаров, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.
Томск, ТУСУР, valeriya.dyu@gmail.com*

В работе [1] из исследований спектров оптического поглощения в нелегированном кристалле титаната висмута получено, что засветка лазерными импульсами на длине волны 532 нм приводит к увеличению поглощения в спектральном диапазоне 492–840 нм, а величина наведенных изменений растет с экспозицией, достигая насыщения при ее значении около 300 Дж/см².

В настоящей работе представлены результаты исследований динамики фотоиндуцированного поглощения, наблюдаемой в легированном алюминием кристалле титаната висмута (Bi₁₂TiO₂₀:Al) на фиксированной длине волны $\lambda_p = 655$ нм при воздействии на него излучением с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм с различной интенсивностью и с варьируемыми временными параметрами.

В экспериментах использовался кристалл Bi₁₂TiO₂₀:Al, выращенный TSSG-методом, имеющий полированные грани и толщину $d = 6,6$ мм вдоль кристаллографического направления [100]. Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения наводились в нем лазерными импульсами с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм (вторая гармоника лазера DTL-324QT) с длительностью 10 нс и частотой следования 1 кГц, а их число определялось выдержкой, устанавливаемой с помощью механического затвора фотокамеры ФЭД-3. Интенсивность импульсного излучения на входной грани кристалла составляла 190 мВт/см². Для регистрации изменений в наведенном поглощении использовались излучение непрерывного лазера с длиной волны $\lambda_p = 655$ нм с интенсивностью от 96 до 223 мВт/см² и pin-фотодиод BPW24R при напряжении обратного смещения 5,5 В, нагруженный на сопротивление $R_1 = 2,4$ кОм. Динамика изменений напряжения на данном сопротивлении фиксировалась электронным осциллографом Tektronix TDS 2012B.

Все эксперименты проводились при комнатной температуре в отсутствие внешнего освещения. Исследуемый образец содержался в светонепроницаемом боксе.

Временная эволюция изменения оптического поглощения на длине волны 655 нм во время и после воздействия индуцирующего импульсного излучения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ показана на рис. 1. Для исследуемого образца наблюдается рост фотоиндуцированного поглощения света за время воздействия излучением с $\lambda_i = 532$ нм, составляющее ~ 125 мс. Далее наблюдалась релаксация изменений в поглощении кристалла для излучения с длиной волны из красной области спектра. Из экспериментов было установлено, что значение интенсивности красного света, используемого для регистрации динамики, влияет на величину наведенных изменений в поглощении, а также на время их релаксации.

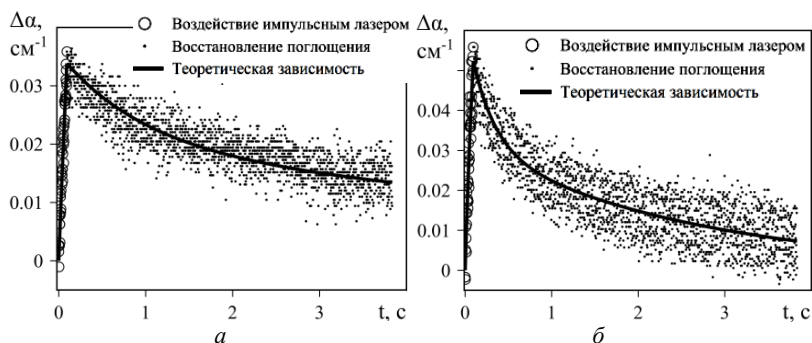


Рис. 1. Временные зависимости изменений коэффициента поглощения на длине волны 655 нм с интенсивностями 96 (а) и 223 мВт/см² (б), индуцированных в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ пакетом наносекундных лазерных импульсов на длине волны 532 нм, с его длительностью ~ 125 мс

Так, при интенсивности красного света 96 мВт/см² возвращение поглощения к начальному уровню после воздействия импульсного лазера в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ составило $t_r \sim 45$ с (см. рис. 1, а), а при интенсивности 223 мВт/см² – $t_r \sim 15$ с (см. рис. 1, б).

Для компьютерного моделирования динамики изменения оптического поглощения, индуцированных пакетами импульсов, была разработана методика численного анализа. Эволюция увеличения оптического поглощения при воздействии импульсным излучением из зеленой области в течение $t_p \sim 125$ мс может быть описана следующим уравнением:

$$\Delta\alpha_{ind}(t) = \Delta\alpha_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{rs}}\right) \right], \quad (1)$$

где $\Delta\alpha_0$ – изменение коэффициента поглощения до его насыщения; t – текущее время в течение длительности пакета фотоиндуцирующих импульсов; t_{rs} – постоянная времени, характеризующая скорость индуцированных изменений в оптическом поглощении.

Анализ показал, что процесс релаксации оптического поглощения к начальному значению может быть аппроксимирован следующей биэкспоненциальной зависимостью:

$$\Delta\alpha_{rel}(t) = \Delta\alpha_{ind}(t_p) \left[f \exp\left(-\frac{t}{t_{relf}}\right) + (1-f) \exp\left(-\frac{t}{t_{rels}}\right) \right], \quad (2)$$

где t – текущее время, отсчитываемое от t_p ; t_{relf} и t_{rels} – постоянные времени, характеризующие быструю и медленную составляющие релаксации поглощения к начальному значению, и $f < 1$ – коэффициент, характеризующий вклад быстрой составляющей в изменения оптического поглощения на этапе релаксации.

Подгонка под экспериментальные данные используемых теоретических зависимостей (1) и (2), представленных на рис. 1 сплошными кривыми, проводился с использованием метода наименьших квадратов. Полученные в ее результате параметры теоретической модели, описывающие динамику процессов фотоиндуцированного поглощения и его релаксации, представлены в таблице.

Параметры компьютерного моделирования

№	Интенсивность излучения с $\lambda_p = 655$ нм, мВт/см ²	$\Delta\alpha_0$, см ⁻¹	t_{rs} , с	f	t_{relf} , с	t_{rels} , с
1	96	0,21	0,53	0,41	0,94	9
2	223	0,12	0,17	0,41	0,26	2,6

Таким образом, получено, что при облучении кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}\text{:Al}$ импульсным излучением с длиной волны 532 нм наблюдается обратимое увеличение оптического поглощения на длине волны 655 нм. При этом величина наведенных изменений и время восстановления оптического поглощения зависят от интенсивности зондирующего излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по госзаданию на 2017–2019 гг. и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю., Кистенева М.Г. и др. Спектральная зависимость фотоиндуцированного поглощения, наведенного в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ импульсным излучением с длиной волны 532 нм // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, №11. – С. 1027–1032.

ПОЛУЧЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ВЫСОКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ KTiOPO_4 МЕТОДОМ ПОСЛЕРОСТОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

М.В. Чуманов, аспирант;

А.Р. Гнатышин, Е.В. Ефимова, магистранты

Научные руководители: Л.Я. Серебренников, доцент каф. ЭП, к.т.н.;

А.Е. Мандель, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.

Томск, ТУСУР, каф. ЭП, silver.47@mail.ru, mandelae@svch.tusur.ru

Целью работы является получение регулярных доменных структур в высокоомных кристаллах KTiOPO_4 методом послеростового электрического воздействия.

В настоящее время области применения волоконных лазеров постоянно расширяются, что зачастую приводит к частичному вытеснению твердотельных и газовых лазеров. Однако волоконные лазеры в большинстве своем являются непрерывными, что затрудняет с этими лазерами эффективно использовать нелинейно-оптические устройства, основанные на монодоменных кристаллах. К таким устройствам можно отнести параметрические генераторы света, устройства для генерации на суммарной частоте, устройства для генерации на разностной частоте, устройства для генерации второй, третьей, четвертой и т.д. гармоник. Это дало толчок развитию исследований нелинейно-оптических устройств, основанных на кристаллах с регулярными доменными структурами. Такие устройства обладают более высокими эффективностями преобразования частоты лазерного излучения при малых мгновенных мощностях излучения [1].

Одним из перспективных материалов для разработки нелинейно-оптических устройств с регулярными доменными структурами является высокоомный кристалл KTiOPO_4 (КТР), выращиваемый по технологии ООО «Кристалл Т».

На основе кристалла КТР можно производить электрооптические затворы, устройства для генерации второй гармоники и разработаны акустооптические модуляторы.

Кристаллические образцы, на которых проводились эксперименты, представляли собой пластины, вырезанные из монодоменного кристалла КТР толщиной от 1,1 до 1,7 мм вдоль кристаллографической оси z . На одной из граней z -среза методом лазерной гравировки сформирована система эквидистантно расположенных электродов штыревого типа, на противоположной грани – сплошной электрод. Геометрия кристаллического образца показана на рис. 1.

Для контроля изменений доменной структуры кристаллического образца собрана экспериментальная установка, представленная на

рис. 2. Альтернативным способом наблюдения за внутренней структурой образца является замена транспаранта на поляризатор. На рис. 3 представлены изображения, полученные двумя методами: изображение *а* – с помощью поляризатора, *б* – теневым методом при использовании пространственного фильтра.

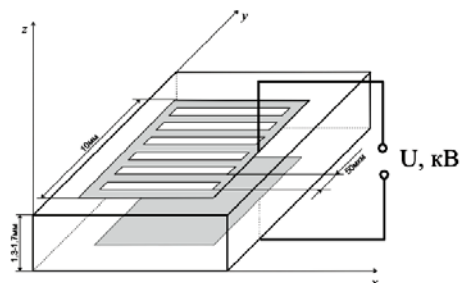


Рис. 1. Схема нанесения электродов на кристаллический образец

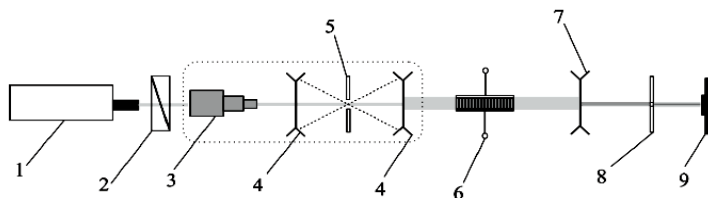
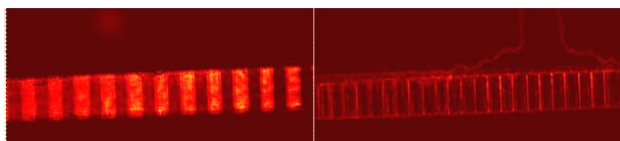


Рис. 2. Оптическая схема для контроля доменной структуры образца: 1 – неоновый лазер на длине волны 632,8 нм; 2 – поляризатор; 3 – коллиматор; 4 – две положительные линзы; 5 – диафрагма; 6 – кристаллический образец; 7 – положительная линза; 8 – транспарант; 9 – измерительная камера



а

б

Рис. 3. Изображения, полученные двумя способами

Экспериментальным путем были получены параметры высокого напряжения, при которых происходила запись РДС. Стирание РДС происходило подачей напряжения обратной полярности относительно записи. Параметры импульсов высокого напряжения при этом не менялись. Изменения изображения доменной структуры в процессе записи и стирания показаны на рис. 4.

В ходе эксперимента была установлена зависимость скорости записи РДС от фронта импульса высокого напряжения. На рис. 5 приве-

дены осциллограммы падения напряжения на балластном сопротивлении в процессе записи.

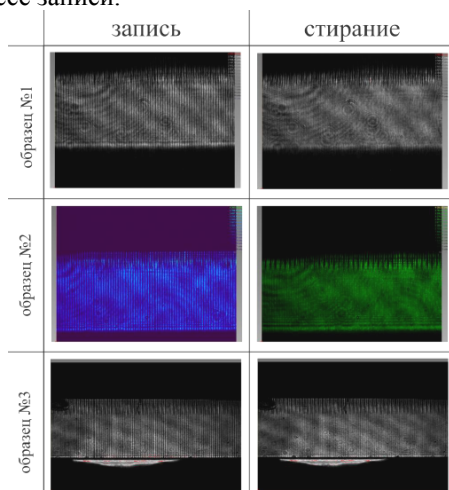


Рис. 4. Результат записи и стирания регулярной доменной структуры

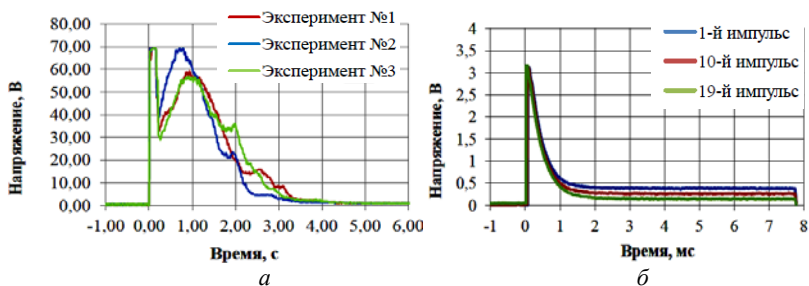


Рис. 5. Осциллограмма падения напряжения на балластном сопротивлении:
 a – фронт импульса 500 мкс; b – фронт импульса 20 нс

Полученные диаграммы показывают, что при увеличении длительности фронта импульса уменьшается скорость записи. В случае если его значение составляет 20 нс, запись происходит за время, не превышающее 2 мс. При достижении фронта 500 мкс время записи увеличивается до 2–3 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamada M., Nada N., Saitoh M., Watanabe K. // Appl. Phys. Lett. – 1993. – 435 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

А.В. Макеев, аспирант каф. наносистем и оптотехники

Научный руководитель В.С. Айрапетян, зав. каф. СУуТ, д.т.н.
Новосибирск, СГУуТ makeeffsan@yandex.ru, v.s.ayrapetyan@sgga.ru

Повышение качества выпускаемой продукции является одной из наиболее актуальных задач современной промышленности. Срок службы изделия, безотказность его работы напрямую зависят от состояния микрорельефа поверхностного слоя. Поэтому применение высокоэффективных методов для контроля состояния поверхностных слоев деталей предоставляет большие резервы для повышения качества выпускаемой продукции. Методы контроля состояния поверхностного слоя деталей должны обеспечивать высокую точность и локальность получаемых в процессе измерения результатов.

Таким образом задачами настоящей работы являются: провести сравнительный анализ основных методов бесконтактного контроля шероховатости поверхности, представить спекл-эллипсометрический метод анализа микрорельефа поверхности с компьютерной обработкой результатов, на основе вейвлет-анализа.

Сравнение основных характеристик приборов, работающих по бесконтактному методу представлено в таблице [1].

**Сравнение основных характеристик бесконтактных методов
измерения шероховатости поверхности**

№	Метод	Диапазон измеряемых высот микронеровностей	Цифровая обработка результатов	Сложность	Стоимость
1	Сравнительный бесконтактный	$R_a > 1,25$ мкм и $R_z > 10$ мкм	Нет	Низкая	Низкая
2	Метод светового сечения	От 0,8 до 62,5 мкм	Нет	Сравнительно низкая	Высокая
3	Эллипсометрия	От 0,3 до 57,9 нм	Да	Высокая	Высокая
4	Растровая электронная микроскопия	До 0,4 нм	Да	Очень высокая	Очень высокая
5	Атомно-силовая микроскопия	От десятков ангстрем, до атомарного	Да	Очень высокая	Очень высокая
6	Интерферометрический	До 19 нм	Да	Высокая	Высокая

Среди бесконтактных методов исследования свойств поверхности особое место занимает метод лазерной эллипсометрии [2]. Как видно из таблицы, возможности методов эллипсометрии позволяют измерять большой диапазон высот микронеровностей.

Для исследования шероховатости поверхности хорошо подходит сравнительно новый метод спекл-эллипсо-метрии [3]. Суть данного метода заключается в возникновении зернистой картины при освещении поверхности со случайным неоднородным рельефом когерентным источником излучения, несущей информацию о величине рассеивающих излучение микронеровностей.

В ходе проведения экспериментальных исследований на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М-1 ($\lambda = 0,6328$ мкм) была произведена регистрация спекл-картины металлической поверхности с $R_z \leq 0,063$ мкм и спекл-картины части поверхности с дефектом (царапина) при угле падения лазерного пучка 68° (рис. 1).

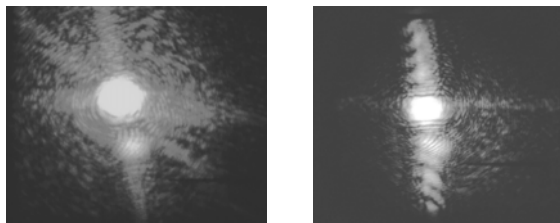


Рис. 1. Спекл-картины металлической поверхности с $R_z \leq 0,063$ мкм

Данный метод обладает всеми достоинствами бесконтактных методов контроля шероховатости поверхности, позволяет осуществлять контроль *in situ*. Однако среди недостатков данного метода можно выделить отсутствие методов анализа, позволяющих обеспечить высокоточное выделение и локализацию спекл-структур. Для решения этой задачи использован метод вейвлет-анализа. В качестве материнского вейвлета выбран вейвлет Мейра, имеющий следующий вид:

$$\psi(t) = 2 \int_0^{\infty} \sin[\Omega(v)] \cos\left[2\pi\left(t - \frac{1}{2}\right)v\right] dv, \quad (1)$$

где $\Omega(v)$ – четная, симметричная при $v = 1/2$ функция [4].

На рис. 2 представлен результат детализации спекл-структур с помощью вейвлет-преобразования в среде MATLAB.

Как видно из рис. 2, данный метод обеспечивает достаточно хорошую пространственно-координатную локализацию спекл-структур, что может позволить расширить возможности спекл-эллипсометрического метода контроля шероховатости поверхности.

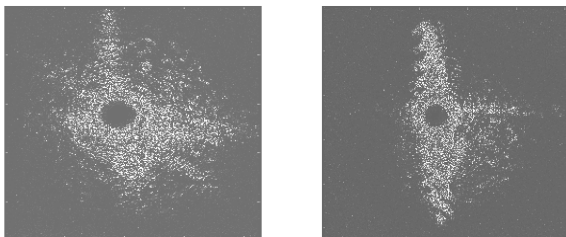


Рис. 2. Детализация спекл-структур в среде MATLAB

Таким образом, в ходе выполнения данной работы произведен сравнительный анализ основных методов бесконтактного измерения шероховатости поверхности, экспериментально получены спекл-картины с металлической поверхности. Произведена обработка спекл-картин, с использованием двумерного вейвлет-преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Макеев А.В., Айрапетян В.С.* Анализ современных методов исследования шероховатости поверхности деталей // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – Новосибирск: Наука, 1978. – С. 338–343.
2. *Скалецкая И.Е.* Введение в прикладную эллипсометрию: учеб. пособие по курсу «Оптические измерения». – Ч. 2: Свойства решений ОУЭ для однородных слоёв. – СПб.: СПбГУИТМО, 2007. – С. 43–45.
3. *Меркушева А.В.* Классы преобразований нестационарного сигнала в информационно-измерительных системах. – III: Время-масштабные (вейвлет) преобразования для спектрально-временного анализа // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12, № 3. – С. 68–82.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МНОГОМОДОВЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ

Д. Окунев, студент

*Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.
Томск, ТУСУР, okunev.dv@yandex.ru*

Передача изображений через волоконные световоды используется в многоволоконных медицинских и технических эндоскопах, применяется в различных областях медицинского и оптического приборостроения [1, 2].

Целью данной работы является исследование возможности передачи излучения светодиодов и лазеров через полимерные оптические волокна, характеризующиеся сравнительно большим диаметром сердцевины.

В экспериментах использовалось излучение «синего» светодиода ARL2-5213UBC 5-8Cd со средней длиной волны 465 нм и «зеленого» светодиода L-1513GC со средней длиной волны 568 нм.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Излучение через диафрагму поступает на линзу L_1 таким образом, чтобы получить параллельный пучок света. Этот пучок фокусируется линзой L_2 для ввода в полимерное многоволоковое оптическое волокно с диаметром сердцевины $d \sim 1$ мм. Излучение с выходного торца волокна попадает на фотодиод или проецируется на экран.

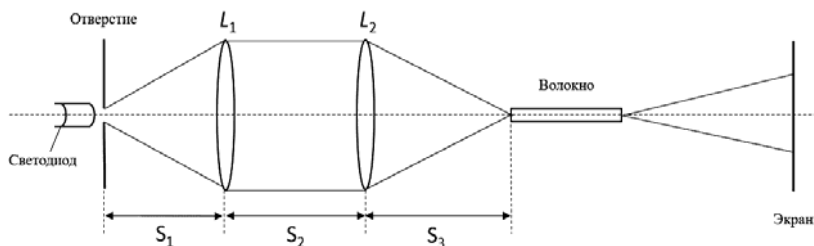


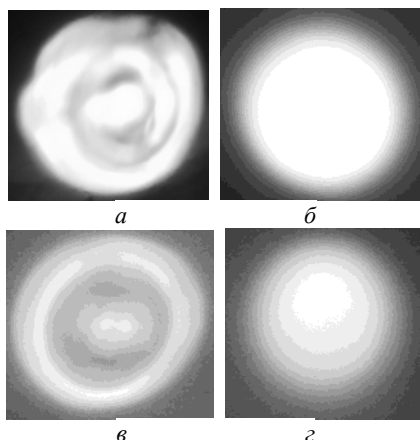
Рис. 1. Схема экспериментальной установки: L_1 и L_2 – фокусирующие линзы; S_1 – расстояние от отверстия до линзы L_1 ; S_2 – расстояние от линзы L_1 до L_2 ; S_3 – расстояние от линзы L_2 до волокна

Изображения поля излучения светодиодов на экране, полученные при прямом попадании на экран, сравниваются со случаем, когда свет проходит через волокно.

Полученные фотографии представлены на рис. 2.

Рис. 2. Фотографии изображений светодиода:

- a – синего светодиода;
- b – синего светодиода через волокно;
- $в$ – зеленого светодиода;
- $г$ – зеленого светодиода через волокно



Можно видеть, что после прохождения света через оптическое волокно распределение интенсивности его поля становится близким к интенсивности гауссова пучка, а изображение деталей конструкции светодиодов исчезают.

Оптические потери, связанные с прохождением излучения через волокно, являются допустимыми. Величины фототока, соответствующие прямому попаданию излучения на фотодиод и прохождению света через световод, для двух образцов светодиодов приведены в таблице.

Мощность излучения светодиодов

Светодиод	P_c , мкА	$P_{в}$, мкА	$P_c/P_{в}$, раз
Синий	77	36	2,13
Зеленый	5	1,92	2,604

Для выявления влияния степени когерентности излучения на возможность передачи изображений по оптическому волокну экспериментально изучено прохождение излучения лазера (длина волны света 532 нм), пространственная структура которого модулировалась амплитудными транспарантами через полимерные оптические волокна разной длины. В этом случае лазерный пучок с диаметром $\sim 0,7$ мм, прошедший через амплитудный транспарант, прямо вводился в оптическое волокно. Установлено, что пространственная структура светового поля существенно искажается уже при длине волокна около 90 мм, а для световодов с длиной более 20 см распределение интенсивности света на выходе волокна также хорошо соответствует функции Гаусса, что согласуется с известными экспериментальными результатами [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – М.: Высшая школа 1978. – 384 с.
3. Бобринев В.И., Сон Дж.Я., Чон Х.В. Прямая передача изображений по оптическому волокну с использованием спектрального кодирования изображений // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 22, № 10. – С. 1034–1036.

ЦИФРОВОЙ МИКРОСКОП НА БАЗЕ WEB-КАМЕРЫ

**А.И. Погар, Г.А. Зенков, Г.К. Килин, М.О. Ковалевский,
М.Е. Губарь, студенты каф. ЭАФУ**

*Научный руководитель Н.В. Ливенцова, доцент каф. ЭАФУ, к.т.н.
Томск, НИТПУ, liventsovanina@tpu.ru*

С помощью цифровых микроскопов можно не только проводить наблюдения, но и получать фото- и видеоматериалы исследований, что облегчает процесс исследования, регистрации и визуализации результатов. Целью работы является создание цифрового микроскопа, в

основе работы которого используется web-камера, отличающаяся от имеющихся на рынке достаточной точностью и низкой стоимостью для собственных исследований и проведения лабораторных работ в школе. Для использования web-камеры A4Tech PK-750MJ в устройстве микроскопа был разобран корпус и извлечена линза, затем изменено направление линзы в обратную сторону, в результате чего уменьшается угол ее обзора и увеличивается приближение проецирующего изображения [1]. Далее собранный корпус web-камеры закрепляется на гайку со шпилькой, что позволяет регулировать высоту веб-камеры относительно приборного столика и фокусное расстояние до приборного стекла. Вся конструкция, представленная на рис. 1, закреплена на подставку, изготовленную из древесины.



Рис. 1. Изготовленный микроскоп

Цифровой микроскоп на базе web-камеры дешевле своего аналога по увеличению среди не слишком дорогих микроскопов.

Экспериментальные снимки, полученные с помощью нашего микроскопа, представлены на рис. 2.

Для усовершенствования конструкции было решено использовать шаговой 4-фазный двигатель, использующий внешнее питание от батарейки типа «Крона». Шаговой двигатель подключается к оси подъемного механизма, и его применение достигается путем использования программного обеспечения Arduino [2] (рис. 3).

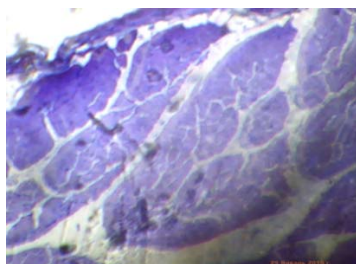


Рис. 2. Голова мухи-дрозофилы и мышечные волокна

Данное устройство позволяет получить качественные снимки при увеличении в 200 раз и может использоваться для проведения лабораторных работ в школах.

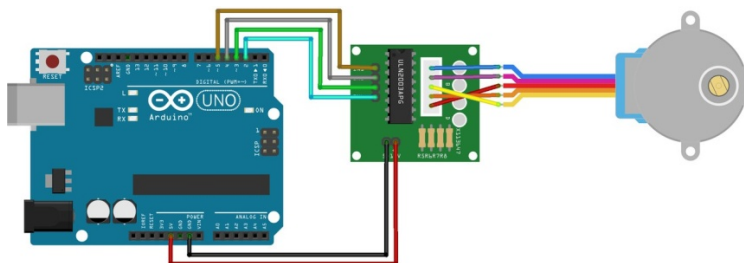


Рис. 3. Схема подключения шагового двигателя

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – М., 1984.

2. Шаговый 4-фазный двигатель [Электронный курс]. – Режим доступа: <http://arduino-kit.ru/catalog/id/shagovyy-4-h-faznyiy-dvigatel-5v-s-platoy-upravleniya-uln2003>, свободный. – Загл. с экрана.

ОПТИЧЕСКОЕ ИНДУЦИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР С БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ ПРОФИЛЕМ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ

П.К. Сафронова, А.А. Саркыт, студенты

*Научный руководитель В.М. Шандаров, проф. каф. СВЧиКР, д.ф.-м.н.
Томск, ТУСУР, <mailto:safkonik@sibmail.com>*

Лазерные пучки широко используются как инструмент для исследования в разных отраслях: в медицине, биомедицинской оптике, прецизионной химии, фармакологии, нелинейной оптике и лазерной физике. Проходя через вещество, свет может изменять его свойства. В результате прозрачные среды становятся непрозрачными и наоборот, показатель преломления прозрачных сред может изменяться. В технике лазеры используются в световодных линиях связи, в системах записи и считывания информации, в системах наведения артиллерийского и стрелкового оружия.

Однако дифракция приводит к ограничению области светового поля с почти неизменной интенсивностью. Поэтому «бездифракционные», практически не расходящиеся световые пучки открывают новые пути развития технологий, требующих высокой интенсивности света или сохранения формы пучка на достаточно больших длинах пути [1]. К подобным «бездифракционным» полям относятся пучки Эйри, Бесселя и некоторые другие.

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. С помощью экспериментальных исследований ранее было подтверждено, что световые поля с бесселеподобными профилями обладают высокой продольной однородностью и концентрацией основной доли волнового поля в центральной части.

Целью данной работы является формирование одномерных и двумерных фотонных структур с бесселеподобным профилем путем преобразования гауссовых лазерных пучков оптическими схемами с амплитудными транспарантами в кристалле лития, легированном по объему фоторефрактивными примесями.

Сформированные бесселеподобные одномерные и двумерные пучки использованы для оптического индуцирования фазовых дифракционных структур в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Размеры пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ составляют $10 \times 2 \times 15 \text{ мм}^3$ по осям X , Y и Z . В процессе выращивания кристалл легирован медью. В режиме формирования фотонных структур кристаллический образец экспонировался бесселеподобными световыми полями, длина волны света при этом составляла 532 нм. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В данном случае световое поле, формирующее ФР в кристалле, представляет собой результат интерференции двух узких световых пучков. Используемый транспарант образован парой одинаковых прямоугольных щелей, ширина которых составляла 0,2 мм, а расстояние между центрами щелей варьировалось от 0,3 до 0,5 мм. Транспарант располагается в передней фокальной плоскости цилиндрической линзы ($F = 19 \text{ см}$), а кристаллический образец размещается в области ее задней фокальной плоскости. Процесс формирования ФР контролируется с помощью ПЗС-видеокамеры [6].

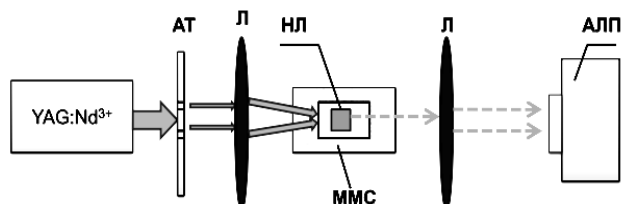


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: YAG:Nd^{3+} – твердотельный лазер с $\lambda = 532 \text{ нм}$; АТ – амплитудный транспарант; Л – фокусирующая линза; ММС – микрометрический столик; НЛ – образец LiNbO_3 ; Л – фокусирующая линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

При исследовании созданных фотонных структур изучались картины дифракции на них гауссовых световых пучков в ближней (на выходной поверхности кристалла) и дальней (в фокальной плоскости фокусирующей линзы) зонах дифракции.

Картины на рис. 2, *а* и *б* иллюстрируют световое поле одномерного бесселеподобного пучка (без кристалла) и профиль его интенсивности с периодами 120 и 180 мкм соответственно. Красная кривая соответствует теоретическому распределению, черным цветом отражены эксперименты. Рисунки 2, *в* и *г* демонстрируют ближнюю зону дифракции лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм) на одномерной фазовой решетке вдоль оси кристалла Z с пространственным периодом 180 мкм в пластине $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Оптическая мощность и время записи решетки соответственно 1 мВт, 1 и 2 мин.

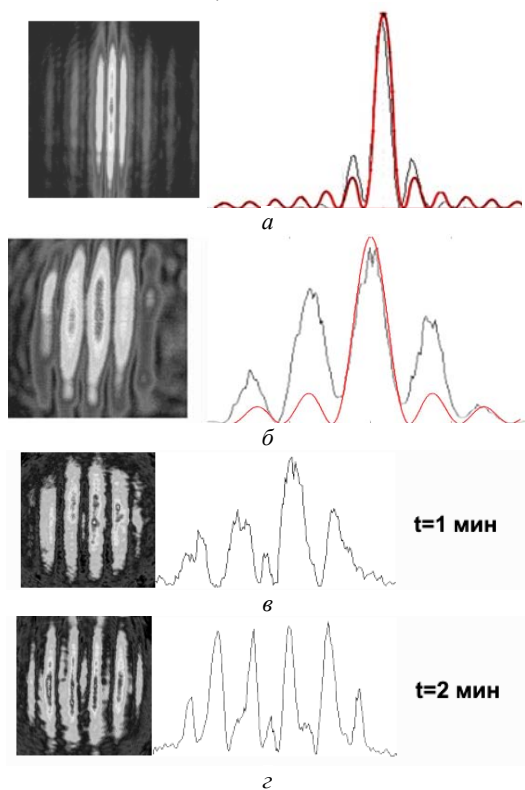


Рис. 2. Картины светового поля и профили его интенсивности на выходной грани пластины LiNbO_3 по оси Z при разном времени экспонирования. Толщина пластины 2 мм

Как можно наблюдать, в начальный момент времени распределение интенсивности на выходной поверхности кристалла сохраняется. Зависимость изменения показателя преломления от времени экспонирования имеет насыщенный характер, и структура поля в области больших времен заметно видоизменяется.

Таким образом, экспериментально продемонстрировано создание фотонных дифракционных и волноводных структур в объеме фото-рефрактивного кристалла с помощью световых полей с бесселеподобными профилями, полученных путем преобразования лазерных гауссовых пучков амплитудными транспарантами. Оптически индуцированные фазовые структуры могут сохраняться в ниобате лития в течение месяцев, но при необходимости другой их топологии могут «перезаписываться» путем повторного экспонирования световым полем. Высокая монохроматичность пучка позволяет разрабатывать голографические методы построения объемных и цветных изображений.

Актуальность исследования непосредственно связана с разработкой оптических систем записи, хранения и обработки информации на основе фоточувствительных материалов (в частности, ниобата лития), что связано с перспективами создания полностью оптических комплексов обработки данных и других вопросов в области телекоммуникационных технологий.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (задание № 3.1110.2017/ПЧ).

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.: Высшая школа, 1978. – 384 с.
4. Georgios A.S., Christodoulides D.N. Accelerating finite energy Airy beams // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32. – PP. 979–981.
5. Christodoulides D.N., Lederer F., Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices // Nature. – 2003. – Vol. 424. – PP. 817–823.
6. Inyushov A., Safronova P., Trushnikov I., Shandarov V. Formation of Photonic Structures in a Bulk of Lithium Niobate by Bessel-like Optical Beams // Proceedings of International Conference ICONO/LAT-2016, ICONO/LAT 2016 Technical Digest (Electronic version), IThM42, 2 p. (Minsk, Belarussia, September 26–30, 2016).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАПУСКА ОЭС КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВС

Р.Д. Юнусов, Е.О. Прокопенко, С.В. Колчин, студенты;

М.П. Бороненко, доцент каф. ФОТД, к.т.н.

Научный руководитель П.Ю. Гуляев, проф. каф. ФОТД, д.т.н.

Ханты-Мансийск, ЮГУ, m_boronenko@ugrasu.ru

Исследование быстропротекающих процессов обычно сопряжено с необходимостью синхронизации включения/выключения регистрирующей аппаратуры и начала регистрируемого процесса. С появлением на рынке микроконтроллеров Arduino [1–3] значительно облегчило выполнение данной задачи как в экономическом, так и исполнительном плане. Язык Arduino достаточно прост в освоении и имеет большую библиотеку готовых примеров. Разработка оптоэлектронной системы контроля теплофизических параметров высокотемпературных быстропротекающих процессов включает в себя этап синхронизации контрольно-измерительной аппаратуры. В работе представлены первые результаты по решению задач синхронизации моментов начала процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и старта видеозаписи.

Приборы и техника эксперимента. Для измерений использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

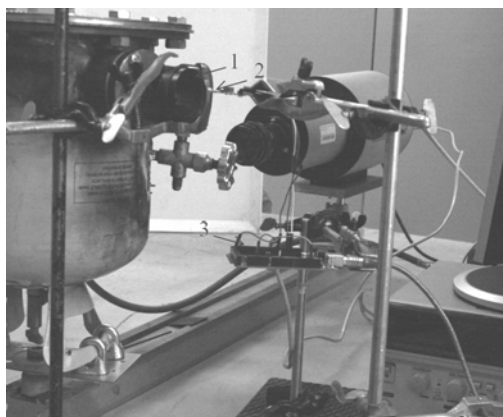


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – объектив; 2 – фоторезистор; 3 – микроконтроллер Arduino

Для автоматического запуска видеосъемки использовалась аппаратная синхронизация по сигналу уровня TTL от Arduino, подключае-

мого к камере через разъем внешней синхронизации. В данном случае внешним сигналом к пуску являлся низкий уровень сопротивления фоторезистора. На светочувствительную поверхность фоторезистора через объектив проецировалось изображение выбранной области шихты. Минимизация размеров проецируемой области достигалась закрытием диафрагмы. Начало процесса горения сопровождается увеличением освещенности светочувствительной области фоторезистора, тем самым инициируется автоматический запуск видеосъемки.

Скетч для автоматического запуска видеосъемки приведен ниже:

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <AltSoftSerial.h>
AltSoftSerial altser;
const int mybaud = 9600;
#include <SoftwareSerial.h>
// software serial #1: TX = digital pin 18, RX = digital pin 50
SoftwareSerial portOne(18, 50);
byte sentbyte;
unsigned long prevmillis;
byte testbyte=0xF0;
unsigned int senseValue = 1; // цифровое значение фоторезистора
int Val = 1; // переменная для хранения значения входного напряжения
int sensePin = A0;
void setup()
{
  pinMode(A0, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) ; // wait for Arduino Serial Monitor
  Serial1.begin(mybaud); // connect a wire from TX
  altser.begin(mybaud); // to AltSoftSerial RX
  Serial.println(«AltSoftSerial Receive Test»);
}
void loop() {
  senseValue = digitalRead(sensePin); // считываем значение с фоторезистора
  if (digitalRead(sensePin) == LOW)
    Serial1.write(sentbyte);
}
```

Прекращение записи видеофайла осуществляется программно по окончании ввода необходимого количества кадров. Количество регистрируемых кадров ограничено максимально возможным числом путем введения в диалоговое окно необходимого количества кадров, после регистрации которых съемка прекращается.

Выводы. Применение скетча на практике позволило провести запуск видеокамеры одновременно с началом процесса СВС. Таким образом, автоматизация запуска и остановка оптоэлектронной системы позволяет не только синхронизировать моменты запуска видеокамеры и начала исследуемого процесса, но и выбрать область на поверхности шихты, по которой можно осуществить пространственную при-

вязку к изображениям, получаемым второй камерой. Однако иногда при небольших перепадах напряжения в сети случаются ложные запуски видеокамеры. Решить создавшуюся проблему можно попробовать путем стабилизации питания контроллера и устранения наводок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kazakova S.V. et al.* A clone of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* among professional football players // *New England Journal of Medicine*. – 2005. – Т. 352, № 5. – PP. 468–475.
2. *Olsen E.A. et al.* Phase IIb multicenter trial of vorinostat in patients with persistent, progressive, or treatment refractory cutaneous T-cell lymphoma // *Journal of Clinical Oncology*. – 2007. – Т. 25, № 21. – PP. 3109–3115.
3. *Mangoni A.A., Jackson S.H.D.* Agerelated changes in pharmacokinetics and pharmacodynamics: basic principles and practical applications // *British journal of clinical pharmacology*. – 2004. – Т. 57, № 1. – PP. 6–14.

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель секции – Заболоцкий А.М., доцент каф. ТУ, к.т.н.;
зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

КОНСТРУКЦИЯ СЕМИКАСКАДНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА БЕЗ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

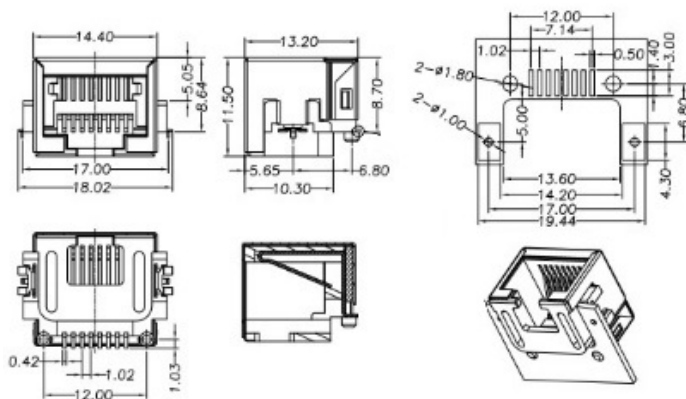
*Я.В. Балахнина, магистрант каф. ТУ
Томск, ТУСУР, balakhnina_yana@bk.ru*

С развитием и широким распространением электронных устройств различного назначения все острее становится необходимость обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). Опасным воздействием представляется мощный сверхкороткий импульс (СКИ) [1], проникающий в устройства и способный вывести их из строя. Для защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от мощного СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод [2]. Устройство, работающее по принципу модальной фильтрации и обеспечивающее защиту критичной аппаратуры от мощного СКИ, называют модальным фильтром (МФ) [3].

Известно семикаскадное устройство защиты порта Ethernet 100 Base-T от опасных импульсных сигналов, состоящее из трех в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников на диэлектрической подложке [3]. Однако изготовление его печатной платы (ПП) требует сверловки и металлизации отверстий, что удорожает производство ПП. Поэтому целесообразна разработка новой конструкции МФ без указанных недостатков. Цель данной работы – представить результаты такой разработки.

При разработке целесообразно использовать конструкцию безрезистивного МФ с холостым ходом в начале и конце пассивных проводников [3]. В данной конструкции исключены процедуры сверления и металлизаций в самом МФ. Однако использованы штыревые соединители 8P8C, требующие сверления и металлизации отверстий. Поэтому необходимо проработать возможность использования соединителей 8P8C для поверхностного монтажа, не требующих отверстий

Чертеж соединителя, который был выбран для реализации данной конструкции, представлен на рис. 1. В программе Altium Designer выполнено построение семикаскадного МФ и посадочных мест соединителей 8P8C в частности.



Параметры данной структуры приняты следующими: ширина проводников 0,3 мм, толщина проводников 0,1 мм, расстояние между первым и третьим проводниками 0,4 мм, проводники имеют длину 2 м и свернуты в меандр с длиной одного витка 20 мм, расстояние между витками в меандре 0,4 мм. ПП изготовлена из стеклотекстолита толщиной 0,3 мм, третий проводник имеет шесть разрывов, при этом его длина до первого разрыва равна 877 мм, длина между первым и вто-

рым разрывами равна 591 мм, вторым и третьим – 306 мм, третьим и четвертым – 143 мм, четвертым и пятым – 61 мм, пятым и шестым – 40 мм. В начале и конце структур на обратных сторонах ПП установлены два экранированных планарных соединителя 8P8C для поверхностного монтажа. Посадочные места входного и выходного соединителей на слоях ПП Bottom и Top представлены на рис. 2. На рис. 3 показана ПП МФ.

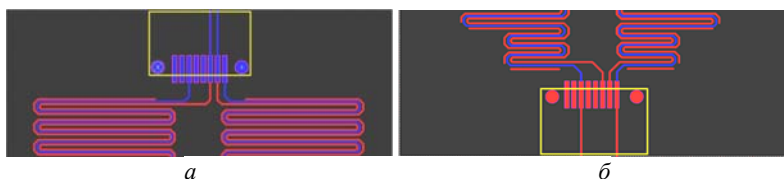


Рис. 2. Посадочное место соединителя 8P8C на входе (а) и выходе (б) ПП

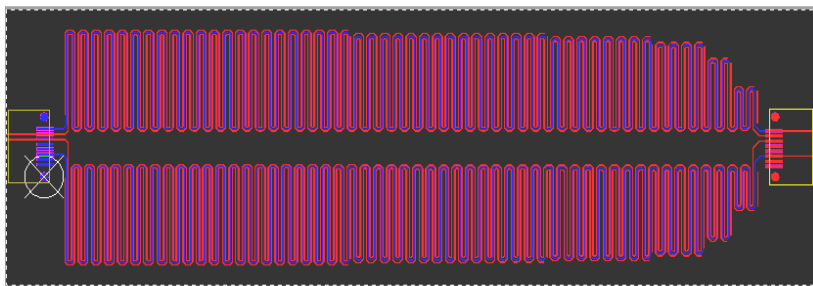


Рис. 3. Конструкция ПП МФ без сквозных отверстий

Таким образом, представлена конструкция ПП семикаскадного МФ без металлизированных сквозных отверстий с соединителями 8P8C для поверхностного монтажа. Данная конструкция является экономичной, поскольку не требует сверловки и металлизации отверстий. В дальнейшем планируется экспериментальная реализация конструкции печатной платы и оценка экономии. Также будут рассмотрены другие варианты с соединителем 8P8C для поверхностного монтажа без использования сквозных металлизированных отверстий, в частности, будут рассмотрены варианты с полигонами корпусной земли, соединяющими экраны входного и выходного соединителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – Note 41. – 8 July 2014.

2. *Самотин И.Е., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.* Кабельные и полосковые модальные фильтры. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 208 с.

3. *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 управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОКАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ: ОБЗОР

***Е.В. Бебякина, магистрант; А.В. Бусыгина, аспирант каф. ТУ
Томск, ТУСУР, fskatya@gmail.com***

Обеспечение устойчивой работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в условиях воздействия электромагнитных помех актуально в связи с интеграцией компонентов, ростом плотности монтажа печатных плат и повышения быстродействия цифровых схем и рабочих частот аналоговых схем. Такая тенденция увеличивает восприимчивость к электромагнитному полю (ЭМП) и предъявляет всё более жёсткие требования к электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА. Нарушение работы таких устройств, как электрокардиостимулятор (ЭКС), может привести к серьёзным последствиям. На сегодняшний день существует ряд исследований, посвященных изучению воздействия ЭМП от различных источников на ЭКС.

Целью данной статьи является составление обзора существующих результатов исследований в области ЭМС ЭКС и методов защиты ЭКС от ЭМП.

Для анализа воздействия ЭМП на ЭКС используют аналитические модели и математический анализ. С помощью таких методов проведено детальное исследование влияния внешних AM, GSM, PAL сигналов на ЭКС и показаны значения их напряжения [1], найден метод ослабления воздействия ЭМП, который основан на том, что чем медленнее нарастает передний фронт приложенного сигнала, тем менее восприимчив ЭКС к этому сигналу [2], и разработана модель связей между внешними магнитными полями и наведенными напряжениями на входе ЭКС с однополярными и биполярными электродами, которая позволяет определить наведенное напряжение в кардиостимуляторе, находящемся в магнитном поле с частотой в диапазоне 10 Гц – 30 кГц [3].

Одним из основных источников воздействия, находящихся вблизи ЭКС, является сотовый телефон. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что необходимо поддерживать расстояние между ЭКС и телефоном минимум 20 см [4], а результаты влияния ЭМП сотового телефона на ЭКС в кабине лифта не показали существенных изменений в работе ЭКС [5]. Также оценено влияние ЭМП путей высокоскоростных поездов и доказано, что корпус вагона имеет достаточный коэффициент экранирования, и люди с ЭКС могут пользоваться данным видом транспорта [6].

Стоит отметить, что со временем конструкция ЭКС усложняется, и инженеры пытаются продлить время работы батареи и разработать устройство для сбора тепловой энергии [7] или дистанционного заряда [8], чтобы избежать хирургического вмешательства. А также производится оценка воздействия ЭМП устройства дистанционного заряда на работу ЭКС [9]. Помимо этого, предлагается использовать корпус ЭКС в качестве направленной антенны для передачи мощности, достаточной для заряда устройства [10]. Появляется всё больше ЭКС с устройством дистанционной передачи данных о состоянии пациента в медицинский центр и проводится оценка их влияния на работу ЭКС, которая показала, что уровень помех должен быть как минимум на 25 дБ ниже амплитуды сердцебиения [11].

Одним из конструкторских решений для защиты от ЭМП является выбор материала для корпуса ЭКС. Сложностью в данном вопросе является то, что материал должен быть биологически совместимым. В статье [12] показано, что резистивная плёнка имеет коэффициент экранирования до 20 дБ, что является хорошим результатом по сравнению с результатом, полученным при отсутствии резистивной плёнки. Также существуют схемные решения проблемы ЭМС радиоэлектронной аппаратуры. В случае с ЭКС применяют усилители сигналов и фильтры для подавления помех и выделения сердечного ритма [13–17].

В ходе изучения материала выявлено, что ЭМП оказывает существенное влияние на ЭКС. В таблице выделены основные электромагнитные излучения (ЭМИ), оказывающие влияние на работу ЭКС, проблемы, связанные с их воздействием на ЭКС, и существующие на сегодняшний день пути преодоления этих проблем. Все это позволяет использовать полученный материал в разработке как самих ЭКС, так и методов их защиты от ЭМП.

Источники воздействия ЭМП и методы защиты ЭКС

ЭМИ	Проблема	Решение	Источник
Крайне низкие частоты 10 Гц – 30 кГц	Нарушение обнаружения ЭКГ и спонтанная асинхронная стимуляция сердечного ритма	Использовать фильтр для выделения ЭКГ и подавления помех	[13–17]
	Затруднение обнаружения ЭКГ	Уменьшить электропроводность электродов	[3]
Немод. сигнал 100 Гц – 150 кГц	Нарушение обнаружения электрокардиограммы (ЭКГ)	Использовать модель для расчёта пороговых амплитуд сигналов, которая поможет оценить электромагнитную устойчивость ЭКС до его выпуска	[1]
АМ 150 кГц – 100 МГц			
PAL 100 МГц – 1 ГГц		Соблюдать минимальное расстояние (20 см) между устройством связи и ЭКС	[4]
GSM 900 МГц, 1800 МГц			
Радиочастоты 3 кГц – 300 ГГц	Задержка сигнала в устройстве обнаружения ЭКГ	Снизить скорость нарастания переднего фронта сигнала	[2]
	Ложное срабатывание ЭКС	Обеспечить запас порогового уровня между полезным сигналом и шумом (минимум 25 дБ)	[11]

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schenke S. et al.* EMC modelling of cardiac pacemakers // Proc. 18th Int. Zurich Symp. on EMC. – Munich, 2007. – PP. 33–36.
2. *Ogirala A. et al.* Electromagnetic Interference of Cardiac Rhythmic Monitoring Devices to Radio Frequency Identification: Analytical Analysis and Mitigation Methodology // IEEE trans. on inform. Techn. in biomed. – November 2011. – Vol. 15, No. 6. – PP. 848–853.
3. *Hille S. et al.* Determination of the interference voltage in implantable medical devices with bipolar electrodes // IEEE Int. Symp. on EMC. – 2008. – PP. 1–5.
4. *Schlegel R.E. et al.* Wireless phones and cardiac pacemakers: in vitro interaction study // Proc. 19th Int. Conf. – IEEE IEMBS 1997. – PP. 2551–2554.
5. *Higashiyama J. et al.* EMI risk assessment of electromagnetic field from mobile phone in elevator cabin for implantable pacemaker // IEEE Int. Symp. on EMC. – 2012. – PP. 1–6.

6. Rizzi R. *et al.* Electromagnetic interferences on implantable medical devices onboard of high speed trains // IEEE Int. Symp. on EMC. – 2006. – PP. 1–6.
7. Ashraf M. *et al.* A thermal energy harvesting power supply with an internal startup circuit for pacemakers // IEEE trans. on VLSI syst. – 2015. – PP. 26–37.
8. Gore V.B. *et al.* Wireless power transfer technology for medical applications // CASP Cummins College of Engin for Women. – 2016. – PP. 455–460.
9. Campi T. *et al.* Induced effects in a pacemaker equipped with a wireless power transfer charging system // IEEE Trans. on EMC. – 2017. – PP. 1–4.
10. Kod M. *et al.* Feasibility study of using the housing vases of implantable devices as antennas // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – PP. 6939–6949.
11. Anzai D. *et al.* EMI evaluation based on electromagnetic and circuit analysis for human body communication systems // Int. Symp. on EMC. – 2014. – PP. 745–748.
12. Wang J. *et al.* Effectiveness evaluation of shielding material for reducing electromagnetic interference of cardiac pacemaker by portable information terminals // Int. Symp. on EMC. – 2001. – PP. 1054–1057.
13. Lai W.C. A band pass filter to near Infrared charging for implantable cardiac pacemaker and ECG micro-stimulator application // IEEE MTT-S IMWS-BIO. – 2015. – P. 51–52.
14. Stevenson R.A. Design and application of broadband ceramic feedthrough capacitor EMI filters to cardiac pacemakers and implantable defibrillators // Proc. 19th Int. Conf. – IEEE/EMBS. – 1997. – PP. 2558–2562.
15. Stevenson R.A. Feedthrough EMI filter with ground isolation for cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators // Proc. of the 20th Annual Int. Conf. of the IEEE Engin. in Med. and Biol. Soc. – 1998. – PP. 3319–3323.
16. Gerosa A. *et al.* A fully integrated dual-channel log-domain programmable preamplifier and filter for an Implantable Cardiac Pacemaker // IEEE trans. on circuits and sys. – 2004. – P. 1916–1925.
17. Basak D. *et al.* A Low Noise Preamplifier and Switched Capacitor Filter for Heart-rate Detection // Int. Conf. on ICAES. – 2013. – PP. 184–188.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРПУСА С АПЕРТУРОЙ

А.В. Веселовский, К.Э. Джанбаев, магистранты;

М.Е. Комнатнов, м.н.с.

Томск, ТУСУР, каф. ТУ, weselalex93@mail.ru

Экранирование является одним из конструкторских средств обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС). Экранирование должно быть обоснованным и рассмотрено после применения методов оптимальной компоновки и трассировки узлов и блоков РЭС [1]. Между тем получение быстрой

предварительной оценки эффективности экранирования (ЭЭ) электромагнитного экрана актуально на стадии проектирования РЭС, поскольку позволяет оценить массу и габариты РЭС, а также принять заблаговременно дополнительные меры конструктивного исполнения помехозащиты. Предварительные оценки ЭЭ могут быть получены при помощи аналитических методов. Одним из первых аналитических методов для вычисления ЭЭ металлического корпуса с апертурой является метод, который позволяет вычислить ЭЭ корпуса с центральным расположением апертury, представленный в [2]. Позже представлен метод [3], учитывающий изменение расположения апертury в стенке корпуса. Методика усовершенствована посредством применения численного интегрирования коэффициента связи апертury с корпусом, позволяет повысить точность вычисления ЭЭ [4]. Однако, это увеличивает временные затраты и усложняет аналитическую оценку ЭЭ. Вычисления без применения интегрального выражения с сохранением точности возможно выполнить на основе [5]. Таким образом, известны отдельные методики вычисления ЭЭ, позволяющие разработчику выполнить быструю предварительную оценку ЭЭ. Однако нет комплексного решения, позволяющего объединить методики и проанализировать вычисленные значения ЭЭ с использованием разных методов вычисления.

Цель работы – разработать графический интерфейс программы с использованием разных аналитических методов вычисления ЭЭ металлического корпуса с прямоугольной апертурой.

Для разработки интерфейса программы использовалась программная среда GUI в MATLAB [6]. Интерфейс содержит семь панелей (рис. 1).

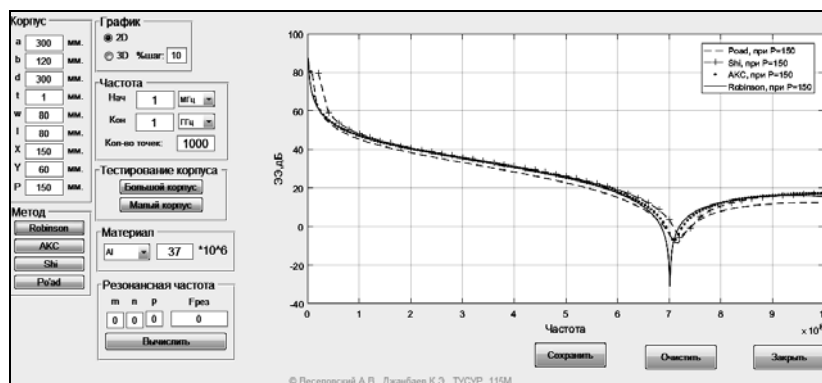


Рис. 1. Графический интерфейс программы для вычисления ЭЭ металлического корпуса с прямоугольной апертурой

В панели «Корпус» пользователю необходимо ввести: размеры корпуса $a \times b \times d$ с толщиной стенок t ; размеры апертуры $w \times l$ и координаты (от левого нижнего угла корпуса) центра $X \times Y$; расположение точки наблюдения ЭЭ P (рис. 2).

Автоматический ввод данных значений может быть выполнен при помощи панели «Тестирование корпуса». При нажатии кнопок «Большой корпус» и «Малый корпус» происходит автозаполнение всех параметров. Для малого $a = 29,5$ мм, $d = 9$ мм, $b = 21,5$ мм с апертурой в центре $w = 2$ мм, $l = 29,5$ мм, а для большого $a = b = 300$ мм, $d = 120$ мм

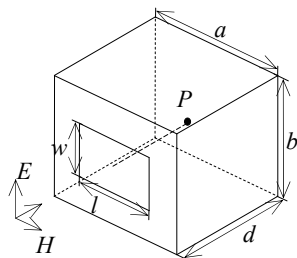


Рис. 2. Прямоугольный корпус

с апертурой $w = 80$ мм $l = 80$ мм в центре корпуса. Вычисления выполняются в частотном диапазоне от 1 МГц до 1 ГГц с шагом 1 МГц. При необходимости каждый из параметров пользователь может изменить.

В панели «Резонансная частота» вычисляется резонансная частота в зависимости от режимов m , n и p возбуждения корпуса, которые задаются от 0 до ∞ пользователем. На панели «График» пользователь выбирает вид построения частотной зависимости ЭЭ: 2D или 3D. При построении 2D вычисляется частотная зависимость для одной точки наблюдения P , а при построении 3D-ряд частотных зависимостей ЭЭ с заданным в процентах шагом точек P (рис. 3).

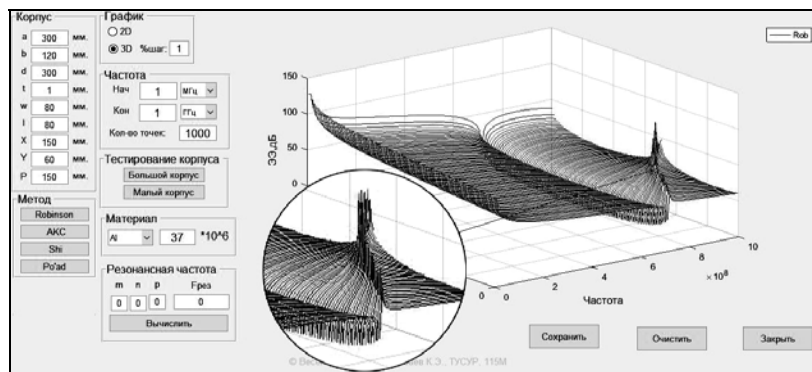


Рис. 3. Отображение ряда частотных зависимостей ЭЭ с заданным шагом для точки P (3D)

Выполнить вычисление ЭЭ возможно в панели «Метод», выбрав необходимый метод вычисления. После вычисления ЭЭ происходит автосохранение результатов в виде таблиц ASCII. Кроме того, возможно сохранить в необходимую директорию результаты с указанием

имени, нажав на кнопку «Сохранить». Панель «Частота» позволяет задать начальное и конечное значения частот, а также количество точек построения. В панели «Материал» либо выбирается материал (алюминий, железо или медь), либо задаётся необходимая удельная проводимость материала корпуса.

Программная реализация вычисления частотных зависимостей ЭЭ, в зависимости от перемещения точки наблюдения, интересна тем, что возможно на графике наблюдать, как изменятся значения ЭЭ в заданном диапазоне частоты на заданном расстоянии от апертуры корпуса. Например, из рис. 3 видно, что возле апертуры корпуса на частотах вблизи первого резонанса ЭЭ повышается, а в середине корпуса имеет наименьшее значение.

Полученные частотные зависимости ЭЭ в MATLAB сравнивались с зависимостями, полученными в программе MathCad и приведенными в работах [2–5]. Однако неучёт точности интегрирования при реализации в MATLAB двух методов [3, 4] привел к небольшому рассогласованию значений в области резонансов, полученных в программе MathCad. Представленная программная реализация известных методов позволит разработчикам более тщательно анализировать частотные зависимости ЭЭ за очень короткое время.

Работа выполнена за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
2. Robinson M.P., Benson T.M., Christopoulos C. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures // IEEE Trans. Electromagn. Compat. Aug. – 1998. – Vol. 40, No. 3. – PP. 240–248.
3. Po'ad F.A., Jenu M.M.Z., Christopoulos C., Thomas D.W.P. Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures // in Proc. 17th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat. – Zurich, Switzerland, 2006. – PP. 618–621.
4. Shi D., Shen Y., Ruan F., Wei Z., Gao Y. Shielding analysis of enclosure with aperture irradiated by plane wave with arbitrary incident angle and polarization direction // Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. –Qingdao, China, 2008. – PP. 361–364.
5. Комнатнов М.Е. Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, ТУСУР, 2016. – 216 с.
6. MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MATLAB/> (дата обращения: 11.11.2016).

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТЕМ-КАМЕРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ЭМС

А.В. Демаков, студент каф. РТС;

М.Е. Комнатнов, ассистент каф. ТУ, к.т.н.

Томск, ТУСУР, vandervals@inbox.ru

Проект ГПО ТУ-1503 «Разработка устройств для испытаний на ЭМС»

Для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем (ИС) используется ТЕМ-камера. Она состоит из центрального проводника, расположенного внутри металлического корпуса. Для возбуждения электромагнитного поля (ЭМП) во внутреннем объеме ТЕМ-камеры к центральному проводнику подключают генератор сигналов и нагрузку через СВЧ-соединители. Создаваемое ЭМП воздействует на испытуемый объект (ИО), что позволяет оценить уровень его восприимчивости к ЭМП согласно [1]. При подключении измерительного приемника к центральному проводнику камеры можно измерить уровень эмиссии от ИО согласно [2]. Данный вид измерений и испытаний широко используется при разработке различных радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят ИС. С ростом верхней частоты спектра полезных и помеховых сигналов необходимо совершенствовать устройства для испытания ИС. В настоящее время разработана ТЕМ-камера для высоты ИО 20 мм с верхней граничной частотой до 2 ГГц [3, 4]. Однако необходимо её дальнейшее совершенствование: увеличение полезного объема под ИО и диапазона рабочих частот, а также уменьшение неравномерности ЭМП.

Цель данной работы – представить усовершенствованную ТЕМ-камеру для испытаний ИС на ЭМС.

При совершенствовании камеры решено уменьшить высоту под ИО, поскольку высота современной компонентной базы для поверхностного монтажа, в том числе ИС, не превышает 5 мм. Уменьшение высоты под ИО позволит увеличить верхнюю граничную частоту и напряженность ЭМП.

Разработана модель камеры (рис. 1) и выполнена её параметрическая оптимизация, по критерию минимизации максимального значения модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ в максимально возможном диапазоне частот. По результатам оптимизации получены размеры камеры: $a = 98,96$ мм, $b = 14,66$ мм, $d = 30$ мм, $w = 39,8$ мм, $g = 29,58$ мм, $t = 0,68$ мм, $L = 82,4$ мм.

Получены частотные зависимости $|S_{11}|$ (рис. 2) и $|S_{21}|$ (рис. 3) модернизированной конструкции камеры, которые сравнивались с характеристиками стандартной камеры [3].

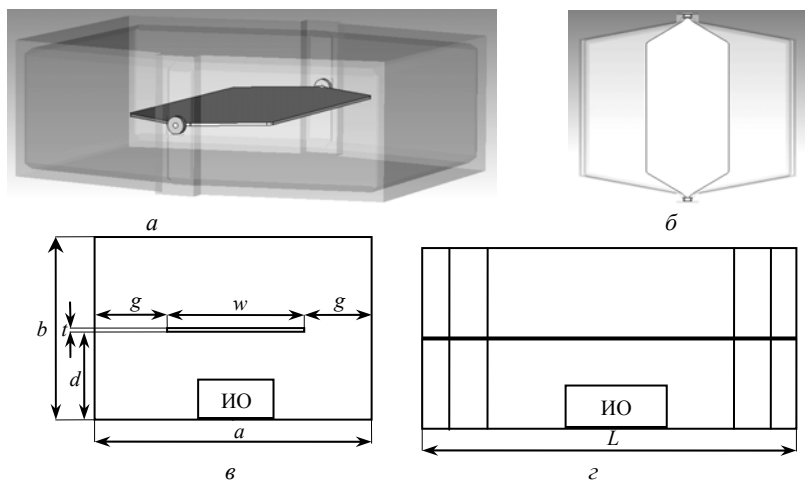


Рис. 1. Общий вид (а), вид сверху (б), поперечное сечение (в) и вид слева (г) модели ТЕМ-камеры

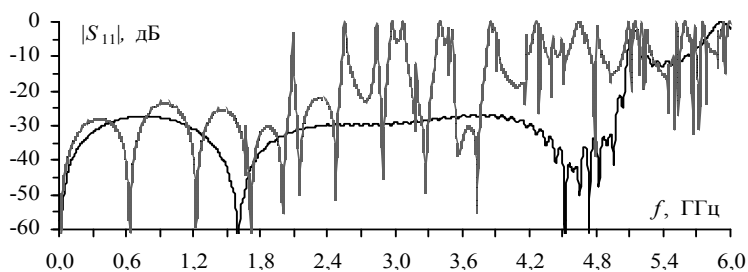


Рис. 2. Частотные зависимости $|S_{11}|$ модернизированной и стандартной моделей ТЕМ-камер

По результатам электродинамического моделирования $|S_{11}|$ модифицированной модели камеры не превышает значения минус 27 дБ в диапазоне частот до 5 ГГц, тогда как в стандартной конструкции это значение не превышает –25 дБ в диапазоне частот до 2 ГГц. Граничная частота для модифицированной камеры составляет 5,1 ГГц, тогда как для стандартной – 2,1 ГГц.

Коэффициент передачи $|S_{21}|$ модифицированной конструкции находится на уровне 0 дБ, в диапазоне частот до 5 ГГц.

Таким образом, разработана модифицированная ТЕМ-камера с $|S_{11}| \leq -27$ дБ в диапазоне частот до 5 ГГц с высотой ИО, не превышающей 5 мм, и увеличенной напряженностью возбуждаемого ЭМП.

Данное конструктивное решение позволит проводить испытания в более широком диапазоне частот и амплитуд воздействий по сравнению с ранее разработанной [3, 4]. В дальнейшем планируется усовершенствовать конструкцию камеры и создать первый экспериментальный образец.

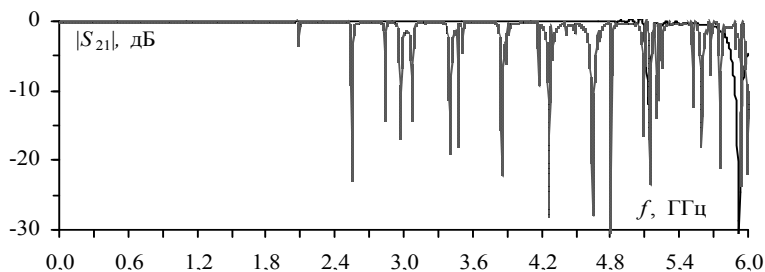


Рис. 3. Частотные зависимости $|S_{21}|$ модифицированной и стандартной моделей ТЕМ-камеры

Работа выполнена за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. – Part 2: Measurement of Radiated Immunity. TEM Cell and Wideband TEM Cell Method.* IEC 62132-2. – First Edition. – 2010.
2. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. – Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method.* IEC 61967-2. – First Edition. – 2005.
3. Пат. №2606173 РФ. ТЕМ-камера / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов (РФ). – № 2015156668; заявл. 28.12.2015, опубл. 10.01.2017.
4. Комнатнов М.Е. Оптимизация геометрических параметров ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, Т.Т. Газизов // Технологии ЭМС. – 2016. – №4 (59). – С. 7–16.
5. Демаков А.В. Методика проектирования ГТЕМ-камеры / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев // Современные технологии в науке и образовании «СТНО–2016»: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. – Т. 2. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 184–187.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРЕХПРОВОДНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ

И.В. Дмитренко, магистрант каф. ТУ;

*Т.Т. Газизов, директор Института прикладной информатики
ТГПУ, к.т.н.*

Томск, ТУСУР, ilyadmitren@mail.ru

В настоящее время повышается интерес к новым методам и средствам ослабления излучаемых эмиссий для бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА). К последним предъявляются такие требования, как радиационная, вибрационная устойчивость, малые массогабаритные показатели, простота и низкая стоимость. В этой связи представляют интерес пассивные устройства, в частности на основе многосвязных полосковых структур с неуравновешенной связью [1]. К таким устройствам можно отнести и модальные фильтры (МФ). Исследованы разные структуры МФ: с торцевой связью, с активным и пассивным проводниками на одной стороне подложки и опорным на другой (треугольного), с лицевой связью [2]. Поперечные сечения показаны на рис. 1. Показано [3, 4], что, используя МФ, можно существенно снизить уровень кондуктивных, а значит, и излучаемых эмиссий на определенной частоте. Длина отрезка зависит от частоты, на которой происходит подавление, и от разности погонных задержек мод, определяемой поперечным сечением МФ:

$$l = \frac{1}{2f|\tau_e - \tau_o|}.$$

Таким образом, меняя поперечное сечение МФ, можно увеличить разность погонных задержек, тем самым уменьшив длину отрезка. Ранее оптимизировались структуры с торцевой связью и треугольная, в более узком диапазоне изменяемых параметров [5]. Несимметричная структура с лицевой связью не оптимизировалась.

Цель работы – оптимизация параметров трех указанных МФ для получения максимальной разности погонных задержек мод.

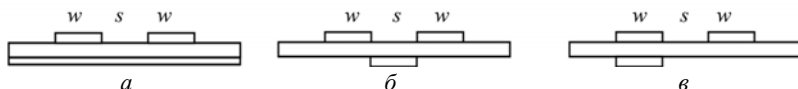


Рис. 1. Поперечные сечения исследуемых структур:

a – с торцевой связью; *б* – треугольная; *в* – с лицевой связью

Оптимизация проводилась в системе TALGAT [6] при следующих параметрах поперечного сечения: толщина диэлектрика $h = 250$ мкм; толщина проводника $t = 105$ мкм; относительная диэлек-

трическая проницаемость $\epsilon_r = 5,4$; тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = 0,025$. Ширина проводников w и расстояние между проводниками s менялись в диапазонах 0,1–9 и 0,1–6 мм соответственно. Результаты приведены в таблице и представлены графически на рис. 2.

**Результаты оптимизации для трех структур
при разном количестве особей и поколений**

<i>N</i> – номер запуска; <i>O</i> – количество особей; <i>Π</i> – количество поколений											
		Торцевая			Треугольная			Лицевая			
<i>O, Π</i>	<i>N</i>	<i>w, мм</i>	<i>s, мм</i>	$\Delta\tau$, нс/м	<i>w, мм</i>	<i>s, мм</i>	$\Delta\tau$, нс/м	<i>w, мм</i>	<i>s, мм</i>	$\Delta\tau$, нс/м	
3, 10	1	0,267	7,206	0,299	0,256	0,949	1,285	5,857	8,491	4,267	
	2	0,903	2,205	0,508	0,141	1,443	1,416	5,886	8,178	4,260	
	3	0,197	2,98	0,572	0,197	2,979	1,351	5,379	8,896	4,269	
	4	0,79	2,367	0,268	0,157	1,533	1,369	5,974	8,938	4,283	
	5	0,224	1,813	0,66	0,429	1,789	1,038	5,071	7,693	4,228	
10, 10	1	0,106	1,936	0,906	0,156	0,325	1,358	5,878	8,989	4,283	
	2	0,114	1,509	0,951	0,102	1,188	1,551	5,94	8,964	4,284	
	3	0,395	2,459	0,431	0,124	1,128	1,489	5,917	8,569	4,27	
	4	0,156	1,567	0,821	0,1	1,056	1,569	5,166	8,967	4,265	
	5	0,142	1,554	0,858	0,119	1,266	1,49	5,82	8,892	4,279	
10, 30	1	0,102	1,759	0,954	0,101	0,677	1,573	5,898	8,838	4,279	
	2	0,126	1,674	0,884	0,109	0,734	1,549	5,937	8,988	4,281	
	3	0,101	1,543	0,996	0,1	0,947	1,576	5,999	8,989	4,285	
	4	0,107	1,593	0,963	0,102	0,837	1,573	5,989	8,989	4,285	
	5	0,107	1,516	0,975	0,104	0,579	1,555	5,97	8,968	4,284	
10, 100	1	0,101	1,501	1,005	0,1	0,764	1,579	5,996	8,999	4,286	
	2	0,112	1,5	0,961	0,101	0,683	1,574	5,991	8,996	4,285	
	3	0,101	1,531	0,997	0,1	0,801	1,578	5,987	8,995	4,285	
	4	0,101	1,509	1,003	0,1	0,749	1,579	5,988	8,998	4,286	
	5	0,1	1,504	1,006	0,1001	0,877	1,578	5,992	8,994	4,285	

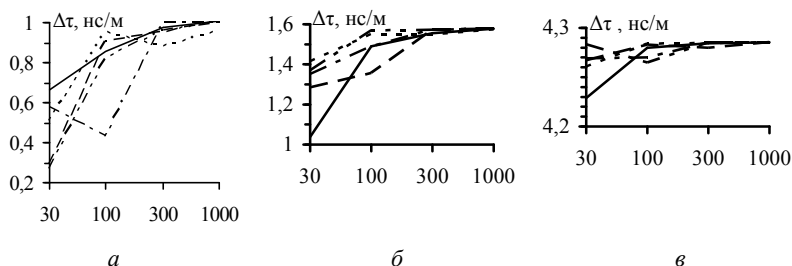


Рис. 2. Зависимость разности погонных задержек от числа вычислений ($O \cdot \Pi$) после оптимизации (запуски: 1 (---); 2 (— —); 3 (— · —); 4 (— · —); 5 (—)) поперечных сечений структур:
a – с торцевой связью; *б* – с треугольной; *в* – с лицевой связью

Таким образом, в работе найдены максимальные разности, схожимость результатов подтверждает это. В сравнении с ручным подбором удалось добиться увеличения разности погонных задержек мод на 12% для структуры с торцевой связью, на 41% – с треугольной, на 36% – с лицевой связью в сравнении с параметрами, подобранными вручную [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малютин Н.Д.* Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.
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. *Дмитренко И.В., Газизов Т.Т.* Анализ частотного отклика двухкаскадных модальных фильтров для подавления излучаемых эмиссий бортовой аппаратуры космического аппарата // Матер. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, 25–27 мая 2016 г. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 304–307.
5. *Самотин И.Е.* Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 199 с.
6. *Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. et al.* New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments // Advances in Intelligent Systems Research. Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM–2015). – Phuket, Thailand, August 23–24, 2015. – PP. 293–301.

ПОДГОТОВКА РАБОЧИХ ПРОГРАММ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ ДЛЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

М.А. Зуева, магистрант каф. ТУ

Томск, ТУСУР, zueva_ria@mail.ru

Английский язык является важной составляющей в жизни современного человека. Сегодня английский язык имеет статус официального языка общения в деловом мире, особенно в сфере информационных технологий. Преподавание на английском языке актуально в связи с глобализацией образования, необходимостью обеспечения студенческой мобильности, а также увеличением требований на рынке труда к техническим специалистам и повышением их конкурентоспо-

собности. Также это позволит привлечь иностранных студентов к обучению в российских университетах. Например, в ТУСУРе открыто много новых магистерских программ, в частности, впервые в России [1] открыты магистерские программы по электромагнитной совместимости (ЭМС) [2, 3]. Однако обучение по этим программам ведется только на русском языке. Между тем оно основано на широко используемом в мире англоязычном учебнике [4] и самых новых мировых научных достижениях в области ЭМС. Кроме того, данные магистерские программы открыты для обучения на них иностранных студентов. Таким образом, целесообразна организация обучения по ним на английском языке. Недавно представлены подходы к выполнению этой работы [5].

В ТУСУРе открыты три магистерские программы в области ЭМС: «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» (2015); «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» (2016) и «Защита от электромагнитного терроризма» (2016). Подготовка специалистов по ним сегодня актуальна, поскольку обеспечение ЭМС важно практически во всех сферах жизнедеятельности человека, от его повседневного быта до безопасности.

Цель данной работы – представить предварительные результаты разработки рабочих программ на английском языке для учебных дисциплин магистерских программ по ЭМС.

Подготовка полного курса преподавания дисциплин на английском языке включает в себя несколько этапов. В качестве первого этапа выполнения данной работы было предложено создание гибких шаблонов перевода рабочих программ. Поскольку любая рабочая программа не остается неизменной в течение долгого времени, она дорабатывается согласно меняющимся требованиям, а также дополняется информацией касательно новых тенденций и исследований. На данном этапе для перевода была выбрана рабочая программа «Теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем» – одна из общепрофессиональных дисциплин, читаемая всем магистрантам радиотехнического факультета. Важно, что она содержит базовые знания и терминологию, необходимые для последующего обучения.

Автором выполнен перевод указанной рабочей программы, который послужит шаблоном при переводе остальных рабочих программ. Для иллюстрации в табл. 1 приведены названия разделов дисциплины на русском и английском языках.

Положено начало составлению словарей терминологии, которые будут пополняться. Представляется целесообразным составить два

словаря. Первый – по общеобразовательной терминологии, полезной для формирования шаблонов настоящих и будущих программ дисциплин, в том числе фондов оценочных средств (табл. 2). Второй – по терминологии ЭМС, которая будет непрерывно и очень активно пополняться (табл. 3).

Таблица 1

Названия разделов дисциплины на русском и английском языках

The Basics of EMC Theory for Radio-electronic Facilities and Systems	Основы теории ЭМС радиоэлектронных средств и систем
The Basic Types of Radioelectronic Facilities and Systems Analysis in the Sphere of EMC	Основные виды анализа радиоэлектронных средств и систем в задачах ЭМС
The Mathematic Models of Radioelectronic Facilities and Systems	Математические модели радиоэлектронных средств и систем
The Methods of Radioelectronics Facilities and Systems Optimization in the Sphere of EMC	Методы оптимизации радиоэлектронных средств и систем в задачах ЭМС

Таблица 2

Словарь общеобразовательной терминологии

Academic research work (ARW)	Научно-исследовательская работа (НИР)
Basic professional educational program (BPEP)	Общепрофессиональная образовательная программа (ОПОП)
Course Project	Курсовая работа
Course unit	Учебная дисциплина
Credit	Зачетная единица (З.Е.)
Calculation task	Расчетная работа
General culture competences (GCC)	Общекультурные компетенции (ОК)
General professional competences (GPC)	Общепрофессиональные компетенции (ОПК)
Information technologies and communication systems (ICT&CS)	Инфокоммуникационные технологии и системы связи (ИКТиСС)
Labor content	Трудоемкость
Professional competences (PC)	Профессиональные компетенции (ПК)
Self-guided work-book	Конспект самоподготовки
Progress Test point	Контрольная точка
Curriculum (WC)	Рабочий учебный план (РУП)

Таким образом, в данной работе представлено выполнение проекта по подготовке преподавания на английском языке дисциплин магистерских программ ТУСУРа по ЭМС. Его реализация улучшит имидж ТУСУРа, поскольку позволит привлечь иностранных студентов к обучению в ТУСУРе, а также повысит качество и уровень образования студентов. Полученный опыт может быть использован в других магистерских программах.

Словарь терминологии ЭМС

Electromagnetic	Электромагнитный
Electromagnetic compatibility (EMC)	Электромагнитная совместимость (ЭМС)
Enclosure	Корпус
Excitation	Воздействие
Radioelectronic	Радиоэлектронный
Simulation	Моделирование

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кечиев Л.Н.* Информационное обеспечение и состояние образования в области ЭМС // Технологии ЭМС. – 2016. – №1(56). – С. 3–12.
2. *Газизов Т.Р.* Магистерская программа ТУСУРа «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, В.К. Салов // Технологии ЭМС. – 2016. – №1(56). – С. 24–33.
3. *Газизов Т.Р.* Подготовка высококвалифицированных кадров квалификации «магистр» в области электромагнитной совместимости для АО «НПП «Полус» // 22-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016)». – Томск. – 2016. – С. 98–102.
4. *Paul C.R.* Introduction to Electromagnetic Compatibility // John Wiley & Sons, Inc. – New York, 1992. 765 p.
5. *Зуева М.А.* Подготовка к преподаванию на английском языке дисциплин магистерских программ по электромагнитной совместимости // М.А. Зуева, Т.Р. Газизов // Матер. Междунар. науч.-метод. конф. «Современное образование: развитие технологий и содержания высшего профессионального образования как условие повышения качества подготовки выпускников», Томск, 26–27 января 2017. – Томск, 2007. – С. 263–264.

УЛУЧШЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МОДУЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ ETHERNET 10/100 BASE-T

В.В. Кропотов, магистрант каф. ТУ;

*О.М. Кузнецова-Таджибаева, вед. инж.-констр. АО «НПП Полус»,
к.т.н.; Т.Т. Газизов, с.н.с., НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа, к.т.н.*

Массовое использование сети Ethernet, особенно в условиях электромагнитных помех, делает актуальной защиту оборудования Ethernet. Известен семикаскадный модальный фильтр (МФ) для защиты порта Ethernet 10/100 Base-T от опасных импульсных сигналов [1, 2]. Каждый каскад МФ состоит из трех в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников на диэлектрической подложке,

причем первый и третий проводники расположены на одной её стороне, а второй – между ними по центру на обратной. Ширина проводников 0,3 мм, толщина проводников 0,1 мм, расстояние между первым и третьим проводниками 0,4 мм, диэлектрическая подложка сделана из стеклотекстолита толщиной 0,3 мм, третий проводник разделен на 7 отрезков с длинами: 306, 420, 300, 140, 77, 38 и 19 мм соответственно. Один из концов каждого из отрезков третьего проводника соединен со вторым проводником сквозным металлизированным отверстием. Однако печатная плата (ПП) этого МФ имеет ряд недостатков.

Цель работы – разработка конструкции улучшенной ПП модуля защиты сети Ethernet 10/100 Base-T.

При разработке использовалась система Altium Designer. Разработанная ПП существенно отличается от предыдущего варианта. Так, добавлены дополнительные сквозные металлизированные отверстия между отдельными МФ для увеличения развязки между ними и в местах крепления соединителей 8P8C для улучшения земли (рис. 1).

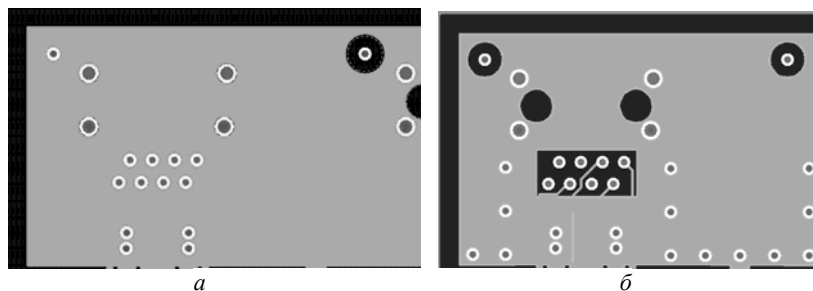


Рис. 1. Фрагменты ПП: предыдущей (а) и новой, с дополнительными металлизированными отверстиями (б)

Изменена длина витков в каждом каскаде семикаскадного МФ для выравнивания длины витков, уменьшающего излучаемые эмиссии (рис. 2). Также изменены металлизированные слои на верхнем и нижнем слоях ПП (рис. 3) и местоположение отверстий для крепления ПП в корпусе модуля защиты.

Таким образом, разработана ПП с семикаскадными МФ в Altium Designer (рис. 4, а), которая была изготовлена в АО НПЦ «Полус» (г. Томск) (рис. 4, б). Параметры ПП: ширина – 208 мм, длина – 425 мм, количество каналов – 12.

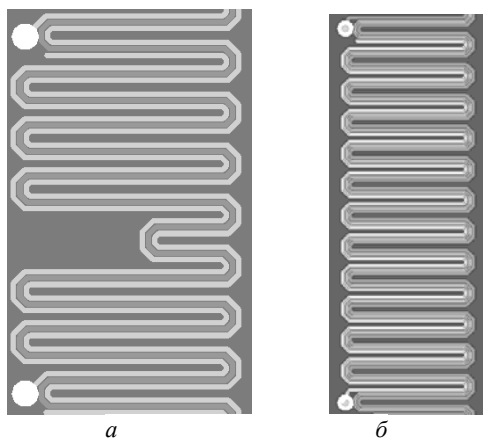


Рис. 2. Структура проводников предыдущей (а) и новой (б) версий каскадов МФ

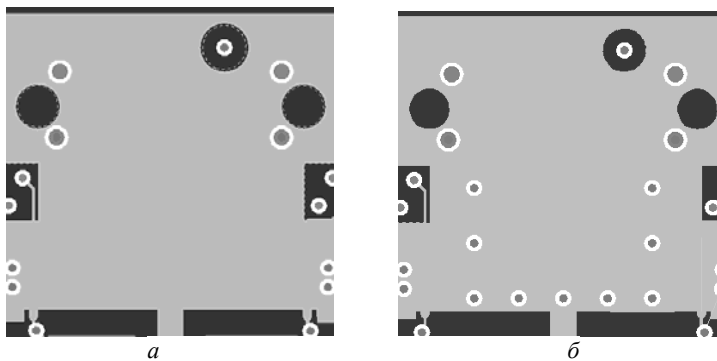


Рис. 3. Вид металлизированного слоя на предыдущей (а) и новой (б) ППИ

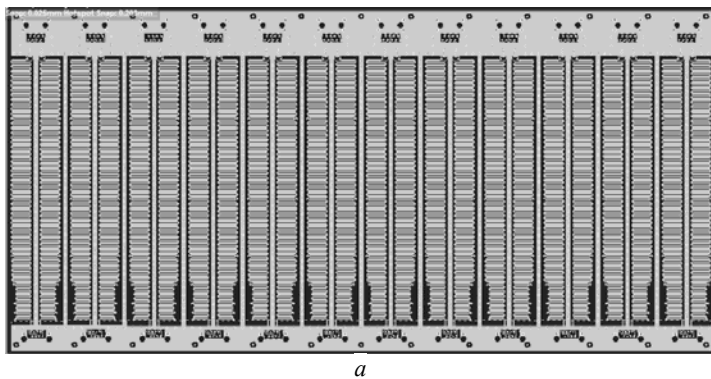


Рис. 4 (начало)



б

Рис. 4 (окончание). Фотошаблон (а) и внешний вид (б) разработанной ПП

ЛИТЕРАТУРА

1. Кропотов В.В., Газизов Т.Т. Конструктив блока модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Научная сессия ТУСУР–2016: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 310–313.

2. Кропотов В.В., Куксенко С.П. Блок модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. (25–27 ноября 2015 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 36–39.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МНОГОКРАТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕМКОСТНОЙ МАТРИЦЫ ПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ

К.А. Лемешко, магистрант; Р.Р. Ахунов, аспирант;

М.С. Танаева, О.К. Шнякина, студентки

Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Томск, ТУСУР, каф. ТУ, ksu_gutnik@mail.ru

Использование полосковых структур позволяет разрабатывать более совершенную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) различного назначения, а анализ связей в них важен для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Для уменьшения финансовых и временных затрат широко используется имитационное моделирование. При этом основные вычислительные затраты приходятся на решение

системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), особенно при выполнении многовариантного анализа. Так, например, при учете частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика (ϵ_r), для каждой частотной точки диапазона вычисляется емкостная матрица, для чего необходимо решить СЛАУ с различными правыми частями. При этом изменяющиеся от матрицы к матрице элементы, отвечающие подынтервалам диэлектрик–диэлектрик, располагаются на части главной диагонали. С учетом данной специфики в работе [1] предложен алгоритм, основанный на блочном LU-разложении. В работе [2] предложен алгоритм многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя и получены аналитические оценки ускорения за счет его использования. Данный алгоритм также учитывает специфику изменяемых элементов матрицы СЛАУ. Так, при изменении диэлектрического слоя изменяемые элементы находятся только в правых столбцах и нижних строках матрицы, что позволяет также использовать блочное LU-разложение. Полученные аналитически и предварительные вычислительные оценки показали его эффективность. Однако точные (подробные) вычислительные оценки не получены. Между тем они важны для оценки эффективности работы алгоритма в различных математических системах.

Цель работы – оценка эффективности алгоритма многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя.

Модель многократного решения СЛАУ с несколькими правыми частями можно представить в матричном виде

$$\mathbf{S}_k \mathbf{\Sigma}_k = \mathbf{V}_k,$$

где $\mathbf{S}_k$ – квадратная и плотная матрица порядка N , являющаяся результатом применения метода моментов к анализируемой структуре; $\mathbf{V}_k$ – неизменная в ходе вычислений матрица размера $N \times N_{\text{COND}}$, состоящая из задаваемых потенциалов на подобластях, на которые разбиты границы структуры, $\mathbf{\Sigma}_k$ – искомая матрица размера $N \times N_{\text{COND}}$, дающая распределение плотности заряда на этих границах; N_{COND} – количество проводников, не считая опорного, $k = 1, 2, \dots, m$, где m – число решаемых СЛАУ. Порядок матрицы СЛАУ складывается из количества подобластей на границах проводник–диэлектрик и диэлектрик–диэлектрик, а элементы матрицы вычисляются из параметров этих подобластей. Количество неизменяемых подобластей далее обозначено через N_A .

Для решения матричных уравнений широко используются такие системы, как Matlab, Octave, Scilab и др. Данные системы отличаются

используемыми низкоуровневыми библиотеками матричных операций, что дает различие в их производительности. Поэтому для широты эксперимента алгоритм многократного вычисления емкостной матрицы в диапазоне изменения высоты диэлектрического слоя (далее – алгоритм) был реализован в трех упомянутых системах. Для проведения вычислительного эксперимента использована рабочая станция (PC) с характеристиками: ОС – Microsoft Windows 8.1, ЦПУ – AMD A8-5550 APU 2,10 GHz, ОЗУ – 8 Гб.

Ускорение за счет использования алгоритма

Оценка	m									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$N = 1000 (N_A = 900)$										
Аналитика	1,77	2,39	2,70	2,89	3,02	3,11	3,17	3,23	3,27	3,30
Matlab	1,26	2,31	2,45	2,65	2,45	2,90	2,80	2,93	2,76	2,76
Octave	1,67	4,35	4,81	5,08	5,30	5,45	5,43	5,54	5,60	5,61
Scilab	2,43	2,65	3,06	3,09	3,17	3,34	3,51	3,52	3,80	3,67
$N = 3000 (N_A = 2700)$										
Аналитика	1,77	2,38	2,70	2,88	3,01	3,10	3,17	3,22	3,27	3,30
Matlab	1,56	2,03	2,52	2,84	3,15	3,24	2,97	3,25	2,98	3,04
Octave	2,57	3,49	4,39	4,73	4,99	5,18	4,96	5,10	5,26	4,44
Scilab	2,31	3,66	3,86	4,65	4,55	4,50	4,68	4,71	4,77	4,60
$N = 1000 (N_A = 990)$										
Аналитика	2,40	4,49	6,31	7,92	9,35	10,63	11,78	12,83	13,78	14,64
Matlab	2,02	2,99	3,03	3,56	3,73	3,87	3,91	4,04	4,05	4,15
Octave	4,06	5,60	7,25	7,99	8,52	9,03	9,35	9,78	9,72	10,10
Scilab	2,54	3,27	3,76	3,94	4,12	4,20	3,94	4,45	4,54	4,36
$N = 3000 (N_A = 2970)$										
Аналитика	2,40	4,47	6,29	7,90	9,33	10,61	11,76	12,80	13,75	14,61
Matlab	1,92	3,57	4,54	5,01	5,52	6,37	6,69	6,98	7,16	7,09
Octave	3,11	5,67	7,32	8,95	10,06	10,83	10,69	11,50	12,18	12,30
Scilab	2,29	4,51	5,29	6,07	6,46	7,01	7,35	7,55	7,39	7,74
$N = 1000 (N_A = 999)$										
Аналитика	2,50	4,96	7,39	9,78	12,13	14,46	16,75	19,00	21,23	23,42
Matlab	2,23	3,32	3,92	4,28	4,50	5,01	5,18	5,24	5,33	5,50
Octave	3,99	6,11	7,39	8,28	8,48	9,37	9,76	9,86	10,38	10,66
Scilab	2,21	4,23	4,90	5,41	6,19	6,53	7,26	7,08	7,49	7,76
$N = 3000 (N_A = 2997)$										
Аналитика	2,49	4,95	7,37	9,75	12,10	14,42	16,70	18,95	21,17	23,35
Matlab	2,05	4,14	5,44	6,58	7,37	8,05	8,16	8,57	8,83	7,06
Octave	3,11	5,30	7,78	9,90	11,25	12,03	13,36	13,79	14,44	14,71
Scilab	2,61	4,33	5,79	6,61	6,82	7,23	7,75	7,98	7,95	8,17

В таблице приведены аналитическая и вычислительные оценки эффективности работы алгоритма: отношение времени его работы ко времени работы алгоритма, основанного на последовательном LU-разложении, полученные в Matlab, Octave и Scilab при $N_{\text{COND}} = 2$, $N_A/N = 0,9$ ($N = 1000$, $N_A = 900$ и $N = 3000$, $N_A = 2700$), $N_A/N = 0,99$ ($N = 1000$, $N_A = 990$ и $N = 3000$, $N_A = 2970$) и $N_A/N = 0,999$ ($N = 1000$, $N_A = 999$ и $N = 3000$, $N_A = 2997$).

Видно, что при $N_A/N = 0,9$ в обоих случаях (практически при любом m) вычислительные оценки, полученные с помощью Matlab, ниже аналитических. При этом оценки при использовании Octave и Scilab выше аналитических. При $N_A/N = 0,99$ ускорение при использовании Matlab и Scilab ниже полученного аналитически во всем диапазоне m (в 2–3 раза при $m = 100$). В случае использования Octave в начале диапазона вычислительные оценки выше аналитических, а в конце – ниже (для выявления причины требуется дополнительное исследование). При $N_A/N = 0,999$ наблюдаются поведения вычислительных оценок аналогично предыдущему случаю. Однако ускорение уменьшается в 3–4 раза при $m = 100$.

Полученные результаты подтверждают, что при росте N_A/N выигрыш за счет использования алгоритма растет, вне зависимости от используемой системы. Однако он может быть в 4 раза меньше, чем по аналитической оценке. Кроме того, выигрыш, полученный в разных математических пакетах, может различаться до 2 раз. Одним из факторов, влияющих на ускорение, полученное в используемых системах, является различие в реализации матрично-матричных операциях.

Вычислительный эксперимент выполнен за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Совершенствование алгоритма вычисления методом моментов ёмкостных матриц системы проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости диэлектриков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 10. – С. 13–21.
2. Суровцев Р.С. Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного LU-разложения при решении СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. Т. 13. – №4. – С. 375–384.

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ПОГОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МНОГОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Р.Р. Мусабаев, магистрант каф. ТУ

Томск, ТУСУР, rustam-koktem@mail.ru

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) всё больше используется в самых различных сферах инфраструктуры современного общества, в том числе в управлении критичными системами в военной, атомной, транспортной и космической отраслях. Проводится много исследований, в которых моделируются устройства защиты на связанных линиях, например, модальные фильтры, для которых выявлено сильное влияние потерь на амплитуду сигнала на выходе [1]. Между тем точная оценка потерь в общем случае отрезка многопроводной линии передачи (МПЛП), описываемая его матрицей $\mathbf{R}$, остается сложным вопросом. Обзор подходов к ее вычислению [2] показал целесообразность использования алгоритма, предложенного в работе [3], вычисляя матрицу $\mathbf{L}$ в системе TALGAT [4].

Целью данной работы являются реализация и тестирование алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений МПЛП в системе TALGAT.

Алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений МПЛП в системе TALGAT выглядит следующим образом:

1. Ввод параметров материала проводника: ρ – удельное сопротивление, μ_r – магнитная проницаемость.
2. Ввод частоты f .
3. Ввод исходных геометрических параметров структуры.
4. Вычисление значения Δn (0,1 от минимального параметра структуры).
5. Вычисление поверхностного сопротивления проводника

$$R_s = \sqrt{\pi f \mu \rho} . \quad (1)$$

6. Построение геометрической модели поперечного сечения структуры при исходных параметрах.

7. Вычисление исходной матрицы погонных коэффициентов электромагнитной индукции $\mathbf{L}_1$.

8. Расширение всех границ опорного проводника на Δn .

9. Вычисление матрицы погонных коэффициентов электромагнитной индукции $\mathbf{L}_2$ для измененной структуры.

10. Вычисление $\Delta \mathbf{L}_{j,k} = \mathbf{L}_{2j,k} - \mathbf{L}_{1j,k}$, для $j \neq k$, где $j, k = 1, 2, \dots, N$, где N – число проводников МПЛП.

11. Вычисление недиагональных элементов матрицы $\mathbf{R}_{j,k}$

$$\mathbf{R}_{j,k} \Big|_{j \neq k} = \frac{R_s}{\mu_0} \left(\frac{-\Delta \mathbf{L}_{j,k}}{\Delta n} \right). \quad (2)$$

12. $j=1$.

13. Расширение всех границ j -го проводника.

14. Вычисление $\mathbf{L}_{2jj}$.

15. Вычисление $\Delta \mathbf{L}_{jj} = \mathbf{L}_{2jj} - \mathbf{L}_{1jj}$.

16. Вычисление диагональных элементов матрицы $\mathbf{R}_{jj}$

$$\mathbf{R}_{jj} = \frac{R_s}{\mu_0} \left(\frac{-\Delta \mathbf{L}_{jj}}{\Delta n} \right). \quad (3)$$

17. Восстановление исходных границ j -го проводника.

18. $j = j + 1$.

19. Повторение пп. 13–17, пока $j \leq N$.

Этот алгоритм реализован в системе TALGAT. Выполнена его апробация на примере одиночной МЛП с параметрами из работы [3], поперечное сечение которой приведено на рис. 1, где $w = h = 2$ мм, $t = 0,5$ мм. Результаты представлены в табл. 1.

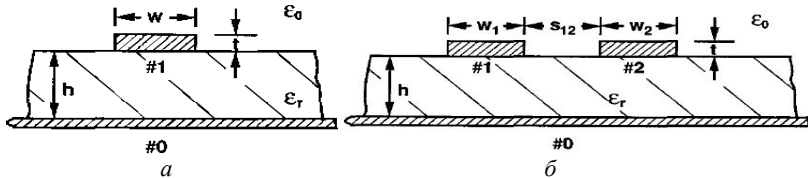


Рис. 1. Примеры одиночной и связанных МЛП [3]

Таблица 1

Значение $\mathbf{R}$ для одиночной МЛП при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на Δn

Δn , мкм	$\mathbf{R}$, Ом/м			
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм	6,25 мкм
0,1	9,12403	9,12403	8,91667	9,12403
1	9,06182	9,08256	9,06182	9,08256
10	9,02035	9,02865	9,0245	9,0245
100	8,55337	8,54715	8,54445	8,54362

Анализ данных табл. 1 показывает, что сегментация слабо влияет на значение $\mathbf{R}$. Влияние значения Δn также мало (за исключением его максимального значения). Если принять $\mathbf{R} = 9,12$ Ом/м, то его отклонение от LINPAR (8,12 Ом/м) составит 12%, тогда как отклонение значения, полученного по [3] (9,25 Ом/м), составило 13%.

Также было выполнено сравнение полученных результатов для связанных МЛП с параметрами из работы [3]. Поперечное сечение приведено на рис. 1, где $w_1 = 10$ мм, $w_2 = s_{12} = h = 5$ мм и $t = 1$ мм. Результаты представлены в табл. 2–4. Из полученных данных также можно сделать вывод, что сегментация и Δn почти не влияют на значения $\mathbf{R}$. Если принять $\mathbf{R}_{11} = 2,488$ Ом/м, $\mathbf{R}_{22} = 3,732$ Ом/м, $\mathbf{R}_{12} = \mathbf{R}_{21} = 0,352$ Ом/м, то их отклонения от LINPAR (2,31; 3,49; 0,35 Ом/м) составят 7,7; 6,9 и 0,5% соответственно. Отклонения от данных из [3] (2,49; 3,87; 0,37 Ом/м) получаются 7,79; 10 и 5% соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что данный алгоритм, реализованный в системе TALGAT, дает приемлемые результаты $\mathbf{R}$. Его дальнейшее использование представляется возможным.

Т а б л и ц а 2
Значение $\mathbf{R}_{11}$ для связанных МЛП при различной сегментации,
полученное при возмущении проводников на Δn

Δn , мкм	$\mathbf{R}_{11}$, Ом/м		
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм
0,1	2,48837	2,28101	2,48837
1	2,46764	2,4469	2,4469
10	2,45519	2,45312	2,45312
100	2,41642	2,416	2,4158

Т а б л и ц а 3
Значение $\mathbf{R}_{22}$ для связанных МЛП при различной сегментации,
полученное при возмущении проводников на Δn

Δn , мкм	$\mathbf{R}_{22}$, Ом/м		
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм
0,1	3,73256	3,73256	3,73256
1	3,79477	3,79477	3,79477
10	3,78647	3,78855	3,78647
100	3,6859	3,68487	3,68445

Т а б л и ц а 4
Значение $\mathbf{R}_{12}$, $\mathbf{R}_{21}$ для связанных МЛП при различной сегментации,
полученное при возмущении опорного проводника на Δn

Δn , мкм	$\mathbf{R}_{12}$, $\mathbf{R}_{21}$ Ом/м		
	50 мкм	25 мкм	12,5 мкм
0,1	0,35252	0,37326	0,37326
1	0,36289	0,36289	0,36496
10	0,36372	0,36392	0,36392
100	0,36403	0,36403	0,36405

ЛИТЕРАТУРА

1. *Заболоцкий А.М.* Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.
2. *Мусабаев Р.Р., Заболоцкий А.М.* Способы вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи // XII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (ЭССУ–2016). – Томск, 16–18 ноября 2016 г. – Т. 1. – Томск, 2016. – С. 215–219.
3. *Matthaei G.L., Chinn G.C.* Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines // Microwave Symposium Digest. – 1992. – PP. 1353–1354.
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 управления и радиоэлектроники. – 2015. – №2(36). – С. 45–50.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ТОКА НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

*А.В. Осинцев, А.А. Собко, магистранты;
М.Е. Комнатнов, ассистент каф. ТУ, к.т.н.
Томск, ТУСУР, kubenet@gmail.com*

В настоящее время широко используются системы автоматического управления (САУ), основным звеном которых является алгоритм регулирования управляющим воздействием в зависимости от управляемой величины [1]. В связи с широким распространением микроконтроллеров (МК) одной из актуальных задач является разработка САУ, позволяющей управлять процессами, используя вычислительные средства МК. Многие ($\approx 90\%$) САУ используют алгоритмы на основе пропорционально интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования [2, 3]. Широкое его распространение связано с простотой применения и возможностью функционирования в промышленном секторе. Среди ПИД-регуляторов 64% занимают одноконтурные и 36% – многоконтурные регуляторы [4]. ПИД-регуляторы с обратной связью охватывают 85% всех приложений; с прямой связью – 6%; соединенные каскадно – 9% [4]. Таким образом, все чаще при проектировании САУ в качестве инструмента управления используют ПИД-регуляторы, которые посредством вычислительных средств (МК, систем-на-кристалле, цифровых сигнальных процессоров [5], программируемых логических интегральных схем [6] и пр.) выполняют требуемые задачи регулирования. Одним из видов САУ является

автоматический регулятор тока (АРТ), который выполняет задачу регулирования отношением, например тока к напряжению. Реализацию САУ выполняют на компонентной базе, отвечающей современным требованиям. Одним из них является МК 1986BE91Т производства «Миландр». Характеристики данного МК не уступают зарубежным аналога, чем интересны для производителей современных радиоэлектронных средств.

Цель данной работы – разработать автоматический регулятор тока на основе комбинированной структуры ПИД-регулятора, используя отечественный МК 1986BE91Т.

Особенностью данного МК является 32-разрядная архитектура ARM с ядром Cortex-M3. Типовая структурная схема (рис. 1) АРТ может быть применена для электропитания различных автономных радиоэлектронных средств. Основной задачей АРТ является регулирование токов нагрузки (Н) и аккумуляторной батареи (АКБ). Принцип работы АРТ заключается в следующем. На МК поступают аналоговые сигналы с датчиков тока ($I_{СБ}$) и напряжения ($U_{СБ}$) солнечной батареи (СБ), АКБ ($I_{АКБ}$, $U_{АКБ}$) и нагрузки ($I_{Н}$, $U_{Н}$). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) МК преобразует аналоговые сигналы с датчиков в цифровой формат данных. Оцифрованные сигналы с датчиков тока и напряжения являются входными данными для ПИД-регулятора, который вычисляет скважность сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Вычисленный сигнал является управляющим для силовых ключей блока управления (см. рис. 1). Предусмотрено несколько режимов работы АРТ. Когда значение тока потребления нагрузкой ниже значения номинального тока СБ, происходит заряд АКБ остаточным током СБ. Когда значение тока потребления нагрузкой равно номинальному току СБ, АКБ не заряжается остаточным током. При отсутствии достаточной интенсивности освещения СБ потребление тока нагрузкой осуществляется как с АКБ, так и с СБ.



Рис. 1. Структурная схема АРТ

Регулирование токов осуществляется комбинированной структурой ПИД-регулятора (рис. 2). Она выполнена в виде отношения двух

параметров $F_{(n)}$ (тока $F_{(I)}$ и напряжения $F_{(U)}$) (рис. 3), что позволяет контролировать отношение тока к напряжению, за счет чего достигается требуемый контроль за системой по обоим параметрам. Сигналы уставки (СУ1 и СУ2) для ПИД-регуляторов задаются вручную посредством кнопок на плате управления с МК. Обратная связь в ПИД-регуляторах осуществляется за счет сигналов с датчиков токов (I_{CB} , I_{AKB} , I_H) и напряжений (U_{CB} , U_{AKB} , U_H), поступающих на каналы АЦП.

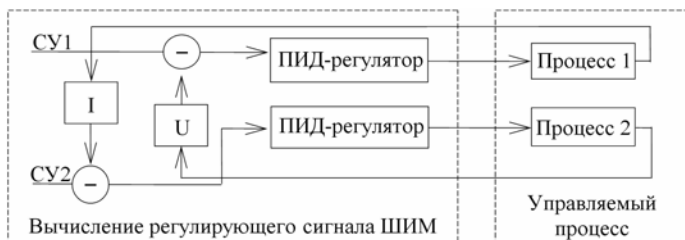


Рис. 2. Структурная схема алгоритма управления отношением тока к напряжению

В МК 1986BE91T реализовано 2 блока АЦП с частотой дискретизации 512 К выб./с, что связано с его максимальной частотой (14 МГц) работы. К МК 1986BE91T можно подключить до 16 аналоговых устройств, такая возможность обеспечивается за счет встроенного мультиплексора (рис. 3).

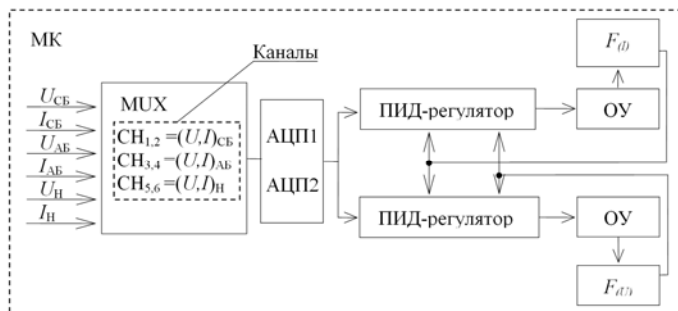


Рис. 3. Схема функционирования АРТ

Работа АЦП возможна в нескольких режимах, однако использовался режим последовательного преобразования аналогового сигнала по заранее установленному списку каналов. Данный режим выбран, поскольку обеспечивает работу с определенными заранее каналами АЦП и обеспечивает автоматическое переключение каналов (по завершении преобразования автоматически приступает к преобразова-

нию сигнала со следующего канала). Также одной из особенностей МК 1986BE91T является наличие прямого доступа к памяти (ПДП), что позволяет сохранять результат работы АЦП в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) МК без вычислительных затрат МК. Таким образом, использование ПДП позволяет существенно разгрузить центральный процессор, не затрачивая вычислительные ресурсы на работу с АЦП. Последние преобразованные данные, находящиеся в ОЗУ, могут быть использованы функциями МК.

Таким образом, разработана схема АРТ с алгоритмом ПИД-регулирования отношением тока к напряжению, что способствует выработке управляющего воздействия одного процесса, учитывая состояние другого процесса. Также разработаны алгоритм и программное обеспечение АРТ для МК 1986BE91T.

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. *Osintsev A., Sobko A., Komnatnov M.* Temperature Controller for External Surface of Waveguide // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016). – М., Russia, 2016. – PP. 1–4.
2. *Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M.* A multi-layer architecture for distributed data acquisition // Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. – 2002. – Vol. 2. – PP. 1261–1264.
3. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control // ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
4. *Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y.* Patents, Software, and Hardware for PID-control // An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006. – PP. 41–54.
5. *Tajuddin M.F.N., Rahim N.A., Daut I., Ismail B., Mohammed M.F.* State Space Averaging Techn. of Power Converter with Digital PID Controller // TENCON–2009 IEEE Region 10. Conference. – 2009. – PP. 1–6.
6. *Jain R.V., Aware M.V., Junghare A.S.* Implementation of a PID control PWM Module on Altera DE0 Kit Using FPGA // Conf. on Control, Meas. and Instrum. (CMI). 2016 IEEE First International. – PP. 1–5.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ГРУППЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

А.В. Осинцев, А.А. Собко, магистранты;

М.Е. Комнатнов, ассистент каф. ТУ, к.т.н.

Томск, ТУСУР, каф. АОИ, каф. ТУ, kubenet@gmail.com

Современные радиотехнические средства состоят из большого количества электронных компонентов, одними из них являются мик-

роконтроллеры (МК). МК получили большое распространение за счет миниатюризации и наличия готовых программно-аппаратных средств. Использование группы МК позволяет расширить возможности и повысить вычислительную способность устройства, но при этом возникает задача синхронизации их работы. Одним из распространенных решений является использование общего тактового генератора для всей группы МК. Однако с увеличением количества МК качество тактовых импульсов может ухудшаться, не гарантируя синхронного выполнения кода во всех МК.

Цель данной работы – разработать программно-аппаратную систему синхронизации работы группы МК, состоящей из 4 и более МК.

Разработана система синхронизации для терморегулятора [1] (рис. 1). Её отличием является работа группы МК от часов реального времени (ЧРВ). Принцип работы основан на формировании синхроимпульсов для группы МК от ЧРВ. Если тактовая частота одного из группы МК отличается, то это не влияет на результат работы группы МК, поскольку каждый МК выполняет собственный подсчет принятых синхроимпульсов от ЧРВ. Например, если один МК работает на частоте 8 МГц, а другой МК на частоте 16 МГц, то срабатывает прерывание за один период времени, при этом значение счетчика для первого МК должно быть вдвое меньше, чем у второго. Это позволяет настроить определенный период срабатывания прерывания в группе МК.

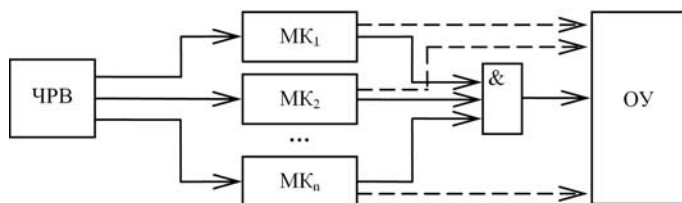


Рис. 1. Общая схема синхронизации МК

При достижении определенного значения счетчика подсчета импульсов (определяющего длительность периода) начинается выполнение «полезной работы». Однако сигнал подтверждения от логического элемента «И» поступит на объект управления (ОУ) только после того, как будут получены сигналы готовности от всех МК, принадлежащих группе.

Синхроимпульсы поступают в МК от прецизионной микросхемы ЧРВ DS3231, управляемой по интерфейсу I²C. Она представляет собой часовой термокомпенсированный кварцевый генератор, настроенный на частоту 32,768 кГц.

Предложенная система синхронизации применена в работе климатической экранированной ТЕМ-камеры [1–4] для эффективного управления температурой на поверхности ТЕМ-камеры. Управляющие сигналы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) рассчитываются четырьмя МК (АТМega2560) на плате терморегулятора. Это позволяет задавать температуру каждой стороны ТЕМ-камеры посредством множества датчиков температуры и обеспечивает своевременные переключения пяти фаз питания 60 элементов Пельтье (ЭП) [5]. Структурная схема платы терморегулятора (рис. 2) состоит из МК АТМega2560, ЭП, датчиков температуры и аппаратно-программных средств синхронизации (ЧРВ, логический элемент «И»).

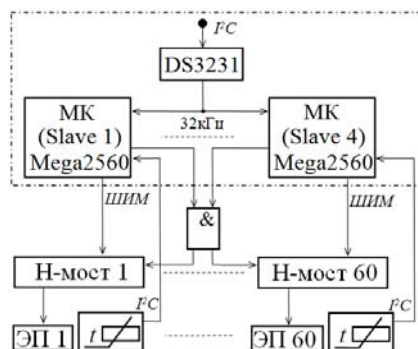


Рис. 2. Структурная схема синхронизации терморегулятора

Проверка работы синхронизации группы МК выполнена в программе Mathlab Simulink. Построена модель схемы синхронизации терморегулятора (см. рис. 2) и выполнено её моделирование (рис. 3).

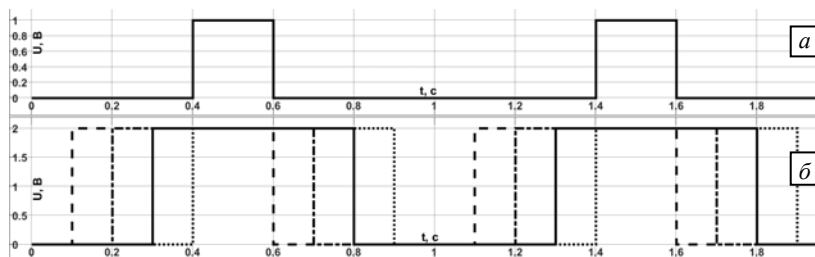


Рис. 3. Работа логического элемента «И» (а) и синхронная работа 4 ШИМ-каналов (б)

Из рис. 3 видно, что длительность каждого ШИМ-сигнала составляет 500 мс и зависит от конфигурации ШИМ-сигнала: частоты, скважности и времени между первым и последним ШИМ-сигналом.

Таким образом, разработан аппаратно-программный комплекс, способный решить задачу синхронизации группы из 4 и более МК. Синхронизация применена в схеме терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры.

Работа выполнена за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Osintsev A., Sobko A., Komnatnov M.* Temperature Controller for External Surface of Waveguide // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016). – Moscow, Russia, 2016. – PP. 1–4.

2. *Комнатнов М.Е., Собко А.А., Осинцев А.В.* Плата управления терморегулятором климатической экранированной ТЕМ-камеры // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2016». – 2016. – С. 330–333.

3. *Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Собко А.А., Демаков А.В.* Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора // Современные технологии в науке и образовании «СТНО–2016»: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. – Т. 1 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 27–30.

4. *Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E.* Software under control of a real-time operating system for environmental shielded TEM-chamber // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2016. – PP. 159–163.

5. *Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Собко А.А., Демаков А.В.* Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора // Современные технологии в науке и образовании «СТНО–2016»: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. – Т. 1. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 27–30.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ, ПОКРЫТОЙ ЗАЗЕМЛЕННЫМ ПРОВОДНИКОМ

И.Е. Сагиева, аспирантка каф. ТУ
Томск, TUSUR, indira_sagieva@mail.ru

Полосковые линии получили широкое распространение в качестве линий передачи быстродействующих сигналов. Одной из самых известных является микрополосковая линия передачи (МПЛ) [1]. Важной задачей является получение стабильных характеристик линий. В этой связи актуальна минимизация чувствительности характеристик линий к изменению их параметров. Поэтому предметом повышенного интереса становятся различные модификации МПЛ, на-

пример подвешенная и обращенная полосковые линии, позволяющие получить нулевую чувствительность погонной задержки и волнового сопротивления к изменению толщины диэлектрических слоев [2]. Эта становится возможным за счет появления дополнительного слоя воздуха конечной толщины и перераспределения электрического поля в слоях воздуха и подложки. Такая же ситуация получится и в случае расположения дополнительного заземленного проводника поверх обычной МПЛ (рис. 1). Между тем детальное исследование возможности получения нулевой чувствительности характеристик такой структуры автору неизвестно. Однако такое исследование позволило бы выявить новые возможности и использовать их.

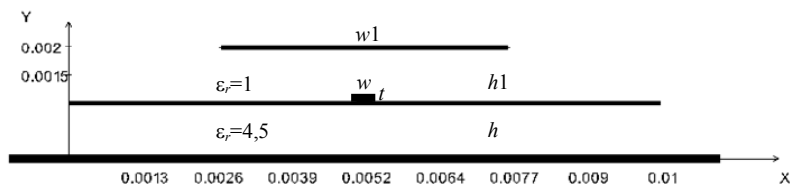


Рис. 1. Поперечное сечение МПЛ, покрытой заземленным проводником

Цель работы – исследовать характеристики МПЛ, покрытой заземленным проводником, и возможность получения их нулевой чувствительности к изменению параметров.

Исследование различных характеристик полосковых структур, особенно на первом этапе, целесообразно выполнять на основе моделирования, поскольку оно менее затратно и может быть более точным, чем измерения. Строгий электродинамический анализ полей в исследуемой линии является достаточно сложной задачей. Это связано с тем, что параметры заполняющей среды в линии неоднородны по сечению. В результате лишь часть поля концентрируется в диэлектрической подложке, а остальная – в воздухе. Поэтому в линии распространяется не чистая ТЕМ-мода, а квази-ТЕМ. При этом характеристики линии не зависят от рабочей частоты, и их можно найти, предварительно определив значение погонной емкости. В данной работе вычисление погонной емкости выполнено в системе TALGAT–2016, а расчет погонной задержки (τ) и волнового сопротивления (Z) выполнен по известным формулам [2]

$$\tau = (C/C_0)^{0.5}/v_0, \quad Z = 1/(v_0(C \cdot C_0)^{0.5}),$$

где v_0 – скорость света в вакууме; C – погонная емкость линии; C_0 – погонная емкость линии в вакууме.

Выполнено моделирование в широком диапазоне параметров линии из рис. 1 и выявлена область параметров с интересующим пове-

дением характеристик. Зависимости τ от высоты заземленного проводника над подложкой (h_1) при разных значениях ширины полоски (w) представлены на рис. 2, а. Характерной особенностью зависимостей является их пересечение между собой. Таким образом, в начале диапазона h_1 увеличение w уменьшает τ , а в конце – увеличивает. В середине диапазона (при $h_1 = 0,5–0,8$ мм) будет минимальная (вплоть до нулевой) чувствительность τ к изменению w . Примечательно также уменьшение чувствительности τ к изменению h_1 при уменьшении w . На рис. 2, б показаны соответствующие зависимости для Z . Они монотонно возрастают и не пересекаются. Таким образом, появляется возможность выбором параметров линии получить требуемое значение Z при минимальной чувствительности τ к изменению w и h_1 .

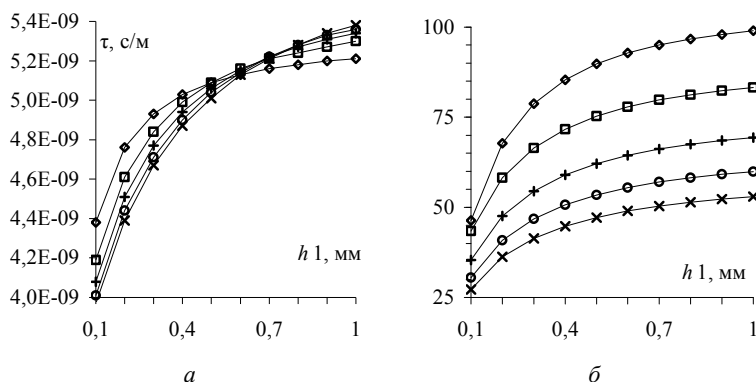


Рис. 2. Зависимости τ (а) и Z (б) от h_1 при $w = 0,3$ ($\diamond$); $0,6$ ($\square$); $0,9$ ($+$); $1,2$ ($\circ$); $1,5$ ($\times$) мм

Таким образом, в работе исследованы характеристики МПЛ, покрытой заземленным проводником, и показана возможность минимизации чувствительности погонной задержки к изменению ширины полоски и высоты заземленного проводника над подложкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарев С.И., Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ-полосковых устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
2. Газизов Т.Р. Характеристики подвешенной и обращенной полосковых линий // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 39, №2. – С. 126–128.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ПОГОННЫЕ ЗАДЕРЖКИ МОД

М.А. Самойличенко, магистрант каф. ТУ;

*Т.Т. Газизов, к.т.н., директор Института прикладной
информатики ТГПУ*

Томск, ТУСУР, 1993mary@mail.ru

Для современного общества характерна насыщенность электрическим, электронным и радиоэлектронным оборудованием. Данное оборудование при работе создает электромагнитные помехи. Особо опасны кондуктивные помехи, подаваемые по проводникам. В качестве источников кондуктивных помех используются сверхкороткие импульсы (СКИ) [1]. В результате действия таких помех возникают различные нарушения в работе оборудования, приводящие к выводу его из строя, авариям и сбоям. Последствия их могут быть катастрофическими для населения и окружающей среды. Все это вызывает необходимость совершенствования защиты.

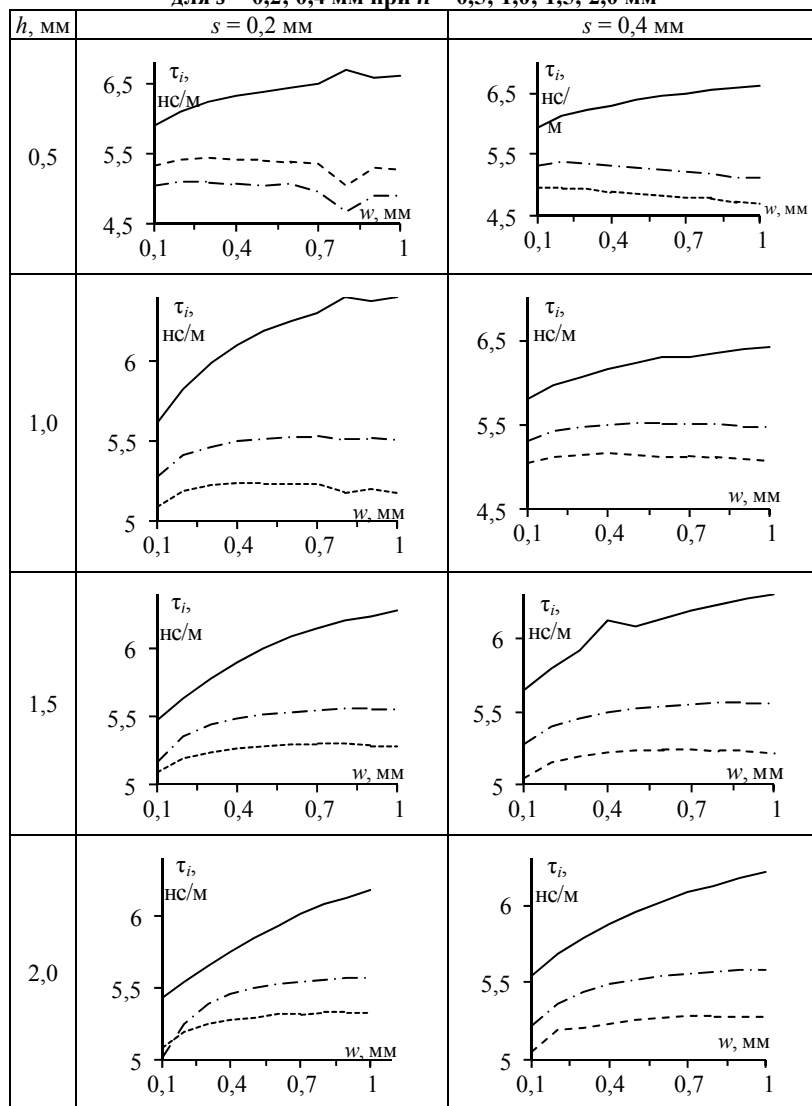
Новым средством защиты от СКИ, использующим модальные искажения [2], являются модальные фильтры (МФ). Ранее исследованы МФ с лицевой связью [3] и на основе гибкого печатного кабеля [4], но у них есть недостатки. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты. Так, в ходе предварительных исследований было предложено расположить пассивный проводник МФ в вырезе опорной плоскости [5]. Показано, что такой МФ имеет перспективы дальнейшего исследования, так как амплитуда на выходе в 3 раза меньше, чем на входе. Найдено оптимальное значение сопротивлений на концах структуры, при котором импульсы на выходе МФ имеют одинаковую амплитуду, являющуюся минимальной амплитудой общего сигнала [6]. Однако влияние параметров МФ на погонные задержки мод не исследовано. Между тем оно важно для улучшения характеристик МФ. Цель работы – выполнить такое исследование.

Вычисление параметров выполнялось в статическом приближении с помощью программного продукта TALGAT [7].

Поперечное сечение исследуемой структуры представлено на рис. 1, где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, w – ширина полигонов, w_1 и t – ширина и толщина сигнального проводника соответственно, h – толщина диэлектрика, s – расстояние между проводниками. Значения параметров: $t = 18$ мкм, ширина проводников $w = w_1$ менялась в диапазоне от 0,1 до 1 мм, $h = 0,5; 1,0; 1,5; 2$ мм, $s = 0,2; 0,4$ мм. Диэлектрическим материалом выбран стеклотекстолит

($\varepsilon_r = 5$) из-за его широкого применения для печатных плат и дешевизны. Полученные результаты представлены в таблице.

Зависимости τ_1 (—), τ_2 (---), τ_3 (- · -) от w
для $s = 0,2; 0,4$ мм при $h = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ мм



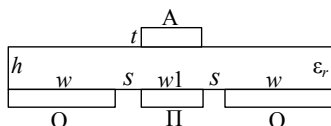


Рис. 1. Поперечное сечение МФ.
Проводники: О – опорный, П – пассивный,
А – активный

Анализ данных из таблицы показывает наличие нефизичных экстремумов (причина которых связана с погрешностями моделирования). Однако везде явно выражены три моды в смысле различия значений их погонных задержек. При этом значение погонной задержки одной из мод всегда существенно выше второй и третьей, значения которых имеют тенденцию к сближению, особенно выраженную при $s = 0,2$ мм и $h = 2,0$ мм. Тем не менее результаты показывают, что для увеличения разности погонных задержек мод надо увеличивать s и w , а также уменьшать h .

Моделирование выполнено 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. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.
3. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWM pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – PP. 1136–1142.
4. Долганов П.Е., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Использование гибкого печатного кабеля для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от высокочастотных кондуктивных помех // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №7. – С. 18–27.
5. Самойличенко М.А. Моделирование модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // Матер. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2016»: в 6 т. – Т. 2. – Томск, В-Спектр. – 2016. – С. 325–327.
6. Самойличенко М.А. Разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // Матер. науч.-техн. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2016. – Т. 2. – С. 222–224.
7. 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 радиотехники. – 2015. – №2 (36). – С. 45–50.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА УРОВЕНЬ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПЯТИПРОВОДНОЙ ШИНЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

В.А. Сирица, студент; А.В. Носов, магистрант;

Р.С. Суровцев, доцент каф. ТУ, к.т.н.

При эксплуатации радиотехнических систем военной, морской и ракетно-космической отраслей большую роль играет стабильность работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Постоянный рост быстродействия и плотности монтажа межсоединений печатных плат РЭА приводит к росту уровня перекрестных наводок, которые могут привести к отказам работы РЭА. Поэтому возникает необходимость разработки новых подходов к компенсации и способов уменьшения уровня перекрестных наводок.

Известно, что нанесение покрывающего диэлектрического слоя оптимальной толщины на пару связанных линий позволяет уменьшить амплитуду наводок [1]. Аналогичное исследование выполнено на примере восьмипроводной шины реальной печатной платы бортовой РЭА космического аппарата, где показана возможность уменьшения амплитуды наводок более чем в 2 раза [2]. Между тем ряд вопросов остается не исследованным. Например, не исследована возможность уменьшения амплитуды перекрестных наводок при неполном покрытии межсоединения диэлектрическим слоем. Целью данной работы является исследование влияния толщины влагозащитного покрытия на уровень перекрестных наводок при частичном нанесении диэлектрика на поверхность межсоединения.

Для проведения исследований выбрана пятипроводная линия передачи с типовыми геометрическими параметрами печатных плат. Поперечное сечение отрезка с покрытием представлено на рис. 1, а, а без покрытия – на рис. 1, б. Параметры поперечного сечения: ширина проводника w и расстояние между проводниками s выбраны по 200 мкм, высота проводника $t = 35$ мкм, толщина основы $h_c = 100$ мкм, диэлектрическая проницаемость основы $\epsilon_{rc} = 3$, диэлектрическая проницаемость покрывающего слоя $\epsilon_{rv} = 4,5$. Построение поперечных сечений и все дальнейшее моделирование выполнено в системе TALGAT [3].

Схема соединения линии передачи представлена на рис. 2, где обозначения l_1 и l_2 введены для длин отрезков межсоединения с покрывающим слоем и без него соответственно. Общая длина линии $l = l_1 + l_2$ выбрана 100 мм. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции: ЭДС $E_0 = 1$ В, длительности фронта/спада $t_f = t_r = 1$ нс, плоской вершины – $t_d = 8$ нс.

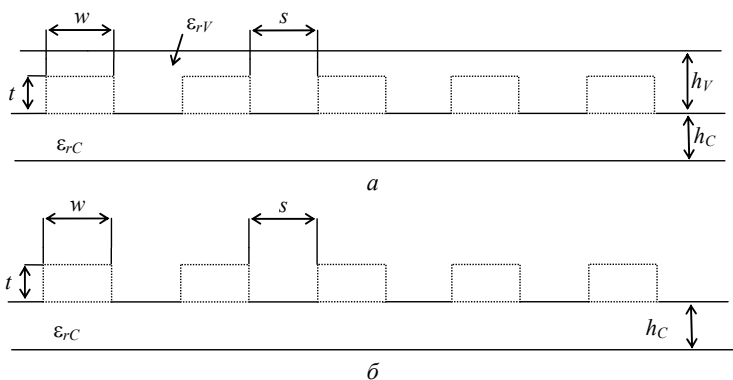


Рис. 1 Поперечные сечения отрезков пятипроводного межсоединения с покрывающим слоем (а) и без него (б)

В качестве активного выбран центральный проводник. Выполнено вычисление форм сигнала на пассивных проводниках в начале и конце межсоединения. Поскольку структура имеет центральную симметрию, то далее на графиках представлены формы сигнала в узлах на ближнем ($V1$, $V4$) и дальнем ($V3$, $V6$) концах только двух пассивных проводников от края структуры. Рассмотрен рассогласованный случай: сопротивления на ближнем конце линии приняты $R1 = R2 = \dots = R5 = 10 \text{ Ом}$, а на дальнем $R6 = R7 = \dots = R10 = 1 \text{ кОм}$.

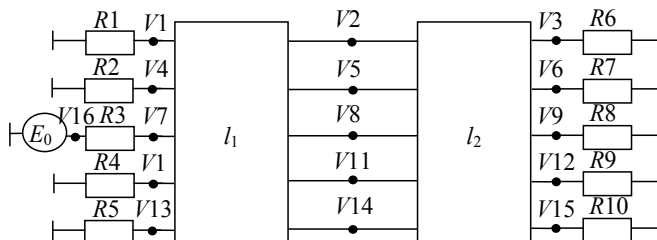
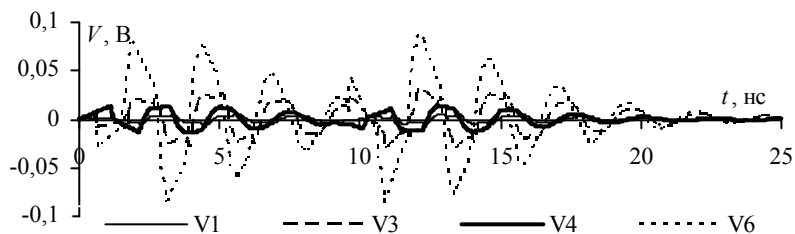


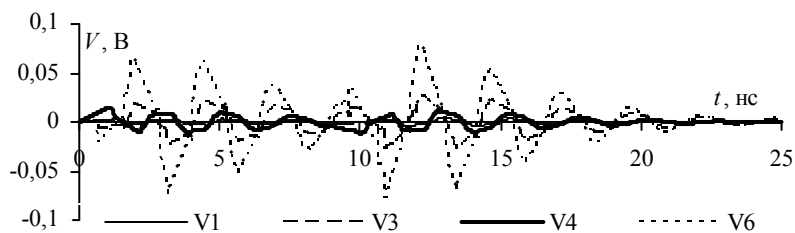
Рис. 2. Схема соединений линии передачи

При моделировании изменялась толщина покрывающего слоя от 10 до 150 мкм при изменении длины отрезка с покрытием от 10 до 90 мм. На рис. 3 представлены формы сигнала в начале ($V1$, $V4$) и конце ($V3$, $V6$) пассивных проводников для крайних точек изменения диапазона $h_V = 10$ и 150 мкм и $l_1 = 10$ и 90 мм.

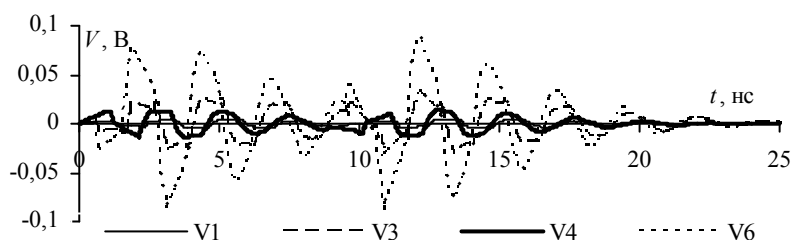
Из зависимостей на рис. 3 видно, что увеличение длины отрезка с покрывающим слоем приводит к уменьшению амплитуды перекрестных наводок.



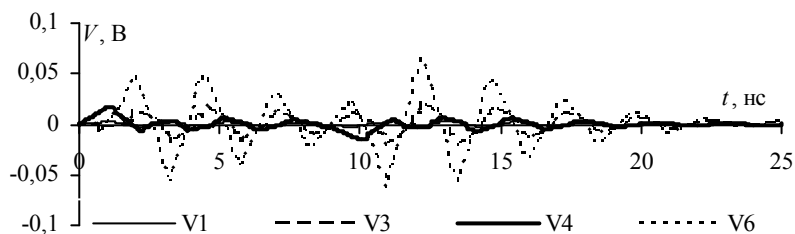
a



б



в



г

Рис. 3. Формы перекрестной помехи на ближнем и дальнем концах линии, при $h_V = 10$ мкм, $l_1 = 10$ мм (*a*), $h_V = 10$ мкм, $l_1 = 90$ мм (*б*), $h_V = 150$ мкм, $l_1 = 10$ мм (*в*) и $h_V = 150$ мкм, $l_1 = 90$ мм (*г*)

Так? при увеличении l_1 от 10 до 90 мм максимальная амплитуда наводок уменьшается более чем на 10%. Увеличение толщины влагозащитного покрытия до 150 мкм при $l_1 = 10$ мм (рис. 3, в) приводит незначительному уменьшению амплитуды наводки (менее 0,1%), однако при увеличении l_1 до 90 мм (рис. 3, г) амплитуда уменьшается на 30% по сравнению с исходным уровнем. Это связано с компенсацией перекрестной наводки на дальнем конце, поскольку ее амплитуда пропорциональна разности коэффициентов емкостной и индуктивной связей, а увеличение толщины влагозащитного покрытия приводит к уменьшению этой разности.

Таким образом, увеличение толщины влагозащитного покрытия позволяет существенно (до 30% на рассмотренном примере) снизить амплитуду перекрестной наводки. Между тем очевидно, что предел уменьшения амплитуды наводки за счет данного похода конечен, поскольку чрезмерное увеличение толщины влагозащитного покрытия может привести к перекомпенсации амплитуды наводки на дальнем конце в согласованном случае, что приведет к росту общего уровня наводок в случае рассогласования. В качестве продолжения исследований видится необходимым рассмотрение других способов нанесения влагозащитного покрытия (избирательное нанесение только на участок межсоединения, или только на критичные проводники и т.д.) и проведение натурных испытаний для апробации предложенных подходов.

Математическое моделирование выполнено за счет госзадания 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации. Численный эксперимент проведен за счет гранта 14-19-01232 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дис. ... д-ра тех. наук: 05.12.07. – Томск: ТУСУР, 2010. – 351 с.

2. Суворовцев Р.С. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04. – Томск: ТУСУР. – 2016. – 248 с.

3. 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 радиотехники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

МАКЕТ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА 1986BE91T

*А.А. Собко, А.В. Осинцев, магистранты;
М.Е. Комнатнов, ассистент каф. ТУ, к.т.н.
Томск, ТУСУР, каф. ТУ, каф. АОИ, alexfreetibet@gmail.com*

Требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) устанавливают соответствующий уровень электромагнитной эмиссии (помехоэмиссии) и восприимчивости (помехоустойчивости). Их измерения проводят в соответствии с нормативными документами, в которых оговаривается порядок проведения, а также необходимые измерительные приборы и устройства. Измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости микроконтроллера (МК) согласно стандартам МЭК 61967-2 [1] и МЭК 62132-2 [2] требуют разработки специальной измерительной печатной платы (ПП) для испытуемой интегральной схемы (ИС).

Цель работы – представить результаты разработки макета измерительной ПП для исследования МК 1986BE91T на ЭМС.

Измерительная ПП для МК 1986BE91T разработана в полном соответствии со стандартами [1, 2]. Она состоит из четырехслойного фольгированного стеклотекстолита размером 100×100 мм². Со стороны размещения МК выполнен сплошной полигон для экранирования и минимальной неравномерности воздействующего поля (рис. 1, а). С другой стороны расположены периферийные устройства (рис. 1, б) необходимые для функционирования МК.

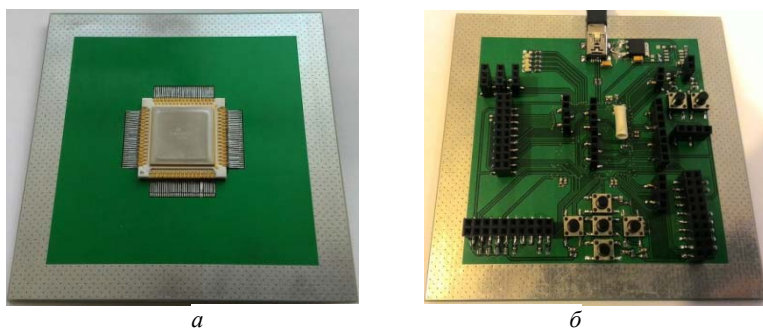


Рис. 1. Измерительная ПП для испытаний на ЭМС: вид сверху (а) и снизу (б)

Сквозные отверстия располагаются под выводами МК (см. рис. 1, а), что необходимо для подключения к печатным проводникам

на обратной стороне платы и создания сплошного полигона земли под МК. Края ПП представляют собой сплошные плоскости земли, без паяльной маски, соединенные между собой сквозными переходными отверстиями для электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры. Для исключения влияния внешних и внутренних высокочастотных помех предлагается включение фильтра нижних частот (ФНЧ) (рис. 2, б) с частотой среза 2 ГГц и ниже.

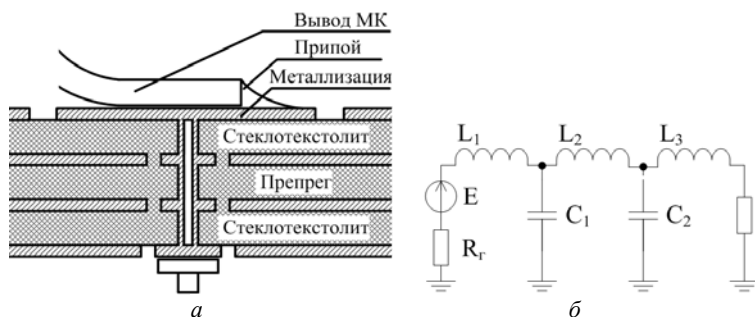


Рис. 2. Стек платы для испытаний на ЭМС (а) и предлагаемый ФНЧ (б)

Напряжение 5 В на измерительную ПП подается через mini USB соединитель, затем линейным стабилизатором напряжения LM1117DT-3,3 стабилизируется до значения напряжения 3,3 В. Расположенный внутри МК линейный стабилизатор обеспечивает функционирование памяти и ядра. Работа МК осуществляется от внешнего источника питания с значением напряжения от 2,4 до 3,6 В, поскольку использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) ограничивает минимальное напряжение (не менее 2,4 В). Выводы питания аналоговых блоков АЦП, ЦАП и компаратора расположены отдельно для уменьшения электромагнитных связей, создаваемых работой других блоков. Для отладки МК посредством JTAG/SW адаптера на обратной стороне платы присутствуют соединители, соответствующие интерфейсу. При этом программные средства отладки позволяют работать с МК в отладочном режиме. К линиям JTAG с учетом влияния на работу системы подключены резисторы номиналом 10 кОм, повышающие логический уровень. На ПП присутствуют инструменты ввода/вывода, есть возможность подключения жидкокристаллического индикатора. На соединители выведены 5 выходов 12-разрядного АЦП, предназначенные для оцифровки данных с датчиков тока и напряжения. Для управления нагрузкой ШИМ-сигналом имеется соединитель с 12 выводами

12-разрядного ЦАП. На ПП присутствуют контроль перегрузки по току и светодиодная индикация режимов работы.

Таким образом, разработана ПП, предназначенная для проведения измерений помехоэмиссии и помехоустойчивости отечественных МК согласно стандартам [1, 2]. Тем самым сделан вклад в импортозамещение.

Работа выполнена за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005.*

2. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*С.А. Тернов, магистрант; М.Е. Комнатнов, м.н.с. каф. ТУ, к.т.н.
Томск, ТУСУР, stanislav.1995@mail.ru*

Силовая шина электропитания (СШЭП) (рис. 1) бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического аппарата (КА) разрабатывается АО «ИСС им. Решетнева» и является экспериментальным макетом для перспективных КА. Эта шина обеспечивает электропитание отдельных блоков КА суммарной мощностью до 20 кВт. Для уменьшения массы и габаритов КА необходимо интегрировать помехозащитные фильтры в СШЭП, исключив их из отдельных блоков КА. Однако СШЭП для перспективных КА может применяться не только для передачи электроэнергии, но и для передачи данных по технологии Power Line Communication (PLC) [1], а также выступать в виде помехозащитного фильтра.



Рис. 1. СШЭП бортовой РЭА КА

Цель работы – исследовать возможность создания интегрированных помехозащитных фильтров в СШЭП бортовой РЭА КА, с возможностью реализации технологии PLC.

Исходная конструкция СШЭП (рис. 2) выполнена из двух параллельных алюминиевых пластин шириной 11 мм и толщиной 5 мм (1). Зазор (2) в 2 мм между пластинами заполнен диэлектриком с $\varepsilon_r = 4,3$. Пластины покрыты слоем напыления 50 мкм с $\varepsilon_r = 20$ (3) и лаком ЭП-730 (4), толщиной 18–20 мкм, согласно ГОСТ 20824–81 [2]. Поверху намотана пленка толщиной 0,1 мкм с $\varepsilon_r = 2,3$ (5), а на пленку намотан экранирующий материал (ЛМAMC) для стекания электростатических зарядов (ЭСР).

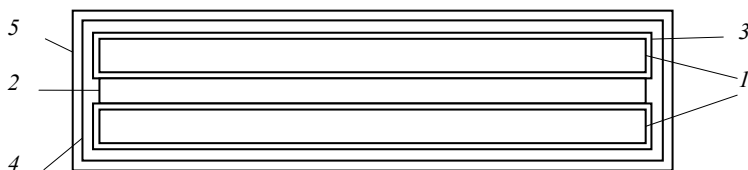


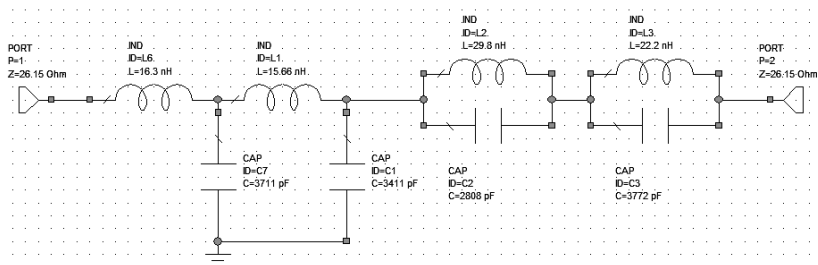
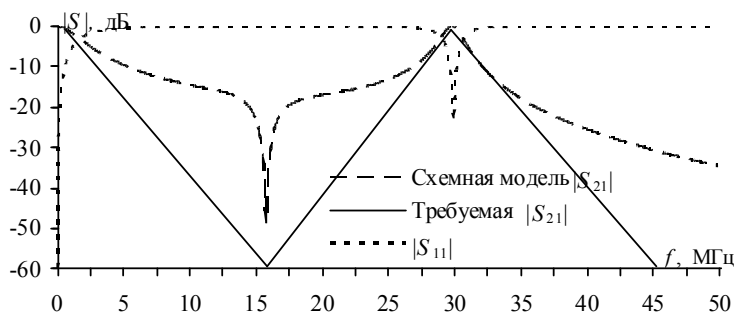
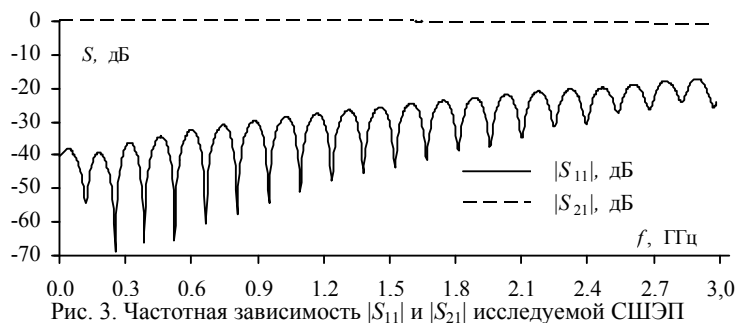
Рис. 2. Поперечное сечение СШЭП бортовой РЭА КА

В программе TALGAT выполнен квазистатический анализ без слоя ЛМAMC. Получены значения погонной емкости $C_0 = 246,15$ пФ/м и индуктивности $L_0 = 0,17$ мкГн/м, а также волновое сопротивление $Z_B = 26,15$ Ом. Также выполнен анализ влияния слоев СШЭП на Z_B , при этом происходило поочередное исключение одного из слоев структуры, исключение только пленки снижает Z_B на 1,58 Ом, исключение только лака – на 3,63 Ом, а исключение напыления – на 11,54 Ом. Таким образом, существенное влияние в Z_B СШЭП вносит напыление, которое повышает Z_B примерно в 2 раза, а его неучет ведет к снижению Z_B до 14,61 Ом.

При помощи электродинамического моделирования получена частотная зависимость модуля коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и передачи $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 3 ГГц.

Из рис. 3 видно, что максимальное значение $|S_{11}|$ возрастает от минус 40 дБ до минус 17 дБ, в диапазоне частот до 3 ГГц, а $|S_{21}|$ с ростом частоты убывает от 0 дБ до –1,5 дБ.

Для реализации помехозащитных фильтров и технологии PLC в СШЭП, необходимо добиться требуемой частотной зависимости $|S_{21}|$ (рис. 4). Для PLC частота поднесущей 30 МГц. Предполагается реализовать PLC основываясь на схемной модели СШЭП. Создана приближенная схемная модель СШЭП (рис. 5), которая состоит из каскадно соединенных двух Г-образных контуров и двух параллельных контуров.



Таким образом, выполнены квазистатический анализ и электродинамическое моделирование СШЭП РЭА КА в диапазоне частот до 3 ГГц. Максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает -17 дБ при $Z_B = 26,15$ Ом. Предложена простая схемная модель реализации технологии PLC в СШЭП бортовой РЭА КА.

Работа выполнена за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Degaque P.* Power-Line communication: channel characterization and modeling for transportation systems // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2015. – Vol. 10, Iss. 2. – PP. 28–37.
2. *ГОСТ 20824–81.* Лак ЭП-730. – СПб.: ООО «Гамма индустриальные краски», 2012. – 2 с.

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ НЕЧЕТНОЙ МОДЫ С ПОМОЩЬЮ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ОБЛАСТИ СВЯЗИ ПРОВОДНИКОВ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

Р.Р. Хажобеков, магистрант каф. ТУ

Томск, ТУСУР, r300994@mail.ru

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса (СКИ) предложены устройства защиты – модальные фильтры (МФ), основанные на технологии модальной фильтрации [1]. Принцип работы МФ основан на использовании явления модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за разности задержек мод. В работе [1] представлены результаты исследований, показывающие влияние неоднородного диэлектрического заполнения связанной линии на разность задержек мод. Однако разность задержек мод можно изменить за счет применения периодического профиля области связи – пилообразного или ступенчатого [2]. В таких структурах увеличивается длина пути нечетной моды по сравнению с четной, поскольку токи нечетной моды вытесняются к внутренним краям проводников в области связи, а токи четной моды – к внешним.

Цель работы – исследовать влияние периодического профиля области связи проводников на изменение задержки нечетной моды МФ.

Для исследования используется структура МФ из FR-4 [1, 3] (рис. 1, а), ширина проводников 0,5 мм, толщина 85 мкм, толщина материала 0,4 мм. Сопротивление резисторов, установленных в начале и конце активного и пассивного проводников, равно 100 Ом. При исследовании используется электродинамическое моделирование [4]. В качестве входного воздействия используется импульсный сигнал длительностью 300 пс и амплитудой 10 В (рис. 2).

Результаты моделирования для исходной структуры МФ длиной 2 м представлены на рис. 3. Видно, что задержка для нечётной моды составила 7,5 нс, а для чётной – 10,8 нс.

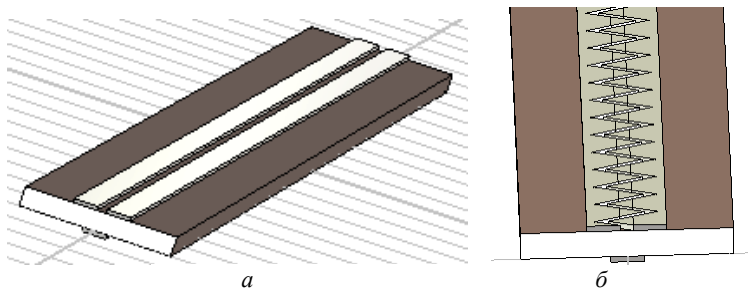


Рис. 1. Исходная структура МФ (а) и МФ с пилообразным профилем области связи между активным и пассивным проводниками (б)

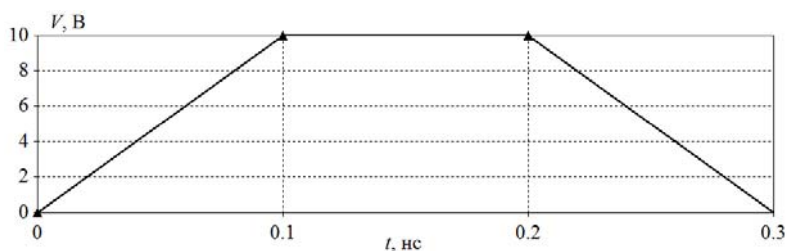


Рис. 2. Входное воздействие

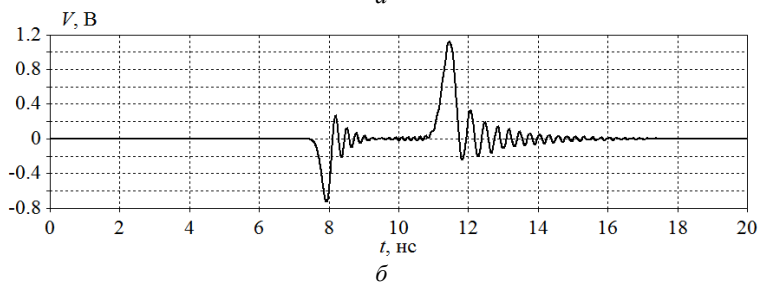
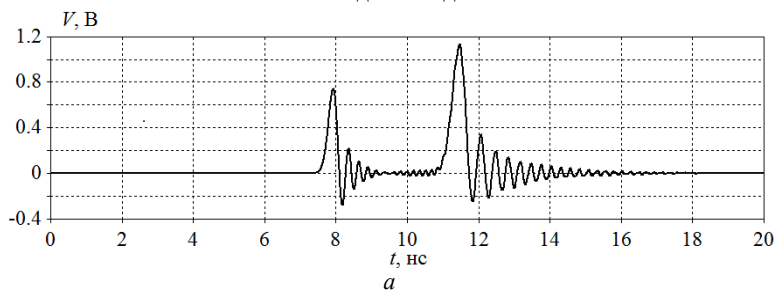


Рис. 3. Формы сигналов для исходной структуры МФ в конце активного (а) и пассивного (б) проводников

На рис. 1, б изображена структура МФ с пилообразным профилем области связи между активным и пассивным проводниками. Результаты моделирования для этой структуры представлены на рис. 4 для длин 1 и 2 м. При этом длины пилообразного профиля области связи равны 1,8 и 3,6 м. Из полученных результатов видно, что при длине структуры МФ 1 м приходит один импульс, как в активном, так и в пассивном проводниках с задержкой 5,2 нс. Происходит выравнивание задержек чётной и нечётной мод. При длине 2 м наблюдается 2 импульса в обоих проводниках, а время задержки нечётной моды составляет 14,5 нс, а для чётной – 11,7 нс.

Таким образом, использование периодического профиля области связи проводников МФ приводит к увеличению задержки нечетной моды.

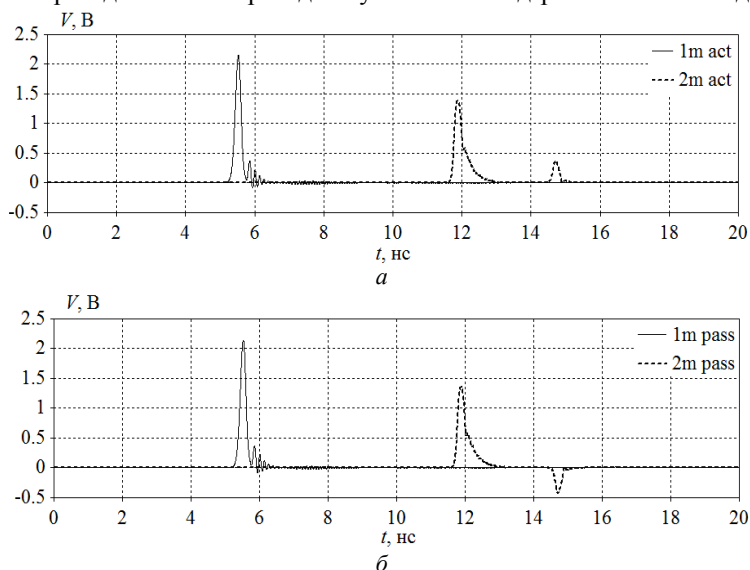


Рис. 4. Формы сигнала для структуры с пилообразным профилем связи в активном (а) и пассивном (б) проводниках для длин 1 м (—) и 2 м (---)

Математическое моделирование выполнено за счет проекта 8.9562.2017 Минобрнауки Российской Федерации. Численный эксперимент проведен за счет гранта РНФ 14-19-01232 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Заболоцкий А.М.* Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.

2. Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.

3. Кропотов В.В., Газизов Т.Т. Конструктив блока модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Научная сессия ТУСУР–2016: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 310–313.

4. CST – Computer Simulation Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cst.com> (дата обращения: 01.09.2016).

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПО ДВУМ КРИТЕРИЯМ

Е.Б. Черникова, студентка; А.О. Белоусов, магистрант
Томск, ТУСУР, каф. ТУ, chiernikova96@mail.ru

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощного сверхкороткого импульса (СКИ) [1] предложена технология модальной фильтрации [2], основанная на использовании явления модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод. В [3] исследована зеркально-симметричная структура для реализации модальных фильтров (МФ). Однако оптимизация параметров для этой структуры не проводилась. Кроме того, в работе [3] использовались 8 резисторов с сопротивлением 92 Ом, по значению главной диагонали матрицы характеристического импеданса. Однако в настоящее время широко используется тракт 50 Ом. Таким образом, возникает необходимость оптимизации параметров данной структуры в тракте 50 Ом.

Цель работы – выполнить оптимизацию параметров зеркально-симметричного МФ в тракте 50 Ом.

Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры приведено на рис. 1, а принципиальная электрическая схема – на рис. 2 а.

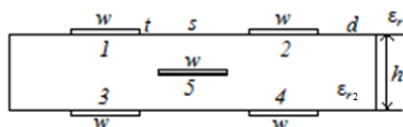


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры

Вычисление параметров линии и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [4]. Исходные параметры зеркально-симметричной структуры: ширина проводников $w = 300$ мкм, расстояния между проводниками $s = 400$ мкм, толщина проводников

$t = 105$ мкм, толщина диэлектрика $h = 290$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_{r1} = 1$, а диэлектрика – $\epsilon_{r2} = 4,5$ при длине проводников $l = 1$ м. Значения сопротивлений резисторов $R_r = R_n = R$ выбраны равными 92 Ом, а источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС (длительности фронта, спада и плоской вершины выбраны равными по 50 пс, так что $t_2 = 150$ пс, а амплитуда – 5 В). Формы сигналов на входе и выходе активного проводника приведены на рис. 3.

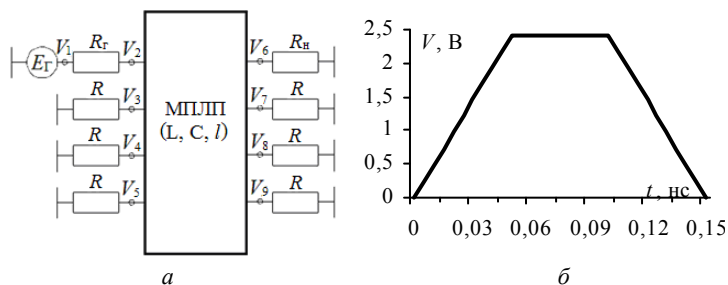


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема для моделирования (а) и форма сигнала на входе (б)

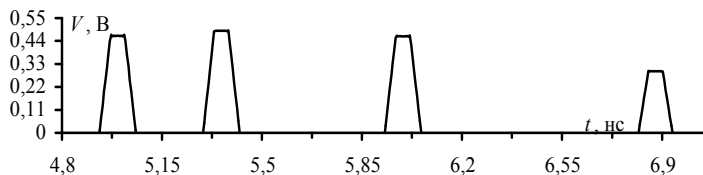


Рис. 3. Форма сигнала на выходе активного проводника при $s = 400$ мкм, $w = 300$ мкм

Из рис. 3 следует, что значения амплитуд импульсов на выходе активного проводника равны 0,466; 0,49; 0,466 и 0,296 В. Разности задержек соседних импульсов равны 0,3628; 0,6355 и 0,8837 нс.

Далее представлены результаты оптимизации эмпирическим поиском параметров на основе двух критериев. Оптимизация выполнялась по параметрам s и w в диапазоне 250–2000 мкм. Были выбраны значения параметров $t = 18$ мкм, $h = 500$ мкм, которые не менялись при оптимизации, как и значение ϵ_r . В результате получены значения, позволяющие выравнять амплитуды импульсов разложения: $w = 1600$ мкм, $s = 250$ мкм, а также интервалы времени между импульсами разложения: $w = 1600$ мкм, $s = 500$ мкм (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что амплитуды импульсов на выходе активного проводника равны 0,622; 0,583; 0,622 и 0,58 В. В результате выравнивания амплитуд импульсов разложения увеличивается их амплитуда (по сравнению с рис. 3), что снижает коэффициент ослабления МФ. Между тем интервалы времени между импульсами выравниваются и точные разности задержек соседних импульсов равны 0,4852; 0,5191 и 0,4971 нс. Однако амплитуды импульсов почти одинаковы 0,62; 0,58; 0,61 и 0,57 В.

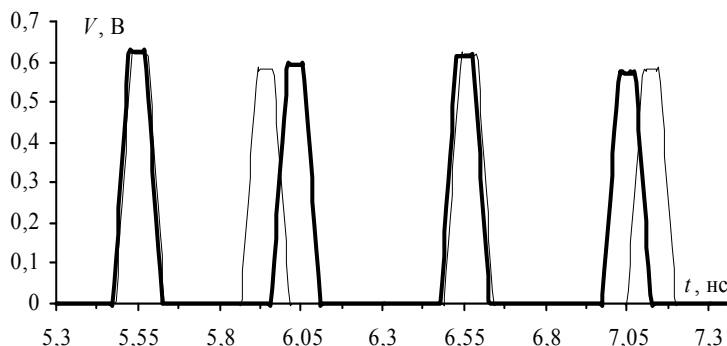


Рис. 4. Форма сигнала на выходе активного проводника при $w = 1600$ мкм, $s = 250$ мкм (—) и $w = 1600$ мкм, $s = 500$ мкм (---)

В результате при $w = 1600$ мкм, $s = 500$ мкм зеркально-симметричный МФ длиной $l = 1$ м может разложить сигнал длительностью до $t_{\Sigma} = 485$ пс при коэффициенте ослабления в 4 раза.

Математическое моделирование МФ выполнено за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации. Численный эксперимент проведен за счет гранта РНФ 14-19-01232 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – Note 41, 2014.
2. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, № 4. – PP. 1136–1142.
3. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015.
4. Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. et al. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments // Advances in Intelligent Systems Research // Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). August 23–24, 2015, Phuket, Thailand. – PP. 293–301.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО РЕСУРСА СИСТЕМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДИАПАЗОНА 146–174 МГц

Д.Б. Шамаков, аспирант каф. ТУ

Томск, ТУСУР, dshrfc@gmail.com

Несмотря на бурное развитие сотовой связи, системы технологической связи (СТС) диапазона 146–174 МГц по-прежнему находят широкое применение в различных отраслях экономики России. Например, в Томской области они активно используются в таких отраслях, как транспорт, энергетика, транспортировка нефти и газа по трубопроводам, а также различными экстренными службами. Широкое использование этих систем объясняется простотой и относительной дешевизной их развертывания, а также специфическими требованиями многочисленных отраслевых руководящих документов к надежности связи и независимости ее от операторов связи.

В соответствии с действующим на данный момент решением Государственной комиссии по радиочастотам [1] для законного использования СТС требуется проведение экспертизы их электромагнитной совместимости (ЭМС) с действующими и планируемыми для использования радиоэлектронными средствами (РЭС). Для проведения экспертизы ЭМС РЭС достаточно того, чтобы поступившая заявка соответствовала требованиям [1], а также чтобы технические характеристики РЭС, которые планируется использовать в сети СТС, не превышали максимальных значений, изложенных в [2]. При этом организация, проводящая экспертизу ЭМС, не вправе требовать от заявителя обосновать выбранные параметры работы РЭС (мощность, высоту подвеса антенны, коэффициент усиления антенны и др.) или принять самостоятельное решение о снижении этих параметров в случае их явно необоснованного завышения. Не существует на данный момент и механизма, позволяющего контролирующим органам в области связи принудительно снизить параметры работы РЭС через определенный срок после процедуры присвоения частот при обнаружении фактов необоснованного завышения этих параметров. Такое положение вещей осложняет и без того непростую электромагнитную обстановку и приводит к дефициту свободного радиочастотного ресурса (РЧР) в диапазоне 146–174 МГц.

Покажем сказанное выше на примере Томской области. Используя интернет-ресурс [3] произведем отбор всех стационарных РЭС диапазона 146–174 МГц на территории Томской области и нанесем их на карту (рис. 1). Из рис. 1 видно, что базовые станции СТС распределены по территории Томской области крайне неравномерно – в ос-

новном они сконцентрированы на территориях крупных населенных пунктов (города Томск, Северск, Стрежевой, Асино), нефтегазовых месторождений, а также вдоль магистрального нефтепровода Александровское – Анжеро-Судженск.

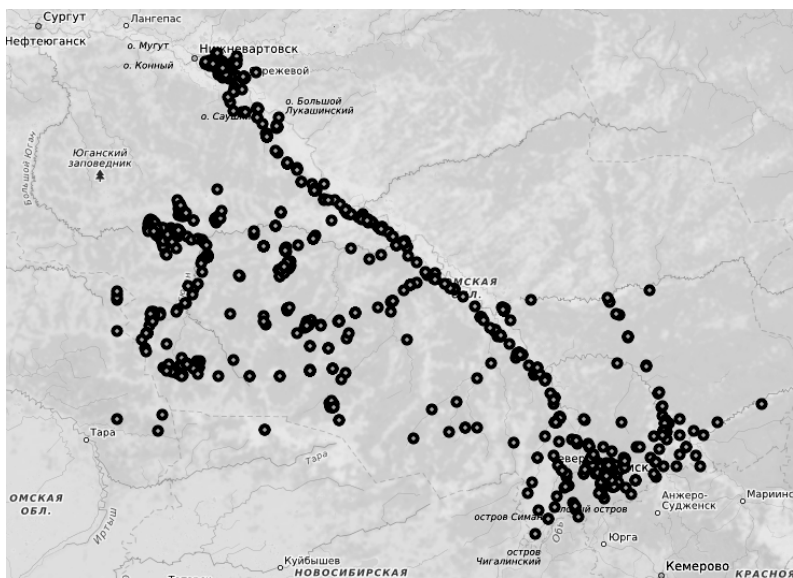


Рис. 1. Распределение стационарных РЭС диапазона 146–174 МГц по территории Томской области на 10.02.2017

Подобная неравномерность распределения базовых станций СТС наблюдается также на территориях других субъектов РФ и приводит к повышенному спросу на частотный ресурс на определенных ограниченных территориях – как правило, на территориях крупных технологических объектов. Вместе с тем параметры работы СТС, закладываемые на этапе проектирования и проходящие впоследствии экспертизу ЭМС, зачастую оказываются необоснованно завышенными.

Покажем это на примере одной из сетей СТС, расположенной в Томской области, состоящей из 17 базовых станций (БС) и абонентских стационарных станций (АС), расположенных по проекту на максимальном удалении в 30 км от каждой БС. Сравним максимально разрешенное удаление с расстоянием до самой отдаленной фактически существующей АС для каждой БС. При этом ограничимся рассмотрением лишь первых 6 БС данной сети в связи с ограничениями, накладываемыми на размер публикации. Данные проведенного анализа внесены в таблицу.

Сравнение проектных и фактических значений зоны обслуживания базовых станций конкретной сети связи, введенной в эксплуатацию в 2008 г.

№ БС	Место размещения БС	Максимальное расстояние до АС по проекту, км	Максимальное расстояние до АС фактически, км	Завышение, %
1	с. Семилужки	30,0	0,4	98,7
2	пос. Орловка	30,0	19,2	36,0
3	д. Рыбалово	30,0	20,1	33,0
4	с. Молчаново	30,0	18,2	39,3
5	с. Леботер	30,0	19,3	35,7
6	д. Первомайка	30,0	9,4	68,7

Пример, приведенный в таблице, показывает, что при проектировании сети был заложен запас от 33 до 98,7%, который не реализовался в течение 9 лет, прошедших с момента ввода сети в эксплуатацию. С точки зрения эффективного использования РЧР целесообразно в данном случае сократить зоны обслуживания БС до фактически необходимых, уменьшив излучаемые мощности БС или высоты подвеса их антенн.

Выводы

1. Существующий дефицит РЧР в диапазоне 146–174 МГц во многом обусловлен его неэффективным использованием.
2. Закладываемые по проекту параметры работы сетей связи зачастую многократно превышают фактически необходимые.
3. Требуется изменение подходов к управлению использованием РЧР, в частности, расширение полномочий контролирующих органов в области связи, введение повышенных ставок оплаты за неэффективное использование РЧР, повышение культуры проектирования сетей связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Решение* ГКРЧ №16-39-01 // Официальный сайт Минкомсвязи России. – URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/5314/> (дата обращения: 10.02.2017).
2. *Решение* ГКРЧ №09-03-01-1 // Официальный сайт Минкомсвязи России. – URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4032/> (дата обращения: 10.02.2017).
3. *Радиоэлектронные средства* // Федеральная автоматизированная информационно-аналитическая система в области использования радиочастотного спектра и средств массовой коммуникации. – URL: <http://fais-rfs.ru/radio/> (дата обращения: 10.02.2017).

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

*Председатель секции – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;
зам. председателя – Вилисов А.А., проф. каф. РЭТЭМ, д.т.н.*

ГИБРИДНЫЙ СВЕТИЛЬНИК – ПРОДУКТ ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМ СОВМЕЩЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Я.В. Анцупов, магистрант, каф. ЭСиЭ

Научный руководитель А.Т. Овчаров, проф. каф. АП, д.т.н.

Томск, НИ ТПУ, antsupov.yv@gmail.com;

ТГАСУ, oat_08@mail.ru

На сегодняшний день в мире значительная часть электроэнергии (ЭЭ) тратится на освещение. Россия не является исключением, на долю искусственного света расходуется 14% от всей вырабатываемой отечественной энергетикой ЭЭ [1]. Основным потребителем является внутреннее освещение, на долю которого приходится около 90%, т.е. внутренние осветительные сети являются наиболее ёмкой и преобладающей сферой потребления ЭЭ на освещение. В этой связи актуальны мероприятия по внедрению современной техники и технологий, решающих задачи энергосбережения.

Современным вариантом систем освещения высокой энергетической эффективности являются системы совмещенного освещения, реализующие ресурс естественного света, интегрированного с современными источниками искусственного света высокой эффективности – светодиодной светотехникой. Технической реализацией таких интегрированных систем является гибридный светильник (ГС) (рис. 1), объединяющий в единую конструкцию светодиодный блок искусственного света (СБИС) и источник естественного света – полые трубчатые световоды (ПТС) [2, 3].

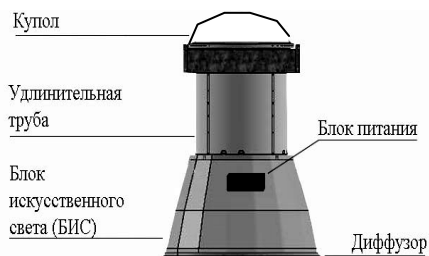


Рис. 1. Вариант гибридного светильника

Такое решение фактически приводит к созданию универсального светотехнического устройства с рекордными параметрами (таблица), способного эффективно функционировать в течение 24 ч без участия человека («Умный свет»), благодаря системе автоматического управления (САУ) (рис. 2).

Показатели ССО на базе гибридного светильника

№ п/п	Показатель	Значение	Примечание
1	Удельная установленная мощность* осветительной системы, Вт/м ²	3	$P_{уд}$: ЛН – 65, КЛЛ – 15, ЛЛ (Т5) – 8, МГЛ – 9, LED – 6 Вт/м ² – тип ламп**
2	Высота установки, м	3–20	Высота потолка помещения
3	Диапазон электрической мощности ГС, Вт	60–600	Электрическая мощность СБИС
4	Максимальный световой поток, лм	60000	ПТС – естественный свет
		60000	СБИС – искусственный свет
		60000	ПТС+СБИС+САУ
5	Световая отдача, приведенная к суточному (годовому) циклу работы, лм/Вт	$\geq 320^{***}$	Физический предел световой отдачи светодиода 280 лм/Вт
6	Качество цветопередачи, R_a	≥ 95	Идеальный свет
7	КПД оптического тракта не ниже, %	97	
8	$\cos\varphi$	0,95	
9	Срок службы, лет/ч	ПТС	30 лет
		СБИС	10/50000

Примечание. * Удельная установленная мощность при $E = 300$ лк, $h_{\text{потолка}} \geq 6$ м.

** Тип ламп: ЛН – лампа накаливания, КЛЛ – компактная люминесцентная лампа, ЛЛ (Т5) – люминесцентная лампа типа Т5, МГЛ – металлогалогенная лампа, LED – светодиодный светильник.

*** Среднее значение на годовой цикл для Томского региона.

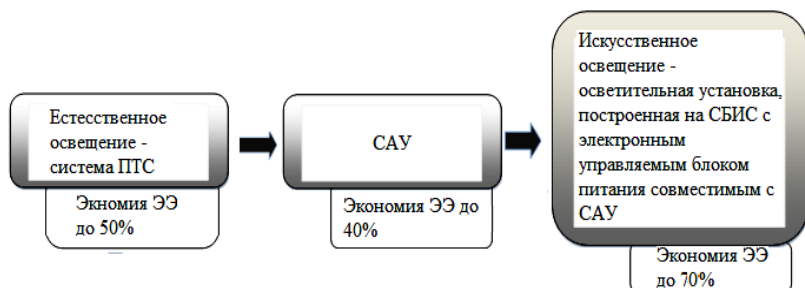


Рис. 2. Структура системы совмещенного освещения

ГС предназначен для ССО с высокими показателями качества световой среды, удовлетворяющими самым жестким требованиям СанПиН и СП52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение», и предельно возможным эффектом энергосбережения (рис. 3). ГС может быть использован для систем освещения объектов любого назначения без ограничений к планировке, высоте потолков (от 3 до 20 м), архитектуре, этажности зданий и сооружений: промышленные предприятия, гражданские, общественные, учебные, детские дошкольные и школьные образовательные учреждения, спортивные, сельскохозяйственные, наземного и подземного размещения в контексте развития новой градостроительной политики.

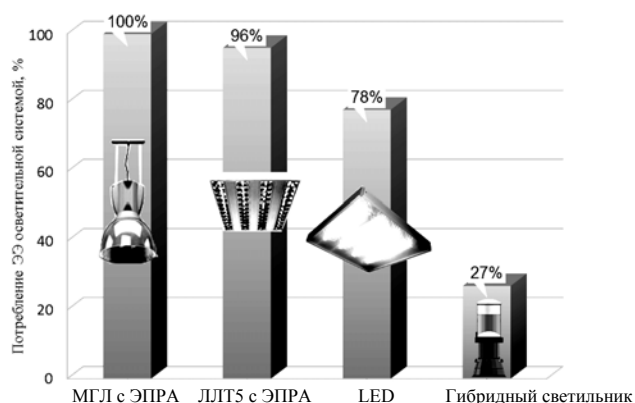


Рис. 3. Эффект энергосбережения при использовании ГССО

Анализ зарубежного и отечественного состояния осветительной техники показал, что разрабатываемый ГС не имеет отечественных аналогов и превосходит известные зарубежные. ГС может быть применен без ограничений географического и климатического фактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Ю.Б. Как повысить эффективность освещения / Ю.Б. Айзенберг, Л.П. Варфоломеев // Спец. выпуск АВОК. – 2011. – №3. – С. 52–56.
2. Aizenberg J.B. Hollow light guides/ J.B. Aizenberg. – М.: Znack Publishing House, 2009. – 208 p.
3. Овчаров А.Т. Solatube в архитектуре и строительстве РФ / А.Т. Овчаров, Ю.Н. Селянин // Светотехника. – 2016. – №1. – С. 35–40.
4. Овчаров А.Т. Гибридный светильник совмещенного освещения с системой автоматического управления / А.Т. Овчаров // Электронные информационные системы. – 2015. – №4. – С. 22–34.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО
ОСВЕЩЕНИЯ НА ТРАВЯНИСТЫЕ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСТЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ
МЯТЫ СОРТА «ОВОЩНАЯ ВОРОЖЕЯ»**

К.В. Бушланова, О.М. Жукова, студентки каф. РЭТЭМ

Научный руководитель Е.Г. Незнамова, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

Томск, ТУСУР, univserh66@mail.ru

*Проект ГПО РЭТЭМ-1403 «Исследование влияния света
на тепличные растения»*

Известно, что свет – неотъемлемый фактор существования культурных растений, так как благодаря ему происходит фотосинтез. Фотосинтез – это преобразование углекислого газа и воды за счёт световой энергии в органические вещества и кислород.

В сельском хозяйстве широко применяется дополнительное освещение при выращивании различной растительной продукции.

Одной из передовых тенденций развития фитоосвещения являются светодиодные технологии, они успешно используются для выращивания нескольких видов сельскохозяйственных культур в опытных хозяйствах. Спектр и интенсивность излучения фитосветильника влияют на фотосинтез, что существенно ускоряет рост и урожайность растений. Индикатором фотосинтеза является хлорофилл.

Из всего спектра солнечного света для жизни растений важна фотосинтетическая активная 380–710 нм и физиологически активная радиация 300–800 нм. Наибольшее значение имеют красный и оранжевый спектры излучения. Именно они являются основными поставщиками энергии для фотосинтеза и влияют на процессы, связанные с изменением скорости развития растения [1].

Целью исследования является нахождение оптимального светового режима для выращивания сельскохозяйственных растений.

Длина волн красного спектра излучения составляет от 620–770 нм, применительно растениям принято данный спектр делить на группы: красный – 660 нм и дальний красный – 730 нм. Ряд исследований показывает, что повышение интенсивности в указанной спектральной области ускоряет скорость роста растений. Помимо хлорофилла, в любом растении есть пигмент, имеющий название – фитохром. Особенность фитохрома заключается в том, что он может принимать две формы с разными свойствами под воздействием спектров красного 660 нм и дальнего красного 730 нм излучения, т.е. он обладает способностью к фотопревращению. Фитохром обеспечивает слежение за временем суток (утро–вечер), управляя периодичностью

жизнедеятельности растения. Более того, светолюбивость или теневыносливость того или иного растения также зависят от особенностей имеющихся в нем фитохромов. И цветением растений также управляет фитохром [2].

Для исследования влияния светодиодного освещения на растения была выбрана мята «Овощная ворожея». Мята – это многолетнее травянистое растение, с горизонтальным ветвистым корневищем и тонкими мочковатыми корнями, вегетационный период которой составляет 125 дней. Растение достигает высоту до 120 см, листья длиной до 6 см, шириной до 3 см, продолговатой формы [3].

Для данного исследования светодиодные лампы были предоставлены ЗАО «Физтехэнерго», которые сочетали красные и белые светодиоды [4].

Посеяны семена в четыре цветочных ящика, площадь каждого $0,5 \text{ м}^2$, плотность посадки в каждом цветочном ящике 72 шт./ м^2 и глубина 1 см. Цветочные ящики установлены под четыре типа светильников с цветовой температурой 4000 К (индекс цветопередачи 80), фито 9, светильник с цветовой температурой 3000 К (индекс цветопередачи 80) и фито 6.

При одинаковых климатических условиях: температурных режимах, режимах полива и вентиляции – всход ростков произошёл одновременно во всех цветочных ящиках через 10 дней по 1–3 ростка.

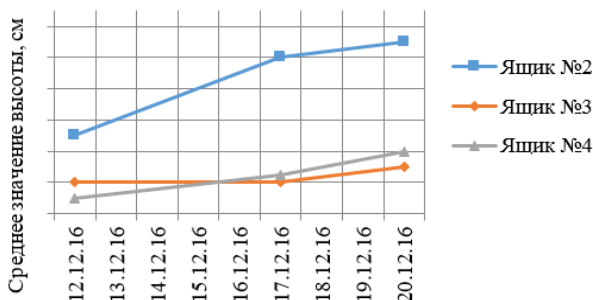


Рис. 1. График средних значений высоты ростков

По результатам исследований можно сделать выводы о том, что максимальное среднее значение высоты ростков мяты сорта «Овощная ворожея» в ящике №2, находящемся под лампой №2 фиолетового спектра (светодиоды: фито – 9 групп; 4000 К Ra80 – 2 группы).

Среднее значение высоты ростков в ящиках под лампой №2 – 2,87 см – оказалось на 0,62 см выше, чем в ящиках, находящихся под лампой №4, – 2,25 см и на 0,64 см выше ящика под лампой №3.

Заключение. Результаты эксперимента показали, что положительное влияние на всхожесть и рост мяты оказывали светодиоды фиолетового цвета, которые содержат красные и белые светодиоды.

Задачи, поставленные в начале эксперимента, выполнены, что приближает наш эксперимент к достижению его основной цели – нахождение оптимального светового режима для выращивания мяты. Результаты работы могут быть использованы в перспективе для создания оптимальных условий выращивания мяты «Овощная ворожея» в теплицах в больших объемах, а также как научно-практическая база для экспериментов схожего типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Влияние света на растения* [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.floralworld.ru/care/light.html> (дата обращения: 15.02.17).
2. *Рассада растений: свет и спектр* [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://humangarden.ru/books/spectr.htm> (дата обращения: 15.02.17).
3. *Мята «Овощная ворожея»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://humangarden.ru/books/spectr.htm> (дата обращения: 15.02.17).
4. *Александрова С.Н., Кудайбергенова Ж.Д., Рыбакова А.А., Незнамова Е.Г.* Рост и развитие томатов при искусственной подсветке разными типами ламп // Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015.

МАКЕТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ФИТОЛАМПЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.С. Ганская, студентка; В.С. Каменкова, магистрант каф. ЭП
Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.
*Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, lizanka_ganskaya@mail.ru,
kamenkova_victoria@mail.ru, soldatkinvs@main.tusur.ru*
Проект ГПО РЭТЭМ-1501 «Исследование и разработка
полупроводниковых источников света»

Во многих научных работах доказана перспектива применения светодиодов в качестве эффективной досветки в тепличных хозяйствах – саженцев (томаты, огурцы и перцы) и тепличных культурах. Существует ряд исследований по разработке и применению различных светодиодных источников света в тепличных хозяйствах для комбинированной досветки (совместно с лампами ДНАТ), досветки (только светодиодные светильники) и освещения в условиях отсутствия естественного света. В отличие от крупных мелкие и фермерские тепличные хозяйства не оборудованы специальной системой освещения, энергоснабжения, управления и имеют низкий уровень автоматизации. В мелких и фермерских тепличных хозяйствах используется

бытовая однофазная электрическая сеть переменного тока с напряжением 220 В 50 Гц, следовательно, для досветки целесообразно использовать такие источники света, которые применимы в данной электрической сети, эффективные, простые в использовании, надёжные, недорогие, удобные для монтажа, переноса и электробезопасные. Именно по этой причине разработка светодиодной фитолампы на основе светодиодных излучающих элементов (СИЭ) в типовой колбе традиционной лампы накаливания и стандартным цоколем Е 27 является актуальной.

Целью работы является создание светодиодной фитолампы на основе СИЭ ленточного типа в традиционной колбе лампы накаливания со стандартным цоколем Е 27.

Для достижения поставленной цели на данном этапе следует решить следующие задачи: проанализировать рынок, передовые достижения светодиодных технологий, требования к тепличному освещению и возможности для серийного производства светодиодной фитолампы, разработать требования к СИЭ.

Известно из [1], что светодиодная лампа с СИЭ в связи с конвекционным отводом тепла, не должна превышать мощность 10 Вт. Требования к спектрам освещения растений, связанные с фотосинтезом, известны из [2].

Таким образом, СИЭ в лампе целесообразно скомбинировать. Расчётные характеристики комбинированной фитолампы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчётные характеристики комбинированной фитолампы

Цвет	Количество, шт.	Спектр/цветовая температура	Световой поток, лм	Потребляемая мощность, не более, Вт
Белый	6	3000–4000 К (индекс цветопередачи не менее 85)	750	4
Синий	4	460 нм	100	3
Красный	13	630 нм	230	5
ИТОГО	23		1080 лм	12

Световая отдача лампы 90 лм/Вт. Так как синяя составляющая спектра содержится в белых СИЭ, то нецелесообразно использовать СИЭ синего цвета свечения, но если сделать управляемый источник питания, то на определённых этапах вегетационного периода можно будет отключать СИЭ определённого спектра. Однако данное решение приведёт к усложнению конструкции и существенному повышению её стоимости. Поэтому просчитан вариант из СИЭ белого и красного спектров.

Светодиодные кристаллы имеют напряжение питания (1,3 В), существенно меньшее, чем синего цвета свечения (2,7 В). Если принять за максимально допустимую мощность СИЭ 1 Вт с учётом габаритных размеров и с целью снижения количества СИЭ в колбе лампы, то на одном СИЭ можно разместить 77 кристаллов, при этом световой поток составит 60 лм.

В первом приближении световой поток СИЭ с люминофором в пять раз больше, чем СИЭ без люминофора. Если не учитывать поглощение синего спектра излучения кристалла в люминофорной композиции (эффективность люминофорной композиции достигает 90%) [3], то можно предложить вариант соотношения СИЭ, которое показано в табл. 2.

Таблица 2

Расчётные характеристики комбинированной фитолампы

Цвет	Количество, шт.	Спектр/цветовая температура	Световой поток, лм	Потребляемая мощность, не более, Вт
Белый	9	3000–4000 К (индекс цветопередачи не менее 85)	1125	7
		460		
Красный	4	630	225	4
ИТОГО	13		1350	11

Примечание. Световая отдача лампы 122 лм/Вт.

Заключение. Для эффективного решения поставленной задачи на данном этапе проекта выбрана аналитическая модель конструкции комбинированной фитолампы, на следующем этапе необходимо разработать конструкцию СИЭ для красного спектра, обеспечивающую размещение большого количества кристаллов и при этом эффективное тепловое распределение на несущей конструкции СИЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск: ТУСУР, 2015. – №3 (37). – С. 55–61.
2. Незнамова Е.Г., Александрова С.Н., Кудайбергенова Ж.Д., Рыбакова А.А. Влияние искусственного света на рост томатов // Наука и современность. – 2014: сб. матер. 29-й Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. – 315 с.
3. Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2013». – Томск: В-Спектр, 2013. – Т. 2. – С. 63–65.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА СВЕТОРАСSEИВАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

А.Д. Гончаров, вед. инж. ООО «Арлайт РУС»

*Научный руководитель В.И. Туев,
директор НИИ светодиодных технологий, д.т.н.
Томск, ТУСУР, tvi_retem@main.tusur.ru*

В настоящее время на рынке представлен широкий ряд светорассеивающих материалов, предназначенных для использования в светодиодных осветительных приборах и отличающихся техническими характеристиками и стоимостью.

Обоснование выбора материала, как правило, осуществляется косвенно по отношению стоимости готовой продукции к световому потоку (единица измерения – руб./лм) [1], что имеет отношение к конкретному изделию и не дает возможности сравнения материалов между собой.

Целью данной работы является разработка новой методики оценки светорассеивающих материалов для сравнительного анализа их применимости в светодиодных осветительных приборах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику экспериментальной оценки светорассеивающих материалов;
- провести апробирование методики на примере ряда представленных на рынке светорассеивающих материалов.

Для реализации методики разработан и изготовлен светодиодный модуль, который представляет собой короб из материала Д16Т с размерами $50 \times 50 \times 50$ мм³, с установленной в него платой размером 40×40 мм² толщиной 1 мм со светодиодами типа 5630 с номинальным током потребления 150 мА производства компании LG в количестве 16 шт. В коробке предусмотрены пазы для установки рассеивателей из испытываемого материала размерами $50 \times 50 \times 1,5$ мм³.

Методика заключается в следующем:

- Светодиодный модуль без рассеивателей устанавливается в фотометрический шар.
- На светодиодный модуль подается ток 130 мА.
- Модуль выдерживается в рабочем состоянии 30 мин, после чего фиксируются значения светового потока.
- На модуль во включенном состоянии поочередно устанавливаются рассеиватели.

– Через 30 мин после установки каждого типа рассеивателя фиксируются значения светового потока.

– Проводится расчет коэффициента полезного действия рассеивателя (КПД рассеивателя), который определяется как отношение светового потока модуля с установленным рассеивателем к световому потоку модуля без установленного рассеивателя, %.

– Проводится расчет отношения стоимости материала рассеивателя за 1 кг к КПД рассеивателя (единица измерения – руб./%).

– Строится зависимость отношения стоимости материала рассеивателя за 1 кг к КПД рассеивателя (руб./%) от массовой концентрации рассеивающих добавок (КРД) (%). Зависимость отношения стоимости материала рассеивателя за 1 кг к КПД рассеивателя (руб./%) от массовой КРД в поликарбонате (%) представлена на рис. 1.

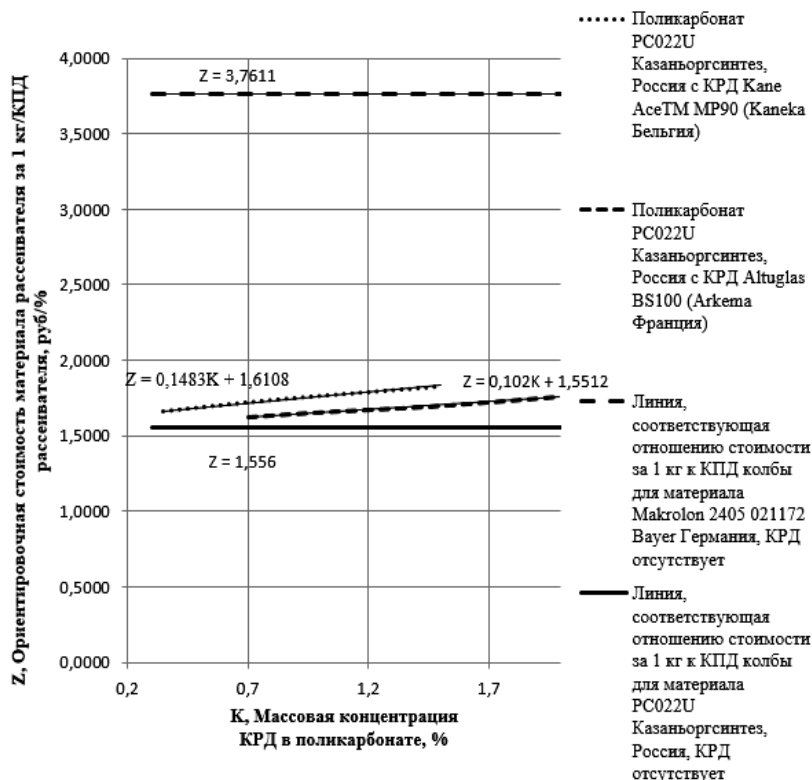


Рис. 1. Зависимость отношения стоимости материала рассеивателя за 1 кг к КПД рассеивателя (руб./%) от массовой концентрации рассеивающих добавок (%)

– Производится оценка видимости светодиодов через рассеиватель, по которой определяется нижний порог концентрации КРД в поликарбонате.

– Полученные зависимости несут информацию об эффективности светорассеивающего материала как из физических, так и из экономических соображений.

Предложенная методика апробирована на следующих светорассеивающих материалах, широко используемых производителями светотехнических изделий: PC022U, производитель Казаньоргсинтез, Россия [2], Kane Ace™ MP90 (Kaneka, Бельгия) [3], Altuglas BS100 (Arkema, Франция) [4] и Makrolon 2405 021172 Bayer, Германия [5].

Рассеивание в поликарбонате без КРД отсутствует, поэтому этот материал можно рассматривать в качестве изготовления оптических материалов, в которых необходимое диффузное светораспределение обеспечивается специальным расположением светодиодов, например филаментные лампы [6].

Из представленных на измерения светорассеивающих материалов наилучшим по экономической эффективности является состав поликарбоната PC022U Казаньоргсинтез с КРД Altuglas BS100 (Arkema, Франция) 0,7%, причем состав поликарбоната PC022U Казаньоргсинтез с КРД Altuglas BS100 (Arkema, Франция) является наилучшим материалом по эффективности по сравнению с другими представленными составами и материалами с любой КРД.

Таким образом, разработана новая универсальная методика оценки светорассеивающих материалов по экономическим и по физическим параметрам для их применения в светодиодных осветительных приборах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шаракишанэ А.С.* Отчет о выполнении проекта «Проведение независимой проверки качества светотехнической продукции» // Светотехника. – 2016. – №1. – С. 69–86.
2. *Официальный сайт ПАО «Казаньоргсинтез»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kazanorgsintez.ru/> (дата обращения: 13.02.2017).
3. *Официальный сайт компании «Kaneka»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kaneka.co.jp/> (дата обращения: 13.02.2017).
4. *Официальный сайт компании «Arkema»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.arkema.com/ (дата обращения: 13.02.2017).
5. *Официальный сайт представителя компании «Bayer»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plastics.covestro.com> (дата обращения: 13.02.2017).
6. *Официальный сайт компании «Rusled»* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rusled.net/> (дата обращения: 13.02.2017).

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ОСВЕЩЕННОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*А.Д. Гончаров, С.И. Кульбаиный,
вед. инженеры ООО «Арлайт РУС»
Научный руководитель В.И. Туев, директор
НИИ светодиодных технологий, д.т.н.
Томск, ТУСУР, tvi_retem@main.tusur.ru*

В настоящее время для измерения пульсаций светового потока компании-производители осветительных приборов, компании-аудиторы, специализированные органы контроля в обязательном порядке применяют приборы, внесенные в Госреестр СИ.

Но, как показали наши исследования, измерения этими приборами не всегда корректны. Этому аспекту и посвящена данная работа.

С развитием светодиодных технологий [1] основную долю осветительных приборов занимают те, принцип управления которых основан на широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тока различной частоты. Пульсации освещенности ограничены частотой 300 Гц, выше которой световые пульсации согласно стандарту [2] не нормируются – они считаются безвредными для человека. Существующие традиционные системы освещения, например, люминесцентные светильники, электропитание которых основано на электронном пускорегулирующем аппарате (ЭПРА), работают на частотах порядка 50 кГц, которые существующие приборы успевают фильтровать. Имеются также традиционные осветительные приборы на основе ламп накаливания, работающие на низкой частоте 50 Гц, но питание таких приборов осуществляется синусоидальным гармоническим сигналом, математическая оценка световых пульсаций которых осуществляется по формуле

$$K_{\Pi} = (E_{\max} - E_{\min}) / (2E_{\text{ср}}) \times 100\%, \quad (1)$$

где $E_{\max}$ – максимальное значение освещенности; $E_{\min}$ – минимальное значение освещенности; $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности, определяющееся по формуле

$$E_{\text{ср}} = (E_{\max} + E_{\min})/2.$$

Но в качестве источников питания для светодиодных приборов можно встретить приборы, принцип действия которых основан на несинусоидальном гармоническом сигнале, а также такие, сигналы которых имеют значение частоты ШИМ, близкой к частоте 300 Гц, которую существующие приборы не успевают фильтровать и при этом регистрируют неверные показания.

Для примера в таблице приведены результаты измерения значения коэффициента пульсации светодиодного светильника, измерен-

ные двумя приборами с условными названиями (прибор 1 и 2), внесенными в Госреестр СИ. Значение частоты питающего тока менялось от 125 до 750 Гц, форма тока иллюстрируется рис. 1. Заполнение ШИМ определялось согласно рис. 1.

Результаты исследования

Заполнение ШИМ, %	Прибор 1			Прибор 2		
	125 Гц	500 Гц	750 Гц	125 Гц	500 Гц	750 Гц
75	72%	70%	67%	100%	23%	0,6%
50	111%	109%	101%	97%	49%	1,4%
25	220%	210%	182%	98%	70%	1,4%

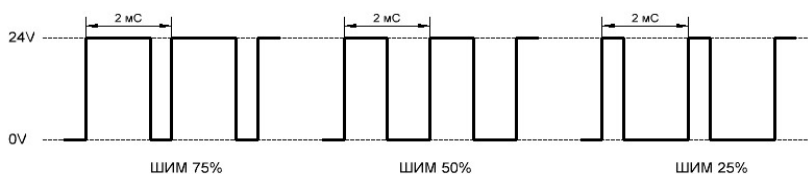


Рис. 1. Формы исследуемых сигналов

Из таблицы видно, что прибор 1 не отфильтровывает пульсации освещенности выше 300 Гц, но при определенных режимах показывает значения пульсации выше 100%, а прибор 2 имеет встроенный фильтр с частотой среза примерно 500 Гц, что видно из приведенных значений, которые уже не равняются 100%, а устремляются к нулевым, но что также является большой ошибкой прибора, но на частоте 750 Гц прибор 2 полностью фильтрует пульсации и выдает результат, близкий к нулю, что согласуется с требованиями стандарта [2].

Отличие показаний в значениях пульсации освещенности менее 100% связано с тем, что прибор 1 рассчитывает пульсации по новому стандарту [2], за среднее значение освещенности принимается площадь под кривой сигнала за период ШИМ, а прибор 2 рассчитывает среднее значение освещенности по формуле (1).

Величина пульсаций освещенности, превышающая 100%, является также определенной недоработкой стандарта [2]. По этой причине для устранения недостатка, связанного с превышением пульсаций освещенности выше 100%, необходимо создавать другие математические алгоритмы определения световых пульсаций несинусоидальных гармонических сигналов.

Предлагается следующая методика измерения коэффициента пульсаций при питании светодиодов импульсами тока произвольной формы:

1. Провести измерение частоты сигнала при помощи осциллографа по методике, приведенной в [2], либо по форме электрических сигналов (см. рис. 1), полученных при помощи осциллографа, снимающего электрические характеристики на выходе источника питания.

2. Если частота пульсации более 300 Гц, то принять значение коэффициента пульсации нулевым.

3. Если частота пульсаций менее 300 Гц, то провести измерение прибором, который проводит измерение по новому стандарту, в нашем случае при помощи прибора 1.

Таким образом, для корректного измерения значения коэффициента пульсаций освещенности светодиодных систем освещения существующими приборами необходимо использовать разработанную в данной работе методику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олисовец А.Ю., Туев В.И., Шкарупо С.П. Устройство питания светодиодной лампы с уменьшенным значением эмиссии помех // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск: ТУСУР, 2015. – №3 (37). – С. 51–54.

2. ГОСТ 33393–2015. Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности. – М.: Стандартинформ, 2015. – 15 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

А.Д. Гончаров, вед. инж. ООО «Арлайт РУС»

Научный руководитель В.И. Туев, директор

НИИ светодиодных технологий, д.т.н.

Томск, ТУСУР, tvi_retet@main.tusur.ru

С появлением осветительных приборов на основе светодиодов, а вместе с тем и появлением широкого спектра светораспределений возникла проблема точного определения коэффициента использования светового потока, в зарубежной литературе известного как Utilization Factor (UF), который зависит от параметров помещения – геометрии, коэффициентов отражения стен, потолка и пола и от кривой силы света КСС, известного также как пространственное светораспределение [1].

В данной статье разработана методика расчета коэффициента использования светового потока, отличающаяся высокой точностью и простотой расчета.

Методика заключается в следующем:

- в программе DIALux [2] создается модель, описываются осветительные установки (ОУ);

- стенам, потолку и полу присваиваются необходимые коэффициенты отражения, которые могут быть получены из справочной литературы в зависимости от применяемых для покрытия поверхностей материалов, например [3];

- в программе DIALux коэффициенту эксплуатации (уменьшению), приведенному в методе плана техобслуживания, присваивается значение «1»;

- производится расчет освещенности;

- в результатах расчета на рассматриваемой плоскости выбираются и копируются полученные значения $E_{K,N}$ из таблицы E с выбранной матрицей значений $K \times N$ (количество точек, на которые разбивается помещение, тем самым задается размер единицы площади помещения);

- проводится расчет единичной площади помещения по формуле $S_{K,N} = S/(K \cdot N)$, где S – площадь помещения;

- проводится расчет световых потоков в каждой единичной площади помещения $\Phi_{K,N}$ по формуле

$$\Phi_{K,N} = E_{K,N} \times S_{K,N};$$

- проводится расчет полезного светового потока Φ_v на рассматриваемой плоскости по формуле

$$\Phi_v = \Sigma \Phi_{K,N};$$

- проводится расчет коэффициента использования светового потока по формуле: $U_F = \Phi_v/\Phi_0$, где Φ_0 – полный световой поток, излучаемый светильниками.

Апробация методики выполнена на основе следующих помещений и последующего расчета и сравнения в программе DIALux.

Помещение № 1: $3,4 \times 3,4 \times 3,0$ м³, количество светильников 4 шт.

Помещение № 2: $10,0 \times 10,0 \times 3,0$ м³, количество светильников 36 шт.

Помещение № 3: $21,8 \times 21,8 \times 3,0$ м³, количество светильников 169 шт.

За основу выбран квазиточечный источник света размером 1×1 мм³ со световым потоком 3000 лм, КСС которого приведена на рис. 1.

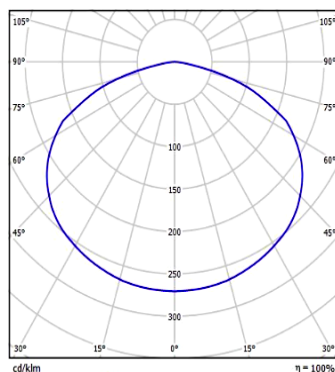


Рис. 1. КСС типа Д – 135 град для квазиточечного источника света 1×1 мм³

Расчет средней освещенности методом коэффициента использования выполняется по формуле: $E_{\text{ср}} = \Phi_v \times U_F \times M_F / S$, где M_F – коэффициент эксплуатации, выбранный в нашем случае 0,71 (офисные, жилые и учебные помещения, торговые залы), что соответствует коэффициенту запаса 1,41.

Результаты расчета

Значения коэффициентов отражения поверхностей помещения: потолок, стены, пол, %	Расчет средней освещенности методом коэффициента использования, лк	Расчет средней освещенности при помощи программы DIALux, лк	Отклонение метода коэффициента использования от компьютерного метода расчета, %
Помещение № 1			
10, 10, 10	254,6	255	0,1
70, 50, 30	374,0	374	0,0
70, 70, 50	513,9	514	0,0
70, 70, 70	550,3	552	0,3
Помещение № 2			
10, 10, 10	531,8	532	0,0
70, 50, 30	692,6	693	0,1
70, 70, 50	876,0	876	0,0
70, 70, 70	1011,8	1012	0,0
Помещение № 3			
10, 10, 10	644,3	644	0,0
70, 50, 30	818,1	818	0,0
70, 70, 50	1009,4	1009	0,0
70, 70, 70	1219,0	1219	0,0

Таким образом, разработана методика расчета коэффициента использования светового потока, которая позволяет с погрешностью отклонения от компьютерного моделирования не превышающего $\pm 0,3\%$, рассчитать коэффициент использования светового потока. Методика может также использоваться для оценки качества пространственного светораспределения в ОУ, для создания светотехнических калькуляторов для расчета количества осветительных приборов и освещенности, а также для расчета облученности, например в тепличных установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Официальный сайт DIALux [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dial.de/> (дата обращения: 13.02.2017).
3. СП 23-102–2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 83 с.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО УРОВНЮ КОНДУКТИВНЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ РАДИОПОМЕХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

А.В. Иванов, аспирант каф. КСУП

Научный руководитель Ю.А. Шурыгин, проф., д.т.н.

Томск, ТУСУР, ivanovnii@sibmail.com

Преимущества классических ламп накаливания, с одной стороны, и полупроводниковых источников света, с другой стороны, объединены в светодиодных лампах с нитевидными излучателями (Filament LED) [1]. При разработке конструкции светодиодных ламп с нитевидными излучателями необходимо решать дополнительную задачу, которая заключается в разработке такого источника питания, чтобы лампа соответствовала требованиям ГОСТ 30804.6.3–2013 [2].

Данная работа посвящена разработке конструкции источника питания светодиодной лампы с нитевидными излучателями с выходной мощностью 4 Вт, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 30804.6.3–2013.

Основным источником помех в блоке питания светодиодной лампы является импульсный преобразователь, работающий на частотах выше 100 кГц и, как правило, выполненный по схеме непосредственного понижающего преобразователя [3]. На рис. 1 приведена упрощенная схема преобразователя. Принцип его работы заключается в следующем: на вход подается постоянное напряжение $U_{\text{п}}$, ключевой элемент (транзистор) осуществляет высокочастотную коммутацию тока. Частота коммутации и коэффициент заполнения регулируются системой управления таким образом, чтобы поддерживать постоянное значение величины тока в нагрузке.

Работа схемы складывается из двух фаз: накачки энергии и разряда. Фаза накачки протекает, когда транзистор открыт. Ток i_L проходит через дроссель L к нагрузке, шунтированной конденсатором C . Накопление энергии происходит как в дросселе, так и в конденсаторе.

После того как транзистор переходит в состояние отсечки, наступает фаза разряда. Поскольку любой индуктивный элемент стремится воспрепятствовать изменению направления и величины тока, протекающего через его обмотку, в данном случае ток дросселя i_L мгновенно уменьшиться до нуля не может, и он замыкается через разрядный диод VD на нагрузку [4]. На рис. 2 приведена форма напряжения на силовом ключе, обозначенном на рис. 1 – Кл, измеренная с помощью осциллографа. На рис. 3 приведено разложение в ряд Фурье сигнала с данной формой. Как следует из рис. 3, помехи будут присутствовать на частотах, превышающих рабочую частоту преобразования 108 кГц.

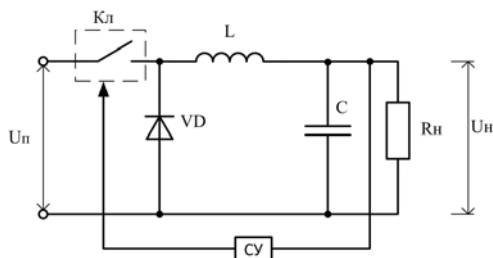


Рис. 1. Упрощенная схема преобразователя

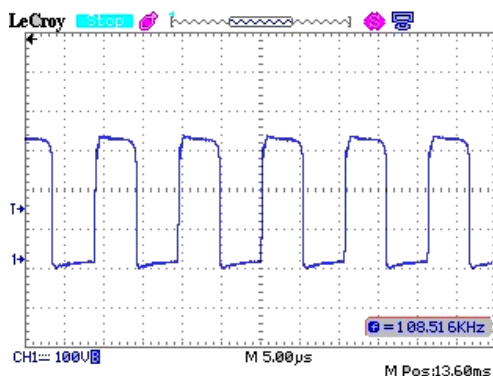


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на силовом ключе

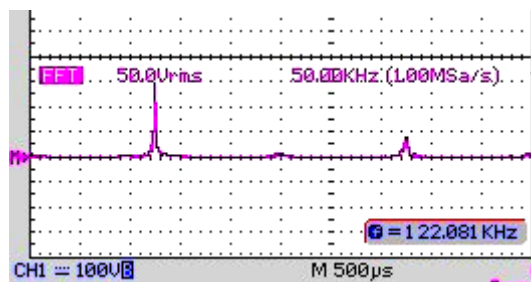


Рис. 3. Разложение в ряд Фурье напряжения на силовом ключе

Для доведения источника питания до соответствия требованиям нормативной документации выполнены следующие действия: снижена частота преобразования, добавлен фильтр нижних частот первого порядка на входе источника и фильтр нижних частот третьего порядка непосредственно перед преобразователем. Основную сложность составляла задача размещения всех дополнительных элементов в ограниченных габаритах цоколя светодиодной лампы. Чтобы выполнить

габаритные требования, было применено следующее техническое решение: противопомеховый фильтр был совмещен со сглаживающим фильтром на входе преобразователя. Результаты испытаний доработанного источника на соответствие требованиям представлены на рис. 4 и полностью соответствуют требованиям ГОСТ 30804.6.3–2013.

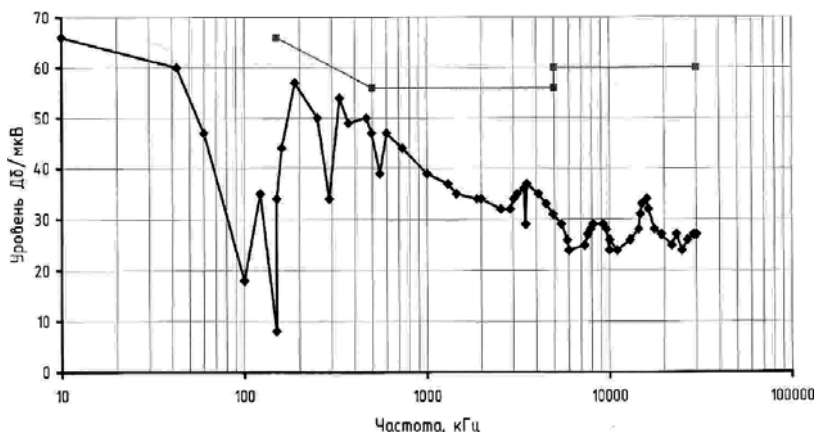


Рис. 4. Результат испытаний лампы светодиодной с нитевидными излучателями

Таким образом, разработана конструкция источника питания светодиодной лампы с нитевидными излучателями с выходной мощностью 4 Вт, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 30804.6.3–2013.

В дальнейшем планируется расширить линейку источников питания для ламп с потребляемой мощностью 6, 8 и 10 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрашкина М., Доброзраков И., Кошин И., Рожкова Т. Филамент светодиодный на смену вольфрамовой спирали // Полупроводниковая светотехника. – 2015. – №4. – С. 6–10.
2. ГОСТ 30804.6.3–2013.
3. Векслер Г.С., Недочетов В.С., Пилинский В.В., Родионова М.В., Темников В.А. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. – К.: Техника, 1990. – 167 с.
4. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: Солон-Р, 2001. – 340 с.

РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ СВЕТИЛЬНИКОМ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ НА ЕГО ОСНОВЕ

***Д.А. Ярославский, Д.А. Иванов, к.т.н.,
научные сотр., ООО «КГЭУ-ИСУ»;***

***Н.А. Григорьева, учитель физики Шеморданского лицея
Научный руководитель М.Ф. Садыков, директор, к.ф.-м.н., доцент
Казань, ООО «КГЭУ-ИСУ», sadykov@kgeu.ru***

Разработка беспроводного блока управления светильником позволит получить недорогой инструмент для организации сетевого управления параметрами искусственного освещения в офисах, производственных помещениях и цехах. Управляемое искусственное освещение, по нашим расчетам, сократит затраты на электроэнергию до сорока процентов. Мы планируем создать несколько модификаций продукта для реализации различных сценариев работы системы освещения.

В первом варианте системы интеллектуальный блок управления устанавливается в светильник, адаптируя схему освещения по заранее заданным алгоритмам. Во втором варианте системы интеллектуальный блок управления устанавливается в светильник, Светильники с установленными блоками самоорганизуются в сеть. Сеть светильников управляется дистанционно, позволяя реализовывать задаваемые схемы освещения.

Беспроводной блок управления светильником имеет оригинальное схемное решение [1]. Основой устройства является микроконтроллер фирмы Atmel со встроенным трансивером (маломощным передатчиком). Наличие последнего позволяет объединять в беспроводную сенсорную сеть все подобные устройства по стандарту ZigBee. Это позволяет получить дальность передачи данных на расстоянии 100 м со скоростью 250 кБ/с.

На рынке существуют аналогичные решения, однако их стоимость в 2–3 раза выше нашей разработки. Например, модуль XBeeSeries 2 (ZigBeeMesh). Применяемая технология имеет широкий потенциал [2], что позволит в дальнейшем модернизировать наше устройство для использования его в качестве приложений «Умного дома», например «умной розетки».

На данный момент изготовлен опытный образец. Требуется разработать ПО для работы устройства и систему управления освещением.

В настоящее время существуют различные варианты систем управления освещением: от простого до самого сложного, когда с по-

мощью специализированного программного обеспечения можно создавать сценарии освещения любой сложности.

Мы предлагаем реализацию такой системы управления освещением [3], при помощи которой будет возможно получение параметров, а также их мониторинг и контроль на базе ПК или смартфона [4].

Система состоит из центра управления, специализированного ПО (программного обеспечения), светильников с блоком управления и драйвером регулировки яркости, которые связаны между собой посредством беспроводной сети (рис. 1). Персональный компьютер с установленным на него специализированным программным обеспечением служит источником управляющего сигнала. Для разработчиков приложений будут доступны сервисные команды/коды, с помощью которых возможно управление системой освещения.

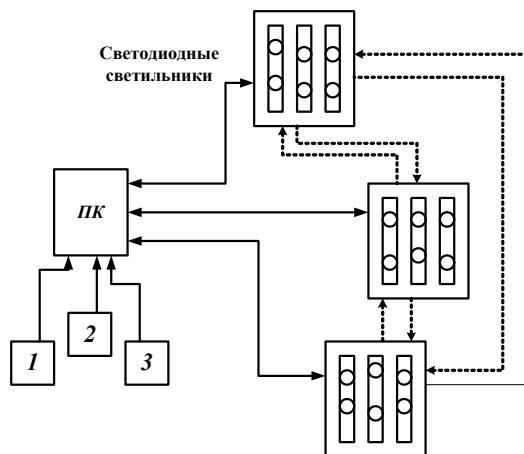


Рис. 1. Схема работы системы управления освещением: 1, 2, 3 – параметры (присутствие людей, освещенность в помещении и т.п.); ПК – персональный компьютер; – беспроводные линии связи

Наша система имеет наиболее широкие возможности из всех встраиваемых систем, она позволяет:

- применять любые цветодинамические эффекты для группы, состоящей как из одинаковых светодиодных светильников, так и для группы, состоящей из светильников разных моделей;
- создавать, сохранять и редактировать сценарии подсветки и освещения любой длительности, состоящие из любого количества эффектов;
- регулировать яркость и насыщенность света;

- контролировать уровень потребления тока;
- просматривать созданный сценарий освещения в вузе в режиме реального времени;
- добавление новых устройств в сеть. Отражается только на программе компьютера (например, будет возможно собирать данные счетчиков воды или контролировать открывание двери);
- возможность автоматического включения/выключения освещения по факту наличия/отсутствия людей в помещении; временные интервалы таймера задержек выключения освещения от датчиков движения и датчиков освещенности могут задаваться пользователем в процессе эксплуатации;
- возможность контроля внештатных ситуаций: аварии, пожар, несанкционированный доступ в охраняемые помещения.

Работа выполняется при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «СТАРТ» по договору № 1691ГС1/24407 от 14.11.2016 (код 0024407), заявка №С1-15361. Исполнитель: ООО «КГЭУ-ИСУ».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Патент* на полезную модель «Интеллектуальный блок питания светильника» № 142028. Заявка № 2014103803, приоритет полезной модели 04 февраля 2014 г. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 16 мая 2014 г. Срок действия патента истекает 04 февраля 2024 г. Авторы: Иванова В.Р., Садыков М.Ф. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «КГЭУ».
2. *Иванова В.Р., Садыков М.Ф.* Современные светодиодные технологии: в 2 т.: – Т. II: Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике / под ред. Э.В. Шамсутдинова, О.С. Зуевой; Казан. гос. энергетич. ун-т. – Казань, 2014. – С. 178–201.
3. *Иванова В.Р., Садыков М.Ф.* Система управления искусственным освещением на основе нейросетевых технологий // Сб. науч. докл. «Актуальные научные проблемы. Рассмотрение, решение, практика», 29.06–30.06.2014 г. – Т. 7. – Wrocław, 2014. – С. 9–13.
4. *Шириев Р.Р., Садыков М.Ф., Иванова В.Р., Нургалиева Э.И.* Комбинированный комплекс систем искусственного и гелиоосвещения // Сб. тр. II Всерос. науч. конф. «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-го поколения», Чебоксары, 23–26 мая 2014 г. – Чебоксары, 2014. – С. 148–151.

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ 10 Вт

В.С. Каменкова, К.Н. Афонин, магистранты

Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.

Томск, ТУСУР, каф. ЭП, каф. РЭТЭМ,

kamenkova victoria@mail.ru, pa3z@mail.ru, soldatkinvs@main.tusur.ru

*Проект ГПО РЭТЭМ-1501 «Исследование и разработка
полупроводниковых источников света»*

В настоящее время большое распространение получили светодиодные лампы с мощностью 10 Вт на основе светодиодных нитей – светодиодных излучающих элементов (СИЭ). Основным отличием от других светодиодных ламп являются привычный внешний вид и сферическое светораспределение [1]. Отвод тепла от СИЭ в таких лампах осуществляется за счёт конвекции между СИЭ и колбой через газовую среду. Мощность ламп зависит от числа СИЭ в колбе и при значениях более 9 Вт требуется увеличение диаметра колбы. Совместно с ООО «Руслед» разработан макетный образец светодиодной лампы на 10 Вт и проведены испытания [2].

Целью данной работы является проведение испытаний по оценке срока службы светодиодной лампы 10 Вт. Для достижения данной цели необходимо решить задачи:

- измерить основные электрические, светотехнические и колориметрические параметры макетного образца лампы;
- провести испытания в течение 1000 ч в камере тепла при температуре 45 °С;
- измерить после испытаний основные электрические, светотехнические и колориметрические параметры макетного образца лампы.

Методика исследования. Для измерений значений потребляемой мощности лампы к выходным клеммам лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) подключили входные клеммы ваттметра, к выходным клеммам ваттметра подключили клеммы макетного образца лампы, подключили ЛАТР к электрической сети, вращая ручку ЛАТР, установили на его выходе (220 ± 2) В, контролируя значение напряжения по показаниям ваттметра, зафиксировали в протоколе испытаний значение потребляемой мощности по показаниям ваттметра.

Измеряя значения светового потока, подключили макетный образец лампы к ЛАТР, включили питание фотометрического шара, вращая ручку ЛАТР, установили на его выходе (220 ± 2) В, контролируя значение напряжения по показаниям ваттметра, выдержали макетный образец лампы во включенном состоянии 5 мин для термостабилизации, значения светового потока внесли в протокол.

Измерение значений коррелированной цветовой температуры: установили макетный образец лампы в зажим спектроколориметра цоколем вверх, установили оптическую ось в горизонтальной плоскости между макетным образцом лампы – центром колбы фотоэлементом спектроколориметра, включили ПК, запустили программу «Спектроколориметр», подключили макетный образец лампы к ЛАТР, вращая ручку ЛАТР, установили на его выходе (220 ± 2) В, контролируя напряжение по показаниям ваттметра, выдержали макетный образец лампы во включенном состоянии 5 мин для термостабилизации, зафиксировали значения координат цветности в протоколе, используя приложения D ГОСТ Р МЭК 60081–99, определили значение коррелированной цветовой температуры (КЦТ) макетных образцов ламп, полученные данные занесли в протокол.

После 1000 ч непрерывной работы в условиях повышенной температуры были проведены измерения значений светового потока, коррелированной цветовой температуры, потребляемой мощности по методикам, указанным выше. Затем были рассчитаны значения световой отдачи [4, 5]. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Определение сохраняемости светового потока светодиодной лампы в процессе эксплуатации. В соответствии с методикой ГОСТ Р 54815–2011 п. 10.1 выбран макетный образец лампы, измерены значения светового потока, коррелированной цветовой температуры, потребляемой мощности и рассчитаны значения световой отдачи.

После этого лампа была помещена в камеру тепла, где после непрерывной работы в течение 1000 ч были также измерены значения светового потока, коррелированной цветовой температуры, потребляемой мощности и рассчитаны значения световой отдачи. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний макетного образца лампы воздействием повышенной температуры окружающей среды

До испытаний				После испытаний			
Потребляемая мощность, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Коррелированная цветовая температура, К	Световой поток, лм	Потребляемая мощность, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Коррелированная цветовая температура, К	Световой поток, лм
9,85	122	3480	1200	9,8	115	3380	1125

Считается, что образец выдержал испытания, отработав 25% от номинального срока службы при 45 °С.

Заключение. В рамках данной работы проведены испытания светодиодной лампы 10 Вт при повышенной температуре. Образец вы-

держал испытание, и после 1000 ч его основные характеристики были снижены порядка на 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркин А. Новое поколение мощных светодиодов Cree: особенности, преимущества, перспективы / А. Туркин, Ю. Дорожкин // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – №5. – С. 36–41.
2. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н. и др. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55–61.
3. Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
4. Закгейм А.Л., Левинштейн М.Е., Петров В.П. и др. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах // ФТП. – 2012. – Т. 46, №2. – С. 219–223.
5. Shmidt N.M., Greshnov A.A., Chernyakov A.E. et al. Mechanisms behind efficiency droop and degradation in InGaN/GaN LEDs // Physica Status Solidi (c). – 2013. – Vol. 10, № 3. – PP. 332–334.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАНТОВОЙ ЯМЫ LED-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА.

1. ВРЕМЯ ЗАХВАТА НОСИТЕЛЕЙ

О.А. Каранкевич, студентка каф. ЭП

*Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП
Томск, ТУСУР, dvn@fet.tusur.ru*

Важным параметром LED-гетероструктур (ГС) с множественными квантовыми ямами (МКЯ), определяющим эффективность преобразования электрической энергии в световую, является время захвата носителей заряда квантовой ямой (КЯ). Знание этого параметра необходимо как для понимания картины формирования тока инжекции в ГС с МКЯ, так и выработки условий повышения мощности излучения [1–4]. В настоящее время в литературе нет работ, в которых был бы детально рассмотрен вопрос о захвате электронов КЯ и получены аналитические выражения для данного параметра.

Целью данной работы является получение аналитического выражения для определения времени захвата свободных носителей заряда на уровень размерного квантования квантовой ямы.

Основные положения расчета. Для решения поставленной задачи в первом приближении можно воспользоваться моделью Шокли–Рида по заполнению и опустошению глубокого уровня энергии свободными носителями заряда. Однако такой подход к описанию

взаимодействия уровня размерного квантования и носителей заряда имеет серьезный недостаток, обусловленный игнорированием пространственных ограничений на взаимодействие носителей заряда с гипотетическим глубоким уровнем.

Из физических соображений следует, что время захвата (эмиссии) электрона КЯ $\tau^{(кя)}$ можно определить как среднее значение времени между соседними соударениями $\overline{t_{ст}}$, умноженное на число столкновений $N_{ст}$, необходимых для изменения энергии электрона до значения энергии заполняемого уровня:

$$\tau^{(кя)} = N_{ст} \cdot \overline{t_{ст}}. \quad (1)$$

В стационарном состоянии нижние уровни энергии мини-зоны проводимости КЯ могут оказаться постоянно занятыми. Поэтому для захвата ямой в результате столкновений электрон должен потерять при захвате энергию ΔE , равную (рис. 1)

$$\Delta E = E_C^{(б)} - E_k, \quad (2)$$

где $k=1, 2, \dots$

Здесь E_k – энергия уровня, на который садится электрон в результате захвата его КЯ; $E_C^{(б)}$ – энергия дна зоны проводимости барьера. Значит, число необходимых для захвата столкновений, в результате которых

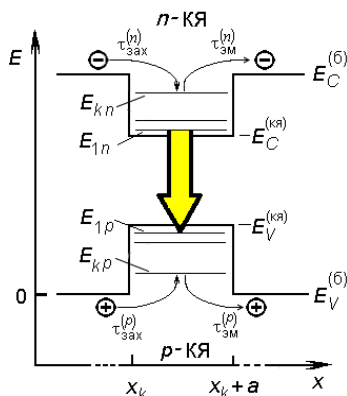


Рис. 1. Схема взаимодействия квантовой ямы с носителями зарядов

электрон потеряет избыток энергии величиной kT , равно

$$\Delta N_{ст} \cong \Delta E / kT. \quad (3)$$

Реальное число столкновений электрона, необходимое для снижения его энергии до требуемого значения, значительно больше найденного по выражению (3), поскольку случайные соударения электрона с фононами и дефектами заканчиваются одним из трех состояний электрона: состояние «+» – электрон приобретает квант тепловой энергии, состояние «0» – электрон не изменяет своей энергии, состояние «-» – электрон теряет квант энергии величиной kT . Поэтому захват электрона квантовой ямой произойдет, если в результате множественных соударений реализуется такая последовательность конечных состояний электрона «+», «0», «-», в которой сумма перечислен-

ных состояний равна величине $\Delta N_{\text{ст}}$. Заметим, что среднее число столкновений с приобретением энергии kT $N_{\text{ст}}^{(+)}$, без приобретения энергии $N_{\text{ст}}^{(0)}$ и потерей энергии $N_{\text{ст}}^{(-)}$ будут отличаться друг от друга на величину, которую определим, воспользовавшись законом Максвелла–Больцмана:

$$N_{\text{ст}}^{(-)} = N_{\text{ст}}^{(0)} (\Delta N_{\text{ст}}) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (4)$$

Нахождение среднего числа столкновений для захвата электрона представляет задачу математической статистики, выходящую за рамки данной работы. Не проводя детального вычисления, его можно оценить сравнением расчетных и измеренных значений.

Расчет параметров взаимодействия. Будем считать, что результативными столкновениями являются столкновения электронов фононами и дефектами на границах раздела «барьер – КЯ», а также столкновения с фононами в объеме КЯ. Находясь в зоне проводимости барьера, электрон имеет тепловую энергию $E_T = kT$. При этом его тепловая скорость в стандартных обозначениях равна $V_T = \sqrt{2kT/m_n^*}$.

В первом случае вектор скорости $\vec{V}_T$ перпендикулярен границам КЯ, а второй – при движении электрона параллельно границам. В первом случае длина свободного пробега равна толщине ямы a , а во втором – длине свободного пробега в объемном материале КЯ – l_V .

Время захвата электрона. Для получения выражения для времени захвата электрона КЯ учтем особенности, определяющие захват носителей. Первая особенность заключается в том, что захват носителя заряда КЯ произойдет, если электрон, находясь над ямой, за счет столкновений с фононами, дефектами решетки, границами «барьер – КЯ» уменьшит свою энергию до энергии состояния в КЯ. Время захвата электрона ямой найдем, если известны средняя длина свободного пробега электрона, среднее число столкновений, обеспечивающих передачу энергии решетке, а также избыток энергии:

$$\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})} = N_{\text{ст}}^{(0)} (\Delta N_{\text{ст}}) \cdot \overline{t_{\text{ст}}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (5)$$

Здесь первый множитель указывает требуемое среднее число столкновений, а последний, в силу распределения Максвелла–Больцмана, – увеличение вероятности потери энергии при столкновениях по сравнению со случаями отсутствия потерь и приобретения энергии электроном. Вторая особенность процесса захвата в гетерост-

руктуре с МКЯ заключается в том, что захват возможен не для всех электронов, движущихся под действием напряжения смещения по зоне проводимости системы «барьер – КЯ – барьер». В выражение для времени захвата необходимо ввести вероятность того, что в момент первых столкновений электрон должен находиться над КЯ. Только в этом случае он сможет опуститься в КЯ. Вероятность этого события можно описать отношением площади области релаксации на объемных дефектах КЯ в объеме КЯ S_V :

$$W_{\text{ст}} = S_V / S_{\text{кя}} = l_V^2 / (a \cdot l_V) = l_V / a ,$$

$$\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})} = N_{\text{ст}}^{(0)} (\Delta N_{\text{ст}}) \cdot \overline{l_{\text{ст}}} \cdot \left(l_V^2 / \sqrt{2kT/m_n^*} \right) \cdot \exp \left(-\frac{\Delta E}{kT} \right). \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить время захвата электрона квантовой ямой, если известны толщина КЯ, ее энергетическая глубина, длина свободного пробега электрона, а также среднее число столкновений, обеспечивающих передачу решетке излишка энергии электрона.

Заключение. Получено аналитическое выражение для времени захвата свободных носителей заряда КЯ, в котором учтены вероятности различных исходов столкновения электронов с фононами и междоузельными границами ГС. Выражение показывает, что время захвата электроном квантовой ямой экспоненциально уменьшается с ростом глубины залегания заполняемого уровня квантования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. Захват носителей заряда и выходная мощность лазера на квантовой яме // ФТП. – 2011. – Т. 45, вып. 11. – С. 1553–1559.
2. Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. Влияние числа квантовых ям в активной области на линейность ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера // ФТП. – 2012. – Т. 46, вып. 8. – С. 1067–1073.
3. Соколова З.Н., Тарасов И.С., Питхтин Н.А., Асрян Л.В. Сравнительный анализ влияния электронного и дырочного захвата на мощностные характеристики полупроводникового лазера // ФТП. – 2015. – Т. 49, вып. 11. – С. 1553–1557.
4. Соколова З.Н., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С., Асрян Л.В. Скорость захвата электронов в зависимости от глубины квантовой ямы в полупроводниковых лазерах // ФТП. – 2016. – Т. 50, вып. 5. – С. 679–682.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАНТОВОЙ ЯМЫ LED-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА.

2. ВРЕМЯ ЭМИССИИ НОСИТЕЛЕЙ

О.А. Каранкевич, студентка каф. ЭП

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП

Томск, ТУСУР, dvn@fet.tusur.ru

Наряду со временем захвата носителей заряда квантовой ямы (КЯ) не менее важное значение для эксплуатационных характеристик LED-гетероструктур (ГС) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) имеет время эмиссии носителей заряда КЯ. Знание этого параметра необходимо как для понимания картины формирования тока инжекции в ГС с МКЯ [1–3], так и повышения мощности оптического излучения.

Действительно, в реальных ГС процесс захвата носителей заряда КЯ всегда сопровождается эмиссией ранее захваченных носителей из ямы в барьерный слой, что приводит к уменьшению тока инжекции в КЯ, а значит, снижает величину излучаемой ГС световой мощности.

Целью данной работы является получение аналитического выражения для определения времени эмиссии носителей из КЯ и установление соотношения между временами захвата и эмиссии.

Основные положения расчета. Из физических соображений следует, что время эмиссии электрона КЯ $\tau^{(кя)}$ можно определить как среднее значение времени между соседними соударениями $\overline{t_{ст}}$, умноженное на число столкновений $N_{ст}$, необходимых для изменения энергии электрона до требуемого значения:

$$\tau^{(кя)} = N_{ст} \cdot \overline{t_{ст}}. \quad (1)$$

В стационарном состоянии нижние уровни энергии мини-зоны проводимости КЯ могут оказаться постоянно занятыми. Поэтому для эмиссии ямой в результате столкновений электрон должен приобрести при эмиссии энергию ΔE , равную:

$$\Delta E = E_c^{(б)} - E_k, \text{ где } k=1, 2, \dots \quad (2)$$

Здесь E_k – энергия уровня, с которого электрон эмитируется из КЯ в зону проводимости барьерного слоя, $E_c^{(б)}$ – энергия дна зоны проводимости барьерного слоя. Значит, число необходимых для эмиссии столкновений, в результате которых электрон приобретет дополнительную энергию величиной kT , равно

$$\Delta N_{\text{ст}} \cong \Delta E / kT . \quad (3)$$

Рассуждая аналогично приведенному по расчету времени захвата можно получить следующее выражение для определения числа столкновений, необходимых для эмиссии электрона из КЯ:

$$N_{\text{ст}}^{(+)} = N_{\text{ст}}^{(0)} (\Delta N_{\text{ст}}) \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (4)$$

Использованные здесь обозначения аналогичны приведенным в работе по расчету времени захвата электронов.

Расчет времени эмиссии. Методология вычисления времени эмиссии электрона подобно использованной нами для расчета времени захвата электронов квантовой ямой.

Эмиссию электрона из КЯ в зону проводимости барьерного слоя можно рассматривать как процесс, обратный процессу захвата, но с тем принципиальным различием, что при эмиссии пространственное ограничение на участие электронов в процессе отсутствуют. Следует также иметь в виду, что для эмиссии электрон должен приобрести дополнительную энергию величиной, определяемой выражением (4). Тогда время эмиссии электрона из КЯ в зону проводимости барьерного слоя можно вычислить так:

$$\tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})} = N_{\text{ст}}^{(0)} \cdot \overline{t_{\text{ст}}^{(\text{кя})}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (5)$$

Подставив в (5) выражение для параметра $\overline{t_{\text{ст}}^{(\text{кя})}}$, получим

$$\tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})} = N_{\text{ст}}^{(0)} \cdot \overline{t_{\text{ст}}} \cdot \left(a \cdot l_V / \sqrt{2kT/m_n^*}\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (6)$$

При рассмотрении токопереноса в гетероструктурах с МКЯ требуется знание не абсолютных значений времени захвата и времени эмиссии электронов множественными квантовыми ямами, а их соотношение. Сравнивая выражения для времени захвата и времени эмиссии электронов (6), найдем

$$\frac{\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})}}{\tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})}} = \left(\frac{l_V}{a}\right) \cdot \exp\left(-2\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (7)$$

Выражение (7) в части энергетической зависимости структурно сходно с соотношением параметров захвата – эмиссии носителей заряда глубоким уровнем в 3D-полупроводниках [4], но отличается наличием геометрического фактора, описываемого первым множителем в (7).

Основной вывод, который следует из выражения (7), заключается в следующем: если глубина квантовой ямы ΔE превышает значение

$\Delta E_0 = (kT/2q) \cdot \ln(l_V/a)$, то время захвата будет меньше времени эмиссии электрона из ямы, что соответствует заполнению квантовой ямы носителями заряда. Чем глубже расположен заполняемый уровень размерного квантования в КЯ, тем на большую величину разнятся времена захвата и эмиссии носителей заряда ей. При этом время захвата меньше времени эмиссии электрона из ямы. На это есть две причины: во-первых, попасть электрону в узкую КЯ труднее, чем пролететь над ней на расстояние l_V , – за этот эффект ответствен первый сомножитель в (7), а во-вторых, потерять часть энергии электрону легче, чем ее приобрести, что отражено вторым сомножителем. Поэтому при малых глубинах залегания уровня скорости захвата и выброса носителей определяются соотношением ширины КЯ и длины свободного пробега в объеме полупроводника.

Численные оценки параметров. Численные оценки параметров взаимодействия свободных носителей заряда и КЯ проведем на примере светодиодных ГС на основе InGaN/GaN, поскольку для них в литературе имеется достаточно большое число экспериментальных значений параметров, описывающих как энергетический спектр размерного квантования, так и значения электрофизических параметров изготавливаемых КЯ.

Типичное значение ширины квантовой ямы в гетероструктурах указанного типа составляет $a \cong 4 \cdot 10^{-9}$ м, а длина свободного пробега электрона в объеме полупроводника $l_V = 10^{-6}$ м. Поэтому на практике реализуется ситуация, когда $\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})} \ll \tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})}$, т.е. ток эмиссии электронов из квантовой ямы меньше, чем ток инжекции в яму. Энергии уровней размерного квантования в прямоугольных ямах из GaN, вычисленные по выражению [5]

$$E_{mn} = h^2 / (8m_n^* a^2) \cdot m^2, \quad (8)$$

где индекс $m=1, 2, \dots$ – номер уровня размерного квантования, равны следующим значениям: $E_{1n}=0,012$; $E_{2n}=0,048$; $E_{3n}=0,108$; $E_{4n}=0,192$; $E_{5n}=0,300$ эВ. Глубина КЯ, равная $\Delta E_C = E_C^{(b)} - E_C^{(\text{кя})}$, составляет 0,40 эВ [6, 7]. Значит, избыток энергии электрона для его оседания из зоны проводимости барьерного слоя на верхний уровень квантования составляет $\Delta E = \Delta E_C - E_{5n} = 0,40 - 0,30 = 0,10$ эВ. Тогда отношение времен захвата и эмиссии электронов на пятый уровень квантования по выражению (9) будет

$$\left[\frac{\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})}}{\tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})}} \right]_{n=5} = \left(\frac{l_V}{a} \right) \cdot \exp \left(-2 \frac{\Delta E}{kT} \right) = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 10^{-9}} \cdot \exp \left(-2 \frac{0.10}{2,5 \cdot 10^{-2}} \right) \cong 10^{-1}. \quad (9)$$

Этот результат означает, что если уровень размерного квантования в мини-зоне КЯ находится далеко от дна зоны проводимости ямы, то время захвата и время выброса электрона в зону проводимости барьера оказываются сопоставимы по величине при доминировании процесса захвата. Он будет идти с большей скоростью, чем выброс. Если же захват и эмиссия электронов осуществляются на более глубоком уровне энергии размерного квантования, то скорость захвата опять-таки будет больше скорости выброса, но различие во временах будет больше рассчитанного для пятого уровня. Так, для случая $m=4$:

$$\left[\tau_{\text{зах}}^{(\text{кя})} / \tau_{\text{эм}}^{(\text{кя})} \right]_{n=4} \cong 2,5 \cdot 10^{-5}.$$

Представленные численные результаты показывают, что эмиссия электронов, инжектированных в КЯ, может оказать существенный вклад в сквозной ток ГС.

Из приведенного рассмотрения видится следующая возможность снижения эффективности излучения ГС с МКЯ при большом прямом смещении. Если, увеличивая прямое смещение, увеличить количество инжектируемых в КЯ электронов, то наряду с ожидаемым увеличением скорости излучательной рекомбинации увеличится число электронов на уровнях размерного квантования в мини-зоне проводимости. Как следствие этого, нижние уровни энергии могут оказаться полностью заполненными. Тогда захватываемые ямой электроны будут вынужденно оседать на более высоких уровнях размерного квантования. Это изменение приведет к тому, что с более высокого уровня эмиссия электронов в зону проводимости барьера будет осуществляться более интенсивно ввиду экспоненциальной зависимости (9), что приведет к снижению уровня инжекции носителей, участвующих в излучательной рекомбинации.

Сдвиг линии излучения LED ГС при больших смещениях в сильную часть спектра экспериментально обнаружен в работе [8].

Заключение. Получены аналитические выражения для оценки времени эмиссии электронов, где учтены вероятности различных исходов столкновения электронов с фононами и межфазными границами. Численные оценки для ГС на основе InGaN/GaN показали, что время захвата носителей ямой практически всегда меньше времени их эмиссии из ямы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарева Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaG/GaN // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 1. – С. 88–95.
2. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Влияние хвостов локализованных состояний в InGaG на уменьшение эффективности GaN-светодиодов с ростом плотности тока // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 8. – С. 1054–1062.
3. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Туннельная инжекция и энергетическая эффективность светодиодов на основе InGaG/GaN // ФТП. – 2013. – Т. 47, № 1. – С. 129–136.
4. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / пер. с англ. Г.С. Пекаря; под ред. М.К. Шейкмана. – М.: Мир, 1977. – 562 с.
5. Schubert E.F. Light-Emitted Diodes. – Cambridge, 2006. – 436 p.
6. Зубков В.И. Моделирование вольт-фарадных характеристик гетероструктур с квантовыми ямами с помощью самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона // ФТП. – 2006. – Т. 40, вып. 10. – С. 1236–1241.
7. Давыдов В.Н., Новиков Д.А. Измерительные методики и автоматизированный комплекс для исследования приборов опто- и наноэлектроники // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Вып. 1 (35). – С. 64–73.
8. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Механизм падения эффективности GaN-светодиодов с ростом тока // ФТП. – 2010. – Т. 44, вып. 6. – С. 822–828.

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНА В КВАНТОВОЙ ЯМЕ LED-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

О.А. Каранкевич, студентка каф. ЭП

*Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП
Томск, ТУСУР, dvn@fet.tusur.ru*

Важным параметром LED-гетероструктур (ГС) с множественными квантовыми ямами (МКЯ), определяющим эффективность преобразования электрической энергии в световую, являются времена захвата и эмиссии свободных носителей заряда квантовой ямой (КЯ). Однако их вычисление основано на расчете числа соударений электронов и фононами и межфазными границами квантовой ямы ГС. В литературе отсутствуют работы, в которых рассматривались бы особенности рассеяния энергии носителей заряда при взаимодействии с КЯ ГС.

Целью данной работы является получение аналитического выражения для длины свободного пробега электрона в квантовой яме светодиодной гетероструктуры.

Исходные положения расчета. Будем считать, что результативными столкновениями являются столкновения электронов фононами и дефектами на границах раздела «барьер – КЯ», а также столкновения с фононами в объеме КЯ [1, 2]. Находясь в зоне проводимости барьера, электрон имеет тепловую энергию $E_T = kT$. При этом его тепловая скорость в стандартных обозначениях равна $V_T = \sqrt{2kT/m_n^*}$.

Первый случай реализуется, когда вектор скорости $\vec{V}_T$ перпендикулярен границам КЯ, а второй – при движении электрона параллельно границам. В первом случае длина свободного пробега равна толщине ямы a , тогда как во втором длине свободного пробега в объемном материале КЯ – l_V .

Расчет длины свободного пробега. Для определения времени столкновения электронов с границами «барьер – КЯ» и дефектами слоя КЯ, вещества барьерного слоя, найдём длину пробега электрона в КЯ при произвольном направлении его вектора тепловой скорости (рис. 1). На рис. 1 слой вещества КЯ помещен между барьерными

слоями. Электрон, находящийся в точке E , двигаясь от передней межфазной границы «барьер – квантовая яма», падает и отражается от задней межфазной границы, определяя длину свободного пробега электрона. Как следует из рисунка, мгновенное значение длины свободного пробега электрона в КЯ, равной величине отрезка AE , определяется через толщину КЯ – a выражением

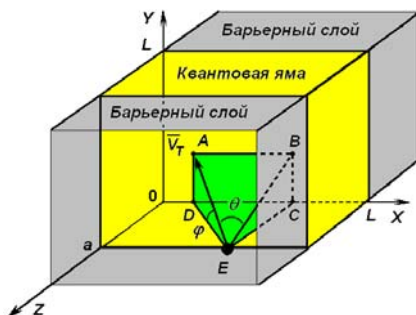


Рис. 1. Ориентация вектора тепловой скорости электрона в плоскостях XOZ , YOZ относительно направления роста

$$l_{\text{кя}} = \left[a / (\cos\theta \cdot \cos\varphi) \right], \quad (1)$$

где $0 \leq \theta, \varphi \leq 2\pi$.

Здесь θ – угол между направлением роста ГС – осью Z и вектором скорости электрона в плоскости XOZ , а угол φ – это угол между направлением вектора тепловой скорости и ее проекцией на плоскость

XOZ. В точках, где углы θ , φ кратны $\pi/2$, косинусы углов обращаются в нуль, что по выражению (1) приводит к бесконечно большим значениям длины свободного пробега электрона в КЯ: $l_{\text{кя}} \rightarrow \infty$. В действительности, двигаясь параллельно границам «барьер – КЯ» электроны сталкиваются с фононами в объёме материала КЯ, где длина свободного пробега достаточно велика: $l_V \approx 1$ мкм. При наличии двух механизмов рассеяния энергии, заменяющих друг друга с изменением угла падения электрона на межфазную границу, математически исключить бесконечное значение длины пробега, в действительности таковым не являющимся, можно, воспользовавшись операцией вычисления среднего геометрического значения длины пробега:

$$l_{\text{ст}} = \frac{\left[\frac{a}{a/(\cos\theta \cdot \cos\varphi)} \right] \cdot l_V}{\left[\frac{a}{a/(\cos\theta \cdot \cos\varphi)} \right] + l_V} = \frac{a \cdot l_V}{a + l_V \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi}. \quad (2)$$

Для учета хаотического направления движения электрона до и после столкновений вычислим среднюю длину свободного пробега $\overline{l_{\text{ст}}}$, взяв за область усреднения углов падения электрона на границу раздела значения $\Delta\theta$, $\Delta\varphi = 0 \dots \pi/2$. Тогда среднее значение длины свободного пробега найдем делением площади, ограниченной интегрируемой функцией, на диапазон изменения независимой переменной:

$$\overline{l_{\text{ст}}} = \frac{4a \cdot l_V}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{a + l_V \cos\theta \cos\varphi}. \quad (3)$$

Интеграл в выражении (3) может быть выражен аналитически:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{a + l_V \cos\varphi \cos\theta} = \\ & = \frac{1}{\sqrt{(l_V \cos\varphi)^2 - a^2}} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{l_V \cos\varphi - a} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sqrt{l_V \cos\varphi + a}}{\sqrt{l_V \cos\varphi - a} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{l_V \cos\varphi + a}} \right] \Bigg|_0^{\pi/2}. \end{aligned}$$

Однако получаемое выражение громоздкое и не наглядное, что мешает физической интерпретации получаемого результата. К тому же это выражение дает неопределенность при подстановке пределов интегрирования, что требует отдельного математического рассмотрения. Поскольку выражение (3) показывает, что влияние углов θ , φ на вычисляемое значение средней длины свободного пробега абсолютно

одинаковое, во избежание математических сложностей, но сохранении физической картины рассеяния, при вычислении интеграла (3) ограничим свое рассмотрение случаем $\varphi=0$. Это соответствует вычислению средней длины свободного пробега электронов при их движении в плоскости XOZ . В этой связи нами подобрана достаточно точная (ошибка менее 5%) и простая математическая аппроксимация подынтегрального выражения, свободная от указанных недостатков:

$$\int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{a + l_V \cdot \cos \theta} \approx \int_0^{\pi/2} \left[c_1 + c_2 \cdot \exp\left(\frac{\theta - \theta_0}{\sigma}\right) \right] \cdot d\theta. \quad (4)$$

Здесь все величины правой части равенства, кроме переменной θ , являются константами, зависящими a , l_V и подбираемыми по заданной точности аппроксимации. Так, для типичных значений $a=4 \cdot 10^{-9}$ м и $l_V=10^{-6}$ м найдено: $c_1=4 \cdot 10^{-9}$; $c_2=10^{-11}$; $\theta_0=0,35$; $\sigma=0,135$ рад. При этом получаемое значение средней длины свободного пробега измеряется в метрах. Взяв интеграл (4), получим

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{a + l_V \cdot \cos \theta} &\cong \\ &\cong \int_0^{\pi/2} \left[c_1 + c_2 \cdot \exp\left(\frac{\theta - \theta_0}{\sigma}\right) \right] \cdot d\theta = \frac{\pi}{2} c_1 + c_2 \sigma \cdot \exp\left(-\frac{\theta_0}{\sigma}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{\pi}{2\sigma}\right) - 1 \right]. \end{aligned}$$

Поскольку толщина КЯ всегда значительно меньше длины свободного пробега электрона в объемном материале ($a \ll l_V$), выражение для среднего значения длины свободного пробега электрона в плоскости XOZ можно переписать в виде

$$\overline{l_{ст}} \cong (a \cdot l_V) \cdot \left[c_1 + \left(\frac{2c_2\sigma}{\pi} \right) \cdot \exp\left(\frac{\pi/2 - \theta_0}{\sigma}\right) \right]. \quad (5)$$

Теперь учтем отклонение вектора скорости электрона от оси Z в плоскости YOZ на угол φ (см. рис. 1). Тогда средняя длина свободного пробега электрона в указанной плоскости будет рассчитываться по тем же выражениям, что и в случае плоскости XOZ . Конечное выражение также будет вида (5), которое теперь можно рассматривать как выражение для средней длины свободного пробега электрона в КЯ для любой ориентации его вектора тепловой скорости.

Заключение. Получено аналитическое выражение для длины свободного пробега электрона в квантовой яме, в котором учтены вероятности различных исходов столкновения электронов с фононами и

межфазными границами гетероструктуры, а также различия в геометрических размерах КЯ в направлении роста ГС и в перпендикулярной ему плоскости. Показано, что длина свободного пробега электрона в квантовой яме линейно растет с увеличением толщины КЯ и длины свободного пробега в ее объеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф.* Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / пер с англ. А.В. Хачояна; под ред. Е.Б. Якимова. – М.: Техносфера, 2007. – 367 с.
2. *Пул Ч.-мл., Оуэнс Ф.* Мир материалов и технологий. Нанотехнологии / пер. с англ.; под ред. Ю.И. Головина. – М.: Техносфера, 2007. – 375 с.

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МОЩНОГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА С АКТИВНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Д.А. Корольский, инженер-электроник;

А.И. Кох, инженер-конструктор

Томск, АО «НИИПП», danmypro@sibmail.com

В настоящее время широкое распространение получило светодиодное освещение, основанное на полупроводниковых светоизлучающих диодах. Светодиодные светильники более экономичны, долговечны, экологичны. Несмотря на их широкое распространение, на рынке светодиодного освещения редко встречаются высокоэффективные светодиодные светильники мощностью в несколько сотен ватт и еще реже мощные светодиодные светильники с принудительным охлаждением. Зачастую их мощность составляет не более 100 Вт [1]. В связи с возникшей потребностью на них АО «НИИПП» был разработан светодиодный светильник с активным охлаждением с потребляемой мощностью 500 Вт и световым потоком более 50 000 лм. Особые требования предъявлялись к источнику питания – драйверу этого светильника: он должен иметь высокие коэффициент мощности и КПД.

Функциональная схема разработанного источника питания изображена на рис. 1.

Источник питания построен на основе непосредственного повышающего преобразователя напряжения, который также осуществляет коррекцию коэффициента мощности. Такая топология позволяет объединить в однокаскадном преобразователе коррекцию коэффициента мощности и формирование выходных параметров, а отсутствие трансформатора позволит получить высокий КПД.

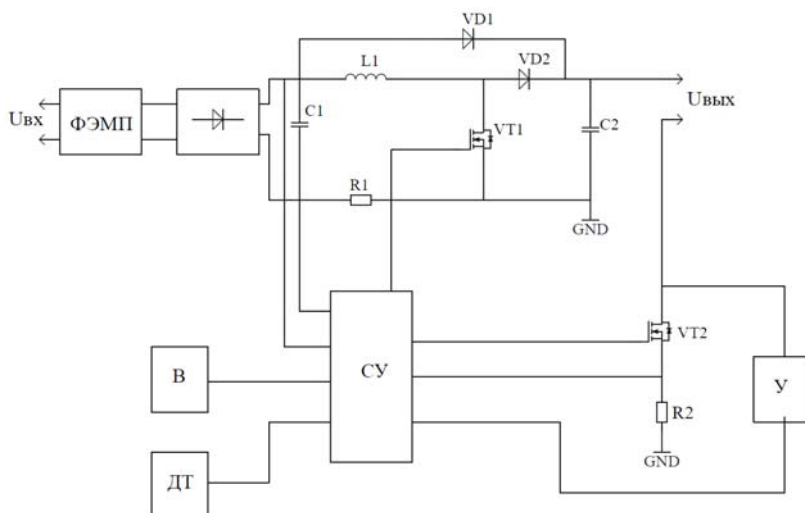


Рис. 1. Схема электрическая функциональная источника питания:
 ДТ – датчик температуры; У – усилитель; В – вентилятор;
 СУ – система управления; ФЭМП – фильтр электромагнитных помех

Входное напряжение источника питания – напряжение однофазной сети переменного тока $220 \text{ В} \pm 10\% / 50 \text{ Гц}$. В преобразователе реализовано управление по току с использованием метода широтно-импульсной модуляции. Используемая микросхема корректора коэффициента мощности – NCP1654 фирмы ON Semiconductor [2]. Частота преобразования составляет 66 кГц . Стабилизацию тока светодиодов осуществляет активный фильтр. Напряжение сток-исток транзистора активного фильтра VT2 – переменная составляющая напряжения выходного конденсатора C2. Благодаря использованию такого фильтра удалось получить низкий коэффициент пульсаций светового потока. Усилитель У также обеспечивает защиту от короткого замыкания в цепи нагрузки. Охлаждение светильника осуществляется с помощью радиального вентилятора. На вход системы управления поступает сигнал с полупроводникового аналогового датчика температуры ДТ, расположенного на световом модуле светильника. При превышении первого порога напряжения с датчика (т.е. при превышении температуры модуля определенного значения) подается напряжение 5 В на вентилятор. При увеличении температуры светового модуля напряжение питания вентилятора растет вплоть до номинального значения. В схеме также предусмотрено защитное отключение преобразователя при превышении температуры светового модуля 90°C .

На рис. 2 представлен макет разработанного источника питания.



Рис. 2. Макет разработанного светодиодного источника питания

Осциллограмма входного тока изображена на рис. 3. Форма потребляемого из сети тока близка к синусоидальной. На рис. 4 показано напряжение сток-исток силового ключа VT1.

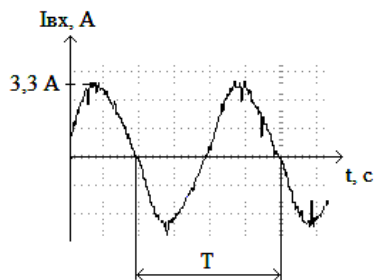


Рис. 3. Потребляемый ток

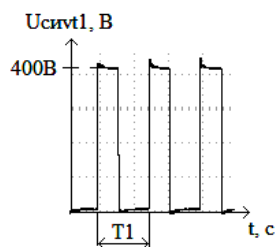


Рис. 4. Напряжение сток-исток транзистора VT1

На рис. 5 и 6 – осциллограммы тока светового модуля и напряжения сток-исток транзистора активного фильтра VT2 соответственно.

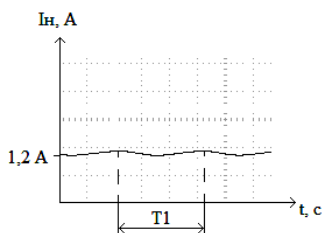


Рис. 5. Ток нагрузки

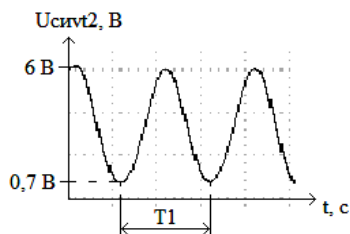


Рис. 6. Напряжение сток-исток транзистора VT2

Несмотря на жесткое переключение силового ключа, разработанный источник питания имеет высокую эффективность. Его КПД составляет 94%, а коэффициент мощности равен 0,98 во всем диапазоне питающих напряжений. Измерения проводились с использованием измерителя электрической мощности GPM8212.

Метод активного охлаждения позволит уменьшить габаритные размеры и массу светодиодного светильника. Более того, активный контроль температуры модуля позволит дополнительно повысить надежность и эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смолянский В., Юсупов С.* Легче пуха, ярче солнца. Светильники с активным охлаждением // Современная светотехника. – 2015. – №5. – С. 16–20.
2. *Техническая документация на контроллер коррекции коэффициента мощности NCP1654 [Электронный ресурс].* – Текст. и граф. данные. – Режим доступа: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP1654-D.PDF>.

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ PIN-ДИОДА

Т.Г. Никишкин, студент

Научный руководитель С.С. Чурсин, ассистент каф. ФЭУ

Томск, НИ ТПУ, timofei.nikishkin@gmail.com

К настоящему времени в мире создано множество детекторов различных типов, позволяющих регистрировать излучение любой природы. Решение конкретных спектрометрических задач, как правило, требует предельной оптимизации детектирующих систем. Таким образом, разработка новых спектрометрических решений и оптимизация уже существующих являются актуальными направлениями в современной ядерной измерительной технике.

Классический детектор радиации, способный определять все виды радиоактивного излучения (альфа, бета и гамма), строится на базе счетчика Гейгера–Мюллера. Счетчик Гейгера–Мюллера имеет ряд как достоинств (высокая эффективность), так и недостатков (цена, пространственность). На сегодняшний день счетчику Гейгера–Мюллера есть множество альтернатив, в том числе полупроводниковый детектор гамма-излучения на базе PIN-диода.

Цель данной работы – рассмотреть возможные радиоэлектронные схемы спектрометрических систем на базе PIN-диода, сравнить и выбрать наиболее оптимальную схему с точки зрения электротехники и схемотехники для её усовершенствования и практического приме-

ния в области гамма-спектрометрии ядерных материалов и радиоактивных веществ.

Ключевым элементом полупроводникового спектрометра является полупроводниковый детектор излучения. В первом приближении его можно рассматривать как твердотельную ионизационную камеру с твердым диэлектриком между электродами.

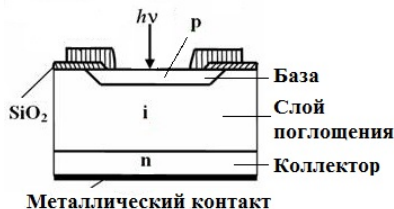


Рис. 1. Конструкция кремниевого PIN-диода

При разработке спектрометра гамма-излучения было решено отказаться от использования дорогостоящих полупроводниковых кристаллов, газоразрядных счётчиков, сцинтилляторов в качестве чувствительного элемента спектрометра и использовать широко распространённые полупроводниковые PIN-диоды.

Далее был выполнен обзор и сравнение трёх существующих принципиальных схем детекторов гамма-излучения на основе PIN-диода различной степени сложности исполнения и компоновки.

На рис. 2 представлена простейшая из рассмотренных радиоэлектронная схема №1 гамма-спектрометра на базе PIN-диода BPW34. Данная принципиальная схема состоит из 11 радиоэлементов: 5 резисторов различного номинала, 3 конденсатора различной ёмкости, 2 транзистора BC547C и PIN-диода марки BPW34. При такой компоновке схема довольно проста в исполнении и наиболее бюджетна — все элементы схемы широко распространены и имеются в свободном доступе при минимальной стоимости. Стоимость всех компонентов без учёта стоимости пайки самой платы составляет порядка 200 руб.

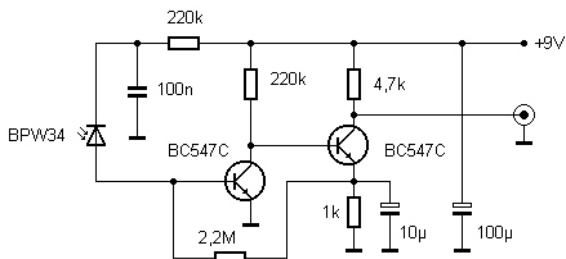


Рис. 2. Принципиальная схема гамма-спектрометра на основе PIN-диода

Такая простейшая радиоэлектронная схема гамма-детектора обладает низкой эффективностью за счёт малого коэффициента усиления

ния. Однако этот вопрос решаем, так как простейшая схема позволяет добавлять компоненты, тем самым улучшая показатели.

Далее была рассмотрена более сложная принципиальная схема №2 гамма-спектрометра с усилителем. Она состоит из 16 радиоэлементов: 7 резисторов различного номинала, 6 конденсаторов различного объёма, PIN-диода BPW34 и 2 операционных усилителей TLC272. За счёт добавления двух операционных усилителей принципиальная схема спектрометра обладает более высоким коэффициентом усиления выходного сигнала и, следовательно, более эффективна, при этом стоимость всех компонентов без учёта стоимости пайки самой платы составляет порядка 350 руб.

Наиболее сложная из рассмотренных принципиальная схема гамма-спектрометра №3 содержит более 30 компонентов. Существенным отличием от предыдущих схем является добавление четырёх операционных усилителей LMH6672 и компаратора LM311. Такое решение приводит к более существенному увеличению эффективности за счёт повышения коэффициента усиления. Но, с другой стороны, увеличение числа компонентов сказывается как на стоимости самой принципиальной схемы – стоимость одних лишь компонентов составляет порядка 1500 руб., так и на увеличении аппаратных шумов в ней, что крайне негативно сказывается на выходном сигнале и его обработке.

Помимо рассмотренных, существует ещё ряд других решений, в том числе более дорогостоящих, как, например, готовая разработка от Maxim Integrated, отличающаяся высокой стоимостью компонентов.

Сравнение принципиальных схем спектрометра на PIN-диоде

Схема	Число компонентов, шт.	Эффективность	Стоимость, руб.
№1	11	Низкая	~200
№2	16	Средняя	~350
№3	33	Выше средней	~1500

Проведя обзор и анализ существующих радиоэлектронных схем спектрометрических систем на базе PIN-диода, выяснилось, что наиболее дешёвое с точки зрения стоимости компонентов решение не есть самое лучшее. Наиболее оптимальным решением является выбор второй принципиальной схемы детектора гамма-излучения, так как данная схема легко подлечит дальнейшей модернизации, увеличению эффективности и удешевлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. *Electronic equipment repair centre* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electro-medical.blogspot.ru/2015/05/radiation-detector-for-gamma-rays.html> (дата обращения: 27.02.2017).

3. *DExUS: Geiger Counter + Gamma spectrum analyzer* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dexus5.com/system3/geiger-counter-gamma-spectrum-analyzer-under-10e/> (дата обращения: 27.02.2017).

4. *TechMedia: Geektimes* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/258008/> (дата обращения: 27.02.2017).

5. *Maxim Application Note 2236: Gamma-Photon Radiation Detector* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2236.pdf> (дата обращения: 27.02.2017).

ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ ПОЛИФЛУОРЕНА

***Е.Н. Никонова**, м.н.с., *С.Ю. Никонов**, н.с.,**

лаборатории органической электроники;

Д.М. Ильгач, н.с., *лаборатории синтеза полимерных
наноматериалов и композиций для оптических сред***

Научный руководитель Т.Н. Копылова, зав. лаб., проф.

****Томск, СФТИ ТГУ, **Санкт-Петербург, ИВС РАН***

ponyavina@ngs.ru

Новые полупроводниковые материалы во многом определяют развитие полимерной органической электроники и позволяют создавать различные устройства на их основе (органические светоизлучающие диоды, транзисторы, тонкопленочные лазеры и т.д.). Органические светоизлучающие диоды в зависимости от структуры полимера могут излучать в синем, зеленом, красном и белом диапазонах спектра с высокой эффективностью [1].

Преимущества использования полимеров при создании устройств органической электроники:

– возможность их нанесения различными методами: центрифугирование, принтерная печать, напыление и т.д. [2];

– возможность создания как однослойных, так и многослойных структур органических светоизлучающих диодов с высокой яркостью и эффективностью [3].

В работе были изучены спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные свойства новых сополимеров на основе полифлуорена, синтезированные в Институте высокомолекулярных соединений РАН.

Все сополифлуорены имеют высокий квантовый выход (ϕ) как в растворах (толуол), так и в пленках ($\lambda_{\text{ex}} = 378$ нм). Это говорит о полном переносе энергии при фотовозбуждении с полифлуоренового звена на излучающий фрагмент полимерной цепи.

Исследована электролюминесценция новых сополимеров на основе полифлуорена в структуре органического светодиода ITO/PEDOT:PSS/Сополифлуорен/Ca/Al. В зависимости от структуры сополифлуорены излучают в синем, зеленом и красном диапазоне спектра.

Полученные спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные характеристики представлены в таблице.

Максимальная яркость – 2830 кд/м² и эффективность электролюминесценции получены для сополифлуорена IV 0.5 кд/м², излучающего в синем диапазоне спектра.

Спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные свойства сополимеров на основе полифлуорена

№	λ_{abs} , нм (раствор)	$\lambda_{\text{fl}}(\phi)$, нм (раствор)	$\lambda_{\text{fl}}(\phi)$, нм (пленка)	λ_{el} , нм	L , кд/м ² (U , В)	Эффектив- ность, кд/А	CIE, 1931
I	369	416, 439 (0,91)	485 (0,6)	423, 480	1125 (10)	0,19	$x = 0,169$ $y = 0,218$
II	371	417, 439 (1,0)	494 (0,83)	423, 486	1767 (8)	0,35	$x = 0,175$ $y = 0,289$
III	371	414, 439 (0,88)	491 (0,77)	421, 485	281 (8)	0,1	$x = 0,172$ $y = 0,274$
IV	370	416, 440 (0,91)	488 (0,57)	423, 482	2830 (10)	0,5	$x = 0,168$ $y = 0,228$
V	369	432 (0,9)	475 (0,39)	434	264 (10)	0,056	$x = 0,178$ $y = 0,175$
VI	384	426, 543 (1)	675 (0,78)	428, 526, 629	200 (10)	0,03	$x = 0,556$ $y = 0,400$
VII	387	424, 542 (0,97)	561 (0,68)	560	920 (10)	0,1	$x = 0,336$ $y = 0,569$

Полученные спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные характеристики показывают, что сополифлуорены перспективны для создания устройств органической и квантовой электроники (тонкопленочных лазеров и органических светодиодов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu S., Zhong C., Dong S., Zhang J. et al. Novel aminoalkyl-functionalized blue-, green- and red-emitting polyfluorenes // Organic Electronics. – 2014. – Vol. 15, № 4. – PP. 850–857.

2. Zheng H., Zheng Y., Liu N. *et al.* All-solution processed polymer light-emitting diode displays // Nature communications. – 2013. – Vol. 4. – PP. 1–7.

3. Zeng W.J., Wu H.B., Zhang C. *et al.* Polymer Light-Emitting Diodes with Cathodes Printed from Conducting Ag Paste // Advanced Materials. – 2007. – Vol. 19, is. 6. – PP. 810–814.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭМИССИИ ГАРМОНИК УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП С ПАСИВНЫМ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

А.Ю. Олисовец, С.П. Шкарупо, аспиранты каф. РЭТЭМ

Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Томск, ТУСУР, vasilii.i.tuev@tusur.ru

Корректоры коэффициента мощности достаточно хорошо изучены [1, 2, 4]. Однако вопросы анализа эмиссии гармоник светодиодных ламп с ККМ решены неокончательно.

Целью данной работы являются разработка математической модели выпрямителя с ККМ с применением метода кусочно-линейной аппроксимации и анализ электромагнитной совместимости выпрямителя с пассивным корректором коэффициента мощности в части эмиссии гармоник [3].

Типовая электрическая схема выпрямителя с пассивным корректором коэффициента мощности представлена на рис. 1.

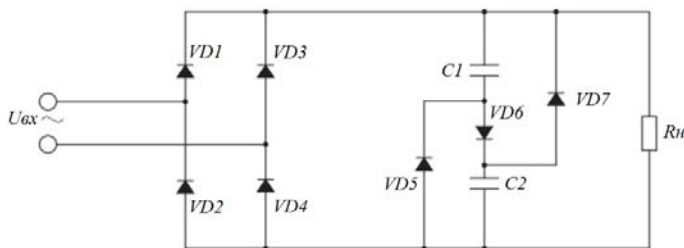


Рис. 1. Типовая электрическая схема выпрямителя с пассивным корректором коэффициента мощности

В качестве исходных данных принято амплитудное значение напряжения U_m , равное 120 В. Частота питающего напряжения $f = 50$ Гц. Конденсаторы C_1 и C_2 имеют одинаковое значение емкости, равное 47 мкФ. Нагрузка равна 350 Ом. На диоды VD_1 – VD_4 поступает переменное напряжение

$$U_{\text{вх}} = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение входного напряжения; ω – круговая частота питающей сети.

Для определения математической записи формы потребляемого тока применен метод кусочно-линейной аппроксимации [3], использующийся с учетом следующих ограничений и допущений:

1. Диоды представлены идеальными ключами с нулевым внутренним сопротивлением.

2. Внутренне сопротивление питающей сети принято равным нулю.

Для того чтобы построить форму напряжения на нагрузке и форму потребляемого тока, необходимо участок длительностью $T/2$, где T – период колебания с частотой f , разложить на 3 временных отрезка: $0-t_1$, t_1-t_2 , t_2-t_3 .

В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$ мгновенное значение входного напряжения меньше остаточного напряжения на нагрузке, поэтому диоды VD_1-VD_4 закрыты. Таким образом, t_1 – это момент времени, когда мгновенное значение возрастающего входного напряжения достигает значение остаточного напряжения на нагрузке. Ток, потребляемый от электрической сети, отсутствует: $i_1 = 0$.

В интервале времени $t_1 \leq t \leq t_2$ мгновенное значение напряжения превышает остаточное напряжение на конденсаторах C_1 и C_2 , одновременно протекают два процесса:

1) ток питающей сети протекает через нагрузку, при этом форма протекающего тока повторяет форму входного напряжения;

2) через открывшийся диод VD_6 конденсаторы C_1 и C_2 в данном случае соединены между собой последовательно, образуя эквивалентную емкость $C_{\text{посл}}$ и заряжаются от входного напряжения. Соответственно

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2)$$

Напряжение на нагрузке U_n в данный промежуток времени при условии, что $t_1 \leq t \leq t_2$, определяется мгновенным значением входного напряжения [3]

$$U_n(t) = U_m \cdot \sin(\omega t). \quad (3)$$

Ток i_2 , потребляемый от электрической сети, равен сумме токов, протекающих через нагрузку i_n и через $C_{\text{посл}}$ i_c :

$$i_2 = i_c + i_n = C_{\text{посл}} \frac{dU_n}{dt} + \frac{U_m}{R_n} \sin(\omega t). \quad (4)$$

Численное значение t_2 соответствует максимальному значению входного напряжения.

В интервале времени $t_2 \leq t \leq t_3$ конденсаторы C_1 и C_2 оказываются включенными параллельно, образуя эквивалентную емкость:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2. \quad (5)$$

Диоды VD_5 и VD_7 открыты. Конденсаторы разряжаются через нагрузку R_H

$$U_H(t) = -R_H C_{\text{пар}} \frac{dU_C}{dt}. \quad (6)$$

Для построения временной зависимости напряжений и токов необходимо найти численные значения t_1 и t_3 .

Численное значение t_3 определяется как [3]

$$t_3 = -\frac{\arctg(\omega C_{\text{пар}} R_H)}{\omega}. \quad (7)$$

Момент времени t_1 находится при решении трансцендентного уравнения [3]:

$$U_m \cdot \sin(\omega t_1) = U_m \cdot \sin(\omega t_2) \cdot e^{-\frac{T+t_1+t_2}{R_H C_{\text{пар}}}}. \quad (8)$$

При определении всех моментов времени можно построить форму напряжения на нагрузке (рис. 2) и форму потребляемого тока (рис. 3).

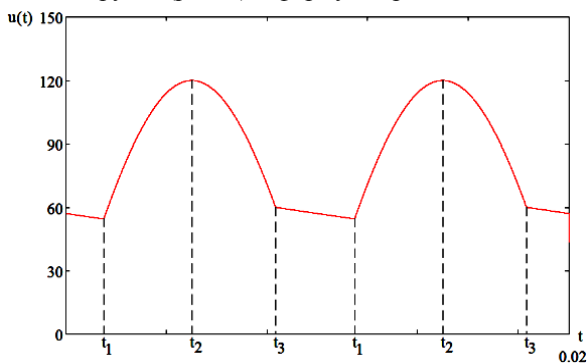


Рис. 2. Форма напряжения на нагрузке

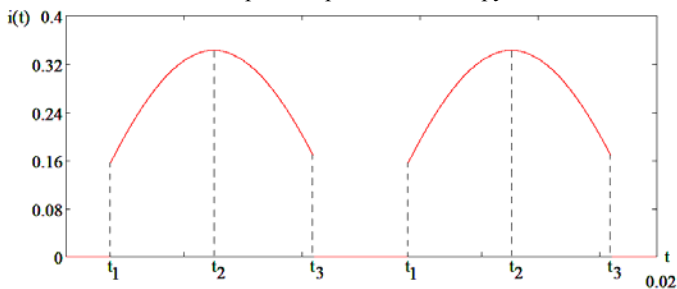


Рис. 3. Форма потребляемого тока

Для анализа гармонического состава необходимо разложить показанную на рис. 3 функцию тока в ряд Фурье согласно формуле:

$$I(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin \omega t, \quad (9)$$

где a_k, b_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Спектральные составляющие тока, потребляемого от сети в типовой схеме выпрямителя с пассивным корректором коэффициента мощности, рассчитанные в соответствии с (9) и нормированные относительно значения первой гармоники, приведены на рис. 4.

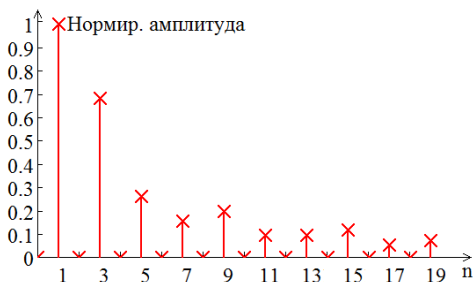


Рис. 4. Спектр тока, потребляемого от сети, в типовой схеме устройств питания с пассивными ККМ

Таким образом, в данной работе с применением метода кусочно-линейной аппроксимации разработана математическая модель, позволяющая проводить анализ электромагнитной совместимости устройств питания светодиодных ламп с пассивными корректорами коэффициента мощности в части эмиссии гармоник.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твердов И. Пассивные корректоры коэффициента мощности для однофазных и трехфазных модулей питания // Силовая электроника. – 2009. – № 4. – С. 8–11.
2. Махлин А. Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 1. – С. 30–33.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – Т. 2. – 407 с.
4. Григорьев В. Коррекция коэффициента мощности во вторичных источниках электропитания / В. Григорьев, Е. Дуплякин // Электронные компоненты. – 2000. – №2. – С. 66–68.

МАКЕТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ЛАМП ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОНОЛИТНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ

Е.О. Постолова, К.В. Тепляков, аспиранты ИФВТ НИ ТПУ;

А.А. Виллисов, проф., д.т.н.; В.С. Солдаткин, доцент, к.т.н.

*Томск, НИ ТПУ, lightmoon765@mail.ru, rjcnz-nuts@mail.ru,
ТУСУР, каф. РЭТЭМ, vilisovaa@mail.ru, soldatkinvs@main.tusur.ru*

В настоящее время основной тенденцией в развитии светодиодных ламп является применение светодиодных излучающих элементов нитевидного типа (СИЭ). Как и во всей светотехнике, задачами научных и производственных коллективов являются повышение эффективности и надёжности и снижение себестоимости [1–3]. Целью данной работы являются изготовление макетов СИЭ с применением новейших мировых достижений в производстве монокристаллических светодиодных матриц и анализ их электрических и световых характеристик.

Для макетирования были выбраны светодиодные кристаллы и матрицы Epistar, крупнейшего мирового производителя в области полупроводниковых нитридных кристаллов. Типовые кристаллы для СИЭ с размерами 750×250 мкм прямое напряжение 3 В; монокристаллические матрицы с размерами 1016×1016 мкм, прямое напряжение 48 В и монокристаллические матрицы с размерами 915×2032 мкм переменное напряжение 90 В (рис. 1).

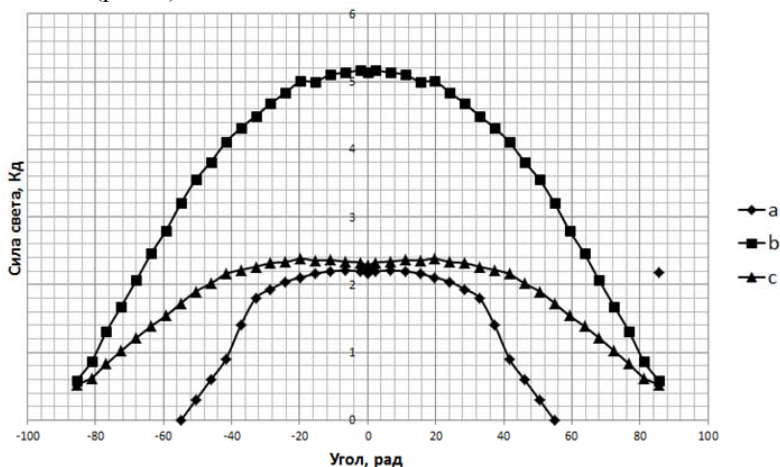


Рис. 1. КСС для СИЭ: *a* – СИЭ с 28 кристаллами;
b – СИЭ со светодиодной матрицей на переменное напряжение;
c – СИЭ с двумя светодиодными матрицами на постоянное напряжение

Несущая конструкция СИЭ металлическая, мощность одного СИЭ 1 Вт заданы производителем ламп. Изготовлены три типа макетов СИЭ:

- а) 28 кристаллов с размерами 750×250 мкм, соединённых последовательно, с общим постоянным током на СИЭ 10 мА;
- б) одна монокристаллическая матрица с размерами 915×2032 мкм с переменным среднеквадратичным током на СИЭ 10 мА;
- в) две монокристаллические матрицы, соединённые последовательно, с размерами 1016×1016 мкм с общим постоянным током на СИЭ 10 мА.

С помощью программного продукта LIGHTTOOLS было проведено моделирование светового поля трех вариантов СИЭ без учета люминофора.

Заключение. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что наиболее эффективное распределение наблюдается у варианта СИЭ на основе 2 монокристаллических матриц, у остальных вариантов наблюдается небольшой провал в 0° и они имеют меньшее значение силы света более чем в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряполова Ю.В., Неверовский К.А., Постолова Е.О., Афонин К.Н. Оптическое моделирование светодиодной лампы // Научная сессия ТУСУР-2016: матер. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 244–246.
2. Ряполова Ю.В., Неверовский К.А., Постолова Е.О., Афонин К.Н. Тепловое моделирование светодиодной лампы // Научная сессия ТУСУР-2016: матер. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 243–244.
3. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. – №3 (37). – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – С. 55–61.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕНТОЧНОГО ТИПА

Е.О. Постолова, аспирантка каф. ЛИСТ, ИФВТ, НИ ТПУ
Научный руководитель А.А. Виллисов, проф. каф. РЭТЭМ, д.т.н.
Томск, ТУСУР, lightmoon765@mail.ru, vilisovaa@mail.ru

Повышение эффективности использования электрической энергии для целей освещения – одна из задач, которая стоит сегодня перед человечеством [1, 2]. На данный момент наиболее перспективными источниками света являются лампы на основе светодиодных излу-

чающих элементов ленточного типа (СИЭ). Данные лампы появились сравнительно недавно. Такие лампы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими светодиодными источниками света: меньшие габариты и масса, кривая силы света (КСС), подобная КСС ЛН, однако они требуют дальнейшей модернизации. Цель данной работы: сборка типичного макета светоизлучающего элемента (СИЭ), измерение и анализ световых и электрических характеристик макета.

Типичный СИЭ состоит из несущей конструкции, к которой с помощью коммерческого клея, прикреплены светодиодные кристаллы с нанесенным на них слоем люминофора. Использовались светодиодные кристаллы фирмы Epistar, крупнейшего мирового производителя в области полупроводниковых нитридных кристаллов. Размеры кристаллов: 750×250 мкм, прямое напряжение 3 В, количество для одного СИЭ 28 шт.

Измерение падения напряжения от температуры. Измерения проводились в лаборатории ТУСУРа, в ходе работы использовалась печь (сушильный шкаф) модели SNOL-58/350. Для измерений были изготовлены 8 СИЭ с нанесенным на них люминофором. Измерения проводились с постоянным током 10 мА и изменением температуры в диапазоне от 25 до 100 °С с шагом 5 °С. На рис. 1 показана зависимость среднего (из десяти измерений) значения прямого напряжения СИЭ от температуры.

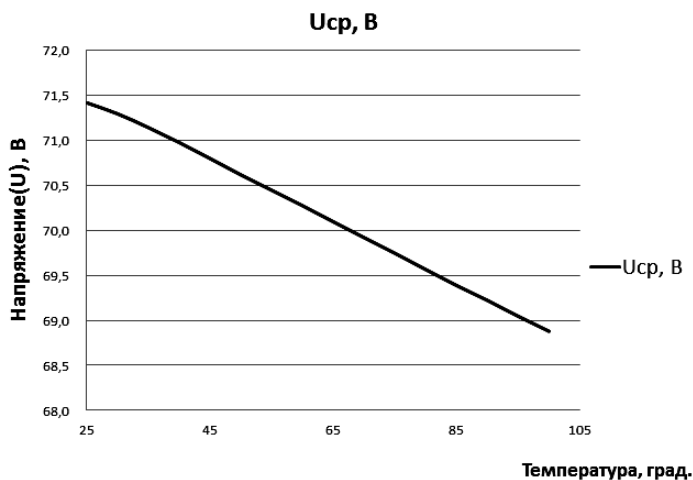


Рис. 1. Зависимость прямого напряжения от температуры

Из рис. 1 видно, что зависимость падения напряжения от температуры имеет линейный характер.

Также были измерены вольт-амперные характеристики СИЭ (рис. 2).

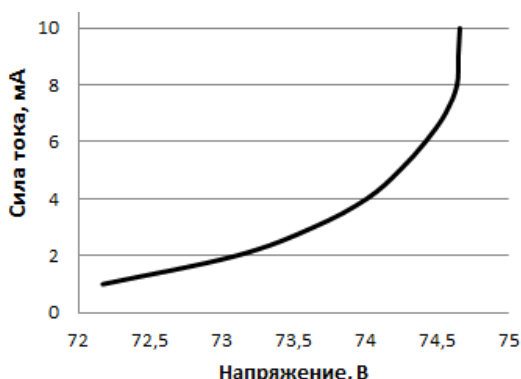


Рис. 2. Типичная вольт-амперная характеристика СИЭ

Заключение. Результаты измерений помогут упростить необходимые расчеты для последующего улучшения характеристик ламп на основе СИЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н. и др. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55–61.
2. Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 2 (28). – С. 51–53.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК, НАНЕСЁННЫХ МЕТОДОМ СТРУЙНОЙ ПРИНТЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Д.А. Решетов, М.В. Андреева, студенты; А.П. Шкарупо, аспирант

*Научный руководитель А.Ю. Хомяков, инженер
Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, khotyakov.a.yu@gmail.com*

В настоящее время одним из приоритетных направлений исследований в области изготовления электронных устройств является струйная печать. Использование функциональных возможностей струйной печати чрезвычайно широко и предполагает применение материалов разной структуры, свойств и возможностей воспроизведения топологии.

Известно, что токопроводящие дорожки печатной платы можно наносить на гибкое диэлектрическое основание. Полученный продукт, гибкая печатная плата, будет иметь преимущества в сравнении с печатными платами на стеклотекстолите, гетинаксе или на другом жестком диэлектрическом основании [1]. Также существует много причин использования гибких печатных плат в качестве средства межсоединений в электронных устройствах. В некоторых случаях, когда необходима устойчивость гибких печатных плат к динамическим нагрузкам, использование таких печатных плат очевидно, в этом они не имеют альтернативы. Мало того, что малая толщина гибких печатных плат привлекательна сама по себе, возможность ее складывать за счет гибкости также позволяет сокращать объемы и габариты электронных устройств [2].

Целью данной работы является экспериментальное определение значений сопротивлений плёнок, нанесённых методом принтерной печати.

Плёнки были нанесены при помощи аппаратно-программного комплекса (АПАК) (рис. 1).

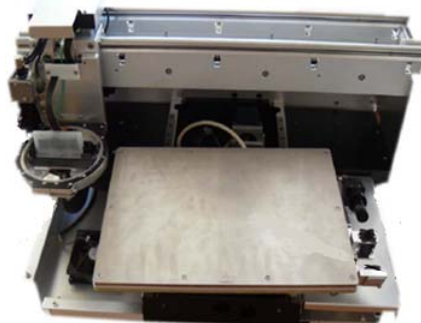


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс

В ходе работы были изготовлены макетные образцы. На стеклянных подложках (2,5×2,5 см) напечатаны плёнки заданной длины и ширины (15 и 1 мм соответственно) пятью разными способами одним и тем же раствором (Poly Ink с этиленгликолем техническим высшего сорта (ГОСТ 19710–83) в пропорции 1:1).

Температура картриджа – 24 °С, температура стола для печати – 30 °С. Температура окружающей среды – 18 °С.

В картридж принтера было заправлено 1,5 мл раствора. Производилась печать проводящих линий на двух стеклянных подложках.

В табл. 1 представлены изображения расположения точек при печати, а также соответствующие им разрешения печати.

После печати образцы с проводящими линиями помещались в сушильный шкаф на 10 мин при 100 °С, для того чтобы с поверхности подложек испарился загуститель (этиленгликоль).

Таблица 1

Разрешение для печати				
				
Разрешение печати				
726 DPI	1016 DPI	1693 DPI	2540 DPI	5080 DPI
Расстояние между центрами точек, мкм				
35	25	15	10	5

Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента			
Номер линии	Разрешение	Первая подложка	Вторая подложка
		Сопротивление	
1	726 DPI	Не проводит ток	160 ($\pm 0,679$) кОм
2	1016 DPI	Не проводит ток	20 ($\pm 0,0195$) кОм
3	1693 DPI	173 ($\pm 0,679$) кОм	6,5 ($\pm 0,0195$) кОм
4	2540 DPI	10 ($\pm 0,0195$) кОм	3 ($\pm 0,0195$) кОм
5	5080 DPI	2 ($\pm 0,0195$) кОм	647 ($\pm 0,281$) Ом

Сопротивление измерялось двухконтактным методом на источнике-измерителе KEITHLEY 2410, подключая контакты к концам линий [3].

В результате экспериментальных исследований установлено, что способ, дающий наименьшее значение сопротивления, – ($647 \pm 0,281$) Ом нанесённых плёнок, имеет следующие параметры:

- 1) разрешение печати – 5080 DPI;
- 2) количество слоёв – 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Медведев А.М.* Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
2. *Гольцова М.А.* Струйная печать в производстве электроники // Печатный монтаж. – 2010. – №2. – С. 24–28.
3. *Keithley.* Измерения и тестирование: справочник по продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tehencom.com/Companies/Keithley/2425_2425-C_SMU/Keithley_2425_2425-C_SMU.pdf (дата обращения: 6.06.16).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАМПЫ С НИТЕВИДНЫМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ю.В. Ряполова¹, Е.О. Постолова², аспирантки

Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Томск, ¹ТУСУР, каф. РЭТЭМ; ²НИ ТПУ, каф. ЛИСТ,

vasilii.i.tuev@tusur.ru

Современные системы освещения разрабатываются с применением высокоэффективных и надёжных источников света, которыми являются светодиодные лампы. Существенным недостатком известных конструкций светодиодных ламп, отличающим их от традиционных, является выраженный «прожекторный эффект», т.е. несферическое светораспределение. Наилучшими параметрами в части неравномерности пространственного распределения силы света обладают лампы с нитевидными светодиодными излучающими элементами (СИЭ) [1], однако световое распределение и этих ламп не достигает сферического. В данной работе решается задача оптимизации конструкции светодиодной лампы с нитевидными светоизлучающими элементами по критерию максимальной равномерности пространственного распределения света.

Исследуется конструкция лампы с четырьмя СИЭ. Достижение максимально равномерного пространственного распределения светового потока осуществляется изменением наклона СИЭ. В нижней части опорной конструкции электрические контакты СИЭ фиксировались в одном положении, а в верхней части прикреплялись к разным точкам контакта (рис. 1).

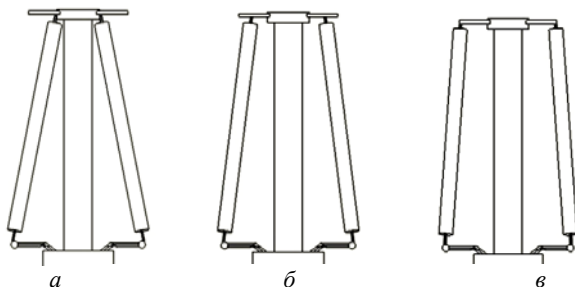


Рис. 1. Расположение контактов СИЭ в верхней части опорной конструкции:
а – в начале металлической поддержки; *б* – посередине металлической поддержки; *в* – на конце металлической поддержки

Максимальное расстояние между СИЭ определяется диаметром нижней части колбы лампы, который составляет 32 мм. Нижние кон-

такты СИЭ зафиксированы в наиболее удалённых точках крепления от центра опорной конструкции, и это расстояние составляет 7,5 мм. Рассмотрены три варианта крепления СИЭ на опорной конструкции: с наименьшим расстоянием между верхними контактами – 6 мм, в середине металлической поддержки – 10 мм и наибольшим – 14 мм, таким образом, для данных вариантов угол наклона СИЭ составляет 80, 83 и 86° [2].

В программе LightTools был проведен расчет светораспределения для трех положений светодиодных нитей в полярных координатах для наилучшего варианта в меридиональной плоскости в углах $\pm 180^\circ$. Для большей наглядности показываем в пределах $\pm 10^\circ$.

Результаты исследования представлены на рис. 2.

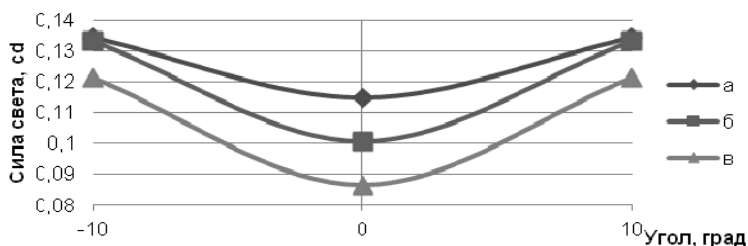


Рис. 2. Кривые силы света светодиодной лампы для трех положений СИЭ

Из рис. 2 следует, что из трех вариантов расположения СИЭ на опорной конструкции лампы наиболее равномерное распределение света имеет лампа с расположением нитей при фиксировании СИЭ с наименьшим расстоянием между верхними контактами в соответствии с вариантом *а*.

Для эксперимента с наклоном СИЭ были собраны 3 макетных образца с расположением СИЭ, приведенных на рис. 1.

На рис. 3 представлены КСС макетных образцов светодиодных ламп в меридиональной плоскости (плоскости, проходящей через геометрическую ось лампы), полученные путем измерения на гониофотометре.

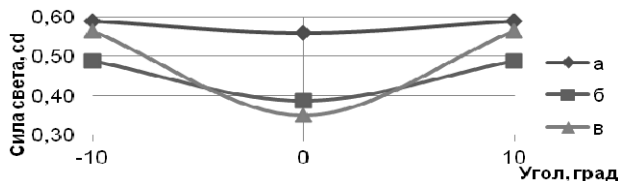


Рис. 3. КСС светодиодных ламп, измеренные на гониофотометре

По результатам макетирования установлено, что вариант *a* является оптимальным по кривой силы света и полученные результаты сравнения макетных образцов в целом соответствуют результатам моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н. и др. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55–61.
2. Ряполова Ю.В., Неверовский К.А., Постолова Е.О., Афонин К.Н. Оптическое моделирование светодиодной лампы // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2015». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 75–76.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТОКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

*Дж. А.А. Саид, аспирант каф. автоматики и управления
Научный руководитель Л.С. Казаринов, проф. каф. автоматики
и управления, д.т.н.
Челябинск, ЮУрГУ, gehads@mail.ru*

Перспективным направлением построения систем светодиодного освещения является использование многоканальных стабилизаторов светоизлучающих диодов.

Применение многоканальных стабилизаторов для питания многозвенных светодиодных линий по сравнению с одноканальными стабилизаторами имеет преимущества в виде более высокой надежности и эффективности.

Дело в том, что для мощных преобразователей с многими звеньями светодиодных линий, целесообразно разделять линии светодиодов на несколько каналов. Причина заключается в том, что если светодиоды включены последовательно в одной линии, получается большой перепад напряжения, который приводит, с одной стороны, к повышению вероятности отказов, а с другой стороны, не всегда допускается использование высокого напряжения на светодиодной нагрузке.

Для исследования результатов моделирования в качестве примера рассмотрим схему двухканального стабилизатора тока светодиодов (рис. 1).

Управление двухканальным стабилизатором в данной работе осуществляется с помощью микроконтроллера. Для обеспечения стабильности выходного тока светодиодов будем синхронизировать каналы стабилизатора с пилообразным сигналом в противофазном режиме.

Схема двухканального стабилизатора тока светодиодов приведена на рис. 1.

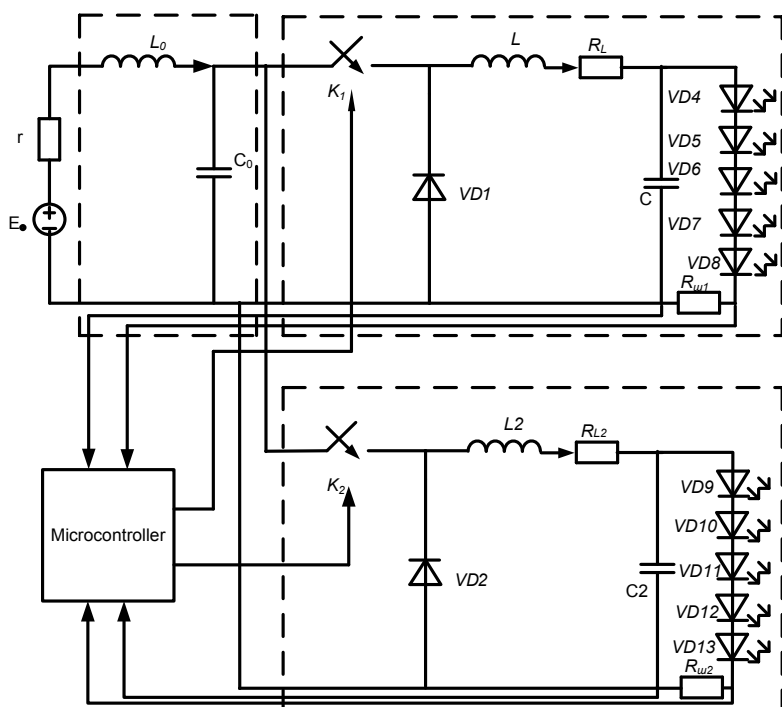


Рис. 1. Схема двухканального стабилизатора тока светоизлучающих диодов

На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования двухканального стабилизатора тока светодиодов в программной среде VisSim.

На основе результатов моделирования многоканальных стабилизаторов светодиодов в программной среде VisSim отметим, что при высокочастотном сигнале управления выходной ток светодиодов в многоканальных стабилизаторах является более стабильным, чем при низкочастотном сигнале.

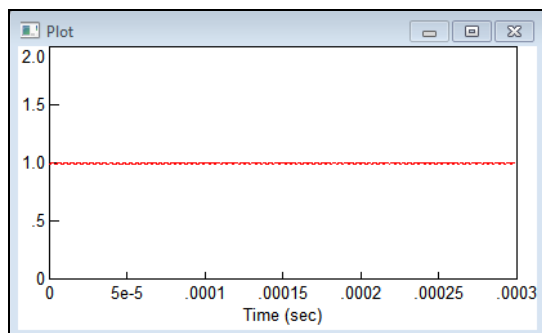


Рис. 2. Ток светодиодов при высокочастотном сигнале управления

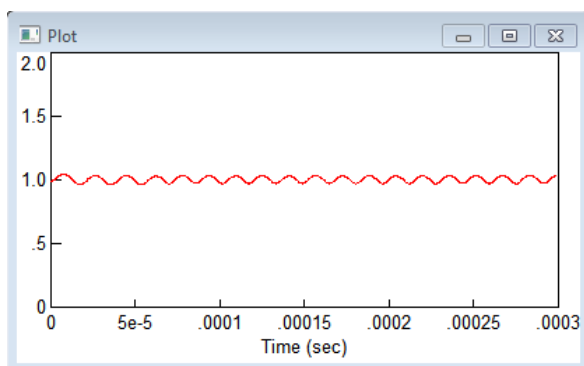


Рис. 3. Ток светодиодов при низкочастотном сигнале управления

ЛИТЕРАТУРА

1. Саид Дж.А. Моделирование процессов бифуркации режимов стабилизатора тока светоизлучающих диодов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 40–49.
2. Казаринов Л.С., Саид Дж.А. Моделирование стабилизатора тока светоизлучающих диодов в пакете VisSim // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2017. – Т. 17, №1. – С. 146–152.
3. Казаринов Л.С., Саид Дж.А. Построение многоканальных стабилизаторов тока светоизлучающих диодов // Интеграция науки и практики в современных условиях: VII Междунар. науч.-практ. конф., 18 октября 2016 г., Москва. – М., 2016. – С. 65–68.

ПОЛИМЕРНЫЙ КОРРЕКТОР КРИВОЙ СИЛЫ СВЕТА СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ С КОНВЕКЦИОННЫМ ГАЗОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Д.Г. Старосек, аспирант

Научный руководитель Д.В. Озёркин, доцент каф. КИПР, к.т.н.

Томск, ТУСУР, каф. КИПР, ozerkin.denis@yandex.ru

Из всех видов энергии, которую люди могут использовать, свет является самой важной. Это ключевой элемент нашей способности видеть, так как нам необходимо оценивать форму, цвет и перспективу предметов, окружающих нас в повседневной жизни. Большую часть информации, которую мы получаем через наши органы чувств, поступает к нам через свет (примерно 80%) [1].

Практически каждая бытовая лампа является точечным источником света. Такой источник имеет высокую точечную яркость, что негативно влияет на зрительный комфорт. Предложения, представленные на рынке, направленные на снижение точечной яркости, имеют достаточно высокую стоимость и зачастую оригинальный дизайн, который не всегда вписывается в интерьер дома или квартиры. Целью разработки является повышение зрительного комфорта, снижение точечной яркости и предоставление лёгкого доступа к управлению световым потоком бытовых осветительных приборов.

Современный рынок осветительных приборов предлагает огромный выбор источников света различной конструкции и принципа действия. В настоящее время наиболее перспективным видом бытовых ламп считаются светодиодные лампы, которые обладают сразу целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами ламп. Одним из таких плюсов является рабочая температура светодиодных источников света. Температура поверхности качественной светодиодной лампы не должна превышать 100 °С. Еще одним важным потребительским качеством – традиционной конструкцией лампы накаливания, также известной как «груша», обладает совместная разработка Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и томской компании «Руслед». Светодиодная лампа с конвекционным газовым охлаждением внешне представляет собой привычную лампу накаливания в стеклянной колбе с цоколем E27 [2]. При этом внутри лампы вместо вольфрамовой нити накаливания располагается светоизлучающая конструкция из светодиодных линеек. Светодиодная лампа с конвекционным газовым охлаждением обладает обеими вышеописанными важными для данной разработки особенностями – традиционная стеклянная колба и температура поверхности менее 100 °С. Внешний вид светодиодной лампы представлен на рис. 1.

Суть разработки заключается в корректировке направления светового потока бытовой лампы с помощью полимерного светоотражателя. На внутреннюю сторону полимерного отражателя нанесен светоотражающий слой покрытия из наносеребра. Снаружи декоративное цветотрафаретное изображение либо отсутствие изображения при условии оптической прозрачности полимерной композиции. На рис. 2 приведена конструкция отражателя (слева) и вариант установки на светодиодную лампу (справа).



Рис. 1. Светодиодная лампа с конвекционным газовым охлаждением

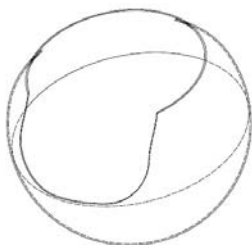


Рис. 2. Конструкция корректора КСС светодиодной лампы (слева), вариант установки на лампу (справа)



Подобная конструкция корректора кривой силы света светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением позволит направлять световой поток точечного источника света в соответствии с пожеланиями потребителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Осин О.М.* Создаём зрительный комфорт на рабочем месте // Санэпидемконтроль. Охрана труда. – 2003. – №3.
2. *Старосек Д.Г.* Теплопроводность и зависимость теплопроводности от давления газов: гелий, азот, воздух // Научная сессия ТУСУР–2015: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13–15 мая 2015 г.: в 5 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 313–316.
3. *Светодиодные светильники* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diodmag.ru/aboutdiodes/1-osvetodiidah/37-led-backlight-technology-part1.html> (дата обращения: 28.02.2010).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНО-ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В НИТРИДНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ

К.В. Тепляков, аспирант ИФВТ НИ ТПУ;

А.А. Виллисов, проф., д.т.н.; В.С. Солдаткин, доцент, к.т.н.

Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ,

rjcnz-nuts@mail.ru, vilisovaa@mail.ru, soldatkinvs@main.tusur.ru

Одним из перспективных направлений развития полупроводниковой светотехники является создание ламп на основе светодиодных излучающих элементов нитевидного типа (СИЭ). В таких элементах применяются светодиодные кристаллы малой мощности, так чтобы суммарная мощность СИЭ не превышала 1 Вт. Данное требование обусловлено тем, что отвод выделяемого на кристаллах тепла осуществляется в основном за счёт конвекции газа внутри колбы лампы.

Известно, что крайне важными явлениями в структуре светодиодных кристаллов являются тепловые эффекты, оказывающие влияние на ресурсные характеристики и эффективность светодиодных источников света. В работах [1–3] опубликованы исследования тепловых эффектов в нитридных светодиодных структурах.

Целью данной работы является определение предельной площади активной области светодиодного кристалла с учётом ограничения по максимальной температуре (не более 120 °С) и выделяемой мощности 1 Вт на всех кристаллах.

При выполнении работы была поставлена задача, заключающаяся в моделировании СИЭ с использованием программы Ansys для оценки распределения тепла в кристалле и определения максимальной температуры.

Для выполнения поставленной задачи рассматривался один кристалл с размерами активной области 1000×1000 мкм², который при потреблении электрической мощности в 1 Вт излучает 350 мВт, и 30 кристаллов, площадь каждого из которых 300×300 мкм², при суммарной мощности 1 Вт излучают оптическую мощность порядка 720 мВт. Таким образом плотность оптической мощности в первом варианте с одним кристаллом составляет 0,35 Вт/мм², а во втором – 0,27 Вт/мм².

Моделирование заключалось в создании модели кристалла с разбиением на конечное количество элементов, приложением граничных условий (способа выделения и отвода тепла). При построении модели использовались данные о нитридных структурах на основе эпитаксиальных подложек из сапфира и меди (наиболее распространённые при производстве светодиодов). Для обоих случаев рассеивание тепла

происходило за счет конвекции, а генерация тепла происходила только в активной области, причем мощность, выделяемая в кристаллах размером 300×300 мкм², равномерно распределялась между всеми кристаллами.

В результате проведения моделирования было установлено, что в модели с одним кристаллом размером 1000×1000 мкм² максимальная температура составляла около 168,2 °С, а в модели с кристаллами 300×300 мкм² максимальная температура составляла около 103,9 °С. На основании того, что предельно допустимая температура кристаллов составляет около 125 °С, согласно документации, предоставляемой производителем кристаллов, можно сделать вывод, что использование одного кристалла с большей активной областью может привести к перегреву кристалла и выходу его из строя, в то время как использование большого количества малых кристаллов может не привести к выходу из строя всей лампы, однако способно привести к ускоренной деградации кристаллов.

В результате выполнения поставленной работы установлено, что для увеличения эффективности работы и срока службы СИЭ необходимо использовать несколько кристаллов, равномерно распределенных на всей поверхности нити, что увеличит активную площадь рассеивания выделяемого тепла. Для увеличения точности результатов моделирования необходимо провести экспериментальные работы по определению температуры кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Starosek D., Khomyakov A., Afonin K., Ryapolova Y., and Tuev V.* Dependence on gas of the thermal regime and the luminous flux of LED filament lamp. Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD–2016) AIP Conference Proceedings. Tomsk, Russia, 26–29 April 2016. – 2016. – Vol. 1772 (Scopus).
2. *Ряполова Ю.В., Неверовский К.А., Постолова Е.О., Афонин К.Н.* Тепловое моделирование светодиодной лампы // Научная сессия ТУСУР–2016: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 6 ч. – Ч. 2. – Томск, В-Спектр, 2016. – С. 243–244.
3. *Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И.* Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Докл. ТУСУРа. – Томск: ТУСУР, 2015. – №3 (37). – С. 55–61.

ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА РОСТ ОГУРЦОВ СОРТА «ПАРТНЕР F1»

Н.Н. Саликова, М.Г. Слепцов, Ю.А. Кайкина, студенты;

А.Ю. Хомяков, аспирант

Научный руководитель Е.Г. Незнамова, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, nadyushkans@yandex.ru

*Проект ГПО 1403 «Исследование влияния света
на тепличные растения»*

В сельскохозяйственной промышленности все усилия направлены на повышение продуктивности и качества урожая. Единственный путь увеличения продуктивности растительных организмов заключается в непрерывном повышении количества связываемой ими лучистой энергии. Развитие агротехники привело к стремлению в ряде опытов заменить естественное освещение искусственным [1, 2].

Целью работы является нахождение наиболее оптимального и эффективного светового излучения для проращивания огурцов в тепличных и комнатных условиях.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

- разработка методики по технологии проращивания огурцов под различным освещением;

- создание условий для наблюдения влияния спектров света на растения;

- наблюдение за процессами, происходящими с растениями при разном освещении;

- анализ результатов всех групп освещения для создания оптимальных условий роста растений;

- приведение статистических данных по полученным результатам.

Объект исследования – огурцы сорта «Партнер F1». Предмет исследования – влияние различных спектральных характеристик источников света на развитие растений. Для эксперимента нам предоставлены светодиодные лампы ЗАО «ФИЗТЕХ-ЭНЕРГО», включающие в себя группы светодиодов с повышенным индексом цветопередачи и группы фитосветодиодов, разработанных специально для выращивания растений в условиях недостаточной освещенности.

Для создания оптимальных условий проращивания семян объекта исследования была разработана методика по технологии проращивания огурцов под различным спектральным составом искусственного освещения, основанная на проведенном литературном анализе.

Для эксперимента использовались 12 пластиковых ёмкостей. Ёмкости до краёв заполняются землёй (используется универсальный грунт – «Terra vita»).

Эксперимент проводился без участия естественного освещения. Исследовали 4 испытуемые группы растений: № 1–4. Первую группу растений поместили под лампу с доминантной длиной волны 580 нм, цветность лампы приближалась к более «нейтральному» белому свету, вторую группу растений – под лампу с доминантной длиной волны 510 нм, третью группу растений под светодиодную лампу белого света с доминантной длиной волны 585 нм, четвертую группу растений под лампу с доминантной длиной волны 500 нм [3]. Для предотвращения рассеивания света светоизлучающие установки обернуты темной тканью.

Длительность эксперимента составила 19 дней.

Во время эксперимента проводились замеры высоты побегов, диаметра розетки листьев, длины и ширины листьев. Замеры проводились раз в три дня. Полученные значения заносились в протокол измерений.

После проведения эксперимента по проращиванию семян полученные саженцы были представлены на следующий этап эксперимента, изучающий влияние спектрального состава источников света на урожайность.

Полученные статистические данные приведены в таблице.

Средние значения показателей роста огурцов				
№ группы	Средняя высота побегов, см	Диаметр розетки листьев, см	Длина листьев, см	Ширина листьев, см
1	11,08	12,55	5,26	5,01
2	11,88	14,9	7,3	6,2
3	10,04	14,1	5,1	5,6
4	10,91	14,9	5,2	5,28

По результатам эксперимента, группа растений, выращенных под лампой № 2, показала лучшие средние значения по всем показателям (средняя высота побегов, диаметр розетки листьев, длина и ширина листьев). Минимальные значения показали группы растений под № 1 и № 3.

Проведенный эксперимент показал, что при освещении семян огурца светодиодными источниками света прошел полный вегетационный период, но побеги сформировались не полностью. Некоторые растения выросли истощёнными, слабыми, малых размеров, без полного формирования листовых пластин.

Если учесть экономию электроэнергии, что возможно при применении светодиодных установок, то экономический эффект от внедрения таких установок может быть очень существенным. Польза свето-

диодных конструкций огромна, но только если их параметры (интенсивность, спектральный состав) будут оптимальны для выращивания тех или иных растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Свет и его роль в жизни растений и животных* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sbio.info/page.php?id=156> (дата обращения: 13.02.2017).
2. *Александрова С.Н., Кудайбергенова Ж.Д., Рыбакова А.А., Незамова Е.Г.* Рост и развитие томатов при искусственной подсветке разными типами ламп // Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015.
3. *Цветовая температура (К) и индекс цветопередачи (CRI)* / Pulsar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pulsar-electric.com/support/tsvetovaya-temperatura-i-indeks-tsvetoperedachi.php> (дата обращения: 14.01.2017).

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ТОМСКЕ (СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ)

А.А. Виллисов, проф., д.т.н.; В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.
Томск, ТУСУР, vilisovaa@mail.ru, tvi_retem@main.tusur.ru

Оптоэлектроника зародилась в недрах науки о полупроводниках и в свою очередь дала развитие многим отраслям науки и техники – оплотехника и светотехника, оптическая связь, светолокация, распознавание образов и многое другое. Поэтому имеет смысл напомнить, как в Томске появилась наука о полупроводниках и как развивалась техника полупроводников. Однако поскольку эта тема уже многократно освещалась в публикациях в связи с юбилеями различных организаций (РФФ ТГУ, НИИПП и др.) [1–6], это будет по возможности кратко.

Становление оптоэлектроники в Томске, как и многих направлений полупроводниковой электроники, неразрывно связано с именем профессора ТГУ В.А. Преснова. Уместно отметить, что в декабре 2017 г. Виктору Алексеевичу исполнилось бы 100 лет со дня рождения. Именно Виктор Алексеевич стал инициатором организации открытия первой и длительное время единственной за Уралом лаборатории физики полупроводников в СФТИ (1954 г.), а также проблемных лабораторий физики полупроводников (РФФ ТГУ) и химии полупроводников (ХФ ТГУ) – 1957 г. Знаменательно, что В.А. Преснов сумел привлечь к исследованиям новых сложных полупроводников и лабораторию теоретической физики СФТИ, и сотрудников кафедры аналитической химии ТГУ.

В 1961 г. на конференции «Электронно-дырочные переходы в полупроводниках» в г. Ташкенте впервые была озвучена информация

о возможности генерации электромагнитного излучения в p - n -переходе из GaAs. Сразу же после конференции (сентябрь 1961 г.) по настоянию В.А. Преснова в СФТИ были начаты работы по излучающим приборам на основе арсенида галлия. Это и есть начало оптоэлектроники в Томске!

С 1962 г. по инициативе В.А. Преснова начали проводиться периодически Всесоюзные конференции по полупроводниковой тематике, в частности по исследованию арсенида галлия, что способствовало укреплению научных связей с ведущими учёными и организациями (университеты, НИИ и п/я) СССР.

К началу 60-х годов в СФТИ уже был выполнен большой комплекс работ по технологии выращивания и изучению свойств GaAs (А.П. Изергин, М.А. Кривов), по эпитаксии арсенида галлия (Л.Г. Лаврентьева), по технологиям получения и характеристикам p - n -переходов, способам изготовления омических контактов (А.П. Вяткин).

Значимость и известность результатов комплексных исследований позволили В.А. Преснову добиться организации Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов (изначально это был а/я 85). В 1964 г. НИИ полупроводниковых приборов с опытным производством вступил в число действующих в системе Министерства электронной промышленности СССР. Появление и функционирование отраслевого института (а это уже более 50 лет) стало настоящим прорывом в исследованиях и разработках новых полупроводниковых приборов. Выполнено не менее 1000 (точно подсчитать не удалось) НИОКР, в том числе по постановлениям Правительства. Большая часть разработок была в интересах ВПК. Обеспечиваются поставки сотням предприятий полупроводниковых приборов различного назначения. Это СВЧ-приборы, светоизлучающие приборы, интегральные модули, медицинские аппараты для КВЧ- и светотерапии и многое другое. Довольно быстро НИИПП стал головным предприятием в отрасли по разработке приборов на основе арсенида галлия.

И с самого начала полупроводниковая оптоэлектроника стала одним из основных направлений в деятельности НИИПП. С 1965 г. формируется группа разработчиков излучающих приборов преимущественно из выпускников радиофизического факультета Томского государственного университета: Ю.К. Пантелеев, И.К. Ковалёв, Е.В. Олексив и др.

Наиболее крупным достижением раннего периода в развитии светоизлучающих диодов (СИД) было создание ИК-диода 3Л107. Была создана технология, разработано и запущено в серийное производство оборудование для шлифовки и полировки сферы Вейерштрасса на каждом диоде. Именно благодаря этой технологии и сегодня, более 50 лет спустя, излучающий диод 3Л107 всё ещё пользуется спросом.

Создание технологии излучающего диода 3Л107, особенно в части изготовления кристалла с полусферой, оставило глубокий след в дальнейших разработках.

Значительную долю в тематике предприятия занимали разработки оптоэлектронных активных элементов для ВОЛС, которые велись в соответствии с Постановлением Правительства СССР. Были освоены все «окна прозрачности» единственного в то время канала передачи – кварцевого волокна и разработаны активные элементы передающего модуля для ВОЛС.

Важнейшей тенденцией развития светоизлучающих диодов (СИД) является расширение номенклатуры требований к их конструкции и светотехническим параметрам, а также ужесточение этих требований. Уже недостаточно простого повышения мощности излучения – необходимо сосредоточить её в заданном угле, в узком спектральном диапазоне, с быстродействием в наносекундном диапазоне при длительности срока службы, существенно превышающей период полного технического перевооружения.

Полупроводниковая светотехника. В последние два десятилетия – это масштабное развитие полупроводниковой светотехники во всём мире. НИИПП является одним из немногих предприятий России, которые начинали развивать это перспективное направление. К настоящему времени разработана очень широкая номенклатура осветительных светодиодных приборов различного назначения. Было выбрано правильное направление конструктива, пригодного для простой замены традиционных источников света на лампы накаливания.

В настоящее время оптоэлектроникой (во всех её проявлениях) в Томске занимается много групп учёных во всех университетах, АО, частных организациях.

Школа В.А. Преснова создала предпосылки появлению новых научных направлений, достижениям томских учёных в плане фундаментальных исследований и широкого практического применения их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лаврентьева Л.Г., Вяткин А.П., Брудный В.Н. и др.* Физика сложных полупроводников и полупроводниковых структур // Современные проблемы физики и высокие технологии: матер. междунар. конф., посвящённой 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ (29 сентября – 4 октября 2003 г.). – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – С. 3–9.

2. *Вестник* Томского государственного университета. Сер. Физика. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – № 285. – 200 с. (Специальный выпуск, посвящённый 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений по физике полупроводников).

3. *Радиофизический* факультет Томского государственного университета. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013.

4. *Заводу* полупроводниковых приборов ФГУП «НИИПП», г. Томск – 35 лет // *Электронная промышленность. Наука. Технологии. Изделия.* – 2002. – № 2/3.

5. *40 лет* НИИПП. История в лицах / гл. ред. И.Д. Романова. – Томск, 2004. – 384 с.

6. *45 лет* НИИПП. На рубеже веков / гл. ред. И.Д. Романова. – Томск, 2008. – 432 с.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 2 ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель секции – Шарангович С.Н., проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;
зам. председателя – Перин А.С., доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.*

*Г.И. Большанин, И.К. Казак, Т.М. Кансейтов,
О.В. Крылевский, А.Ю. Яковлева*

ДИФРАКЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ
В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ 15

Д.В. Ралко, А.А. Гуляева, Р.В. Мезенцев

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА
ПРИ ЗАСВЕТКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 532 НМ 18

И.А. Видулина, К.О. Гусаченко, Д.И. Дудник, А.О. Семкин

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ЗАПИСЫВАЮЩИХ ПУЧКОВ
НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ
ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛАХ 21

Т.Д. Токмашев, Д.В. Соколов, С.Г. Пашелов, В.Г. Дю

ДИНАМИКА ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА
В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННОМ
АЛЮМИНИЕМ, ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПАКЕТОМ ИМПУЛЬСОВ
НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ 24

М.В. Чуманов, А.Р. Гнатышин, Е.В. Ефимова

ПОЛУЧЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР
В ВЫСОКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ КТiOPO₄ МЕТОДОМ
ПОСЛЕРОСТОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 27

А.В. Макеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ
СПЕКЛ-ЭЛЛИПСОМЕТРИИ 30

Д. Окунев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПО МНОГОМОДОВЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ 32

<i>А.И. Погар, Г.А. Зенков, Г.К. Килин, М.О. Ковалевский, М.Е. Губарь</i> ЦИФРОВОЙ МИКРОСКОП НА БАЗЕ WEB-КАМЕРЫ	34
<i>П.К. Сафронова, А.А. Саркыт</i> ОПТИЧЕСКОЕ ИНДУЦИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР С БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ ПРОФИЛЕМ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ	36
<i>Р.Д. Юнусов, Е.О. Прокопенко, С.В. Колчин, М.П. Бороненко</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАПУСКА ОЭС КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ	40

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Заболоцкий А.М., доцент каф. ТУ, к.т.н.;
зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, к.т.н.

<i>Я.В. Балахнина</i> КОНСТРУКЦИЯ СЕМИКАСКАДНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА БЕЗ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ	43
<i>Е.В. Бебякина, А.В. Бусыгина</i> ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОКАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ: ОБЗОР	46
<i>А.В. Веселовский, К.Э. Джанбаев, М.Е. Комнатнов</i> РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРПУСА С АПЕРТУРОЙ	49
<i>А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов</i> МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТЕМ-КАМЕРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ЭМС	53
<i>И.В. Дмитренко, Т.Т. Газизов</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРЕХПРОВОДНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ	56
<i>М.А. Зуева</i> ПОДГОТОВКА РАБОЧИХ ПРОГРАММ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ ДЛЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	58
<i>В.В. Кропотов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, Т.Т. Газизов</i> УЛУЧШЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МОДУЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ ETHERNET 10/100 BASE-T	61

К.А. Лемешко, Р.Р. Ахунов, М.С. Танаева, О.К. Шнякина ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МНОГОКРАТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕМКОСТНОЙ МАТРИЦЫ ПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ	64
Р.Р. Мусабаев АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ПОГОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МНОГОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	68
А.В. Осинцев, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ТОКА НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ПИД-РЕГУЛЯТОРА.....	71
А.В. Осинцев, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов СИНХРОНИЗАЦИЯ ГРУППЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ	74
И.Е. Сагиева МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ, ПОКРЫТОЙ ЗАЗЕМЛЕННЫМ ПРОВОДНИКОМ.....	77
М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ПОГОННЫЕ ЗАДЕРЖКИ МОД.....	80
В.А. Сирица, А.В. Носов, Р.С. Суровцев АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА УРОВЕНЬ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПЯТИПРОВОДНОЙ ШИНЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ	83
А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов МАКЕТ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА 1986VE91T	87
С.А. Тернов, М.Е. Комнатнов ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	89
Р.Р. Хажибеков ИЗМЕНЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ НЕЧЕТНОЙ МОДЫ С ПОМОЩЬЮ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ОБЛАСТИ СВЯЗИ ПРОВОДНИКОВ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА	92
Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПО ДВУМ КРИТЕРИЯМ	95
Д.Б. Шмаков ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО РЕСУРСА СИСТЕМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДИАПАЗОНА 146–174 МГЦ	98

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

*Председатель секции – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;
зам. председателя – Вилисов А.А., проф. каф. РЭТЭМ, д.т.н.*

Я.В. Анцупов

ГИБРИДНЫЙ СВЕТИЛЬНИК – ПРОДУКТ ЭВОЛЮЦИИ
СИСТЕМ СОВМЕЩЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ 101

К.В. Бушланова, О.М. Жукова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО
ОСВЕЩЕНИЯ НА ТРАВЯНИСТЫЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ
РАСТЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЯТЫ СОРТА «ОВОЩНАЯ ВОРОЖЕЯ» 104

Е.С. Ганская, В.С. Каменкова

МАКЕТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ФИТОЛАМПЫ
НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ 106

А.Д. Гончаров

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА
СВЕТОРАССЕИВАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ
В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ 109

А.Д. Гончаров, С.И. Кульбаиный

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ОСВЕЩЕННОСТИ
СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ 112

А.Д. Гончаров

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СВЕТОВОГО ПОТОКА ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ
СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ 114

А.В. Иванов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО УРОВНЮ КОНДУКТИВНЫХ
ИНДУСТРИАЛЬНЫХ РАДИОПОМЕХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП 117

Д.А. Ярославский, Д.А. Иванов, Н.А. Григорьева

РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ
СВЕТИЛЬНИКОМ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ
НА ЕГО ОСНОВЕ 120

В.С. Каменкова, К.Н. Афонин

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ 10 ВТ 123

О.А. Каранкевич

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАНТОВОЙ ЯМЫ
LED-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА.
1. ВРЕМЯ ЗАХВАТА НОСИТЕЛЕЙ 125

О.А. Каранкевич	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАНТОВОЙ ЯМЫ LED-ГETEROSTPYPKTYPЫ C HOCИTEЛЯМИ ЗАРЯДА. 2. BPEMЯ ЭМИССИИ HOCИTEЛЕЙ.....	129
О.А. Каранкевич	
ДЛИНА CBOБODHOГO ПPOБEГA ЭЛЕКТPOHA B КBАНTOBOЙ ЯME LED-ГETEROSTPYPKTYPЫ	133
Д.А. Кopoльcкий, А.И. Кox	
ИCТOЧHИК ПИТАHИЯ MOЩHOГO CBEТОДИOДHOГO CBEТИЛЬHИКА C AKTИBНЫМ OХЛAЖДEHИEM.....	137
Т.Г. Hикийcкин	
CPAВHEHИE BOЗMOЖHЫХ PАДИOЭЛЕКТPOHHЫХ CХEM CПEКТPOMETPИЧECKИХ CИCTEM HА БАЗE PИH-ДИOДА	140
Е.Н. Hиkoнoвa, C.Ю. Hиkoнoв, Д.М. Ильгaч	
OРГАHИЧECKИЕ CBEТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИOДЫ HА OСHОВE COПOЛИMЕРОВ ПОЛИФЛУOPEHА	143
А.Ю. Oлиcoвeц, C.П. Шкapупo	
ПPИMEHEHИE MEТОДА КУCОЧHO-ЛИHEЙHOЙ АППPOКСИМАЦИИ ДЛЯ АHAЛИЗА ЭМИССИИ ГАРMOHИК УCТPOЙCTBA УПPAВЛEHИЯ И ПИТАHИЯ CBEТОДИOДHЫХ ЛAМП C ПACCИBНЫМ КOPPEKTOPOМ KOЭФФИЦИЕНТА MOЩHOCTИ	145
Е.О. Пocтoлoвa, К.В. Tеплякoв, А.А. Bиллиcoв, B.С. Coлдaткин	
MAKETИPOBAHИE CBEТОДИOДHOГO ИЗЛУЧАЮЩЕГO ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ЛAМП OБЩЕГO HАЗHАЧEHИЯ C ПPИMEHEHИEM MOHОЛИТHЫХ CBEТОДИOДHЫХ МАТPИЦ.....	149
Е.О. Пocтoлoвa	
ХАPАКТЕРИCTИКИ CBEТОДИOДHЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛEHTOЧHOГO TИПА	150
Д.А. Pешeтoв, М.В. Aндреевa, А.П. Шкapупo	
ЭКCПEРИMЕHTАЛЬHOЕ ИCCЛЕДОВАHИE COПPOТИBЛEHИЯ TOHКИХ ПЛЁHOK, HАHECЁHHЫХ MEТОДOM CТPУЙHOЙ ПPИHTEPHOЙ ПEЧАТИ.....	152
Ю.В. Pяпoлoвa, Е.О. Пocтoлoвa	
OПТИЧECKИЕ CBOЙCTBA ЛAМПЫ C HИTEBИДHЫМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	155
Дж. А.А. Caид	
ИCCЛЕДОВАHИE BЛИЯHИЯ ЧАCTOTЫ CИГHAЛOВ УПPAВЛEHИЯ HА CТАБИЛЬHOCTИ TOKA MHOГOKAHAЛЬHЫХ CТАБИЛИЗАТОPOВ CBEТОДИOДHЫХ ИЗЛУЧATEЛЕЙ	157

<i>Д.Г. Старосек</i> ПОЛИМЕРНЫЙ КОРРЕКТОР КРИВОЙ СИЛЫ СВЕТА СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ С КОНВЕКЦИОННЫМ ГАЗОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.....	160
<i>К.В. Тепляков, А.А. Виллисов, В.С. Солдаткин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНО-ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В НИТРИДНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ	162
<i>Н.Н. Саликова, М.Г. Слепцов, Ю.А. Кайкина, А.Ю. Хомяков</i> ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА РОСТ ОГУРЦОВ СОРТА «ПАРТНЕР F1».....	166
<i>А.А. Виллисов, В.И. Туев</i> ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ТОМСКЕ (СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ)	166

Научное издание

**Материалы
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2017»,
посвященной 55-летию ТУСУРа**

10–12 мая 2017 г., г. Томск

В восьми частях

Часть 3

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Издательство «В-Спектр».
Сдано на верстку 20.03.2017. Подписано к печати 25.04.2017.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная. Печ. л. 11
Тираж 100 экз. Заказ 8.

ТУСУР, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24
(записано 680 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