# Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УДК 621.396.33:528.8

Рег. № АААА-А19-119121190007-0

**УТВЕРЖДАЮ** Ректор ТУСУР Рулевский В.М. «30» ноября 2020

ОТЧЕТ

по теме: «ПОДДЕРЖКА И РАЗВИТИЕ ЦЕНТРА КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬС (ТУСУР) НАУЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПО НАПРАВЛЕНИЮ "ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТКА И ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МИКРО - И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, УСТРОЙСТВ И МОДУЛЕЙ" ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИОРИТЕТОВ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ». НАЗВАНИЕ ЭТАПА: РАСШИРЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ И КОМПЛЕКСНОСТИ ОКАЗЫВАЕМЫХ УСЛУГ, ВЫПОЛНЕНИЕ КОМПЛЕКСА УСЛУГ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

(заключительный)

Книга 2

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научнотехнологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. (внутренний номер соглашения 05.621.21.0029) Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0029

Руководитель проекта д.т.н., главный научный сотрудник, директор ЦКП «Импульс»

Dillim Н.Д. Малютин

Томск 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ А Программное обеспечение Profilm оптического профилометра из состава
УНУ
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Методика зондовые измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1
ПРИЛОЖЕНИЕ В Метолика провеления испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2
на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Лабораторные работы по современным технологиям и системам
автоматизированного измерения на СВЧ
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Договор на оказание услуг
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Заявка на проведение научных исследований и/или оказание услуг 530
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Перечень выполняемых типовых работ и (или) оказываемых услуг
ПРИЛОЖЕНИЕ И Положение о Центре коллективного пользования «Аппаратно-
программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ
устройств импульсными методами»
ПРИЛОЖЕНИЕ К Копии публикаций сотрудников лабораторий молодых ученых со
ссылками на ЦКП «Импульс
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Материалы конгресса 7th International Congress on Energy Fluxes and
Radiation Effects (EFRE-2020)
ПРИЛОЖЕНИЕ М Копия статьи «Особенности интерференции синфазных и
противофазных волн»
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Материалы доклада на симпозиуме по фундаментальным исследованиям
электрических систем
ПРИЛОЖЕНИЕ О Перспективные измерительные платформы в области
микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации
ПРИЛОЖЕНИЕ П Копии публикаций сотрудников со ссылкой на ЦКП «Импульс»591
ПРИЛОЖЕНИЕ Р Копии интернет – сообщений о работе ЦКП «Импульс»

ПРИЛОЖЕНИЕ С Методика измерения вязкости	37
ПРИЛОЖЕНИЕ Т Пример Соглашения с внутренним пользователем услуг ЦКП6	54
ПРИЛОЖЕНИЕ УИзмерение параметров радиофотонного тракта	56

**Примечание:** во всех приложениях сохранена нумерация разделов, рисунков, таблиц в соответствии с нумерацией оригиналов документов, которые представляются пользователям ПО, методик, а также вошли в журналы, сборники докладов, презентации и т.д.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программное обеспечение Profilm оптического профилометра из состава УНУ

Комплект программного обеспечения Profilm предназначен для анализа образцов профилей поверхностей с целью измерения топографии поверхности и толщины пленки широкого спектра материалов. Это достигается посредством различных инструментов и приспособлений, о которых пойдет речь в данном руководстве.

Первым шагом к освоению программного обеспечения Profilm является знакомство с различными интерфейсами и набором функций. Данное программное обеспечение разделено на три главных раздела: «Интерактивное окно» и «Окно для сканирования» – предназначены для сбора данных, «Ленты» – для выбора инструментов и функций и «Главное меню» – для управления данными.

Интерактивное окно появляется первым при запуске программного обеспечения Profilm. Обозначения с номерами 1-8 означают следующее.



#### Интерактивное окно

1. Ленты: Выберите нужную ленту: «Параметры», <u>«Личные настройки»</u>, и <u>«Помощь»</u>, либо откройте <u>«Главное меню»</u>.

**2.** Видеоизображение: Видеоизображение с камеры в режиме реального времени. Перемещая курсор мышки по видеоизображению, можно вычислить координаты X и Y опре-

деленной точки. Полученные данные можно ввести в разделе Система позиционирования для центрирования изображения относительно данной точки.

3. Фокусировка: Данные элементы управления регулируют высоту фокусировки. Одинарная стрелка – для замедленного воспроизведения, двойная – для ускоренного. Самая верхняя кнопка соответствует максимальному отдалению камеры. Щелкните кнопку «Установить значение 0», чтобы изменить текущее положение на «0» и кнопку «Сбросить на 0» для установки заводского значения «0». Щелкните кнопку «Аварийная остановка» для остановки любого движения в системе координат X, Y или Z.

4. Система позиционирования координат X и Y: данные элементы управления отвечают за автоматическую систему позиционирования. Введите конкретные координаты X и Y или щелкните по круглой кнопке в середине для автоматического центрирования системы позиционирования. Щелкните кнопку «Аварийная остановка» для остановки любого движения в системе координат X, Y или Z.

**5.** Идентификационные данные образца: введите идентифицирующее имя образца здесь. Система последовательного сканирования будет добавлять порядковую цифру к имени каждого последующего сканирования (например, Образец, Образец 1, Образец 2 и т.д.).

6. Настройки сбора данных: данные элементы управления регулируют настройки измерения и сбора данных. Более подробную информацию можно получить в разделе «*Редактирование программ*».

7. **Яркость изображения:** отрегулируйте яркость изображения движением ползунка влево-вправо, Щелкните кнопку **«Авто»**, чтобы программа сама определила оптимальную яркость изображения текущего образца. Также здесь есть опция <u>«Автоэкспозиция»</u>.

8. Регистрация на ProfilmOnline: зарегистрируйте свой аккаунт на ProfilmOnline для выгрузки своих видеозаписей на сайт.

**9. Инструменты:** раздел «Настройки экрана» для выбранных инструментов находится в ленте «Параметры». Лента <u>«Помощь»</u> также отображается в данном разделе, если включена в настройках. При необходимости можно свернуть или развернуть окно с этой лентой.

409

## Окно (окна) сканирования



После окончания сканирования соответствующее окно откроется в отдельной вкладке.

**1. Ленты:** выберите нужную ленту: «Параметры», <u>«Личные настройки»</u>, и <u>«Помощь»</u>, либо откройте <u>«Главное меню»</u>.

2. Просмотр вкладок: переключайтесь между недавно открытыми окнами для сканирования и <u>«Интерактивным окном»</u>, нажимая на соответствующие вкладки.

**3. Цветовая гамма:** показывает соотношение между высотой изображения в пикселях и цветом, отображаемым на 2D и 3D сканировании.

**4. Вид сверху:** вид на образец сверху в 2D изображении; используется для выбора области анализа образца. См. <u>«Проведение измерений»</u> для более подробной информации.

**5.** Профиль линии: линейная диаграмма конкретного участка. В горизонтальном виде ось X образца соответствует оси X 2D сканирования, а ось Y показывает высоту изображения. В вертикальном виде ось X образца соответствует оси Y 2D сканирования. В диагональном виде «0» соответствует исходной точке, а максимальное значение оси X соответствует конечной точке.

**6. 3D-вид:** данное окно показывает 3D изображение выбранного сканирования. См. <u>«Управление камерой»</u> для более подробной информации по работе с 3D сканированием.

7. Регистрация на ProfilmOnline: зарегистрируйте свой аккаунт на ProfilmOnline для выгрузки своих видеозаписей на сайт.

8. Результаты анализа: данная боковая панель содержит элементы управления, настройки и результаты для различных функций анализа.

## Ленты

Доступ к различным функциям и элементам управления программного обеспечения Profilm осуществляется с помощью лент, каждая из которых соответствует определенной задаче. Данный раздел рассматривает элементы управления для каждой ленты и их применение.

<u>Параметры</u> <u>Анализ</u> <u>Личные настройки</u> <u>Помощь</u>

о Параметры



Лента «Параметры» содержит 3 набора элементов управления для ввода и запуска сканирования. Обратите внимание, что лента «Параметры» доступна, только когда «Интерактивное окно» открыто. После завершения и загрузки сканирования вместо ленты «Параметры» появляется лента <u>«Анализ»</u>.

<u>Сканирование</u> <u>Программа для сканирования и анализа</u> <u>Инструменты</u>

о Сканирование



Вкладка «Сканирование» используется для начала нового сканирования, а также для остановки текущего сканирования. Если текущее сканирование приостановлено, данные не будут отображаться.

## о Программа для сканирования и анализа

В программном обеспечении Profilm используются программы для хранения различных собранных данных и настроек анализа. Набор различных программ может быть сохранен для не-

скольких систем и функций для максимальной универсальности.

Step He	ight	•
🞦 New	<u>S</u> Edit 🚽 Save 🔣 Save A	s
	Scan & Analysis Recipe	

Step Height 🔹

– Показывает недавно выбранную программу. Щелкните

мышкой по стрелке раскрывающегося списка, чтобы открыть окно для новой программы.

New – Щелкните мышкой для выбора новой программы.

Section 2017 - Щелкните, чтобы открыть диалоговое окно «Программа».

Save – Щелкните мышкой, чтобы сохранить настройки сканирования в недавно выбранной программе.

Save As – Щелкните мышкой, чтобы сохранить настройки сканирования как новую программу.

▶ Сбор данных

			Last Modified: 1/2/2019 2:23:05
Scan Settings			
Measurement WLI PSI Composite WLI/PSI	Scan Speed Zoo Fast Normal	m Backscan 1x × Scan Length Scan Averages	20 µm Grid (0 x 0 mm) 25 µm Details 1 Subtract Reference
Automatic Positioning  None Specify measurement loc X: Y: Z: Copy Current Position	ation mm mm µm tion to X, Y, Z	TotalFocus™ Image <ul> <li>Color</li> <li>Monochrome</li> </ul> Autofocus Settings         Range (Percentage of Maxim)         Enable autofocus for me         ✓ Start autofocus with fine	um) 100 % asurements focus
Multiple locations from fi Pattern origin:  O(0,0)  File containing locations:  Create  Ch Folder for saving scan resi  File type:  V	ile Current Position ange Ults: Change	Height Formation Settings WLI Settings © Centroid Envelope Peak Envelope Center Envelope Threshold SNR Threshold 22%	Post Processing Invalidate clusters Cluster area [5] Pixels Threshold 3.922 %

Вкладка «Сбор данных» содержит все настройки для измерения образца. Функции разделены на две группы. «Настройки сканирования» используются для выбора метода измерения и управления системой позиционирования и положением измерительной головки. «Настройки высоты изображения» определяют, как программное обеспечение передает измеряемые данные.

## ▶ Анализ

Так же как и вкладка <u>«Сбор данных»</u>, вкладка «<u>Анализ</u>» разделена на две группы. «Обработка данных» содержит различные средства управления сканированием, такие как выравнивание, удаление формы, фильтрация. «Анализ» используется для выбора типа анализа и условий его проведения. <u>Устройства</u>, используемые при сканировании, также указаны в данном окне.

Recipe X
Last Modified: 6/22/2016 4:03:44 PM
Acquisition Analysis
Data Conditioning
Operation Operation Settings
Remove Form <u>Normal Plane</u> Edit
Analysis Type Saved Settings
Step Height (Histogram) *         Histogram - Diced *         Edit         Save As
Measurement System • mm, micron, (Metric) • inch, milliinch (mil), (Imperial)
Units Lateral (X/Y) Height (Z) micron * micron *
OK Cancel

<u>Автофокусировка</u>

#### о Инструменты



<u>Проверка системы</u>

## Автофокусировка

Autorocus	iettings		
Enable au Prompt n Start with	itofocu nanual fine fo	s for measuremen focus upon autofo cus search	ts ocus failure
coursere			
Backscan	2.5	mm	

В меню «Автофокусировка» доступны следующие опции: автофокусировка при каждом сканировании, переход к ручной фокусировке при неполадках автофокусировки и начало поиска тонкой фокусировки.

Лента «Инструменты» используется для изменения настроек

управления автофокусировкой и калибровки системы. Только

одна опция может быть активной в заданный период времени.

Запуск с настройкой тонкой фокусировки используется для ускорения процедуры автофокусировки при приближении к оптимальной фокусировке образца. Вместо настройки грубой фокусировки, о которой пойдет речь ниже, камера быстро остановится на более узком диапазоне сканирования для определения оптимальной фокусировки изображения. Если это не удается, то запускается сканирование с грубой фокусировкой для определения оптимальной высоты фокусировки. Если функция тонкой фокусировки отключена, настройка грубой фокусировки всегда будет начинаться при запуске программного обеспечения. Настройка удаления сканера и длины сканирования при грубой фокусировке похожа на настройку измерительной головки. Удаление сканера определяет, насколько измерительной головке необходимо опуститься для оптимальной фокусировки в границах конкретной длины сканирования. Меньшие значения удаления сканера и длины сканирования способствуют ускорению процесса автофокусировки, несмотря на то, что при меньших значениях не устанавливается оптимальная высота фокусировки. В связи с этим рекомендуется использовать элементы управления грубой фокусировки в «Интерактивном окне», приблизительно ориентируясь на образец поверхности до применения функции автофокусировки для точного приближения к образцу.

#### 🕨 Калибровка системы



Функция «Калибровка» используется для корректировки выбранных параметров, которые могли сбиться со временем или при транспортировке. Не изменяйте данные настройки без подтверждения отдела поддержки компании Filmetrics.

Настройка пределов фокусировки

#### <u>Калибровка шага высоты</u>

#### Вычесть опорное изображение

#### Настройка пределов фокусировки



Камера имеет два предела фокусировки для светового пути, что облегчает автофокусировку. Для максимально точных измерений важно вносить в программу данные о пределах фокусировки. Это

достигается за счет выполнения калибровки Настройки пределов фокусировки.

Для включения данной функции сначала выберите ленту «Параметры», а затем раздел «Инструменты». Нажмите кнопку «Калибровка», чтобы разделы «Настройки пределов фокусировки», «Шаг высоты» и «Внесение поправок» начали отображаться в окне видеоизображения справа. Две желтые вертикальные линии на видеоизображении в режиме реального времени указывают пределы фокусировки, определяемые программой.



Пределы фокусировки полностью соответствуют на данном изображении. Настройте приприближение 1х, чтобы рассмотреть пределы фокусировки.

В данном случае пределы фокусировки (черные участки на обеих сторонах изображения) соответствуют пределам, настроенным программой. В противном случае, сфокусируйте

414

камеру на поверхности и щелкните мышкой кнопку «Найти пределы...» для автоматического определения пределов фокусировки. Следуйте инструкциям, указанным на экране, чтобы система произвела фокусировку и выявила новое соответствие, о чем будет свидетельствовать наличие двух синих вертикальных линий на изображении. При подтверждении соответствия пределов фокусировки щелкните мышкой на клавишу «OK» для установки новых локаций или клавишу «Отмена» для новой попытки. Если программе постоянно не удается найти соответствие, а также если один или оба черных участка не отображаются, сообщите о проблеме в отдел поддержки компании Filmetrics.

Также отклонение может быть введено вручную с помощью текстового поля «Отклонения пределов». Нажмите кнопку «Обновить отклонение» для применения введенных данных.

#### ✓ Шаг высоты



Инструмент «Калибровки шага высоты» используется для учета различий между измерениями, произведенными оптическим профилометром и другим устройством.

Для проведения калибровки шага высоты выберите ленту «Параметры», затем щелкните мышкой по кнопке «Калибровка» в разделе «Инструменты». Разделы «Шаг высоты», «Настройки пределов фокусировки» и «Вычесть опорное изображение» начнут отображаться в окне видеоизображения.

Сначала выберите скорость сканирования и метод измерения для калибровки в раскрывающемся меню. Далее введите значение «Измеренной высоты» оптического профилометра компании Filmetrics, затем значение «Действительной высоты» другого устройства. Нажмите кнопку «Вычисление коэффициента», чтобы вычислить и указать коэффициент соответствия для корректировки различий. Нажмите кнопку «Принять вычисленный коэффициент», чтобы принять корректировку. Чтобы сбросить систему до заводских настроек, нажмите кнопку «Сбросить до заводского коэффициента».

Важно отметить, что калибровка шага высоты распространяется только на измерения, произведенные после корректировки. Все сохраненные до этой корректировки сканирования будут отображать нескорректированные показатели толщины.

Так как программа принимает изменения толщины ±10% или менее, при вводе значения, превышающего 10%, программа оповестит об ошибке и отменит калибровку. В данной ситуации сообщите в отдел поддержки компании Filmetrics. ✓ Калибровка гладкости линз объектива



На очень гладких или очень плоских поверхностях при сканировании на снимке может проявиться артефакт в связи с изъянами опорного зеркала объектива. «Калибровка гладкости линз объектива» может использоваться для удаления артефакта из данных. Перед калибровкой гладкости линз объектива, свяжи-

тесь с отделом поддержки компании Filmetrics для подтверждения необходимости корректировки.

Калибровка представляет собой ряд измерений образца, определяемых данными, вводимыми в поля «Количество рядов» и «Количество колонок». Для большинства образцов используется заводской сканер 3х3.

Калибровка должна производится с использованием контрольной калибровочной линзы, однако допускается использование Вашего образца с выявленным артефактом. Установите профилометр с образцом, максимально выровненным за счет регулировки высоты и наклона, на столике. Произведите фокусировку образца (т.е когда интерференционная полоса видна на видеоизображении). Нажмите кнопку «Калибровка» для запуска процесса. Программа автоматически будет двигаться по заданной координатной сетке, сканируя каждую локацию. Программа оповестит о завершении калибровки.

Затем необходимо нажать кнопку «Вычесть опорное изображение» в программе *Настроек сканирования*. Используйте данную кнопку каждый раз для подтверждения коррекции.

Анализ



Лента **«Анализ»** содержит опции для анализа данных и получения результатов. Обратите внимание, что лента **«Анализ»** доступна, только когда выбрано полное сканирование. Если выбрано <u>«Интерактивное окно</u>», будет отображаться лента <u>«Параметры»</u>. Чтобы войти в ленту **«Анализ»**, просто щелкните мышкой на уже открытое сканирование, начните новое сканирование или загрузите сохраненное сканирование.

<u>Отчет</u>

<u>Анализ</u>

Дополнительные элементы управления для программ

<u>Настройки экрана</u>

#### о Отчет

Вкладка «Отчет» используется для вывода данных на принтер, в файл изображения или на сайт ProfilmOnline.



Откройте «Мастер по работе с принтером». Раздел «Распечатка» включает: 2D и 3D сканирования, линейный график и результаты недавно выбранного режима анализа.

Сделайте снимок экрана недавно проведенного сканирования и его результатов. Файлы сохраняются как .jpg по умолчанию, однако доступны и другие форматы.



Загружает выбранное изображение на сайт ProfilmOnline. Необходимо зарегистрироваться на сайте ProfilmOnline. Если Вы еще не зарегистрировались в программе, то для загрузки Вашего файла потребуется регистрация на сайте.



о Анализ

Вкладка «Анализ» используется для выбора между режимами анализа, поддерживаемых программой: <u>«Срез»</u>, <u>«Размеры»</u>, <u>«Шаг высоты»</u>, <u>«Неровность площади 2D»</u>, <u>«Неровность линии 1Р»</u>, <u>«Коэффициент сдвига»</u>, <u>«Объем» и «Частицы/зерна»</u>. Активный режим будет выделен; единовременно можно использовать только один режим

#### о Дополнительные элементы управления для программ

На Вкладке «Дополнительные элементы управления для программ» расположены различные инструменты для сканирования.



Любой элемент управления может быть сохранен в программе и автоматически использоваться при следующем сканировании. Чтобы увидеть выбранные элементы управления, щелкните кнопку <u>«Свойства изображения»</u> в разделе <u>«Настройки экрана»</u>.

<u>Пространственный фильтр</u>

Ввод недопустимых значений

<u> Убрать выбросы</u>

<u>Выровнять</u> <u>Сглаживание</u> <u>Фильтр</u> <u>БПФ-фильтр</u> <u>Обрезать</u>

## Пространственный фильтр

«Пространственный фильтр» применяет матричный фильтр к данным о поверхности. Доступны шесть фильтров: медианный, средний, максимальный, минимальный, фильтр Гаусса и фильтр Лапласа. Данные фильтры используются для улучшения качества изображения, а также поиска определенных характеристик поверхности.

Для демонстрации базового процесса фильтрации мы используем образец матрицы, указанной ниже, для пиксельного изображения размером 5x5, где объектом фильтрации является пиксель, выделенный серым (2,4).

5	4	7	1	6
5	4	3	6	4
8	7	2	2	7
7	7	9	8	7
4	2	3	1	7

Средний фильтр, применяемый для размера 3x3, рассчитывает среднее значение на основе данных окружающих точек. Таким образом, сумма для сетки размером 3x3 равна 38 (7+1+6+3+6+4+2+2+7), которая затем делится на 9, давая среднее значение 5,4.

Основные функции фильтров:

Медианный фильтр – Устраняет шум за счет выстраивания значений точек в области матрицы в возрастающем порядке. Среднее значение распределения в таком случае используется как отфильтрованное значение.

Средний фильтр – Сглаживает поверхность за счет усреднения каждой точки по отношению к ближайшим. Чем больше размер матрицы фильтра, тем сильнее сглаживающий эффект.





Средний фильтр 3х3

Средний фильтр 9х9

Максимальный фильтр – Выбирает точку области матрицы с максимальным значением и использует ее как новое значение. Остаточная поверхность, образованная с помощью данного фильтра, часто используется для обнаружения предельных выбросов на поверхности.

Минимальный фильтр – Выбирает образец в области матрицы с минимальным значением и использует ее как новое значение. Остаточная поверхность, образованная с помощью данного фильтра, часто используется для обнаружения минимальных выбросов на поверхности.

Фильтр Гаусса – Аналогично среднему фильтру используется для сглаживания поверхности. Однако вместо использования среднего значения применяют ядро гауссовой матрицы. Образец ядра матрицы размером 3х3 показан ниже.

1	2	1
2	4	2
1	2	1

Фильтр Лапласа – Обнаруживает резкие перепады в данных о поверхности. Образец ядра матрицы размером 3х3 показан ниже.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Допустимые размеры фильтров: 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 и 13x13. Как правило, чем больше размер фильтра, тем сильнее его эффект. Сглаженное изображение получается за счет вычитания изображения шума из Исходного изображения. Изображение шума содержит детали поверхности, подлежащие фильтрации. Выберите изображение для вывода, используя переключатели внизу. Сглаженное изображение выбирается по умолчанию.

После выбора метода фильтрации, размера фильтра и выводного изображения нажмите клавишу «ОК», чтобы применить выбранные параметры к сканированию.

## ▶ Ввод недопустимых значений



Инструмент **«Ввод недопустимых значений»** используется для ввода недопустимых значений посредством интерполяции ближайших точек.

Invalids Опцию ввода до границ лучше оставлять отключенной, если известно, что на недоступных участках нет данных (т.е. образец меньше, чем изображаемый участок). При включении данной функции программное обеспечение оценит значения границ рамки, используя известные данные.



## Убрать выбросы

Инструмент «Убрать выбросы» используется для определения и удаления выбросов Remove значений точек поверхности за счет сопоставления их с ближайшими точками.



Максимально допустимый угол уклона – это допустимое значение, выражаемое в градусах, между соседними пикселями до момента определения точки как выброса. Например, на изображениях ниже представлена плоская поверхность с острым выступом в центре, который является выбросом значения. Если установить значение максимального угла уклона «45», острый выступ в центре будет удален, а остальные точки останутся.





Образец сканирования с одним выбросом Тот же образец после удаления выбросов

Все удаленные точки меняются на недопустимые значения в данных. После щелчка мышкой по окошку «Ввод недопустимых пикселей» активируется интерполяция данных точек на основе ближайших точек.

Как и при работе с другими функциями, пользователю предоставляется возможность выбрать, какое сканирование будет отображаться после завершения операции удаления выбросов. «Изображение удаленных выбросов» показывает остаточные точки после удаления выбросов, а «Изображение выбросов» - удаленные точки.

- Level
- ▶ Выровнять

422

**Инструмент** «Выровнять» используется для удаления любых вершин или ребер, существующих на отсканированном изображении. Для включения данной функции сначала загрузите сканирование или запустите новое, затем щелкните мышкой на кнопку «Выровнять», которая находится под лентой «Анализ». Откроется окно «Элемент управления: выровнять», показанное ниже. Следует отметить, что инструмент «Выровнять» лучше всего подходит для плоских поверхностей.



Элемент управления: Окно «Выровнять»

Окно покажет два изображения: исходное и выровненное. Затем выберите один из методов выравнивания: трехточечный или фасетирование.

Трехточечное выравнивание выполняется за счет размещения плоскости на средней высоте от трех затемненных кругообразных участков вокруг точек изображения образца поверхности. Радиус данных точек можно задавать в текстовом поле опции «Метод выравнивания». Положение трех точек можно изменить за счет щелчка мышкой по центру точки и ее перетаскивания. При изменении радиуса и положения точек выровненная поверхность обновляется и отображает данные изменения. Чтобы применить результат выравнивания к сканированию, нажмите на кнопку «**OK**».

Фасетирование поверхности используется для образцов с несколькими ровными поверхностями; примером может послужить стандартная высота шага. Вместо использования трех точек для определения уровня программа вычитает плоскость, определяемую как параллель фасетам в исходном изображении.



Образец поверхности до выравнивания. Образец поверхности после выравнивания.

Коррекция отображается до тех пор, пока открыто окно сканирования, но при этом для подтверждения изменений необходимо сохранить файл.

#### Сглаживание



Инструмент «Сглаживание» используется для удаления внутреннего контура образца с рельефа поверхности. Компания Profilm предлагает пять методов

выполнения данной функции: метод плоскости, метод нормальной плоскости, метод сферы, полиномиальный метод и цилиндрический метод.

При использовании данного инструмента выберите сканирование для загрузки после ввода параметров анализа. Сглаженное изображение - это изображение после обработки, а изображение формы показывает контур формы, удаленной из сканирования.



Элемент управления: окно «Удалить форму».

Метод плоскости: Работает по тому же принципу, что и функция <u>Трехточечного</u> <u>выравнивания</u>, путем введения в изображение плоскости через три выбранные точки, которая затем удаляется из изображения. Программа Profilm автоматически выбирает точки для плоскости.

Метод нормальной плоскости: Работает по тому же принципу, что и функция <u>Фа-</u> <u>сетирования</u>, вычисляя плоскость, параллельную фасетам поверхности. Лучше всего подходит для поверхностей со смешанными плоскостями на различных высотах, таких как стандартный шаг высоты, **Цилиндрический метод:** Цилиндрический метод определяет и удаляет все внутренние цилиндрические контуры их измеряемого образца. Данная функция работает тем лучше, чем ближе край цилиндра к вертикализации или горизонтализации.

**Метод сферы:** Программа определяет и удаляет наиболее четкие сферы из выбранного сканирования.

**Полиномиальный метод:** Полиномиальный метод используется для определения наиболее четких полиномиальных кривых на измеряемом пространстве. Чем сложнее измеряемая поверхность, тем большая степень полинома необходима. В текстовое поле можно ввести значения степени от 1 до 13.

Определенные области сканирования могут быть удалены из анализа удаления формы. Выберите задаваемый пользователем полигон, на котором щелкните мышкой по Исходному изображению для определения точек для создания диапазона удалений (необходимо хотя бы 3 точки) или сформируйте регулируемый прямоугольный или кругообразный контур на образце. Можно использовать несколько контуров одновременно.

Выбрав контуры, щелкните мышкой по кнопке «Игнорировать выбранную область» для удаления выбранного свойства или кнопку «Использовать выбранную область» для его замены. Игнорируемые области будут выделяться оттенком сепия, а используемые области -разноцветным. Используйте кнопку «Выбрать используемую/игнорируемую область» для переключения между используемыми и игнорируемыми областями. Нажмите кнопку «Использовать полное изображение» для удаления всех контуров.

#### ▶ Фильтр

Инструмент «Фильтр» используется для удаления особенностей поверхности за счет ^ применения фильтра низких или высоких частот, двухмерного фильтра. Фильтрация определяется выбором одного из пяти заданных значений длины среза или вводом Filter пользовательского значения. Действующая длина среза определяется настройками объектива и приближения. Предлагается два метода фильтрации: метод Гаусса и метод полиномиальной кривой.

Метод полиномиальной кривой является более гибким и не приводит к уменьшению масштаба сканирования после применения. Разнообразие метода полиномиальной кривой достигается за счет регулировки растяжения ((3), задаваемые значения которого могут быть от «О» до «1» в зависимости от пользовательского ввода. Значение растяжения по умолчанию - p = 0.625242, что приблизительно соответствует значению для фильтра Гаусса.

425

Фильтр Гаусса приводит к уменьшению масштаба сканирования, так как он выводит среднее значение поверхности для конкретной области. Игнорируемая область будет обозначаться серым участком вокруг окон вывода шероховатости и волнистости. Размер данной области определяется выбранной длиной среза.

Выберите поверхность, которая будет отображаться в результате процесса фильтрации, щелкнув мышкой на кнопку «Изображение вывода волнистости» или кнопку «Изображение вывода шероховатости».

<ul> <li>Operator: Filter (Roughness Image = Starting Imag</li> </ul>	e - waviness image)	
sarting Image	Waviness Image (>Cutoff Length)	Roughness Image ( <cutoff length)<="" td=""></cutoff>
	Output Waviness image	<ul> <li>Output Roughness image</li> </ul>
Filter Method	O Output Waviness image	Output Roughness image     Dimensions
Filter Method © Gaussian	Output Waviness image	Output Roughness image     Dimensions     Source Image:
Filter Method © Gaussian > Spline	Output Waviness image Cutoff Length ○ 2.5 µm ○ 8 µm	Output Roughness image     Dimensions     Source Image:     285 x 241.5 µm (571 x 484 Pixels)
Filter Method Gaussian Spline @ Gaussian (β = 0.625242)	Output Weviness image Cutoff Length ○ 2.5 µm ◎ 8 µm ◎ (25 µm	Output Roughness image  Dimensions  Source Image: 285 x 241.5 µm (571 x 484 Pixels)  Cutref Size
Filter Method	Output Waviness image Cutoff Length ○ 2.5 µm ◎ 8 µm ◎ [25 µm ○ 80 µm	Output Roughness image     Dimensions     Source Image:     285 x 241.5 µm (571 x 484 Pixels)     Cutoff Size:     The second seco
Filter Method Gaussian Spline Gaussian (β = 0.625242) Adjustable Tension (0 ≤ β ≤ 1) β	Output Waviness image Cutoff Length 2.5 µm 8 µm €25 µm 8 80 µm 8 80 µm	<ul> <li>Output Roughness image</li> <li>Dimensions</li> <li>Source Image: 285 x 241.5 µm (571 x 484 Pixels)</li> <li>Cutoff Size: 25 x 25 µm (51 x 51 Pixels)</li> </ul>
Filter Method • Gaussian • Spline • Gaussian ( $\beta = 0.625242$ ) • Adjustable Tension ( $0 \le \beta \le 1$ ) $\beta$ 0	Output Waviness image Cutoff Length 2.5 μm 8 μm 25 μm 80 μm 80 μm 80 μm	<ul> <li>Output Roughness image</li> <li>Dimensions</li> <li>Source Image: 285 x 241.5 µm (571 x 484 Pixels)</li> <li>Cutoff Size: 25 x 25 µm (51 x 51 Pixels)</li> <li>Output Image:</li> </ul>

Элемент управления: Окно «Фильтр»

## ▶ БПФ-фильтр

Элемент управления «БПФ-фильтр» (быстрое преобразование Фурье) отделяет ко-



роткие компоненты длины волны от длинных компонентов на изображении. Также он отделяет компоненты поверхности, находящиеся в определенном направлении. БПФ-фильтр должен использоваться на изображениях без недопустимых значений. Используйте элемент управления <u>«Ввод недопустимых значений»</u> или <u>«Удалить выбросы»</u> для ввода недопустимых пикселей.

Окно «БПФ-фильтр» содержит предварительный просмотр вывода исходного, удаленного и добавленного изображения.

Изображение исключенного вывода показывает только значения ниже выбранной длины отсечки шага. Изображение добавленного вывода показывает значения выше длины отсечки шага и выбирается по умолчанию.

Изображение спектральной плотности сигнала показывает отфильтрованные пространственные частоты в двухмерной плоскости. Высокие пространственные частоты отображаются в центре, а низкие - по краям. Градуирование от белого к синему показывает периодичность частот.

Ползунок порога изображения спектральной плотности сигнала (%) фильтрует шум на изображении спектральной плотности сигнала на основе выбранной степени отсечки шага (в процентах). Значения ниже степени отсечки шага устанавливаются как минимальные значения и отображаются в виде синих пикселей. Изменения данных значений не влияют на итоговое изображение.

БПФ-фильтр требует, чтобы размеры изображения соответствовали степени двух (т.е. 256 x 512), иначе данный элемент управления заполняет свободные поля пустыми пикселями от края до ближайшего поля в степени двух. Зеркало X и зеркало Y заполняет свободные поля края пустыми пикселями, копируя их по всей выбранной оси. Если значения не выбраны, используется значение «О» для всех свободных полей до края, что может привести к появлению артефактов в итоговом изображении.

Низкочастотная фильтрация отделяет низкочастотную информацию изображения от высокочастотной за счет изменения длины волны отсечки шага в направлении осей X и Y. Пространственные частоты за пределами красного эллипса не подлежат фильтрации. Значения отсечки шага определяют размер эллипса. «Синхронное соотношение значений» выражает соотношение между одновременно изменяющимися значениями отсечки шага на оси X и оси Y.

«Низкочастотный фильтр» требует выбора типа фильтра. Идеальный фильтр отображает значения отсечки шага в виде четкой границы, а фильтр Гаусса применяет легкое размытие вокруг длины отсечки шага, что легче воспринимается глазом. Смотрите пример использования кнопки «Низкочастотный фильтр» ниже:



Оригинальное изображение

Низкочастотный фильтр 40 мкм- изображение с сохраненными частотами Низкочастотный фильтр 40 мкм- изображение с удаленными частотами

«Ручная фильтрация» позволяет выбрать точные элементы Фурье, которые будут ослабляться с помощью БПФ-фильтра. Алгоритм выбора данных функций похож на операции с элементом управления <u>«Селаживание»</u>, где области выделяются с помощью прямоугольных или кругообразных контуров, либо задаваемого пользователем полигона. Щелкните мышкой по кнопке «Удалить выбранные частоты» для удаления выбранной области, выделенной оттенком сепии. Кнопка «Сохранить выбранные частоты» добавляет определенную область внутри удаленной зоны. Следует отметить, что изображение спектральной плотности сигнала отображается на осях X и Y, программа размещает соответствующую область в сопряженных пространственных частотах, когда определены удаления/добавления.

На примере, приведенном ниже, изображение содержит поверхность с преобладающим зерном и глубокой царапиной. С помощью функции **«Ручная фильтрация»**, удалось удалить из изображения информацию о зерне, оставив интересующее свойство – царапину – для дальнейшего анализа.



Оригинальное изображение

Вырезать





Изображение спектральной мощности с удаленной областью Изображение добавленного вывода



Инструмент «Вырезать» используется для удаления ненужных участков из завершенного изображения.

arting Image			Cropped Imag	e	
Rectangle	x to define the crop region				
User-defined patt	ern				
Define Regions to I	keep/Delete (shown in Start	ing Image)		Starting Image Color Key	
election Shape (C	lick/Drag in Starting Image)	Keep/Delete All	Special		
Rectangle	Keep Selected Region	Keep Entire Image	Undo	Color gradients for regions to k	eep or delete:
Bolygon	region	inter and intege		Kept Regions	Deleted Regions
Polygon			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Circle	Delete Colected Region	Delete Entire Image	Swan Koon /Delete		

Использование «Элемент управления: вырезать» для удаления недопустимых пикселей на цилиндрической поверхности.

«Прямоугольный» удаляет информацию, находящуюся за пределами желтого прямоугольника на исходном изображении. Щелкните мышкой по границам желтого прямоугольника и перетащите их для изменения области вырезания. Щелкните мышкой по любой области внутри границ желтого прямоугольника, чтобы перетащить его без изменения размеров.

Функция «Определяемый пользователем шаблон» работает аналогично функции «Сглаживание». Выберите данную функцию для добавления определяемого пользователем полигона или регулируемых прямоугольных, кругообразных или эллиптических контуров. Определите полигон, щелкнув мышкой на исходном изображении и добавив точки в диапазон удаления или добавления (минимум 3 точки). Одновременно можно использовать различные контуры.

Добавив контуры, сохраните или удалите область с помощью соответствующих кнопок. Сохраненные данные отображаются разноцветным оттенком. Удаленные области отображаются оттенком сепии. Используйте меньшие контуры для удаления выбросов, которые трудно идентифицировать с помощью инструмента «Удалить выбросы».

Щелкните мышкой по кнопке «ОК» для принятия изменений или «Отменить» для выхода.

429

#### о Настройки экрана



<u>«Настройки экрана»</u> содержат параметры <u>«Цветовая гамма»</u>, <u>«Общие»</u> и <u>«Освещение 3D вида»</u>, а также экран <u>«Свойства изображения»</u>.

<u>Цветовая гамма</u> <u>Общие настройки экрана</u> <u>Настройки освещения</u> <u>3D Свойства изображения</u>

## Цветовая гамма

Данный элемент управления используется для изменения цветовой гаммы.

🛱 Color Scale X
Color Scale Range
✓ Manual Range
Min 2.4084 µm Max 53.669 µm Interactive
Color Gradient
Built-in Custom
C
Delate New Edit Astimite
Delete New Edit Activate
Active Gradient:
Add To Library
OK Cancel

<u>«Градиент цвета»</u> используется для выбора между разноцветным, бело-синим и пользовательским градиентами цвета. В программе предустановлены пять разных градиента цвета. Для выбора градиента из набора цветов нажмите кнопку «Пользовательский», а затем выберите необходимый градиент из вкладки Набор цветов. Щелкните мышкой по кнопке «Активировать» для подтверждения выбранного градиента цвета.

Когда все изменения внесены, щелкните мышкой по кнопке «ОК», чтобы применить их, или «Отменить», чтобы закрыть окно без изменений.



<u>«Выбор градиента цвета в ручную»</u> позволяет выбрать цвет вручную. Введите свои значения или щелкните мышкой по кнопке «Интерактивное...», чтобы открыть окно «Редактировать цветовую гамму». В данном окне отрегулируйте Минимальное и Максимальное значения с помощью ползунка на левой стороне изображения Изображение будет автоматически обновляться при передвижении ползунка по шкале цветовой гаммы.

Когда цвет будет выбран, щелкните мышкой по кнопке «ОК» для принятия изменений.



**Минимум** и **максимум** на **шкале цветовой гаммы** обновится в соответствии с новым выбором.

Для добавления нового градиента щелкните мышкой по кнопке «Пользовательский» и затем выберите вкладку <u>«Пользовательский»</u> в <u>«Библиотеке градиентов»</u>. Щелкните мышкой по кнопке «Новый» для создания нового градиента цвета. Выберите новый градиент, затем щелкните мышкой по кнопке «Ре-

дактировать», чтобы открыть окно «Редактировать градиент цвета».

Окно «*Редактировать градиент цвета*» предлагает следующие функции:

1. Добавление новой точки цвета - щелкните правой кнопкой мышки в любой точке цветовой панели и выберите «Добавить точку цвета» для создания новой точки цвета в данной локации.

2. Редактирование имеющейся точки цвета - щелкните правой кнопкой мышки по любой из стрелок, затем выберите «Редактировать», чтобы открыть окно «Редактировать цвет». Щелкните мышкой по стрелке раскрывающегося списка, чтобы открыть Палитру цвета. Цвета можно выбирать из заданной палитры в Стандартном режиме или из значений R, G, B и A в Продвинутом режиме.

3. Перемещение имеющейся точки цвета - щелкните мышкой по одной из стрелок имеющейся точки цвета и перетащите ее, чтобы изменить положение и степень изменения

цвета для данной точки. Следует отметить, что точки, расположенные на краях, невозможно переместить.

4. Удаление имеющейся точки цвета - щелкните правой кнопкой мышки по любой из стрелок, затем выберите «Удалить», чтобы удалить выбранную точку цвета. Следует отметить, что точки, расположенные на краях, невозможно удалить.

Когда выбран градиент цвета, щелкните мышкой по кнопке «**OK**», чтобы сохранить изменения и вернуться в «Библиотеку градиентов». Щелкните мышкой по кнопке «**Активировать**» для выбора нового градиента цвета. Можно сохранить несколько градиентов сразу. Градиенты из Набора цветов не подлежат прямому редактированию, но могут быть скопированы в <u>«Пользовательскую библиотеку»</u> для изменения с помощью кнопки «**Добавить в библиотеку**». Щелкните мышкой по необходимому градиенту, затем по кнопке «Акти-

вировать» и затем по кнопке «Добавить в библиотеку».

Общие настройки экрана

«Общие настройки экрана» предоставляют функции для изменения способа отображения данных в окне трехмерного вида. Данные изменения не влияют на основные данные, только на отображение.

Second Display Set	tings		×
3D View			
Show Line Profile	plane ction line		
Show axes	65		
Show controls	t scale (stretch/corr	(press)	
Height scale: Camera view: Return	to Default		
Z-Axis Origin			
Origin at     Minimum	Origin at Center	Origin at Meximum	Origin From Deta

Показать плоскость линейного профиля в 3D виде: Переключайтесь между вкл/выкл, чтобы показать/скрыть выбранную плоскость линейного профиля с 3D видом сверху.

**Показать линию пересечения:** Переключайтесь между вкл/выкл, чтобы показать/скрыть локализацию линии соприкосновения плоскости профиля с поверхностью 3D вида.

**Показать оси в 3D виде:** Переключайтесь между вкл/выкл, чтобы показать/скрыть оси X, Y и Z и их обозначения на 3D виде.

Показать линии сетки: Переключайтесь между вкл/выкл, чтобы показать/скрыть линии сетки на 3D виде.

Элементы управления отображения: Переключайтесь между вкл/выкл, чтобы показать/скрыть элементы управления обработкой изображения на 3D виде.

Шкала высоты: Установите значение для сканирования на шкале высоты, от «О» (плоская) до «5» (сильно приподнятая). Значение «1» является заводским.

**Вид заводской камеры:** Изменяет положение (вращение, боковое и вертикальное движение или приближение) вида заводской камеры для сканирования.

Исходная точка оси Z: Выберите одну из четырех точек в качестве исходной:

Минимум - «О» в самой нижней измеряемой точке сканирования.

432

Центр - «О» в центре сканирования.

Максимум - «О» в самой высокой измеряемой точке сканирования.

От значения - диапазон устанавливается на основе абсолютной координаты диапазона сканирования.

## Настройки освещения 3D

🕰 3D Lighting Settings × Light Orientation Relative to camera Azimuth: degrees Elevation: degrees Relative to sample Azimuth: degrees Elevation: degrees Light orientation: Return to Default Light Intensity U<sub>%</sub> Relative to max Light intensity: Return to Default

Окно «Настройки освещения 3D» используется для регули-

ровки настроек освещения, используемого на 3D сканерах. В зависимости от характера образца регулировка данных нас троек может помочь рассмотреть его определенные свойства.

**Положение освещения:** Позволяет производить ручную настройку азимута и подъема источника света относительно и камеры, и образца. Щелкнув мышкой по кнопке **«Заво-** дское положение освещения», можно сбросить данный параметр к заводским настройкам («О» - азимут, «-45» - повышение относительно камеры, «О» - азимут, «-90» - повышение относительно образца).

**Интенсивность света:** Позволяет производить ручную настройку интенсивности освещения 3D сканера. Щелкнув мышкой по кнопке «Заводская интенсивность света», можно сбросить данный параметр к заводскому значению (100% относительно максимального).

## ▶ Свойства изображения



Раздел «Свойства изображения» содержит большое количество информации о недавно загруженных сканирован иях. Он включает в себя всю информацию от цели сканирования и типа использованной системы (с серийным номером) до настроек приближения, метода сканирования, скорости измерения, удаления, а также положения на предметном столике, на котором проводились измерения.

Также в данном разделе содержится история всех операций, выполненных при выбранном сканировании, таких как анализ шага высоты, удаление формы или фильтрация. Данная информация доступна только о сканированиях, произведенных оборудованием Profilm3D. Щелкнув мышкой по красной кнопке «Х» рядом с данным слоем, можно удалить эффекты данного элемента управления. Следует отметить, что все последующие операции также будут удалены.

#### Личные настройки



Лента «Личные настройки» позволяет адаптировать выбранные параметры программы Profilm под потребности пользователя.

Снимок экрана: Только активная вкладка вырезает снимок экрана так, чтобы была видна

только активная вкладка. Если данная функция отключена, ленты и все открытые вкладки присутствуют на снимке экрана.

General		
<ul> <li>ScreenShot: Active tab only</li> </ul>		
✓ Offer to reprocess raw data		
Data Recording		
Access Control		

Переработка исходных данных - просит подтверждения для повторного анали за данных при загрузке новой программы. В противном случае Profilm примет изменения автоматически. Повторный анализ распространяется только на последнее завершенное сканирование или последний загруженный

#### файл с расширением .fibes.

Данный раздел также содержит функции «Запись данных» и «Управление досту-



Units	
Edit	

<u>пом»</u>.

Контролирует максимальное количество сканирований, которое программа способна отображать одновременно, от 1 до 10. Предупреждающее сообщение перед закрытием активного сканирования также может быть активировано здесь.

Открывает окно «Редактировать единицы измерения и числа» для изменения единиц измерения контроля движения.

Запись данных

«Запись данных» позволяет автоматически экспортировать результаты в файл с расширением .csv для дальнейшего использования. Для включения данной функции выберите ленту «Личные настройки», затем щелкните мышкой по кнопке «Общие», которая находится под настройками. Откроется новая боковая панель. Щелкните мышкой по кнопке «Запись данных», чтобы открыть окно.

Окно «Запись данных»

Для активации щелкните мышкой по окошку рядом со строкой «Автоматически добавлять результаты в файл». Щелкните мышкой по кнопке «Просмотр...» для выбора файла, в котором будут сохраняться результаты. Выберите существующий файл или создайте новый. Для того, чтобы программа спрашивала подтверждения пользователя перед добавлением результатов в файл, активируйте функцию «Подтверждать перед сохранением». Щелкните мышкой по кнопке «ОК» для принятия изменений или «Отменить», чтобы закрыть окно без изменений.

Если данная функция включена, Profilm будет добавлять результаты любого анализа отдельной строкой в файл с расширением .csv, пока новый файл не будет выбран в окне или пока не будет отключена функция. Следующие значения включены в результат каждого анализа, сохраняемый в файле: имя программы, требуемое время, координаты X и Y на предметном столике, выраженные в микронах. Если другая информация анализируется выбранной программой, данная информация отображается в отдельной колонке. Сюда относятся все результаты шага высоты, шероховатости области 2D и шероховатости линии 1D.

Управление доступом

* Access Control	
Access Leve	Logged Out 🔹
User II	: Engineer1
Passwor	
Activate Access Control	
Exit Program Log In	

Программа Profilm защищена паролем, ограничивающим вход в настройки программы и измерения. При первой установке программы управление доступом отключено. Программа предложит заводской уровень доступа, уровень Инженера, который предоставляет дос-

туп ко всем функциям программы, кроме включения/выключения управления доступом и добавления/удаления пользователей.

Программа предлагает три уровня доступа: руководитель, инженер и оператор.

Руководитель: имеет доступ ко всем функциям программы, может включать/отключать управление доступом, добавлять новых пользователей или удалять существующих.

**Инженер:** имеет доступ ко всем функциям программы, но не может включать/выключать управление доступом и вносить изменения в аккаунты пользователей.

**Оператор:** может открывать ранее созданные программы, но не может редактировать значения в них. Имеет полный доступ ко всем функциям анализа.

Включение/выключение управления доступом требует уровня руководителя. Изначально в списке пользователей программы указан только один пользователь, руководитель, как это показано ниже:

ID пользователя: filmsuper

Пароль: filmetricsfff

Для того, чтобы включить управление доступом, войдите как filmsuper, используя пароль, указанный выше. Необходимо выбрать окошко **«Включить управление доступом»** для включения функции управления доступом. **ID пользователя** и **Пароль** чувствительны к регистру.

Чтобы добавить пользователя, выберите соответствующую функцию «Управление доступом», введите ID пользователя и исходный пароль и затем щелкните мышкой по кнопке «Добавить пользователя».

* Access Control		
Access Level:	Operator	
User ID:		
Password:		
Activate Access Control		
Delete User	Add User Log Out OK	

Чтобы удалить пользователя, введите ID пользователя, нажмите кнопку «Удалить пользователя».

Пользователь уровня доступа оператора и инженера может изменять свой пароль, если ввести свой пароль в поле пароля и щелкнуть мышкой по кнопке «Изменить». Пользователь уровня доступа Руководителя может изменять свой пароль и пароль любого другого пользователя, выбрав соответствующий уровень доступа, введя ID пользователя и новый пароль, а затем щелкнув мышкой по кнопке «Добавить пользователя». Если программа

определяет, что пользователь уже существует, она удалит старые данные входа для этого пользоват еля и создаст новые.

💎 Access Cor	ntrol	×
Access Level:	Engineer 💌	
User ID:	engineer1	
Password:		Change
<b>J</b>	Activate Access Control	
	Log Ou	t OK

Для максимальной безопасности создайте нового пользователя уровня руководителя и удалите пользователя с ID filmsuper. Если не удается войти как пользователь уровня руководитель (например, забыли пароль), переустановите программу и добавьте всех пользователей еще раз.

#### ▶ Единицы измерения

Окно «Единицы измерения и числа» позволяет пользователю выбирать, единицы измерения для боковых координат (X/Y) и координат по высоте (Z).

Единицы измерения выбираются из списка в раскрывающемся меню на экране.

Данное окно содержит подробную информацию об использовании показаний индикаторов программы, значащих разрядов чисел и десятичных знаков. При изменении данных значений окно «Форматированные примеры чисел» обновится, чтобы показать эффекты на измеряемых результатах. При выборе функции «Конечные нули экрана» программа добавляет дополнительные нули к результатам, если это необходимо для выбранного значения значащего разряда чисел или десятичных знаков.



nits	
Measurement Syste	m
mm, micron, (	Metric)
<ul> <li>inch, millinch (n</li> </ul>	nil), (Imperial)
Motor Positioning U	Inits
Lateral (X/Y)	Height (Z)
milimeter *	micron *
Decimal places	
Decimal places	NO.8
Decimal places     Decimal places     Display trailing z     Formatted Number	rros Examples
Decimal places     Decimal places     Display trailing at     Formatted Number	stos Examples E = 3.142
Decimal places	9705 Examples π = 3.142 0 = 0.003142
Decimal places     Decimal places     Display trailing ze     Formatted Number     n/100     1/5	5105 Examples E = 3.142 0 = 0.003142 0 = 0.02
Decimal places     Decimal places     A     Display trailing zx     Formatted Number     n/100     1/5     n*1000*100	9705 Examples E = 3,142 0 = 0.023142 0 = 0.02 0 = 3142000
Decimal places     Decimal places     Display trailing z     Formatted Number     n/100     1/5     n*1000*100	5705 Examples E = 3.142 0 = 0.003142 0 = 0.02 0 = 3142000

Помощь

Лента «Помощь» содержит вкладки «Диагностика» и «Поддержка» для устранения неисправностей. Большинство данных функций будет отра-

жаться под Интерактивным окном, если они активированы.

<u>Диагностика</u> <u>Поддержка</u>

#### о Диагностика

Функции «Диагностики» используются для отслеживания состояния системы, что необходимо для устранения неисправностей.

<u>Вибрация</u> <u>Срез интенсивности</u> <u>Сравнительный тест</u> <u>Аппаратное обеспечение</u>

▶ Вибрация



Инструмент **«Вибрация»** используется для отслеживания интенсивности вибрации, определяемой системой. Данный инструмент отображается под Интерактивным окном, где шаблон «Х» накладывается на видеоизображение в режиме реального времени со строкой состояния и графиком зависимости значения интенсивности от времени.

Щелчком мышки по кнопке с выпадающим окном в окне инструмента «Вибрация» открывается перечень функций и команд для оптимизации измерения. Для наиболее опти-

мальных результатов инструмент должен находиться на чистой и гладкой поверхности (подойдет стандартный шаг высоты), с наличием не более 2-3 интерференционных полос. Строка состояния показывает максимальное значение интенсивности вибрации на всем изображении. Кнопка «Тест» переместит столик оси Z до подтверждения изменения вибрации. График внизу показывает зависимость значения интенсивности от времени для выбранной точки (выделенной красным) в миллисекундах.

Чтобы обновить график, щелкните мышкой по новой точке или той же точке еще раз.

Срез интенсивности

«Срез интенсивности» отображает интенсивность установленного на датчике источника освещения на линии, проведенной на изображении, в настоящий момент. Чтобы сделать срез интенсивности, щелкните мышкой по необходимому положению на видеоизображении в режиме реального времени. Интенсивность отобразится на графике внизу. Переключайтесь между горизонтальным и вертикальным срезами, используя переключатели под полем видео-



изображения в режиме реального времени.

Максимальное количество проводимых измерений датчика - приблизительно 250. Свыше 250 измерений приведут к перенасыщению датчика. Если изображение перенасыщено, включите функцию экспозиции или опустите ползунок интенсивности для компенсации.

#### $\triangleright$ Сравнительный тест

Benchmark	
Step Height	PSI Repeatability
<ol> <li>Load Step-</li> <li>Locate calili</li> <li>Click Setup</li> <li>Center step</li> <li>Adjust focu on lower surf</li> <li>Click Measure</li> </ol>	Height standard. bration step. Details Setup edge in field of view, is until fringes appear face. Details
Number	of repetitions: 10
Status: N	Not Ready Measure
	Mean:µm
Standa	ard deviation:µm
Relative standa	ard deviation: %

Сравнительный тест проверяет корректную работу программы Profilm3D после установки системы. Он включает в себя две функции: шаг высоты и повторяемость PSI. Инструкции по использованию обеих функций внесены в программу.

Функция «шаг высоты» представляет собой автоматическое измерение WLI для проверки последовательности измерений стандартного шага высоты. Результатами данных измерений являются средняя толщина измеряемой поверхности и измеренное среднеквадратичное отклонение.

Функция «Повторяемости PSI» схожа с режимом сканирования PSI. Получаемое число повторяемости означает изменение Sq (среднеквадратичное отклонение неровностей) на поверхности между последовательными измерениями.

## Аппаратное обеспечение



Вкладка «Аппаратное обеспечение» показывает текущее напряжение пьезокристаллов, контролирующих положение измерительного объектива на оси Z.

Оптимальным напряжением является  $3OB \pm 3B$ , хотя система будет эффективно работать и при других значениях. При падении напряжения до 0 или росте до 80 обратитесь в отдел поддержки компании Filmetrics.

Функции «Отключить автостоп фокусировки» и «Фиксирующий элемент» должны проверяться непосредственно специалистами компании Filmetrics.

Для транспортировки системы, щелкните мышкой по стрелке раскрывающегося списка, чтобы открыть окно «Детали аппаратного обеспечения», в котором есть кнопка «Переместить Z в положение для транспортировки». Щелкните мышкой по ней, чтобы переместить головку в положение, удобное для транспортировки. Программа предложит снять все объективы перед перемещением головки.

## о Поддержка

Вкладка «Поддержка» содержит подробную информацию о программе Profilm, а также контакты компании Filmetrics.



Вкладка содержит программную копию руководства по эксплуатации.

Вкладка содержит форму для подачи заявки в службу поддержки. Если компьютер, подключенный к устройству, имеет выход в интернет, программа может напрямую отправить запрос на поддержку в компанию Filmetrics. В противном

случае файл Request заявки на поддержку может быть создан и сохранен с по-

мощью кнопки «Создать Support файл для электронной почты...». Отправьте данный файл (с расширением .fipsa) на электронный адрес: swsupportfSfilmetrics.com.



Данная вкладка отображает информацию о программе, включая версию программы и ее серийный номер. Сообщите данную информацию при обращении в отдел MboUl поддержки компании Filmetrics.
# Главное меню

«Главное меню» содержит основные элементы управления для обработки данных, входящих и исходящих из программы Profilm. Функция «Открыть различия» сравнивает результаты изменения образца между двумя сканированиями. Если была установлена платная программа сшивания UPG, функция <u>Сшивания</u> будет доступна в данном меню.

**Открыть сканирование:** Открывает последнее сохраненное сканирование. Файлы со следующими расширениями поддерживаются программой Profilm:

.fibps, .fibcs, .sur, .ibw, .bcr, .bcrf, ,vk4, .dat, ,x3p, .asc, .opd

Открыть различия: Открывает и сравнивает два разных сканирования, а затем создает сканирование различий. Используется для сравнения образцов до и после сканирования.

Сшивание: Открывает окно «Сиивание». Требует установки программы сшивания UPG.

Импортировать: Импортирует программы и файлы лицензии.

Сохранить: Сохраняет активное сканирование.

Сохранить как: Сохраняет активное сканирование под новым именем.

Экспортировать: Экспортирует программы, файлы лицензии и файлы информации о системы.

Выйти: Выходит из программы.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Методика зондовые измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1



Методика

зондовых измерений СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Разработал Миненко Д.Е. «Зд» 10 2020 г.

Томск 2020

# Условные обозначения и сокращения

ИС	Интегральная микросхема
ФБ	Функциональный блок
ЦАТТ	Цифровой аттенюатор
БУ	Буферный усилитель
ВАЦ	Векторный анализатор цепей
ИП	Источник питания
ОИ	Испытуемый образец, объект испытаний
СИ	Средство измерения
УУ	Устройство управления

#### 1 Назначение и область применения методики

1.1 Настоящий документ устанавливает методику измерения модуля и фазы параметров рассеяния СВЧ интегральной микросхемы ИС1 на пластине зондовым способом.

1.2 Измерения проводятся при нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 8.395-80.

1.3 Настоящая методика предназначена для выполнения измерений в диапазоне частот от 0,05 ГГц до 10 ГГц.

#### 2 Объект измерений

2.1 Объектами измерений (ОИ) являются буферный усилитель (БУ) и цифровой перестраиваемый аттенюатор (ЦАТТ), входящие в состав СВЧ интегральной микросхемы ИС1.

2.2 Описание объекта измерений

2.2.1 Чертеж топологии кристалла СВЧ интегральной микросхемы ИС1, содержащий БУ и ЦАТТ представлен на рис. 2.1.

2.2.2 Контактные площадки ОИ имеют следующие назначения и обозначения:

1 – напряжение питания буферного усилителя (VDD BA);

2 – управление питанием буферного усилителя PD, «1» - вкл, «0» – выкл. Интегрирован подтягивающий резистор к питанию (*VDD BA*);

3, 5, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45 – земля буферного усилителя;

4 – СВЧ вход буферного усилителя (*IN\_BA*);

6 – состояние аттенюатора при включении питания. («0» - максимальное ослабление; «1» - минимальное ослабление). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию;

7 – переключение режима управления аттенюатором (*SER\_PAR*), где «1» – последовательный код; «0» – параллельный код. Интегрирован подтягивающий резистор к питанию VDD ATT;

8 - сброс в начальное состояние (вспомогательный вывод, нужен для отладки);

9, 11, 12, 16, 19, 22, 24, 25, 27 – земля цифрового аттенюатора и драйвера;

10 – СВЧ вход цифрового аттенюатора (IN\_ATT);

13 – выбор микросхемы/фиксация состояния аттенюатора. Интегрирован подтягивающий резистор к питанию (*CS/LE*);

14 — управление секцией цифрового аттенюатора 1 дБ (*D0/SCK*). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию. / Вход тактового сигнала;

15 – управление секцией цифрового аттенюатора 2 дБ (*D1/SD1*). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию. / Вход последовательного интерфейса;

17 – управление секцией цифрового аттенюатора 4 дБ (*D2*). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию;

18 – управление секцией цифрового аттенюатора 8 дБ (*D3*). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию;

20 – управление секцией цифрового аттенюатора 16 дБ (*D4*). Интегрирован подтягивающий резистор к питанию;

21 – напряжение питания драйвера аттенюатора (VDD\_ATT);

23 – выход последовательно-параллельного регистра (SDO);

26 – СВЧ выход цифрового аттенюатора (OUT\_ATT);

28 – установить все секции цифрового аттенюатора в режим «1», что соответствует минимальному ослаблению в канале (*SETH*);

29 – установить все секции цифрового аттенюатора в режим «0», что соответствует максимальному ослаблению в канале (*SETL*);

31 – СВЧ выход буферного усилителя (*OUT\_BA*);

40 – отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения второго каскада буферного усилителя (*VG2 BA*);

44 – отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения первого каскада буферного усилителя (*VG1\_BA*).

2.3.3 Измерения проводятся на зондовой станции, на которую закрепляется ОИ.



Рисунок 2.1 – Чертеж топологии кристалла ИС1, содержащий БУ и ЦАТТ

## 3 Общие положения

3.1 Цель измерения

3.1.1 Целью измерения является определение параметров рассеяния БУ и ЦАТТ оговоренным пунктом 4.3 настоящей методики.

3.2 Перечень документов, на основании которых проводятся измерения.

техническое задание на выполнение НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

- настоящая методика измерений;

- ГОСТ 8.395-80 «Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования»;

– ГОСТ Р 8.568-97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения»;

 ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»;

 ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности»;

– ГОСТ 12.2.091-2002 (МЭК 61010-1:1990) «Безопасность электрических контрольноизмерительных приборов и лабораторного оборудования»;

- ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности»;

– ГОСТ 12.1.030-81 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление»;

 ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»;

 ГОСТ 12.0.004-90 «Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения»;

– ГОСТ 12.0.005-84 «Система стандартов безопасности труда. Метрологическое обеспечение в области безопасности труда. Основные положения»;

– Постановление 848-70 «Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот».

3.3 Место проведения измерений

3.3.1 Измерения проводятся на базе:

 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУ-СУР)», г. Томск.

3.4 Организации, участвующие в измерениях:

ФГБОУ ВО «ТУСУР»;

- ООО «ЛЭМЗ-Т».

3.5 Обязательность приемки ВП МО РФ образца изделия перед проведением измерений

3.5.1 Приемка ВП МО РФ образца изделия перед проведением измерений не требуется.

3.6 Обеспечение защиты государственной тайны.

3.6.1 В соответствии с требованиями Технического задания.

3.7 Конфиденциальность

3.7.1 При выполнении работы должны соблюдаться требования по конфиденциальности сведений, касающихся выполняемой работы и полученных результатов.

3.7.2 Запрещается передача методик третьим лицам.

## 4 Объем измерений

4.1 Для измерений предоставляются макетные образцы кристаллов СВЧ интегральной микросхемы ИС1.

4.2 Количество макетных образцов тестовых кристаллов, предоставляемых для измерения параметров ОИ: 2 шт.

4.3 Настоящая методика измерений ОИ включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Измерение параметров рассеяния БУ.

Этап 2. Измерение коэффициента шума БУ.

Этап 3. Измерение параметров рассеяния ЦАТТ.

4.4 Измерение параметров рассеяния ОИ на всех этапах производится в частотном диапазоне 0,05-10 ГГц.

4.5 Объем измерений ОИ приведен в табл. 4.1.

4.6 Основные технические характеристики ЦАТТ и БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1,

установленные Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР», представлены в таблице 4.2 и 4.3 соответственно.

Пункт методи- ки	Этап изме- рения	Измеряемые параметры	Погрешность измере- ний
11.6	Этап 1	Модули (в дБ) и фазы (в градусах) параметров рассеяния БУ S11, S21, S12, S22	По модулю: не более 0,1 дБ; по фазе: не более 2°
11.7	Этап 2	Модуль (в дБ) коэффициента шума БУ	По модулю: не более 0,1 дБ
12.4	Этап 3	Модули (в дБ) параметров рассея- ния ЦАТТ S11, S21, S12, S22 для 32 состояний	По модулю: не более 0,1 дБ; по фазе: не более 2°

Таблица 4.1 – Объем измерений ОИ

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,05		4,5
Разрядность, бит	5		6
Минимальный шаг ослабления, дБ	0,4		1,2
Глубина регулировки, дБ <sup>2)</sup>	30		31,5
Прямые потери, дБ <sup>2)</sup>	1		5,5
Точка 1 дБ компрессии Ку на входе, дБм <sup>2)</sup>	15	16	
Точка интермодуляционных искажений. Зго порядка на вых., дБм <sup>1) 2)</sup>	30	31	
Коэффициент отражения на входе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Коэффициент отражения на выходе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Напряжение питания, В	2,25	2,5	3,3
Потребляемый ток, мА			5
Напряжение питания драйвера, В (VDD)	2,25	2,5	3,3
Рабочая температура, С	-55	25	85

Таблица 4.2 – Основные параметры ЦАТТ

Таблица 4.3 – Основные параметры БУ

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	1		5
Коэффициент усиления, дБ	14	15	17
Неравномерность Кп в полосе 1 ГГц, дБ		0,5	0,7
Коэффициент шума, дБ	3	4,5	5
Точка 1 дБ компрессии Ку на вых., дБм	13	15	16
Точка интермодуляционных искажений 3-го поряд- ка на вых., дБм <sup>1)</sup>	24	25	27
Обратный коэффициент передачи, дБ		-30	-25
Коэффициент отражения на входе, дБ		-15	-10
Коэффициент отражения на выходе, дБ		-15	-10
Напряжение питания, В	3,0	3,3	3,6
Потребляемый ток, мА		60	70
Диапазон рабочих температур, С	-55	25	85

# 5 Условия и порядок измерений

5.1 Условия проведения измерений

5.1.1 В соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.395-80 измерения проводятся при нормаль-

ных климатических условиях:

температура окружающей среды от 20 до 27° С;

относительная влажность не более 80 %; (при температуре выше 30 градусов влажность не должна превышать 70%);

- атмосферное давление от 86 до 106 кПа (от 630 до 800 мм. рт. ст.).

5.1.2 Переменное напряжение первичного источника электропитания 220 В ±10%, 50/60 Гц и 380±20 В, 3-фазное, 50±0,5 Гц.

## 5.2 Критерии начала и прекращения измерений

5.2.1 Критерии начала измерений, состав предоставляемых макетных образцов ОИ, их комплектность и техническое состояние описаны в соответствующих разделах методики измерений.

5.2.2 Критерии прекращения измерений:

- полнота проведенных измерений в соответствии с п. 4 настоящей методики;
- несоответствие типономинала образца ОИ заданному;
- выход из строя образца ОИ в процессе проведения измерений;
- механические повреждения образца ОИ;

 отклонение условий проведения испытаний от нормальных, заданных настоящей методикой;

– иные нештатные ситуации, способные повлиять на результаты измерений.

5.3 Условия перерыва в измерениях

5.3.1 Допускаются перерывы в измерениях, если это не приводит к нарушению требований настоящей методикой, не нарушает технических свойств образцов.

5.4 Условия хранения образцов в течение проведения измерений

5.4.1 На период проведения измерений ОИ хранить в сухом помещении при температуре не выше 27°С.

5.5 Безопасность проведения измерений

5.5.1 При выполнении измерений соблюдают требования ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности».

5.5.2 Средства измерений должны удовлетворять требованиям безопасности по ГОСТ 22261-94 и ГОСТ Р 51350–99.

5.5.3 Электрические приборы должны быть заземлены в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81.

5.5.4 При измерениях должны применяться средства защиты по ГОСТ 12.4.011-89.

5.6 Порядок взаимодействия организаций, участвующих в измерениях

5.6.1 Устанавливается в соответствии с действующей нормативно-правовой базой.

5.7 Допуск к проведению измерений

5.7.1 К проведению испытаний допускаются лица, обладающие соответствующей квалификацией, изучившие техническое описание приборов, методику измерений, ознакомленные с техникой безопасности при проведении измерений.

### 6 Материально-техническое обеспечение измерений

6.1 Перечень материально-технического обеспечения, применяемого в измерениях образцов, приведен в табл. 6.1.

6.2 К описанным в табл. 6.1 техническим средствам должно прилагаться руководство по эксплуатации.

6.3 Средства измерений могут быть заменены аналогичными, погрешность которых не превышает погрешностей, установленных требованиями настоящей методики измерений. Функционал применяемых в этом случае средств измерений должен обеспечивать совместимость с другими устройствами, применяемыми при измерениях.

№ п/п	Наименование	Тип и норматив- ные доку- менты	Назначение	Измеряемые характеристики	Метрологические и технические характе- ристики
1	Трёхканальный источник пита- ния с возмож- ностью изме- рения тока и напряжения	Keysight E36313A	Установка рабочего ре- жима по на- пряжению	Измерение по- требляемого тока и напря- жение питания	Погрешность установ- ки по напряжению не более 5 мВ, по току не более 5 мА. Погрешность измере- ния не более 0,1%
2	Векторный анализатор це- пей с набором калибровочных мер	R&S ZVA40	Измерение параметров рассеяния	Измерение мо- дуля и фазы параметров рассеяния	Диапазон частот: 10 МГц – 40 ГГц; Погрешность измере- ния по модулю: не бо- лее 0,2 дБ; по фазе: не более 2°
3	Век- торный анали- затор цепей	Keysight PNA-X N5247B	Изме- рение пара- метров рас- сеяния	Изме- рение модуля и фазы парамет- ров рассеяния	Диапазон частот: 10 МГц – 67 ГГц; Погрешность измере- ния по модулю: не бо- лее 0,1 дБ; по фазе: не более 2°

Таблица 6.1 – Материально-техническое обеспечение измерений

## 7 Требования к показателям точности измерений

7.1. Переделы допускаемой относительной погрешности по данной методике измерений зависят от выбранных средств измерений (СИ) и диапазонов измерений;

7.2 Погрешность измерения параметров рассеяния зависит от рабочей частоты и уровня мощности, и должна составлять по модулю не более 0,1 дБ, по фазе не более 2°.

### 8 Метод измерений

8.1 Измерение параметров рассеяния ОИ выполняется прямым методом при использовании автоматического векторного анализатора цепей, откалиброванного в соответствии с типовой методикой LRRM в плоскостях подключения СВЧ–зондов контактного устройства к ОИ.

#### 9 Измерительная установка

9.1 Измерение параметров рассеяния ОИ в различных режимах осуществляется при помощи измерительных установок, структурные схемы которых представлены на рис. 9.1 и 9.2.



Рисунок 9.1 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния БУ на этапах 1 и 2 пункта 4 методики



Рисунок 9.2 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния ЦАТТ на этапе 3 пункта 4 методики

9.2 Состав измерительной установки для измерения параметров рассеяния ОИ представлен в табл. 9.1.

9.3 Основание с установленным БУ закрепляется в зондовой станции. Подача управляющих напряжений на БУ осуществляется через четыре игольчатых зонда контактного устройства. Также в

состав контактного устройства входят два СВЧ-зонда для подачи и измерения входных/выходных СВЧ сигналов. Кабели питания и кабели СВЧ соединяют зонды контактного устройства с векторным анализатором цепей, источником питания.

9.4 Основание с установленным ЦАТТ закрепляется в зондовой станции. Подача управляющих напряжений на ЦАТТ осуществляется через один многоконтактный зонд контактного устройства. Также в состав контактного устройства входят два СВЧ-зонда для подачи и измерения входных/выходных СВЧ сигналов. Кабели питания и кабели СВЧ соединяют зонды контактного устройства с векторным анализатором цепей, устройством управления и источник питания.

№ п.п.	Обозначение	Наименование	Тип
1	БУ	Объект измерений	-
2	ЦАТТ	Объект измерений	-
3	Контактное уст- ройство	Контактное устройство зондовой станции	<ol> <li>1) GSG CBЧ зонд</li> <li>с шагом 150 мкм, для CBЧ сигналов;</li> <li>2) 10-ти контактный DC</li> <li>зонд с шагом 150 мкм, для цифровых сигналов;</li> <li>3) DC зонд с шагом 150 мкм, для цифровых кон- тактов (для контакта SER_PAR).</li> </ol>
4	Кабель СВЧ	СВЧ коаксиальный соединительный кабель (волновое сопротивление 50 Ом)	-
5	Кабель СВЧ	СВЧ коаксиальный соединительный кабель (волновое сопротивление 50 Ом)	-
6	Источник пита- ния	Источник питания 3-х канальный	Agilent E3646A
7	Векторный ана- лизатор цепей	Векторный анализатор цепей с набором калибровочных мер	R&S ZVA40
8	Устройство управления	Устройство, реализующее функции Master SPI и обеспечивающее подачу управляю- щих сигналов	ЛВЦР.468382.004
9	Кабели питания	Кабели электрические соединительные	-
10	РК	Разделительный конденсатор	-

Таблица 9.1 – Состав измерительной установки

#### 10 Подготовка к выполнению измерений

10.1 Установить и заземлить приборы в соответствии с инструкциями по эксплуатации;

10.2 Обеспечить свободный доступ к ИО;

10.3 Включить необходимое измерительное оборудование, проверить и подготовить режимы работы в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Установить необходимые значения параметров приборов в соответствии с измеряемой схемой и частотными характеристиками устройства. Установить необходимые значения параметров (в соответствии с проводимыми измерениями), количество точек измерения принять равным 2001 (минимальное значение); 10.3.1 Начальные условия для измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1 на кристалле (для ВАЦ): полоса частот 0,05...10 ГГц, количество точек – 2001, полоса фильтра ПЧ – 1 кГц, входная мощность для измерения S-параметров – минус 15 дБм.

10.4 Выполнить типовую LRRM калибровку векторного анализатора цепей, используя соответствующие калибровочные меры и руководствуясь инструкцией по эксплуатации. Рекомендуется прогреть измерительные приборы в течение 30 минут перед выполнением калибровки. После выполнения калибровки запрещается изменять режимы измерений векторного анализатора цепей. В случае изменения режимов калибровку следует повторить заново.

10.5 Собрать схему измерительного стенда, приведенную на рис. 9.1 и рис. 9.2 в соответствии с проводимыми измерениями.

10.6 Внести в протокол (Приложение 1) условия проведения измерений.

## 11 Порядок выполнения измерений БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

11.1 Установить СВЧ интегральную микросхему ИС1 (стандартная толщина) в контактное устройство зондовой станции;

11.2 Подключить контакты зондов к контактным площадкам БУ в нижеследующем порядке:

– сигнальные контакты игольчатых зондов в первом канале источника питания соединить с контактной площадкой БУ *VDD BA*;

– сигнальный контакт игольчатого зонда во втором канале источника питания соединить с контактной площадкой БУ *PD*;

– сигнальный контакт игольчатого зонда в третьем канале источника питания соединить с контактными площадками БУ *VG1 BA* и *VG2 BA*;

– СВЧ-зонд, подключенный к первому порту векторного анализатора цепей, соединить с контактной площадкой БУ *IN BA*;

– СВЧ-зонд, подключенный ко второму порту векторного анализатора цепей, соединить с контактными площадками БУ *ОUT ВА*;

11.3 Включить источник питания;

11.4 Установить на источнике питания выходное напряжения 3,3 В (канал 1), в пределах от 2 В до 3 В для 2 канала и в пределах от 0 В до 1 В для 3 канала. Выставить на источнике питания ограничение по току 70 мА. Подать установленные напряжения на ОИ. Если после подачи управляющих напряжений, источник питания переходит в режим защиты по току, необходимо выявить и устранить причину. В случае, когда проблема перехода в защиту не связана с внешними факторами, увеличить ограничение по току на 10-20% от начального ограничения;

11.5 Зафиксировать с экрана индикации источника питания значение потребляемого тока и напряжение питания в протокол измерений (Приложение 1);

11.6 Произвести измерения параметров рассеяния БУ для этапа 1 пункта 4 методики, результаты измерения модуля и фазы параметров рассеяния, зафиксировать напряжение питания и потребление тока и внести полученные результаты в протокол (таблица П.1 в Приложении 1);

11.7 Произвести измерения коэффициента шума БУ для этапа 2 пункта 4 методики, результаты измерения коэффициента шума внести в протокол (таблица П.2 в Приложении 1).

11.8 Снять с БУ все питающие и управляющие напряжения.

11.9 Установить СВЧ интегральную микросхему ИС1 (толщина 200 мкм) в контактное устройство зондовой станции;

11.10 Повторить п.п. 11.2 -11.8;

11.11 Внести необходимые данные и результаты в протокол измерений (Приложение 1);

11.12 Разобрать измерительную установку.

## 12 Порядок проведения измерений ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

12.1 Установить СВЧ интегральную микросхему ИС1 (стандартная толщина) в контактное устройство зондовой станции;

12.2 Подключить контакты зондов к контактным площадкам ЦАТТ в нижеследующем порядке:

 Подключить при помочи USB интерфейса источник питания к устройству управления (УУ). Сигналы многоконтактного игольчатого зонда с устройства управления соединить с контактными площадками ЦАТТ CS/LE, SER/PAR, D<sub>0</sub>-D<sub>4</sub>, VDD ATT;

– СВЧ-зонд, подключенный к первому порту векторного анализатора цепей, соединить с контактными площадками ЦАТТ *IN ATT*;

– СВЧ-зонд, подключенный ко второму порту векторного анализатора цепей, соединить с контактными площадками ЦАТТ *ОUT ATT*;

12.3 Установить на источнике питания управляющие напряжения 5 В (канал 1). Подать выставленные управляющие напряжения на УУ;

12.4 Установить УУ в режим управления последовательным кодом;

12.5 Произвести измерения каждого состояния ослабления сигнала ЦАТТ;

12.6 Перевести УУ в режим управления параллельным кодом;

12.7 Произвести измерения ослабления сигнала каждой секции, включенной по отдельности;

12.7 Перевести ЦАТТ в режим ослабления 20 дБ;

12.8 Произвести проверку управляющего сигнала *SETL*, путем установления логического уровня «0» (при этом условии ЦАТТ должен перейти в состояние минимального ослабления сигнала);

12.9 Произвести проверку управляющего сигнала *SETH*, путем установления логического уровня «0» (при этом условии ЦАТТ должен перейти в состояние максимального ослабления сигнала);

12.10 Произвести измерения параметров рассеяния ЦАТТ для этапа 3 пункта 4 методики, результаты измерения модуля параметров рассеяния ОИ внести в протокол (таблица П.3 – П.6 в Приложении 1);

12.11 Снять с ЦАТТ питающие и управляющие напряжения;

12.12 Установить СВЧ интегральную микросхему ИС1 (толщина 200 мкм) в контактное устройство зондовой станции;

12.13 Повторить п.п. 12.2-12.11;

12.14 Внести необходимые данные в протокол измерений (Приложение 1);

12.15 Разобрать измерительную установку.

## 13 Оформление результатов измерений

13.1 Результаты измерений оформляют протоколом, форма протокола представлена в Приложении 1.

13.2 В протоколе приводятся условия, при которых проводились измерения, а также режимы работы средств измерений.

13.3 Итогом протокола являются измеренные и вычисленные числовые значения величин в ходе лабораторных испытаний, указанных в пункте 4. Численные значения величин модуля параметров рассеяния ЦАТТ для 32 состояний, для третьего этапа.

13.4 Результаты измерений удостоверяют лица, проводившие измерения. При необходимости протокол подписывается административно-ответственным лицом и заверяется печатью организации, проводившей измерения.

13.5 Протокол может сопровождаться переносными носителями информации, содержащими файлы с результатами измерений.

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

Методика проведения испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2 на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2

Утверждаю Проректор по НР и И ТУСУР А.Г. Лощилов ou «22» 09 2020 г.

# МЕТОДИКА

проведения испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2 на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2

Разработал <u>День</u> Миненко Д.Е. «<u>22» 09</u> 2020 г.

# Условные обозначения и сокращения

ИС	Интегральная микросхема
МОП ИС	Макет отладочной платы СВЧ интегральной микросхемы
ФБ	Функциональный блок
ЦАТТ	Цифровой аттенюатор
БУ	Буферный усилитель
СМ	Смеситель
УСГ	Усилитель сигнала гетеродина
УПЧ	Усилитель промежуточной частоты
ВАЦ	Векторный анализатор цепей
AC	Анализатор спектра
ГС	Генератор СВЧ сигналов
ИП	Источник питания
СТ	Симметрирующий трансформатор
ИО	Испытуемый образец, объект испытаний
СИ	Средство измерения
ПУ	Плата управления

#### 1 Назначение и область применения методики

1.1 Настоящий документ устанавливает методику проведения испытаний для измерения параметров СВЧ интегральных микросхем ИС1 (в корпусе *QFN24* и *QFN20*) и ИС2 (в корпусе *QFN32* и *QFN24*), заявленных в Техническом задании на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

1.2 Испытания проводятся при нормальных условиях, установленными ГОСТ 8.395-80;

1.3 Настоящая методика предназначена для выполнения измерений в диапазоне частот от 0,05 ГГц до 10 ГГц.

## 2 Объект испытаний

2.1 Объектами испытаний (ИО) для проведения измерения параметров в рамках НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР» являются СВЧ интегральные микросхемы ИС1 (в корпусе *QFN24* и *QFN20*) и ИС2 (в корпусе *QFN32* и *QFN24*).

## 3 Описание объекта испытаний ИС1

3.1 СВЧ Интегральная микросхема ИС1 представляет собой набор функциональных блоков (ФБ), состоящая из цифрового аттенюатора (ЦАТТ), драйвера ЦАТТ и буферного усилителя (БУ).

3.2 Условное расположение ΦБ на интегральной микросхеме ИС1 представлены на рисунке 3.1. На рис. 3.2 и рис. 3.3 представлены изображения интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN20* и *QFN24* с соответствующим наименованием контактных площадок.



Рис. 3.1 – Условное расположение функциональных блоков на интегральной микросхеме

ИС1



Рис 3.2 – Интегральная микросхема ИС1 в корпусе QFN20

Контактные площадки интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN20* имеют следующее назначение и обозначение:

- 1 CS/LE: Выбор микросхемы/ фиксация состояния аттенюатора
- 2 IN\_ATT: СВЧ вход цифрового аттенюатора
- 3 SER\_PAR: Переключение режима управления аттенюатором («0» параллельный код; «1» – последовательный код)
- 4 IN\_BA: СВЧ вход буферного усилителя
- 5 PD: Управление логическими уровнями «1» вкл, «0» выкл.
- 6 VDD: Напряжение питания буферного усилителя (+3,3 B/70 мA)
- 7 VG1\_BA: Отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения первого каскада буферного усилителя (1 В)
- VG2\_BA: Отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения второго каскада буферного усилителя (1 В)
- 9 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 10 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 11 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 12 OUT\_ВА: СВЧ выход буферного усилителя
- 13 GND\_ATT: Земля цифрового аттенюатора
- 14 OUT\_ATT: СВЧ выход цифрового аттенюатора
- 15 VDD\_ATT: Питание драйвера (+2,5 В)
- 16 D4: Управление секцией цифрового аттенюатора 16 дБ (параллельный код)

- 17 D3: Управление секцией цифрового аттенюатора 8 дБ (параллельный код)
- 18 D2: Управление секцией цифрового аттенюатора 4 дБ (параллельный код)
- 19 D1/SDI: Управление секцией цифрового аттенюатора 2 дБ (параллельный код)/ Вход последовательного интерфейса

20 – D0/SCK: Управление секцией цифрового аттенюатора 1 дБ (параллельный код)/ Вход тактового сигнала



Рис. 3.3 – Интегральная микросхема ИС1 в корпусе QFN24

- 1 CS/LE: Выбор микросхемы/ фиксация состояния аттенюатора
- 2 IN\_ATT: СВЧ вход цифрового аттенюатора
- 3 SER\_PAR: Переключение режима управления аттенюатором («0» параллельный код; «1» – последовательный код)
- 4 Reset: Сброс в начальное состояние
- 5 IN\_BA: СВЧ вход буферного усилителя
- 6 PD: Управление логическими уровнями «1» вкл, «0» выкл.
- 7 VDD: Напряжение питания буферного усилителя (+3,3 В/70 мА)
- VG1\_BA: Отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения первого каскада буферного усилителя (1 В)
- 9 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 10 VG2\_BA: Отладочная площадка. Служит для контроля напряжения смещения второго каскада буферного усилителя (1 В)

- 11 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 12 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 13 GND\_BA: Земля буферного усилителя
- 14 OUT\_BA: СВЧ выход буферного усилителя
- 15 SETL: Установить все секции цифрового аттенюатора в режим минимального ослабления
- 16 SETH: Установить все секции цифрового аттенюатора в режим максимального ослабления
- 17 OUT\_ATT: СВЧ выход цифрового аттенюатора
- 18 SDO: Выход последовательно-параллельного интерфейса
- 19 VDD\_ATT: Питание драйвера (+2,5 В)
- 20 D4: Управление секцией цифрового аттенюатора 16 дБ (параллельный код)
- 21 D3: Управление секцией цифрового аттенюатора 8 дБ (параллельный код)
- 22 D2: Управление секцией цифрового аттенюатора 4 дБ (параллельный код)
- 23 D1/SDI: Управление секцией цифрового аттенюатора 2 дБ (параллельный код)/ Вход последовательного интерфейса
- 24 D0/SCK: Управление секцией цифрового аттенюатора 1 дБ (параллельный код)/ Вход тактового сигнала

3.3 Основные технические характеристики БУ и ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1, установленные Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР» представлены в таблице 3.1 и 3.2 соответственно.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	1		5
Коэффициент усиления, дБ	14	15	17
Неравномерность Кп в полосе 1 ГГц, дБ		0,5	0,7
Коэффициент шума, дБ	3	4,5	5
Точка 1 дБ компрессии Ку на вых., дБм	13	15	16
Точка интермодуляционных искажений 3-го порядка на вых., дБм <sup>1)</sup>	24	25	27
Обратный коэффициент передачи, дБ		-30	-25
Коэффициент отражения на входе, дБ		-15	-10
Коэффициент отражения на выходе, дБ		-15	-10

Напряжение питания, В	3,0	3,3	3,6
Потребляемый ток, мА		60	70
Диапазон рабочих температур, С°	-55	25	85

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,05		4,5
Разрядность, бит	5		6
Минимальный шаг ослабления, дБ	0,4		1,2
Глубина регулировки, дБ <sup>2)</sup>	30		31,5
Прямые потери, дБ <sup>2)</sup>	1		5,5
Точка 1 дБ компрессии Ку на входе, дБм <sup>2)</sup>	15	16	
Точка интермодуляционных искажений. Зго порядка на вых., дБм <sup>1) 2)</sup>	30	31	
Коэффициент отражения на входе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Коэффициент отражения на выходе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Напряжение питания, В	2,25	2,5	3,3
Потребляемый ток, мА			5
Напряжение питания драйвера, В (VDD)	2,25	2,5	3,3
Рабочая температура, С°	-55	25	85

3.4 Испытания проводятся на макете отладочной платы МОП ИС1, на которую предварительно устанавливается СВЧ интегральная микросхема ИС1 в корпусе (*QFN24* и *QFN20*), согласно Техническому заданию.

3.5 Для работы цифрового аттенюатора необходимо установить напряжение питания на соответствующем выводе  $VDD\_ATT = +2,5\pm0,1$  В МОП ИС1;

3.6 Для работы буферного усилителя необходимо установить напряжение питания на соответствующем выводе  $VDD = +3,3\pm0,15$  В МОП ИС1;

3.7 Для управления уровнем ослабления цифрового аттенюатора используются выводы *D4*, *D3*, *D2*, *D1/SDI*, *D0/SCK*, *SDO*, *CS/LE*, на которые, за счет использования параллельного и последовательного режима управления, подаются последовательности логических уровней «0» и «1», соответствующие логическим состоянием ЦАТТ, указанным в Техническом задании.

# 4 Описание объекта испытаний ИС2

4.1 СВЧ Интегральная микросхема ИС2 представляет собой набор ФБ, состоящая из смесителя (СМ), усилителя сигнала гетеродина (УСГ), первого и второго усилителя промежуточной частоты (УПЧ1, УПЧ2).

4.2 Условное расположение ФБ на интегральной микросхеме ИС1 представлены на рисунке 4.1. На рис. 4.2 и рис. 4.3 представлены изображения интегральной микросхемы

ИС2 в корпусе QFN32 и QFN24 с наименованием контактных площадок.



Рис. 4.1 – Условное расположение функциональных блоков на интегральной микросхеме

ИС2



Рис 4.2 – Интегральная микросхема ИС2 в корпусе *QFN32* 

Контактные площадки интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32* имеют следующее назначение и обозначение:

- 1,2 N/C: Не подключен/ Земля
- 3 VGATE\_LO: Напряжение смещения смесителя (+5 B)
- 4 VBIAS\_LO: Управление питанием усилителя сигнала гетеродина (+3 B/ 60 мА; +5 B/ 100 мА)
- 5 VDD\_LO: Напряжение питания усилителя сигнала гетеродина (+5 B/ 60-100 мА)
- 6 RF\_IN: ВЧ вход смесителя
- 7 IFA\_IN1+: Дифференциальный вход УПЧ1
- 8 IFA\_IN1-: Дифференциальный вход УПЧ1
- 9 IFA\_OUT1-: Дифференциальный выход УПЧ1
- 10 IFA\_OUT1+: Дифференциальный выход УПЧ1
- 11 VDD\_IFA1: Напряжение питания УПЧ1 (+5 В/ 70 мА)
- 12 IF\_OUT+: Дифференциальный выход ПЧ смесителя
- 13 IF\_OUT-: Дифференциальный выход ПЧ смесителя
- 14 IFA\_IN2+: Дифференциальный вход УПЧ2
- 15 IFA\_IN2-: Дифференциальный вход УПЧ2
- 16 VDD\_IFA2: Напряжение питания УПЧ1 (+5 В/ 70 мА)

17 – IFA\_OUT2-: Дифференциальный выход УПЧ2

18 – IFA\_OUT2+: Дифференциальный выход УПЧ2

19 – LO\_IN: СВЧ вход гетеродина смесителя

20-32 – N/C: Не подключен/ Земля



Рис.4.3 – Интегральная микросхема ИС2 в корпусе QFN24

Контактные площадки интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24* имеют следующее назначение и обозначение:

VDD_LO: Напряжение питания усилителя сигнала гетеродина (+5 B/ 60-
100 мА)
GND_RF: Земля ВЧ входа смесителя
RF_IN: ВЧ вход смесителя
GND_RF: Земля ВЧ входа смесителя
IFA_IN1+: Дифференциальный вход УПЧ1
IFA_IN1-: Дифференциальный вход УПЧ1
IFA_OUT1-: Дифференциальный выход УПЧ1
IFA_OUT1+: Дифференциальный выход УПЧ1
VDD_IFA1: Напряжение питания УПЧ1 (+5В/ 70 мА)
IF_OUT+: Дифференциальный выход ПЧ смесителя
IF_OUT-: Дифференциальный выход ПЧ смесителя
IFA_IN2+: Дифференциальный вход УПЧ2
IFA_IN2-: Дифференциальный вход УПЧ2

14 – VDD\_IFA2: Напряжение питания УПЧ1 (+5В/ 70 мА)

15 – IFA\_OUT2-: Дифференциальный выход УПЧ2

16 – IFA\_OUT2+: Дифференциальный выход УПЧ2

17 – LO\_IN: СВЧ вход гетеродина смесителя

18-22 – N/C: Не подключен/ Земля

23 – VGATE\_LO: Напряжение смещения смесителя (+5 B)

 24 – VBIAS\_LO: Управление питанием усилителя сигнала гетеродина (+3 B/ 60 мА; +5 B/ 100 мА)

4.3 Основные технические характеристики СМ и УСГ, а также УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2, установленные Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР» представлены в таблице 4.1 и 4.2 соответственно.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики СМ и УСГ СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Диапазон частот СВЧ RF, ГГц	1		4,5
Диапазон частот гетеродина LO, ГГц	1		5
Неравномерность Кп в полосе 0,5 ГГц, дБ		0,5	0,8
Диапазон промежуточной частоты IF, ГГц	0,05		0,5
Потери преобразования, дБ		-9	-11
Коэффициент шума, дБ		9	11
Коэффициент отражения на входе RF, дБ		-15	-8
Коэффициент отражения на входе LO, дБ		-15	-10
Коэффициент отражения на входе IF, дБ		-15	-10
Развязка IF-RF, дБ (для UP Conv) <sup>1)</sup>	40	45	60
Развязка LO-IF, дБ <sup>1)</sup>	40	45	60
Развязка RF-IF, дБ (для DOWN Conv) <sup>1)</sup>	40	45	60
Развязка LO-RF, дБ <sup>1)</sup>	40	45	60
Мощность гетеродина Р <sub>LO</sub> , дБ	-6	0	4
Точка 1 дБ компрессии коэффициента	12	14	16
преобразования на входе, дБм	12	14	10
Точка интермодуляционных искажений Зго порядка	10	23	25
на входе, дБм <sup>2)</sup>	17	23	25
Напряжение питания, В	4,75	5	5,25
Потребляемый ток, мА	40	80	100
Рабочая температура, С°	-55	25	85

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,05		0,5
Коэффициент усиления, дБ <sup>1)</sup>	12	13	15
Неравномерность Кп в полосе 100 МГц, дБ		0,5	1
Коэффициент шума, дБ	4	5	7
Точка 1 дБ компрессии Ку на выходе, дБм	14	15	17
Точка интермодуляционных искажений 3го порядка на выходе, дБм <sup>2)</sup>	24	24	27
Обратный коэффициент передачи, дБ	-40	-25	-20
Коэффициент отражения на входе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Коэффициент отражения на выходе, дБ <sup>3)</sup>		-15	-10
Напряжение питания, В	4,75	5	5,25
Потребляемый ток, мА		60	70
Рабочая температура, С°	-55	25	85

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2

4.4 Испытания проводятся на макете отладочной платы МОП ИС2, на которую предварительно устанавливается СВЧ интегральная микросхема ИС2 в корпусе (*QFN32* и QFN24), согласно Техническому заданию.

4.5 Для работы смесителя необходимо установить напряжение смещения на соответствующем выводе *VGATE*  $LO = +5\pm0,2$  В МОП ИС2;

4.6 Для работы усилителя сигнала гетеродина необходимо установить напряжение питания на соответствующих выводах  $VDD_LO = +5\pm0,2$  В и  $VBIAS_LO = +3\pm0,15/+5\pm0,2$  В МОП ИС2;

4.7 Для работы первого и второго усилителя промежуточной частоты необходимо установить напряжение питания на соответствующих выводах  $VDD_IFA1 = +5\pm0,2$  В и  $VDD_IFA2 = +5\pm0,2$  В МОП ИС2;

4.8 В соответствии с обозначением контактных площадок на рис. 4.2 и 4.3 видно, что у СМ дифференциальный выход ПЧ, а у УПЧ1 и УПЧ2 дифференциальный вход/выход. Для преобразования дифференциальных в несимметричные входы/выходы, на макете отладочной платы МОП ИС2 предусмотрены симметрирующие трансформаторы *СТ*.

#### 5 Общие положения

5.1 Цель испытаний

5.1.1 Целью проведения испытаний является измерение параметров СВЧ интегральных микросхем ИС1 и ИС2, заявленных в Техническом задании, на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2.

5.2 Перечень документов, на основании которых проводятся испытания:

5.2.1 Техническое задание на выполнение НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

5.2.2 Настоящая методика испытаний;

5.2.3 ГОСТ 8.395-80 «Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования»;

5.2.4 ГОСТ Р 8.568-97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения»;

5.2.5 ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»;

5.2.6 ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности»;

5.2.7 ГОСТ 12.2.091-2002 (МЭК 61010-1:1990) «Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования»;

5.2.8 ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности»;

5.2.9 ГОСТ 12.1.030-81 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление»;

5.2.10 ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»;

5.2.11 ГОСТ 12.0.004-90 «Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения»;

5.2.12 ГОСТ 12.0.005-84 «Система стандартов безопасности труда. Метрологическое обеспечение в области безопасности труда. Основные положения»;

5.2.13 Постановление 848-70 «Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот».

5.3 Место проведения испытаний

5.3.1 Испытания проводятся на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ФГБОУ ВО «ТУСУР»), г. Томск.

5.4 Организации, участвующие в испытаниях

5.4.1 ФГБОУ ВО «ТУСУР»;

5.4.2 ООО «ЛЭМЗ-Т».

5.5 Обязательность приемки ВП МО РФ испытуемого образца перед проведением испытаний

5.5.1 Приемка ВП МО РФ испытуемого образца перед проведением испытаний не требуется.

5.6 Обеспечение защиты государственной тайны

5.6.1. В соответствии с Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР».

5.7 Конфиденциальность

5.7.1 При проведении испытаний должны соблюдаться требования по конфиденциальности сведений, касающихся выполняемых испытаний и полученных результатов.

5.8 Запрещается передача методик третьим лицам.

### 6 Объем испытаний

6.1 При проведении испытаний предоставляются макеты отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2, для измерения параметров СВЧ интегральных микросхем ИС1 и ИС2 соответственно.

6.2 Количество испытуемых образцов, предоставляемых для испытания:

МОП ИС1 для корпуса *QFN20*-1шт.;

МОП ИС1 для корпуса *QFN24* – 1шт.;

ИС1 в корпусе *QFN20* – 2 шт.;

ИС1 в корпусе *QFN24* – 2 шт.;

МОП ИС2 для корпуса *QFN32* – 1 шт.;

МОП ИС2 для корпуса *QFN24* – 1 шт.;

ИС2 в корпусе *QFN32* – 2 шт.;

ИС2 в корпусе *QFN24* – 2 шт.

6.3 Процесс испытаний для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС1 включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Измерение параметров рассеяния ЦАТТ в диапазоне частот 0,05-10 ГГц, при различных уровнях ослабления сигнала.

Этап 2. Определение значения минимального шага ослабления, глубины регулировки, прямых потерь, коэффициента отражения на входе/выходе ЦАТТ.

Этап 3. Измерение точки 1 дБ компрессии Ку по входу ЦАТТ.

Этап 4. Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ.

Этап 5. Измерение параметров рассеяния и потребления тока БУ в диапазоне частот 0,05-10 ГГц. Проверка работоспособности вывода управления питанием БУ (PD).

Этап 6. Определение значения максимального коэффициента усиления, неравномерности коэффициента передачи в полосе 1 ГГц, обратного коэффициента передачи, коэффициента отражения на входе/выходе БУ.

Этап 7. Измерение точки 1 дБ компрессии Ку по выходу БУ.

Этап 8. Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ.

Этап 9. Измерение коэффициента шума БУ.

Испытания для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС1 проводятся в частотном диапазоне от 0,05 до 10 ГГц. Напряжение питание драйвера цифрового аттенюатора и буферного усилителя составляет +2,5±0,1 В и +3,3±0,15 В соответственно. Для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка используются две несущие с равной мощностью минус 10 дБм и разностью частот 1 МГц.

6.4 Процесс испытаний для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС2 включается в себя следующие этапы:

Этап 1. Измерение потребления тока и коэффициента преобразования СМ в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ в диапазоне частот 0,05-10 ГГц.

Этап 2. Измерение коэффициента преобразования СМ в диапазоне частот 0,05-10 ГГц, в зависимости от мощности сигнала гетеродина при частоте ПЧ 150 МГц.

Этап 3. Измерение коэффициента отражения СМ по входу ВЧ, Гетеродина и выходу ПЧ.

Этап 4. Определение значения потерь на преобразовании, неравномерности коэффициента передачи в полосе 0,5 ГГц.

Этап 5. Измерение точки 1 дБ компрессии коэффициента преобразования СМ по входу.

Этап 6. Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка СМ по входу.

Этап 7. Измерение параметров рассеяния и потребление тока УПЧ1 и УПЧ2 в диапазоне частот 0,05-5 ГГц.

471

Этап 8. Определение значения максимального коэффициента усиления, неравномерности коэффициента передачи, обратного коэффициента передачи, коэффициента отражения по входу/выходу УПЧ1 и УПЧ2.

Этап 9. Измерение точки 1 дБ компрессии Ку по выходу УЧП1 и УПЧ2.

Этап 10. Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2.

Этап 11. Измерение коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2.

Испытания для измерения основных параметров, указанных в ТЗ, интегральной микросхемы ИС2 проводятся в частотном диапазоне от 0,05 до 10 ГГц. Напряжение питания УСГ, УПЧ1 и УПЧ2 составляет +5±0,2 В. Напряжение управлением питанием УСГ составляет +3±0,15/+5±0,2 В. Напряжение смещения СМ составляет +5±0,2 В. Для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка используются две несущие с равной мощностью минус 10 дБм и разностью частот 1 МГц.

6.5 Объем испытаний для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС1 представлен в таблице 6.1.

Пункт	Этап ис-		Погрешность
методики	пытания	измерлемые параметры	измерений
14	Этап 1	Параметры рассеяния ЦАТТ	Не более 0,1 дБ
14	Этап 2	Минимальный шаг ослабления, глубина ре- гулировки ослабления, прямые потерь, ко- эффициент отражения на входе/выходе ЦАТТ	Не более 0,1 дБ
15	Этап 3	Точка 1 дБ компрессии Ку по входу ЦАТТ	Не более 0,1 дБм
16	Этап 4	Точка интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ	Не более 0,1 дБм
14	14Этап 5Параметры рассеяния и потребление тока БУ, проверка работоспособности вывода PD		Не более 0,1 дБ
14	Этап б	Максимальный коэффициент усиления, неравномерность коэффициента передачи в полосе 1 ГГц, обратный коэффициент передачи, коэффициент отражения на вхо- де/выходе БУ	Не более 0,1 дБ
15	Этап 7	Точка 1 дБ компрессии Ку по выходу БУ	Не более 0,1 дБм

Таблица 6.1 – Объем испытаний ИО ИС1

472

16	Этап 8	Точка интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ	Не более 0,1 дБм
17	Этап 9	Коэффициент шума	Не более 0,1 дБ

6.6 Объем испытаний для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС1 представлен в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Объем испытаний ИО ИС2

Пункт	Этап ис-		Попуск	
методики	пытания	параметры	допуск	
		Коэффициент преобразования смесителя		
18	Этап 1	СМ в зависимости от частоты сигналов ВЧ и	Не более 0,1 дБ	
		ПЧ, ток потребления		
		Коэффициент преобразования СМ в диапа-		
18	Этап 2	зоне рабочих частот, в зависимости от мощ-	Не более 0,1 дБ	
		ности сигнала гетеродина		
10	Этап 3	Коэффициент отражения СМ по входу ВЧ,	Не более 0.1 лБ	
17	Jian J	Гетеродина и выходу ПЧ		
		Потери на преобразовании, неравномер-		
18	Этап 4	ность коэффициента передачи в полосе 0,5	Не более 0,1 дБ	
		ГГц.		
20	Этап 5	Точка 1 дБ компрессии коэффициента пре-	Ηο δοποο Ο 1 πΕλι	
20	Jian J	образования по входу СМ	пе облее 0,1 двм	
21	Этап б	Точка интермодуляционных искажений 3-го	Не более 0.1 лБм	
21		порядка по входу СМ		
22	Этап 7	Параметры рассеяния и потребление тока	Не более 0 1 лБ	
		УПЧ1 и УПЧ2		
		Максимальный коэффициент усиления, не-		
		равномерность коэффициента передачи, об-		
22	Этап 8	ратный коэффициент передачи, коэффици-	Не более 0,1 дБ	
		ент отражения по входу/выходу УПЧ1 и		
		УПЧ2		
23	Этап 0	Точка 1 дБ компрессии коэффициента пре-	Ηε более 0.1 πБм	
23	Jiall 9	образования по выходу УПЧ1 и УПЧ2		
24	Этен 10	Точка интермодуляционных искажений 3-го	Не более 0 1 лБм	
<u> </u>		порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2		
25	Этап 11	Коэффициент шума УПЧ1 и УПЧ2	Не более 0,1 дБ	

#### 7 Условия и порядок испытаний

7.1 Условия проведения испытаний

7.1.1 В соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.395-80 измерения проводятся при нормальных климатических условиях:

7.1.1.1 Температура окружающей среды от 20 до 27° С;

7.1.1.2 Относительная влажность не более 80 %; (при температуре выше 30 градусов влажность не должна превышать 70%);

7.1.1.3 Атмосферное давление от 86 до 106 кПа (от 630 до 800 мм. рт. ст.).

7.1.2 Переменное напряжение первичного источника электропитания 220 В  $\pm 10\%$ , 50/60 Гц и 380 $\pm 20$  В, 3-фазное, 50 $\pm 0.5$  Гц;

7.2 Критерии начала и прекращения испытаний

7.2.1 Критерии начала измерений, состав предоставляемых макетных образцов ОИ, их комплектность и техническое состояние описаны в соответствующих разделах методики измерений.

7.2.2 Критерии прекращения измерений:

7.2.2.1 Полнота проведенных измерений в соответствии с п. 6 настоящей методики;

7.2.2.2 Несоответствие типономинала ИО заданному;

7.2.2.3 Выход из строя ИО в процессе проведения измерений;

7.2.2.4 Механические повреждения ИО;

7.2.2.5 Отклонение условий проведения испытаний от нормальных, заданных настоящей методикой;

7.2.2.6 Иные нештатные ситуации, способные повлиять на результаты измерений.

7.3 Условия перерыва в испытаниях

7.3.1 Допускаются перерывы в испытаниях, если это не приводит к нарушению требований настоящей методики, не нарушает технических свойств образцов.

7.4 Условия хранения образцов в течение проведения испытаний

7.4.1 Требования к хранению образцов ИС1 и ИС2 не предъявляются.

7.5 Безопасность проведения испытаний

7.5.1 При выполнении испытаний соблюдают требования ГОСТ Р 12.1.019-2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.3.019-80 «Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности».

7.5.2 Средства испытаний должны удовлетворять требованиям безопасности по ГОСТ 22261-94 и ГОСТ Р 51350-99.

7.5.3 Электрические приборы должны быть заземлены в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81.

7.5.4 При испытаниях должны применяться средства защиты по ГОСТ 12.4.011-89.

7.6 Порядок взаимодействия организаций, участвующих в испытаниях

7.6.1 Устанавливается в соответствии с действующей нормативно-правовой базой.

7.7 Допуск к проведению испытаний

7.7.1 К проведению испытаний допускаются лица, обладающие соответствующей квалификацией, изучившие техническое описание приборов, методику испытаний, ознакомленные с техникой безопасности при проведении испытаний.

# 8 Материально-техническое обеспечение испытаний

8.1 Перечень материально-технического обеспечения, применяемого в испытаниях образцов, приведен в табл. 8.1.

8.2 К описанным в табл. 8.1 техническим средствам должна прилагаться техническая документация.

8.3 Измерительные средства могу быть заменены аналогичными, погрешность которых не превышает погрешностей, установленных требованиями настоящей методики испытаний. Функционал применяемых в этом случае средств испытаний должен обеспечивать совместимость с другими устройствами, применяемыми при испытаниях.

$T_{-} \sigma_{} 0.1$	N /		v
таолина в г –	илатериально-	гехническое орес	печение измерении
raomiqu o.r	inter opniandino		ne remie nomepennin

№ п/п	Наименование	Тип и норма- тивные до- кументы	Назначение	Измеряемые характеристики	Метрологические и технические характеристики
1	Двухканальный ис- точник питания с возможностью из- менения тока и на- пряжения	Agilent E3646A S/N MY40013280	Установка рабочего ре- жима по на- пряжению		Погрешность ус- тановки по на- пряжению не более 10 мВ, по току не более 1 мА. Погрешность из- мерения не более 1%

# Продолжение таблицы 8.1

2	Векторный анализа- тор цепей с опцией скалярного измере- ния коэффициента преобразования смесителя	R&S ZVA40	Измерение параметров рассеяния, измерение параметров смесителя	Измерение мо- дуля и фазы па- раметров рас- сеяния, измере- ние коэффици- ента преобразо- вания	Диапазон частот: 10 МГц – 40 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не бо- лее 0,1 дБ; по фазе: не более 2°
	Векторный анализа- тор цепей с опцией скалярного измере- ния коэффициента преобразования смесителя	Keysight PNA-X N5247B	Измерение коэффици- ента шума	Измерение мо- дуля и фазы па- раметров рас- сеяния, измере- ние коэффици- ента преобразо- вания	Диапазон час- тот: 10 МГц – 67 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не бо- лее 0,1 дБ; по фазе: не более 2°
	Генератор сигналов	R&S SMB 100A	Формирова- ние СВЧ сигнала	_	100 кГц – 20 ГГц
	Векторный анализа- тор цепей	Agilent E5071C	Формирова- ние СВЧ сигнала	_	100 кГц – 20 ГГц

# 9 Требования к показателям точности испытаний

9.1 Переделы допускаемой относительной погрешности по данной методике измерений зависят от выбранных СИ и диапазонов испытаний;

9.2 Погрешность измерения параметров рассеяния зависит от рабочей частоты и уровня мощности и должна составлять не более 0,1 дБ;

9.3 Погрешность измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка и точки 1 дБ компрессии должна составлять не более 0,1 дБм;

9.4 Погрешность измерения коэффициента шума должна составлять не более 0,1 дБ.
# 10 Метод измерений при испытаниях для измерения параметров СВЧ интегральных микросхем ИС1 и ИС2

10.1 Измерение параметров рассеяния ИО выполняется прямым методом при использовании векторного анализатора цепей (ВАЦ), откалиброванного в соответствии с Технической документацией и описанием методики калибровки ВАЦ. Измерение спектральных составляющих выполняется при использовании анализатора спектра (AC).

#### 11 Измерительная установка для проведения испытаний МИП ИС1

11.1 Измерение параметров ИО МИП ИС1 проводится в девять этапов. На рис. 11.1 представлена схема измерительной установки, используемая при измерении параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по входу ЦАТТ и драйвера ЦАТТ интегральной микросхемы ИС1 на первом и третьем этапе пункта 6.3 настоящей методики.



Рис. 11.1 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по входу ЦАТТ и драйвера ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рис. 11.2 представлена схема измерительной установки, используемая при измерении точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ на четвертом этапе пункта 6.3 настоящей методики.



Рис. 11.2 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рис. 11.3 представлена схема измерительной установки для проведения измерений параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы на пятом и седьмом этапе пункта 6.3 настоящей методики.





На рис. 11.4 представлена схема измерительной установки для проведения измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ на восьмом этапе пункта 6.3 настоящей методики.



Рис. 11.4 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рис. 11.5 представлена схема измерительной установки для проведения измерения коэффициента шума БУ на девятом этапе пункта 6.3 настоящей методики.



Рис. 11.5 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

11.2 Состав измерительной установки для проведения испытаний ИО интегральной микросхемы ИС1 представлен в табл. 11.1.

№ п/п	Обозначение	Определение	Тип
1	ИО	Испытуемый образец интегральной мик- росхемы ИС1, помещенный в контактное устройство КУ	
2	КУ	Контактное устройство	QFN20, QFN24
3	МОП ИС1	Макет отладочной платы для интеграль- ной микросхемы ИС1	_
4	Кабель СВЧ	СВЧ коаксиальный соединительный ка- бель (волновое сопротивление 50 Ом)	_
5	КС	Кабель электрический соединительный (используются для подключения выво- дов МИП ИС1 к источнику питания)	_

T (	111	C			
Гаолина	-	Состав	измерит	гельнои	vстановки
1.000111140		000100			J • 1 • 1 • 2 1 • 1

Продолжение таблицы 11.1

6	ВАЦ	Векторный анализатор цепей	R&S ZVA40
7	AC	Анализатор спектра	Agilent E4448A
9	Кабель плоский Кабель, используемый для подключения МИП ИС1		_
10	Плата управле- ния (ПУ)	Устройство, позволяющее осуществлять управление питанием МОП ИС1 и драй- вером ЦАТТ для установления уровня ослабления сигнала	ЛВЦР.468382.004
11	РК	Разделительный конденсатор	_
13	СМ	Смеситель для проведения измерений точки интермодуляционных искажений 3-го порядка	_
14	ГШ	Внешний генератор шума	_

11.3 Испытания проводятся на макете отладочной платы МОП для СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в различных вариантах корпуса (*QFN24*, *QFN20*), установленным Техническим заданием на НИР шифр (Поиск 2 – ТУСУР). СВЧ Интегральная микросхема ИС1 (в корпусе *QFN24* или *QFN20*) помещается на макет отладочной платы МОП ИС1. Кабели соединительные КС и кабели СВЧ соединяют макет испытательной платы МИП ИС1 с источником питания, векторным анализатором цепей, анализатором спектра, генератором шума в соответствии со схемами измерительных установок.

#### 12 Измерительная установка для проведения испытаний МИП ИС2

12.1 Измерение параметров ИО МОП ИС2 выполняется в одиннадцать этапов. На рис. 12.1 представлена схема измерительной установки, используемая при измерении коэффициента преобразования смесителя, в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ; коэффициента преобразования смесителя в диапазоне рабочих частот, в зависимости от мощности сигнала гетеродина на первом и втором этапе пункта 6.4 настоящей методики. Также данная схема используется для измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ на пятом этапе пункта 6.4 настоящей методики.



Рис. 12.1 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента преобразования СМ при различных зависимостях входных параметров сигнала ВЧ и ПЧ СВЧ, и для изме-

рения точки 1 дБ компрессии по входу СМ интегральной микросхемы ИС2

На рис. 12.2 представлена схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ на шестом этапе пункта 6.4 настоящей методики.



Рис. 12.2 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2

На рис. 12.3 представлена схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 и УПЧ2 на седьмом и девятом этапе пункта 6.4 настоящей методики.



Рис. 12.3 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 (схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

На рис. 12.4 представлена схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2 на десятом этапе пункта 6.4 настоящей методики.



Рис. 12.4 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2

(схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

На рис. 12.5 представлена схема измерительной установки для измерения коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2 на одиннадцатом этапе пункта 6.4 настоящей методики.



Рис. 12.5 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 (схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

12.2 Состав измерительной установки для проведения испытаний ИО интегральной микросхемы ИС2 представлен в табл. 12.1.

№ п/п	Обозначение Определение		Тип
1	ИО	Испытуемый образец интегральной мик- росхемы ИС2, помещенный в контактное устройство КУ	_
2	КУ	Контактное устройство	QFN32, QFN24
3	МИП ИС2	МИП ИС2 Макет испытательной платы для инте- гральной микросхемы ИС2	
4	Кабель СВЧ Коаксиальный соединительный ка- бель (волновое сопротивление 50 Ом)		_
5	КС	Кабель электрический соединительный (используются для подключения выводов МИП ИС2 к источнику питания)	_
6	ВАЦ	Векторный анализатор цепей	R&S ZVA40
7	ВАЦ	Векторный анализатор цепей	Keysight PNA-X
8	Плата управле- ния (ПУ)	Устройство, позволяющее осуществлять управление питанием МОП ИС2	ЛВЦР.468382.004
9	AC	Анализатор спектра используется для из- мерения спектральных составляющих на выходе Смесителя	Agilent E4448A
10	ГС1	Генератор СВЧ сигналов. Используется для формирования СВЧ сигнала на RF входе Смесителя СМ	Agilent E5071C
11	ГС2	Генератор СВЧ сигналов. Используется для формирования СВЧ сигнала на входе LO Смесителя СМ	R&S SMB 100A
12	Т	Симметрирующий трансформатор	-
13	РК	Разделительный конденсатор	_
14	СМ	Смеситель для проведения измерений точ- ки интермодуляционных искажений 3-го порядка	_
15	ГШ	Внешний генератор шума	

Таблица 12.1 – Состав измерительной установки

12.3 Испытания проводятся на макете отладочной платы МОП для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в различных вариантах корпуса (*QFN32*, *QFN24*), установленным Техническим заданием на НИР шифр (Поиск 2 – ТУСУР). СВЧ интегральная микросхема ИС2 (в корпусе *QFN32* или *QFN24*) помещается на макет отладочной платы МОП ИС1. Кабели соединительные КС и кабели СВЧ соединяют макет испытательной платы МИП ИС2 с источником питания, векторным анализатором цепей, анализатором спектра, генератором шума.

#### 13 Подготовка к выполнению испытаний

13.1 Установить и заземлить приборы в соответствии с инструкциями по эксплуатации;

13.2 Обеспечить свободный доступ к ИО;

13.3 Включить необходимое измерительное оборудование, проверить и подготовить режимы работы в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Установить необходимые значения параметров приборов в соответствии с измеряемой схемой и частотными характеристиками устройства. Установить необходимые значения параметров (в соответствии с проводимыми измерениями), количество точек измерения принять равным 2001 (минимальное значение);

13.3.1 Условия измерения ИС1 для МОП: полоса частот 0,05...10 ГГц, количество точек – 2001, полоса фильтра ПЧ – 1 кГц, включить АТТ 10 дБ на входе измерительного порта ВАЦ, подключенного к выходу БУ во избежание перегрузки измерительного приёмника, входная мощность для измерения S-параметров «минус 15 дБм», для измерения выходной мощность установить развёртку по входной мощности от минус 25 до 5 дБм.

13.3.2 Условия измерения ИС2 для МОП: полоса частот 0,05...10 ГГц, количество точек – 2001, полоса фильтра ПЧ – 1 кГц, входная мощность по ВЧ для измерения КП «минус 15 дБм», мощность сигнала гетеродина – -3...3 дБм, фиксируемая промежуточная частота – 150 МГц, верхняя настройка гетеродина  $f_{IF} = f_{LO}-f_{RF}$ , для установления уровня Р1дБ по входу необходимо установить развёртку по выходной мощности прибора от минус 10 до 17 дБм.

13.4 Провести калибровку используемого оборудования в соответствии с Технической документацией. Рекомендуется перед проведением калибровки прогреть измерительные приборы в течение 30 минут. После выполнения калибровки запрещается изменять режимы и значение параметров, установленных в п. 12.3;

13.5 Установить и подготовить макет отладочной платы ИО в соответствии со схемой измерительной установки;

13.6 Внести в протокол (Приложение 1, 2) условия проведения испытаний.

## 14 Порядок проведения измерения параметров рассеяния цифрового аттенюатора и буферного усилителя СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

14.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.1, для измерения параметров рассеяния ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN24*;

14.2 Задать режим работы измерительного оборудования в соответствии с Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

14.3 На персональном компьютере запустить программу, отвечающую за работу платы управления (при необходимости);

14.4 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

14.5 Подать на контакт *SER\_PAR* логический уровень «0» при помощи платы управления, для включения режима управления с помощью параллельного кода и задать уровень ослабления сигнала ЦАТТ «0» дБ;

14.6 На векторном анализаторе цепей зафиксировать значение параметров рассеяния цифрового аттенюатора на частотах от 0,05 до 10 ГГц, с шагом 0,5 ГГц;

14.7 Записать значение параметров рассеяния ЦАТТ в таблицу П.1-П.4 протокола испытаний (Приложение 1);

14.8 При помощи платы управления увеличить уровень ослабления сигнала до «31» дБ, с шагом 1 дБ;

14.9 Зафиксировать соответствующие значения параметров рассеяния в таблицу П.1-П.4 протокола испытаний (Приложение 1);

14.10 Подать на контакт *SER\_PAR* логический уровень «1» при помощи платы управления, для включения режима управления с помощью последовательного кода;

14.11 При помощи программы для платы управления задать уровень ослабления сигнала «0» дБ, в режиме последовательного кода и проверить на ВАЦ соответствующий уровень ослабления;

14.12 Изменить уровень ослабления сигнала, до подтверждения работы управления ЦАТТ с помощью последовательного кода;

14.13 Произвести расчет минимального шага ослабления, глубины регулировки ослабления, прямых потерь, коэффициента отражения на входе/выходе цифрового аттенюатора;

14.14 Полученные результаты записать в протокол испытаний (Приложение 1);

488

14.15 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.3 для измерения параметров рассеяния БУ;

14.16 Проверить работоспособность контакта *PD*. Для этого на соответствующий контакт макета отладочной платы СВЧ интегральной микросхемы МОП ИС1 необходимо подать «0» для выключения БУ и «1» для соответствующего включения, при помощи платы управления. Результаты внести в протокол (Приложение 1);

14.17 Записать значение параметров рассеяния БУ в таблицу П.7 протокола испытаний (Приложение 1);

14.18 Измерить значение падения напряжение на соответствующем резисторе (1 Ом) и рассчитать значение потребление тока БУ. Результаты записать в протокол (Приложение 1);

14.19 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС1;

14.20 Разобрать измерительную установку;

14.21 Произвести расчет максимального коэффициента усиления, неравномерности коэффициента передачи в полосе частот 1 ГГц, обратного коэффициента передачи, коэффициента отражения на входе/выходе буферного усилителя;

14.22 Полученные результаты и данные записать в протокол испытаний (Приложение 1);

14.23 Указать количество листов в протоколе испытаний;

14.24 Подписать и утвердить протокол испытаний;

14.25 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить плату управления от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

14.26 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.1, для измерения параметров СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN20*;

14.27 Повторить п.14.5-п.14.25 для СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QNF20.

## 15 Измерение точки 1 дБ компрессии по входу/выходу цифрового аттенюатора и буферного усилителя СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

15.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.1, для измерения точки 1 дБ компрессии по входу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN24*;

489

15.2 Задать режим работы измерительного оборудования для измерения точки 1 дБ компрессии в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР», диапазон входной мощности должен составлять 0–20 дБм;

15.3 На персональном компьютере запустить программу, отвечающую за работу платы управления (при необходимости);

15.4 Подключить плату управления к персональному компьютеру

15.5 Подать на контакт *SER\_PAR* логический уровень «1» при помощи платы управления, для включения режима управления с помощью параллельного кода и задать уровень ослабления сигнала ЦАТТ «0» дБ;

15.6 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки 1 дБ компрессии;

15.7 Записать полученные результаты измерения точки 1 дБ компрессии по входу цифрового аттенюатора ЦАТТ в таблицу П.5 протокола испытаний (Приложение 1);

15.8 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.3, для измерения точки 1 дБ компрессии по выходу БУ;

15.9 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки 1 дБ компрессии;

15.10 Записать полученные результаты измерения точки 1 дБ компрессии по выходу БУ в таблицу П.8 протокола испытаний (Приложение 1);

15.11 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС1;

15.12 Разобрать измерительную установку;

15.13 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 1);

15.14 Указать количество листов в протоколе испытаний;

15.15 Подписать и утвердить протокол испытаний;

15.16 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

15.17 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.1, для измерения точки 1 дБ компрессии по входу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN20*;

15.18 Повторить п.15.5-п.15.16 для СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *ONF20*.

# 16 Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу цифрового аттенюатора и буферного усилителя СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

16.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.2, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN24*;

16.2 Задать режим работы измерительного оборудования для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

16.3 На персональном компьютере запустить программу, отвечающую за работу платы управления (при необходимости);

16.4 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

16.5 Подать на контакт *SER\_PAR* логический «1» при помощи платы управления, для включения режима управления с помощью параллельного кода и задать уровень ослабления сигнала «0» дБ;

16.6 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка;

16.7 Записать полученные результаты измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу цифрового аттенюатора ЦАТТ в таблицу П.6 протокола испытаний (Приложение 1);

16.8 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.4, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ;

16.9 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка;

16.10 Записать полученные результаты измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ в таблицу П.9 протокола испытаний (Приложение 1);

16.11 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС1;

16.12 Разобрать измерительную установку;

16.13 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 1);

16.14 Указать количество листов в протоколе испытаний;

16.15 Подписать и утвердить протокол испытаний;

16.16 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

16.17 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.2, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QNF20* 

491

16.18 Повторить п.16.5-п.16.16 для СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *ONF20*.

# 17 Измерение коэффициента шума буферного усилителя СВЧ интегральной микросхемы ИС1

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

17.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.5, для измерения коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QFN24*;

17.2 Выполнить калибровку анализатора спектра в плоскости Анализатор спектра (+28 В) – ГШ – Кабель СВЧ – Анализатор спектра в соответствии с Технической документацией: Анализатор спектра (+28 В) – ГШ – Кабель СВЧ – МОП ИС1 – РК – Анализатор спектра;

17.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

17.4 Провести измерение коэффициента шума СВЧ интегральной микросхемы ИС1;

17.5 Полученные результаты записать в таблицу П.10 протокола испытаний (Приложение 1);

17.6 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС1;

17.7 Разобрать измерительную установку;

17.8 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 1);

17.9 Указать количество листов в протоколе испытаний;

17.10 Подписать и утвердить протокол испытаний;

17.11 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

17.12 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 11.5, для измерения коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе *QNF20*;

17.13 Повторить п.17.3-п.17.11 для СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QNF20.

18 Измерение коэффициента преобразования смесителя в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ/мощности сигнала гетеродина СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

18.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.1, для измерения коэффициента преобразования СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*, в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ, а также в зависимости от мощности сигнала гетеродина;

18.2 Задать режим работы измерительного оборудования в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

18.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

18.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

18.5 Измерить значение падения напряжения на соответствующем резисторе (1 Ом) и рассчитать значение потребления тока УПЧ1. Результаты записать в протокол (Приложение 2);

18.6 На векторном анализаторе цепей измерить коэффициент преобразования СМ в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ;

18.7 Записать полученные результаты измерения в таблицу П.1 протокола испытаний (Приложение 2);

18.8 На векторном анализаторе цепей измерить коэффициент преобразования СМ в зависимости от мощности сигнала Гетеродина;

18.9 Записать полученные результаты измерения в таблицу П.2 протокола испытаний (Приложение 2);

18.10 Определить значение потерь на преобразовании и неравномерность коэффициента передачи в полосе частот 0,5 ГГц;

18.11 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

18.12 Разобрать измерительную установку;

18.13 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

18.14 Указать количество листов в протоколе испытаний;

18.15 Подписать и утвердить протокол испытаний;

18.16 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

18.17 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.1, для измерения коэффициента преобразования СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*, в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ, а также в зависимости от мощности сигнала гетеродина;

18.18 Повторить п.18.3-п.18.16 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *ONF24*.

# 19 Измерение коэффициента отражения смесителя по входу ВЧ, Гетеродина и выходу ПЧ СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

19.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.2, для измерения коэффициента отражения по входу ВЧ, Гетеродина и выходу ПЧ СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

19.2 Задать режим работы измерительного оборудования в соответствии с Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

19.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

19.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

19.5 Подключить векторный анализатор цепей к соответствующему входу ВЧ СМ;

19.6 Подать сигнал Гетеродина на вход смесителя СМ;

19.7 Измерить коэффициент отражения по входу ВЧ СМ;

19.8 Записать полученные результаты в таблицу П.3 протокола испытаний (Приложение 2);

19.9 Подключить векторный анализатор цепей к соответствующему входу Гетеродина на макете отладочной платы МОП ИС2;

19.10 Ко входу ВЧ и выходу ПЧ подключить нагрузку 50 Ом;

19.11 Измерить коэффициент отражения по входу Гетеродина смесителя СМ;

19.12 Записать полученные результаты в таблицу П.3 протокола испытаний (Приложение 2);

19.13 Подключить векторный анализатор цепей к выходу ПЧ смесителя СМ;

19.14 Измерить коэффициент отражения по выходу ПЧ смесителя СМ;

19.15 Записать полученные результаты в таблицу П.3 протокола испытаний (Приложение 2);

19.16 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

19.17 Разобрать измерительную установку;

19.18 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

19.19 Указать количество листов в протоколе испытаний;

19.20 Подписать и утвердить протокол испытаний;

19.21 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

19.22 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.2, для измерения коэффициента отражения по входу ВЧ, Гетеродина и выходу ПЧ СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

19.23 Повторить п.19.3-п.19.21 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе QNF24.

# 20 Измерение точки 1 дБ компрессии по входу смесителя СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

20.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.1, для измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

20.2 Задать на векторном анализаторе цепей диапазон развертки входной мощности ВЧ при фиксированных частотах ВЧ и ПЧ, а также мощности Гетеродина, в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

20.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

20.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

20.5 Установить на источнике питания напряжение, соответствующее питающему напряжению СМ;

20.6 На векторном анализаторе цепей запустить развертку входной мощности и измерить уровень точки 1 дБ компрессии по входу СМ;

20.7 Записать полученные результаты измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ в таблицу П.4 протокола испытаний (Приложение 2);

20.8 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

20.9 Разобрать измерительную установку;

20.10 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

20.11 Указать количество листов в протоколе испытаний;

20.12 Подписать и утвердить протокол испытаний;

20.13 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

20.14 Собрать измерительную установки согласно рис. 12.1, для измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24* 

20.15 Повторить п.20.3-п.20.13 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе QNF24.

# 21 Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу смесителя СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

21.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.2, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

21.2 Задать режим работы векторного анализатора цепей для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

21.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

21.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

21.5 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ;

21.6 Записать полученные результаты измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу смесителя СМ в таблицу П.5 протокола испытаний (Приложение 2);

21.7 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

21.8 Разобрать измерительную установку;

21.9 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

21.10 Указать количество листов в протоколе испытаний;

21.11 Подписать и утвердить протокол испытаний;

21.12 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

21.13 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.2, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

21.14 Повторить п.21.3-п.21.12 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе QNF24.

## 22 Измерение параметров рассеяния первого и второго усилителя промежуточной частоты СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

22.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения параметров рассеяния УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

22.2 Задать режим работы измерительного оборудования в соответствии с Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

22.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

22.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

22.5 Измерить значение падения напряжения на соответствующем резисторе (1 Ом) и рассчитать значение потребления тока УПЧ1. Результаты записать в протокол (Приложение 2);

22.6 Измерить и записать значения параметров рассеяния УПЧ1 в таблицу П.6 протокола испытаний (Приложение 2);

22.7 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

22.8 Разобрать измерительную установку;

22.9 Снять измеренные значения максимального коэффициента усиления, неравномерности коэффициента передачи, обратного коэффициента передачи, коэффициента отражения на входе/выходе первого усилителя промежуточной частоты УПЧ1;

22.10 Полученные результаты и данные записать в протокол испытаний (Приложение 2);

22.11 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения параметров рассеяния УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

22.12 Повторить п.22.3-п.22.9 для измерения параметров рассеяния УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

22.13 Записать значение параметров рассеяния УПЧ2 в таблицу П.7 протокола испытаний (Приложение 2); 22.14 Указать количество листов в протоколе испытаний;

22.15 Подписать и утвердить протокол испытаний;

22.16 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

22.17 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения параметров рассеяния УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

22.18 Повторить п.22.3-п.22.16 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе QNF24.

# 23 Измерение точки 1 дБ компрессии по выходу первого и второго усилителя промежуточной частоты СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

23.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

23.2 Задать режим работы векторного анализатора цепей для измерения точки 1 дБ компрессии в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР», диапазон входной мощности должен составлять от минус 5 до +5 дБм;

23.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

23.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

23.5 На векторном анализаторе цепей произвести измерение точки 1 дБ компрессии;

23.6 Записать полученные результаты измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 в таблицу П.8 протокола испытаний (Приложение 2);

23.7 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

23.8 Разобрать измерительную установку;

23.9 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

23.10 Повторить п.23.3-п.23.8 для измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

23.11 Записать полученные результаты измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ2 в таблицу П.9 протокола испытаний (Приложение 2); 23.12 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

23.13 Указать количество листов в протоколе испытаний;

23.14 Подписать и утвердить протокол испытаний;

23.15 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

23.16 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.3, для измерения точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

23.17 Повторить п.23.3-п.23.15 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QNF24*.

24 Измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу первого и второго усилителя промежуточной частоты СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

24.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.4, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

24.2 Задать режим работы векторного анализатора цепей для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка в соответствии с условиями из Технического задания на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

24.3 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

24.4 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2;

24.5 Запустить на векторном анализаторе цепей измерение точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1;

24.6 Записать полученные результаты измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 в таблицу П.10 протокола испытаний (Приложение 2);

24.7 Отключить плату управления от макета отладочной платы МОП ИС2;

24.8 Разобрать измерительную установку;

24.9 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.4, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

24.10 Повторить п.24.3-п.24.8 для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ2;

24.11 Записать полученные результаты измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ2 в таблицу П.11 протокола испытаний (Приложение 2);

24.12 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

24.13 Указать количество листов в протоколе испытаний;

24.14 Подписать и утвердить протокол испытаний;

24.15 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

24.16 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.4, для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

24.17 Повторить п.24.3-п.24.15 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QNF24*.

# 25 Измерение коэффициента шума первого и второго усилителя промежуточной частоты СВЧ интегральной микросхемы ИС2

Измерения проводятся последовательно, в соответствии с порядком, приведенным ниже.

25.1 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.5 для измерения коэффициента шума УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN32*;

25.2 Задать режим работы измерительного оборудования в соответствии с Техническим заданием на НИР шифр «Поиск 2 – ТУСУР»;

25.3 Выполнить калибровку анализатора спектра в плоскости Анализатор спектра (+28 В) – ГШ – Кабель СВЧ – Анализатор спектра в соответствии с Технической документацией:

25.4 Подключить макет отладочной платы МОП ИС2 в соответствии со схемой измерительной установки: Анализатор спектра (+28 В) – ГШ – Кабель СВЧ – МОП ИС2 – Кабель СВЧ – РК – Анализатор спектра;

25.5 Подключить плату управления к персональному компьютеру;

25.6 При помощи платы управления подать напряжение питания на соответствующие выводы макета отладочной платы МОП ИС2

25.7 Провести измерение коэффициента шума УПЧ1 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

25.8 Отключить плату управления от персонального компьютера;

25.9 Разобрать измерительную установку;

25.10 Полученные результаты для УПЧ1 записать в таблицу П.12 протокола испытаний (Приложение 2);

25.11 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.5 для измерения коэффициента шума УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

25.12 Повторить п.25.4-п.25.9 для измерения коэффициента шума УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2;

25.13 Полученные результаты для УПЧ2 записать в таблицу П.13 протокола испытаний (Приложение 2);

25.14 Внести необходимые данные в протокол испытаний (Приложение 2);

25.15 Указать количество листов в протоколе испытаний;

25.16 Подписать и утвердить протокол испытаний;

25.17 При выявлении дефекта в результате испытаний, отключить напряжение от макета испытательной платы, отключить измерительное оборудование, сообщить ответственному за испытания, в случае необходимости заменить испытуемый образец;

25.18 Собрать схему измерительной установки согласно рис. 12.5 для измерения коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе *QFN24*;

25.19 Повторить п.25.4-п.25.17 для СВЧ интегральной микросхемы ИС2 в корпусе QNF24.

501

#### 26 Оформление результатов испытаний

26.1 Результаты испытаний оформляют в соответствующем протоколе испытаний для ИС1 и ИС2;

26.2 В протоколе приводятся условия, при которых проводились испытания, а также режимы работы средств измерений;

26.3 Результаты испытаний удостоверяют лица, проводившие измерения параметров испытуемых образцов. При необходимости протокол подписывается административно-ответственным лицом и заверяется печатью организации, проводившей испытания;

26.4 Протокол может сопровождаться переносными носителями информации, содержащими файлы с результатами испытаний.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Лабораторные работы по современным технологиям и системам автоматизированного измерения на СВЧ

# РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

# «Современные технологии и системы автоматизированного измерения на СВЧ»

для слушателей повышения квалификации, студентов и аспирантов

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

#### СКАЛЯРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение структуры и принципа работы скалярного анализатора (САЦ) цепей Р2М.

#### 2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

#### 2.1 Требования к оборудованию и программному обеспечению

Для выполнения лабораторной работы необходимы:

- САЦ серии Р2М (или эмулятор);
- полосовой фильтр (или S2P-файл для эмулятора);
- усилитель и источник питания.

2.2 Структура и принцип работы САЦ серии Р2М

САЦ состоит из следующих частей:

- измерительный блок, включающий в себя генератор зондирующего сигнала и трёхканальный измеритель постоянного напряжения;
- детектор, преобразующий СВЧ-сигнал в постоянное напряжение;
- датчик КСВН, преобразующий в постоянное напряжение отражённый от исследуемого устройства СВЧ-сигнал;
- компьютер, управляющий измерительным блоком, обрабатывающий и отображающий результаты измерения.

Типовая схема измерения приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема измерения коэффициентов отражения и передачи

Зондирующий сигнал, с заданными частотой и мощностью, поступает на вход исследуемого устройства (ИУ). Отраженная от входа ИУ часть зондирующего сигнала, детектируется в датчике КСВН, и напряжение пропорциональное мощности отраженного сигнала подаётся на один из входов измерительного блока. Часть сигнала, прошедшая через ИУ, поступает на детектор. Откуда напряжение пропорциональное мощности сигнала, прошедшего через ИУ, подаётся на другой вход измерительного блока. Перед измерениями выполняется калибровка трактов передачи и отражения, подключая вместо ИУ меры с единичным коэффициентом отражения (нагрузки короткого замыкания и холостого хода) и меру с единичным коэффициентом передачи (непосредственное подключение детектора или через перемычку).



Рисунок 2.2 - Калибровка

### З ПОРЯДОК РАБОТЫ

#### 3.1 Калибровка

- Соберите схему, приведённую на рисунке 2.1
- Запустите приложение «Graphit P2M» и подключитесь к прибору (или к эмулятору).
- Подключите ИУ, запустите измерения и задайте диапазон частот соответствующий частотной характеристике ИУ.
- 4) Отключите ИУ и выполните калибровку на отражение и на передачу (рисунок 2.2). Для калибровки на отражение следует выделить трассу, для которой в панели управления «Параметры измерения» установлен режим измерения «отражение». Затем нажать кнопку «Калибровка» и выполнить указания «Мастера калибровки».

Аналогично для калибровки на передачу следует выделить трассу, соответствующую режиму измерения «Модуль КП» и нажать кнопку «Калибровка».

#### 3.2 Измерение частотных характеристик

Подключите ИУ. Окно программы управления P2M должно принять вид, как показано на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Измерение ЧХ

Сохраните результаты измерения в файл в S2P-формате, используя контекстное меню диаграммы.

3.3. Измерения вторичных параметров

Создайте 2 маркера.

Чтобы создать маркер, нужно «взять мышкой» треугольник в левом нижнем углу диаграммы и переместить его в желаемую позицию.

Привяжите маркеры к трассе, содержащей коэффициент передачи.

Задайте в свойствах маркеров слежение за уровнем -3дБ от максимума слева и справа, чтобы маркеры следили за краями полосы пропускания.

 Создайте связь между маркерами. В свойствах связи выберите выражение, вычисляющее полосу частот в мегагерцах.

Отметьте в отчёте по лабораторной работе полученные численные значения.

 Создайте ещё пару маркеров, следящих за уровнем -50 дБ от максимума. В связи между маркерами наберите выражение, вычисляющее коэффициент прямоугольности ЧХ фильтра:

$$K_{npямоуе.} = \frac{\Delta f_{-50dB}}{\Delta f_{-3dB}}.$$

Отметьте в отчёте по лабораторной работе полученные численные значения.

#### 3.4. Динамические измерения

При измерении динамических характеристик ИУ выполнятся сканирование по уровню мощности зондирующего сигнала. Схема калибровки и измерения приведена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Измерение коэффициента передачи усилителя

#### Подготовка к динамическим измерениям

Создайте новую измерительную трассу. Задайте для неё канал 2 / измерение 1. В панели управления «Тип канала» выберите динамические измерения – «ДИ». В панели управления «Параметры измерения» задайте используемый измерительный вход.

Калибровка

Подключите детектор к выходу СВЧ, как показано на рисунке 3.2-а.

Задайте диапазон изменения мощности в панели управления «Параметры мощности» В панели управления «Параметры измерения» нажмите кнопку «Калибровка». Чтобы применить калибровочные данные в поле ввода со списком «Опорные данные» выбрать «Калибровка».

Измерение точки сжатия P1

<u>Способ 1</u>

Запомните в трассе памяти характеристику, измеренную после калибровки (рисунок 3.2а).

#### Подключите ИУ (ТОЛЬКО В ПРИСУТСТВИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ).

Создайте 2 маркера. С помощью первого маркера на линейном участке динамической характеристики измерьте коэффициент усиления. Второму маркеру задайте режим слежения за разностью уровней (К<sub>усиления</sub> -1 дБ) в трассах памяти и измерительной. Положение второго маркера даст точку сжатия P1, как показано на рисунке 3.3.

Способ 2

На панели управления «Параметры измерения» установите флажок «Вычитать опорные данные». Калибровочные данные будут вычитаться из измеренных. Измерительная трасса на линейном участке примет горизонтальный вид, а значения в трассе будут соответствовать коэффициенту усиления.

С помощью маркера, следящего за уровнем (Кусиления -1 дБ), найти точку сжатия Р1.

5



Рисунок 3.3 – Маркер, следящий за разностью уровней

## 4 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Напишите отчёт, который должен содержать:

1) Цель работы.

- Краткое описание используемых в лабораторной работе инструментальных средств (состав, назначение, возможности).
- Полученные по пунктам 3.1 3.4 результаты.
- Выводы.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ

#### 1 ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение структуры и принципа работы векторного анализатора (ВАЦ) цепей Р4М.

#### 2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Требования к оборудованию и программному обеспечению.

Для выполнения лабораторной работы необходимы:

- ВАЦ Р4М, набор мер или электронный калибратор;
- полосовой фильтр.

Вместо перечисленного выше оборудования может использоваться эмулятор.

#### 2.2 Структура и принцип работы ВАЦ

ВАЦ состоит из следующих частей:

- измерительный блок, состоящего из генератора зондирующего сигнала и четырёх измерительных приёмников;
- набор калибровочных мер или электронный калибратор;
- компьютер, управляющий измерительным блоком, обрабатывающий и отображающий результаты измерения.



Рисунок 2.1 - Структура измерительного блока ВАЦ

Принцип измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения заключается в подаче на исследуемое устройство (ИУ) зондирующего гармонического сигнала заданной частоты, последующего измерения амплитуды и фазы прошедшего через ИУ и отраженного от ИУ сигналов и сравнения их с амплитудой и фазой зондирующего сигнала. Перед измерениями выполняется калибровка трактов передачи и отражения, подключая к портам измерителя меры с известными коэффициентами отражения и передачи. В результате калибровки вычисляются параметры измерительной системы – факторы ошибок, позволяющие скомпенсировать систематическую составляющую ошибок измерения. На рисунке 2.2 представлена модель ошибок ВАЦ, выполняющего зондирование первым портом.



Рисунок 2.2 - Модель с 6 факторами ошибок при прямом зондировании

- E<sub>DF</sub> фактор направленности (англ.: Directivity), характеризующий проникновения (наводки) и отражения зондирующего сигнала на измерительный вход.
- ESF фактор рассогласования источника (англ.: Source impedance mismatches), характеризующий все повторные отражения от измерителя отражённого от ИУ сигнала.
- ERF фактор неравномерности отражения (англ.: Frequency response reflection tracking) характеризует частотную неравномерность тракта отражения.
- ELF фактор рассогласования нагрузки (англ.: Load impedance mismatches), характеризующий все отражения от второго (при прямом зондировании) порта.
- ETF фактор неравномерности передачи (англ.: Frequency response reflection tracking) характеризует частотную неравномерность тракта передачи.
- EXF фактор изоляции (англ.: Crosstalk or Isolation) проникновение между измерительными портами.

В перечисленных факторах ошибок индекс "F" (от англ.: forward) означает прямое зондирование – от первого порта ко второму. В случае обратного зондирования измерительную систему характеризуют другие 6 факторов ошибок, в которых используется индекс "R" (от англ.: reverse).

### З ПОРЯДОК РАБОТЫ

Запустите приложение «Graphit P4M» и подключитесь к прибору (или к эмулятору). Загрузите профиль lab2, воспользовавшись пунктом меню «Профиль \ Загрузить». Запустите измерения.

3.1 Исследование вариантов нормировки

Нормировка на нагрузку холостого хода (XX).

 Выполните нормировку порта 1 на отражение от XX Для этого выберите пункт меню «Калибровка \ Управляемая калибровка».
 В появившемся диалоговом окне мастера калибровки в группе «Используемые порты» выберите радио-кнопку «порт 1» и нажмите кнопку «Далее». В поле со списком «Тип калибровки» выберите вариант «Частотной неравномерности по отражению». Оставьте установленным флажок «Нагрузка XX» и очистите остальные флажки.

Нажмите кнопку «Далее» и следуйте инструкциям мастера калибровок.

Измерения.

Коррекция измерений выполняется по формуле:

$$S_{11}^* = \frac{S_{11}^M}{S_{11Open}^M} \cdot \Gamma_{Open}$$

Отключите все мешающие трассы, не отображающие S<sub>11</sub>.

Подключите к порту 1 нагрузку короткозамкнутую (КЗ).
 Запишите в трассу памяти трассу, отображающую |S<sub>11</sub>| в логарифмическом масштабе.

Нормировка на XX и КЗ, нормировка на произвольную нагрузку.

- Выполните нормировку порта 1 на отражение от XX и КЗ.
- Выполните нормировку порта 2 на отражение от произвольной нагрузки, используя нагрузку XX.
- Измерения.

Коррекция измерений выполняется по формулам:

$$S_{11}^{*} = \frac{2 \cdot S_{11}^{M}}{\frac{S_{11}^{M}Open}{\Gamma_{Open}} + \frac{S_{11}^{M}Short}{\Gamma_{Short}}}, \qquad S_{22}^{*} = \frac{S_{22}^{M}}{S_{22}^{M}Kanu\delta}$$

После калибровки на XX и K3 на порту 1 должна остаться нагрузка K3. Сравните результаты измерения |S11| с запомненными после калибровки на XX.

- Включите трассы, отображающие |S22|.
- Подключите нагрузки XX к порту 1, КЗ к порту 2.
- Сохраните результаты калибровки на диск.

#### 3.2 Однопортовая векторная калибровка

- Выполните однопортовую калибровку порта 1.
- Измерение.

Коррекция измерений выполняется по формуле:

$$S_{11}^{*} = \frac{S_{11}^{M} - E_{D}^{*}}{E_{R}^{*} + E_{S}^{*} \cdot (S_{11}^{M} - E_{D}^{*})}.$$
(3.1)

Подключите нагрузку XX затем КЗ. Убедитесь в отсутствии биений в ЧХ и в отсутствии паразитных составляющих во временной области.

#### 3.3 Двухпортовая калибровка в одном направлении

- Выполните двухпортовую калибровку порта 1.
- Выполните двухпортовую калибровку для взаимных устройств порта 2.
- Сохраните результаты калибровки на диск.
- Измерение.

Коррекция измеренного коэффициента передачи выполняется по формуле:

$$S_{21}^{*} = \frac{S_{21}^{M} - E_{X}^{*}}{E_{T}^{*}} \cdot \frac{E_{R}^{*}}{E_{R}^{*} + E_{S}^{*} \cdot (S_{11}^{M} - E_{D}^{*})}$$

Измеренный коэффициент отражения, в общем случае, корректируется по формуле (3.1). Для взаимных устройств используется следующее выражение:

$$S_{11}^{*} = \frac{S_{11}^{M} - E_{D}^{*}}{E_{R}^{*} + E_{S}^{*} \cdot (S_{11}^{M} - E_{D}^{*})} - E_{L}^{*} \cdot (S_{21}^{*})^{2}.$$

- Соедините порты перемычкой.
   Отметьте различие в результатах измерений S<sub>11</sub> и S<sub>22</sub>.
- Подключите исследуемое устройство.
   Отметьте различие в результатах измерений S<sub>11</sub> и S<sub>22</sub>.
- Подключите две согласованные нагрузки Отметьте отсутствие различий в измерениях S<sub>11</sub> и S<sub>22</sub>, наблюдаемых в пунктах 4 и 5. Объясните причины.
  - 3.4 Полная двухпортовая калибровка
- Выполните полную двухпортовую калибровку. Сохраните результаты калибровки на диск.
- Измерение. Подключите перемычку. Последовательно подгружая ранее сохранённые калибровки, наблюдайте отличия результатов измерения. Повторите измерения для ИУ и согласованных нагрузок.

## 4 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Напишите отчёт, который должен содержать:

- 1) Цель работы.
- Краткое описание используемых в лабораторной работе инструментальных средств (состав, назначение, возможности).
- Полученные по пунктам 3.1 3.4 результаты.
- Выводы.
#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение структуры и принципа работы векторного анализатора (ВАЦ) цепей Р4М.

#### 2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Требования к оборудованию и программному обеспечению

Для выполнения лабораторной работы необходимы:

- ВАЦ Р4М, набор мер или электронный калибратор;
- полосовой фильтр;
- усилитель.

Вместо перечисленного выше оборудования могут использоваться файлы содержащие сигналы приёмников ВАЦ.

2.2 Структура и принцип работы ВАЦ

ВАЦ состоит из следующих частей:

- измерительный блок, состоящего из генератора зондирующего сигнала и четырёх измерительных приёмников;
- набор калибровочных мер или электронный калибратор;
- компьютер, управляющий измерительным блоком, обрабатывающий и отображающий результаты измерения.

Структура измерительного блока приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 - Структура измерительного блока ВАЦ

Принцип измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения заключается в подаче на исследуемое устройство (ИУ) зондирующего гармонического сигнала заданной частоты, последующего измерения амплитуды и фазы прошедшего через ИУ и отраженного от ИУ сигналов и сравнения их с амплитудой и фазой зондирующего сигнала.

Перед измерениями выполняется калибровка трактов передачи и отражения, подключая к портам измерителя меры с известными коэффициентами отражения и передачи. В результате калибровки вычисляются параметры измерительной системы – факторы ошибок, позволяющие скомпенсировать систематическую составляющую ошибок измерения.

### З ПОРЯДОК РАБОТЫ

#### 3.1 Калибровка

- Запустите приложение «Р4» и подключитесь к прибору (или в диалоге подключения нажмите кнопку «Использовать файл»).
- Сбросьте параметры в исходные состояния, нажав соответствующую кнопку. Откройте окно измерения S-параметров.
- Запустите измерения. При использовании файлов выберите любой файл в каталоге Lab3.
- Откройте окно калибровки, нажав соответствующую кнопку.
- 5) Задайте набор мер в группе «Общие параметры». При использовании файлов выберите 8050ulw.mck. Задайте характеристику генератора шума в группе «Измерение шума». При использовании файлов выберите agilent 067.ngd.
- Выполните калибровки измерителя мощности шума и измерения S-параметров. При использовании файлов выбирайте

a)	on.rp4,	чтобы подключить к порту 2 включенный ГШ;
	off.rp4,	чтобы подключить к порту 2 выключенный ГШ;
6)	OpenShort.rp4,	чтобы подключить к порту 1 XX, к порту 2 КЗ;
в)	ShortMatch.rp4,	чтобы подключить к порту 1КЗ, к порту 2 СН;
г)	MatchOpen.rp4,	чтобы подключить к порту 1 CH, к порту 2 XX;
д)	Open3dB.rp4,	чтобы подключить к порту 2 XX через аттенюатор 3 дБ;
e)	Short3dB.rp4,	чтобы подключить к порту 2 КЗ через аттенюатор 3 дБ;
ж)	Gmshu.rp4,	чтобы соединить порты и включить встроенный МШУ;
3)	Thru.rp4.	чтобы соединить порты.

Литеры «а)...з)» из приведённого выше списка обозначают рисунке 3.1 соответствующие флажки.



Рисунок 3.1 – Калибровка

- Сохраните на диск результаты калибровки.
- Нажмите кнопку «Применить», чтобы закрыть окно калибровки.

3.2 Измерение S-параметров пассивных устройств

- Запустите измерения. При использовании файлов выберите файл Lab3\Filtr.rp4.
- Включите измерение S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub>, S<sub>22</sub>.
- Измените тип коррекции с «Полной 2-портовой» на «В одном направлении». В результате отключится компенсация отражения от противоположного порта Р4М.
   В отчёте по лабораторной работе объясните, почему при смене типа коррекции существенно изменяется только часть трассы S<sub>11</sub> или S<sub>22</sub>.
- Установите флажок «для взаимных устройств» Отметьте в отчёте по лабораторной работе его влияние на результаты измерений.
- Измерьте полосу пропускания фильтра. Установите 2 маркера на трассу S<sub>21</sub> (удерживая клавишу Ctrl щёлкнуть «мышью» по трассе).

Нажмите кнопку «Параметры маркеров». В открывшемся окне задайте типы маркеров «Мах-дБ слева» и «Мах-дБ справа», чтобы найти точки на трассе на 3 дБ меньше максимума. В поле «Дополнительное значение по (X)» задайте функцию «|Разница|», как показано на рисунке 3.2



Рисунок 3.2 – Измерение S-параметров фильтра

3.2 Измерение параметров усилителя

Требуется измерить:

- коэффициент усиления в диапазоне частот;
- точку сжатия выходной мощности на 1 дБ;
- коэффициент интермодуляционных искажений третьего порядка IMD3, точку пересечения по выходу третьего порядка – OIP3;
- коэффициент шума.

Схема измерений представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Схема измерений

При использовании файлов имеется возможность воспроизвести сигналы, записанные при различных состояниях выходного и входного аттенюаторов, в соответствии с таблицей 3.1.

Имя файла	Аттенюатор по выходу	Аттенюатор приёмника b <sub>2</sub>
AmplifAttOut10AttIn0.rp4	10 дБ	0 дБ
AmplifAttOut10AttIn10.rp4	10 дБ	10 дБ
AmplifAttOut10AttIn20.rp4	10 дБ	20 дБ
AmplifAttOut20AttIn0.rp4	20 дБ	0 дБ
AmplifAttOut20AttIn10.rp4	20 дБ	10 дБ
AmplifAttOut20AttIn20.rp4	20 дБ	20 дБ
AmplifAttOut30AttIn0.rp4	30 дБ	0 дБ
AmplifAttOut30AttIn10.rp4	30 дБ	10 дБ
AmplifAttOut30AttIn20.rp4	30 дБ	20 дБ

Таблица 3.1 – Файлы с сигналами для измерения параметров усилителя

<u>Аттенюатор по выходу источника</u> зондирующего сигнала служит для создания требуемых условий работы усилителя – в линейном режиме или с небольшим сжатием.

С помощью <u>аттенюатора на входе</u> Р4М обеспечивается линейный режим работы измерительного приёмника (при Р<sub>вх. првёмника Р4М</sub> < 0 дБм).

#### 3.2.1 Измерение коэффициента усиления

Запустите измерения.

При использовании файлов выберите любой из файлов AmplifAttOut\*AttIn\*.rp4. При использовании P4M загрузите профиль Lab3\profile.pp4.

- В измерительном окне «S1» включите измерение S21.
   В панели общих параметров разверните группы «Источник зонд. сигнала» и «Приёмники», чтобы видеть состояния встроенных аттенюаторов.
- 3) В окне измерения мощности включите измерение мощности приёмником b<sub>2f</sub>. В окне измерения мощности выполняется сканирование по мощности – отображается динамическая характеристика P<sub>вых</sub>(P<sub>вх</sub>). Создайте маркер, задайте тип маркера «Сжатие» и уровень сжатия 1 дБ. Маркер покажет, до какой входной мощности усилитель работает в линейном режиме.

Выберите такое значение выходного аттенюатора, чтобы усилитель работал в линейном режиме.

4) Если в окне измерения мощности установить флажок «связано с S1», то применятся параметры окна «S1» и в диаграмме отобразятся мощности сигналов, поступающих на измерительный порт при измерении S-параметров. Мощность на входе приёмника будет меньше на величину ослабления входным аттенюатором.

<sup>\*</sup> Символ "f" (forward) означает зондирование в прямом направлении – из порта 1 в порт 2.



16

Рисунок 3.4 - Измерение S-параметров усилителя

Выберите такое значение входного аттенюатора, чтобы на приёмник поступала мощность меньше 0 дБм.

 Измерьте коэффициент усиления – S<sub>21</sub> и попутно коэффициенты отражения S<sub>11</sub> и S<sub>22</sub>. Отметьте в отчёте по лабораторной работе полученные численные значения.

#### 3.2.2 Измерение сжатия

Сжатие (компрессия) – нелинейное искажение гармонического сигнала, выраженное в ограничении или ослаблении синусоиды вблизи экстремумов. Сжатие возникает в цепях неспособных одинаково хорошо передавать малые и большие (по напряжению) сигналы. Для таких цепей характерна нелинейная динамическая характеристика, представленная на рисунке 3.5.



InCP – точка сжатия по входу

Рисунок 3.5 – Динамическая характеристика

Рассмотренный вид нелинейности цепи характеризуется точкой сжатия — уровнем выходной мощности OutCP (для активных устройств) или уровнем входной мощности InCP (для пассивных цепей, например смесителей), при которой динамическая характеристика отклонилась вниз на заданное число децибел.

- Окно «S1» можно закрыть.
   В окне измерения мощности очистите флажок «связано с S1».
- Сжатие достигается при мощностях несколько больших, чем те при которых измерялся коэффициент усиления. Поэтому проверьте, не перегружается ли приёмник Р4М. При необходимости добавьте ослабление входного аттенюатора.
- 3) <u>Первый способ</u> измерения сжатия уже реализован. Маркер, созданный при выполнении раздел 3.2.1 пункта 3, нашёл точку сжатия на динамической характеристике. Для активных устройств обычно измеряется выходная мощность в точке сжатия и называется она точкой сжатия по выходу.

Отметьте в отчёте по лабораторной работе точку сжатия по выходу, измеренную первым способом.

Второй способ.

Откройте измерительное окно «S2» включите измерение S21. Задайте тип коррекции «Полная 2-х портов.».

Создайте маркер, задайте тип маркера «Мах-дБ справа» и уровень 1 дБ.

Маркер находит точку, в которой коэффициент передачи деградирует на 1 дБ. Но отображает он не выходную мощность, а коэффициент усиления. По показаниям маркера рассчитайте выходную мощность и укажите её в отчёте по лабораторной работе.



Рисунок 3.6 - Измерение сжатия

#### 3.2.3 Измерение интермодуляций

Интермодуляционное искажение (IMD – Intermodulation distortion) характеризует нелинейность цепи, обусловленную нелинейностью передаточной характеристики UBыX(UBX). При зондировании двух-тональным сигналом интермодуляция проявляется в порождении комбинаторных спектральных составляющих (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 - Интермодуляционные комбинаторики

На рисунке 3.8 представлены графики мощностей комбинаторик.



Рисунок 3.8 - Динамические характеристики на частотах основного тона и комбинаторик

Как видно из рисунка 3.8 коэффициенты интермодуляционных искажений – *IMD2*, *IMD3*, зависят от входной мощности, что неудобно. А точки пересечения (*IP* – *intercept point*), хотя и абстрактны, одним числом характеризуют нелинейность усилителя.

Для измерения точек пересечения не требуется измерять динамические характеристики. Так как наклоны динамических характеристик известны, остаётся измерить их смещения от динамической характеристики основного тона, т.е. измерить *IMD*. Ниже представлены формулы для интермодуляции 3-го порядка:

$$IMD3 = P_{BAIN}(f_1) - P_{BAIN}(2f_1 - f_2),$$
 для комбинаторики с низкой частотой,  
 $IMD3 = P_{BAIN}(f_2) - P_{BAIN}(2f_2 - f_1),$  для комбинаторики с высокой частотой,  
 $OIP3 = P_{BAIN}(f_1) + [P_{BAIN}(f_2) - P_{BAIN}(2f_1 - f_2)] / 2,$  для комбинаторики с низкой частотой,  
 $OIP3 = P_{BAIN}(f_2) + [P_{BAIN}(f_1) - P_{BAIN}(2f_2 - f_1)] / 2,$  для комбинаторики с высокой частотой.  
(3.1)

- Все измерительные окна можно закрыть. Откройте окна анализа спектра и осциллографа<sup>\*</sup>. В открытых окнах включите измерение приёмниками a<sub>1</sub> и b<sub>2</sub>, чтобы наблюдать входной и выходной сигналы
- Задайте ослабление выходного и входного аттенюаторов 20 дБ. При использовании файлов выберите файл AmplifAttOut20AttIn20.rp4.
- В окне анализа спектра число отображаемых точек такое чтобы видеть комбинаторики 5го порядка.

Установите флажок «Хэмминга», чтобы сгладить спектр и уменьшить уровень шума.

 Расставьте маркеры на основные тона и комбинаторики. По формулам (3.1) рассчитайте коэффициент гармоник IMD3 и точку пересечения OIP3 для комбинаторики с высокой частотой.



Рисунок 3.9 – Измерение интермодуляций

5) Задайте ослабление выходного и входного аттенюаторов 30 и 20 дБ соответственно. При использовании файлов выберите файл AmplifAttOut30AttIn20.rp4. Повторите вычисление IMD3 и OIP3. Результаты внесите в отчёт по лабораторной работе.

#### 3.2.3 Измерение коэффициента шума

- В измерительном окне «S1» включите измерение S21.
   В окне измерения шума включите измерение NF (Nose Figure).
   Остальные измерительные окна можно закрыть.
- Запустите измерения Входные аттенюаторы на измерение шума не оказывают влияния (см. рисунок 2.1).

<sup>\*</sup> Если кнопка «Спектр» не доступна, то нажмите кнопку «Настройки программы» и добавьте лицензию из каталога Lab3.

Выходной аттенюатор при любом ненулевом ослаблении немного улучшает согласование порта P4M.

При измерении коэффициента шума более значима точность измерения S<sub>21</sub>, поэтому состояния аттенюаторов следует выбрать те, при которых выполнялась калибровка.

 В каталоге Lab3 находится файл AgilentAmpf.txt, содержащий результаты измерения коэффициента шума ВАЦ Agilent N5245A. Загрузите его в память (Shift + щелчок «мышью» по кнопке памяти), чтобы сравнить с Вашими измерениями.

Результаты измерений внесите в отчёт по лабораторной работе.



Рисунок 3.10 – Измерение коэффициента шума

#### 4 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Напишите отчёт, который должен содержать:

- Цель работы.
- Краткое описание используемых в лабораторной работе инструментальных средств (состав, назначение, возможности).
- Полученные по пунктам 3.1, 3.2 результаты.
- Выводы.

### ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Договор на оказание услуг

ДОГОВОР № \_\_\_\_\_

г. Томск

«\_\_\_»\_\_\_\_2020 г.

Общество с ограниченной ответственностью «ТУСУР-Электроника», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице \_\_\_\_\_\_, действующего на основании Устава, с одной стороны, и Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), именуемое в дальнейшем «Исполнитель», в лице проректора по научной работе и инновациям Лощилова Антона Геннадьевича, действующего на основании доверенности от 17.09.2019 № 20/2795, с другой стороны, совместно именуемые в дальнейшем «Стороны», заключили настоящий Договор о следующем:

### 1. ПРЕДМЕТ ДОГОВОРА

1.1. Исполнитель обязуется в установленный п. 1.2. настоящего договора срок оказать услуги по

(далее по тексту - «Услуги»), а Заказчик обязуется принять услуги и оплатить обусловленную п. 2.1. настоящего договора стоимость услуг.

1.2. Срок оказания услуг: с \_\_\_\_\_ по \_\_\_\_\_.

1.3. Наименование конкретных Услуг, их объем, сроки оказания и иные дополнительные условия определяются Сторонами в Техническом описании Услуги, которое является неотъемлемой частью настоящего Договора (Приложение А).

1.4. Услуги оказываются Исполнителем с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополостных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»). Перечень оборудования ЦКП «Импульс», которое будет использовано при выполнении работ, представлен в Приложении А.

1.5. Исполнитель гарантирует наличие у него квалификации и навыков, необходимых для проведения предусмотренных настоящим Договором Услуг, соответствующих разрешений, лицензий и допусков, предусмотренных действующим законодательством РФ для данного вида Услуг.

## 2. СТОИМОСТЬ УСЛУГ И ПОРЯДОК ОПЛАТЫ

2.1. Стоимость Услуг составляет \_\_\_\_\_(Прописью) рублей \_\_\_\_копеек, в том числе НДС 20% в размере \_\_\_\_\_ (Прописью) рублей \_\_\_\_копеек.

2.2. При заключении и (или) исполнении договора Стороны вправе изменить:

1) предусмотренный договором объем Услуг не более чем на 10 процентов;

2) цену договора:

а) путем ее уменьшения без изменения иных условий исполнения договора;

б) в случаях, предусмотренных подпунктом 1 настоящего пункта.

в) в случае инфляционных процессов (увеличение минимальной оплаты труда, увеличение тарифов на потребление электроэнергии, изменения цен на материалы), увеличения или уменьшения затрат, требуемых для оказания Услуг.

Изменения оформляются в порядке, предусмотренном п. 11.3. Договора.

2.3. Оплата Услуг Исполнителя производится на основании счетов Исполнителя путем перечисления денежных средств Заказчиком на расчетный счет Исполнителя в течение 10 (Десяти) банковских дней с момента подписания Сторонами Акта оказанных услуг по соответствующему Техническому описанию.

## 3. ПРАВА И ОБЯЗАННОСТИ СТОРОН

3.1. Исполнитель обязуется:

3.1.1. Оказать Заказчику Услуги в полном объеме, в установленные сроки, с соблюдением всех условий настоящего Договора и приложений к нему.

3.1.2. Обеспечить в ходе оказания Услуг мероприятия по охране труда, технике безопасности, пожарной безопасности, а также нести полную ответственность за соблюдение вышеперечисленных мероприятий.

3.1.3. Незамедлительно сообщать Заказчику об обстоятельствах, исключающих оказание Услуг по настоящему Договору. Исполнитель, уведомив Заказчика, приостанавливает оказание Услуг до получения от Заказчика инструкций по дальнейшим действиям.

3.1.4. Вместе с результатом Услуг передать Заказчику Акт оказанных услуг.

3.2. Исполнитель имеет право:

3.2.1. По согласованию с Заказчиком сдать результат оказания Услуг досрочно.

3.2.2. По согласованию с Заказчиком привлекать к исполнению своих обязательств по настоящему Договору третьих лиц. Перед Заказчиком ответственность за действия третьих лиц, привлеченных Исполнителем к исполнению настоящего Договора, несет Исполнитель.

3.2.3. Приостановить оказание Услуг при проведении профилактических и ремонтных работ на своем оборудовании, уведомив об этом Заказчика. При этом срок исполнения обязательств по настоящему Договору отодвигается соразмерно времени, в течение которого проводятся указанные работы.

3.3. Заказчик обязуется:

3.3.1. Производить оплату по настоящему Договору в соответствии с условиями Раздела 2 настоящего Договора.

3.3.2. Принимать результат оказания Услуг в соответствии с Разделом 4 настоящего Договора.

3.3.3. Делать ссылки в публикациях, в ходе выступлений на научно-технических конференциях и других публичных выступлениях о том, что проведенные измерения были выполнены с использованием ЦКП «Импульс» ТУСУР.

3.4. Заказчик имеет право:

3.4.1. Контролировать оказание Услуг Исполнителем по настоящему Договору без вмешательства в оперативно-хозяйственную деятельность Исполнителя.

## 4. ПОРЯДОК ПРИЕМКИ ОКАЗАННЫХ УСЛУГ

4.1. После завершения оказания Услуг по настоящему Договору Исполнитель предоставляет Заказчику результат оказания Услуг (отчет) с приложением Акта оказанных услуг.

4.2. Заказчик в течение 5 (пяти) рабочих дней с момента получения от Исполнителя Акта оказанных услуг, обязан осмотреть и принять результат оказанных Услуг по настоящему Договору.

## 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

5.1. Стороны обязуются обеспечить конфиденциальность использования и неразглашение третьим лицам информации, которая будет представлена Сторонами в ходе исполнения настоящего Договора, в том числе информации, составляющей коммерческую тайну, и использовать эту информацию только по назначению, предусмотренному условиями Договора. 5.2. Исполнитель гарантирует сохранение конфиденциальности относительно технической сути Услуг, в том числе результата Услуг, а также информации, полученной от Заказчика.

5.3. Обязательства по сохранению конфиденциальности сохраняют силу после истечения срока действия настоящего Договора или его досрочного расторжения в течение 3 (трех) лет.

5.4. Исполнитель не вправе публиковать информацию о результатах оказанных Услуг, а также использовать их в ходе выступлений на научных конференциях, а также в ходе иных публичных выступлений.

## 6. ПРАВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

6.1. Исполнитель и Заказчик обязуются информировать друг друга о ранее созданных и принадлежащих им правах на объекты интеллектуальной собственности, используемых при оказании услуг по настоящему Договору.

6.2. Условия использования объектов интеллектуальной собственности при оказании услуг по настоящему Договору, устанавливаются отдельными договорами между Исполнителем и Заказчиком.

6.3. Права на интеллектуальную собственность, созданную по настоящему Договору принадлежат Заказчику. Правовую охрану создаваемой интеллектуальной собственности обеспечивает Заказчик.

### 7. ФОРС-МАЖОР

7.1. Ни одна из Сторон не несет ответственности перед другой Стороной за невыполнение или ненадлежащее выполнение своих обязательств по настоящему Договору, обусловленные действием обстоятельств непреодолимой силы (форс-мажор), признаваемых таковыми в соответствии со ст. 401 Гражданского кодекса Российской Федерации. При этом срок исполнения обязательств по настоящему Договору отодвигается соразмерно времени, в течение которого действовали перечисленные обстоятельства, а также последствия, вызванные этими обстоятельствами.

7.2. Сторона, для которой создалась невозможность надлежащего исполнения обязательств, обязана незамедлительно, но не позднее 5 (пяти) рабочих дней с даты наступления, известить другую Сторону о наступлении вышеуказанных обстоятельств, предполагаемом сроке действия и прекращении вышеуказанных обстоятельств.

### 8. АНТИКОРРУПЦИОННАЯ ОГОВОРКА

8.1. При исполнении настоящего Договора Стороны соблюдают и будут соблюдать в дальнейшем все применимые законы и нормативные акты, включая любые законы о противодействии взяточничеству и коррупции.

8.2. Стороны и любые их должностные лица, работники, акционеры, представители, агенты, или любые лица, действующие от имени или в интересах или по просьбе какой либо из Сторон в связи с настоящим Договором, не будут прямо или косвенно, в рамках деловых отношений в сфере предпринимательской деятельности или в рамках деловых отношений с государственным сектором, предлагать, вручать или осуществлять, а также соглашаться на предложение, вручение или осуществление (самостоятельно или в согласии с другими лицами) какого-либо платежа, подарка или иной привилегии с целью исполнения (воздержания от исполнения) каких-либо условий настоящего Договора, если указанные действия нарушают применимые законы или нормативные акты о противодействии взяточничеству и коррупции.

### 9. ПОРЯДОК РАЗРЕШЕНИЯ СПОРОВ

9.1. Все споры и разногласия, которые могут возникать из настоящего Договора или в связи с ним, будут по возможности решаться путем письменных претензий между

Сторонами. Стороны устанавливают срок ответа на претензии 10 календарных дней с даты её получения.

9.2. В случае если Стороны не придут к соглашению, то дело подлежит передаче в арбитражный суд в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации по месту нахождения истца.

## 10. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТОРОН

10.1. Стороны несут ответственность в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и настоящим Договором.

10.2. За просрочку исполнения Исполнителем обязательств, предусмотренных Договором, Заказчик вправе потребовать от Исполнителя выплатить неустойку в размере 1/300 действующей на день уплаты неустойки ключевой ставки Центрального банка Российской Федерации от цены Договора за каждый день просрочки, но не более 5 (пяти) процентов от общей суммы Договора. Исполнитель освобождается от уплаты неустойки, если докажет, что просрочка исполнения произошла вследствие действия обстоятельств непреодолимой силы или по вине Заказчика.

10.3. В случае просрочки исполнения Заказчиком обязательств, предусмотренных Договором, Исполнитель вправе потребовать от Заказчика выплатить неустойку в размере 1/300 действующей на день уплаты неустойки ключевой ставки Центрального банка Российской Федерации от цены Договора за каждый день просрочки, но не более 5 (пяти) процентов от общей суммы Договора. Заказчик освобождается от уплаты неустойки, если докажет, что просрочка исполнения указанного обязательства произошла вследствие действия обстоятельств непреодолимой силы или по вине Исполнителя.

10.4. Уплата неустойки не освобождает Сторону от надлежащего исполнения настоящего Договора в полном объеме. Убытки взыскиваются в полной сумме сверх неустойки.

## 11. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

11.1. Настоящий Договор вступает в силу с момента его подписания Сторонами и действует до полного исполнения Сторонами своих обязательств по настоящему Договору.

11.2. Все приложения, изменения и дополнения к настоящему Договору, в том числе подписанные Сторонами после подписания настоящего Договора, составляют его неотъемлемую часть.

11.3. Все приложения, изменения и дополнения к настоящему Договору действительны при условии, если они совершены в письменной форме и подписаны обеими Сторонами.

11.4. Стороны обязуются незамедлительно уведомлять друг друга об изменении своих реквизитов.

11.5. Настоящий Договор подписан в двух экземплярах, имеющих равную юридическую силу, по одному для каждой из Сторон.

11.6. Договор может быть досрочно расторгнут по соглашению Сторон, либо по требованию одной из Сторон в порядке и по основаниям, предусмотренным действующим законодательством РФ.

## 12. АДРЕСА, БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ И ПОДПИСИ СТОРОН

### Исполнитель:

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, (ТУСУР) 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40 Платёжные реквизиты ИНН 7021000043 КПП 701701001 УФК по Томской области (ТУСУР л/с 20656Х91490) Р/с 40501810550042004500 в Отделении Томск г. Томск БИК 046902001 (код дохода 000000000000000130) ОКТМО 69 701 000

Символ Х в лицевом счёте следует заполнять латинской прописной буквой

Заказчик:	
Наименование	
Адрес	
Реквизиты	
ОГРН	
ИНН/КПП	
ОКВЭД	
ОКПО	
Р/сч. №	
B	
БИК:	

## От Исполнителя

Проректор по научной работе и инновациям

Лощилов А.Г.

Ф.И.О.

М.П.

М.П.

От Заказчика

Директор

СОГЛАСОВАНО: Руководитель ЦКП «Импульс»

\_\_\_\_\_ Малютин Н.Д.

## Приложение А к договору оказания услуг №\_\_\_\_\_ от «\_\_\_\_»\_\_\_\_\_2020 г.

## Техническое описание Услуги

## 1. Контактное лицо Заказчика:

ФИО	Организация	Должность	Телефон, факс	e-mail
ФИО				

#### 2. Состав группы экспериментаторов:

N⁰	ФИО	Организация	Должность	Телефон	e-mail
п/п					
1.					
2.					

#### 3. Используемое оборудование центра коллективного пользования:

Наименование оборудования	Планируемые даты ока- зания Услуги	Планируемое количество часов

### 4. Техническое описание Услуги (эксперимента):

4.1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.2	
4.3	

#### Подписи сторон:

От Исполнителя Проректор по научной работе и инновациям От Заказчика Директор

\_\_\_\_\_Лощилов А.Г.

\_\_\_\_\_ФИО

М.П.

М.П.

СОГЛАСОВАНО: Руководитель ЦКП «Импульс»

\_\_\_\_\_ Малютин Н.Д.

Заказчик
Наименование
Адрес
Реквизиты
ОГРН
ИНН/КПП
ОКВЭД
ОКПО
Р/сч. №
В
БИК:

#### Исполнитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

ИНН 7021000043/ КПП 701701001 УФК по Томской области (ТУСУР л/с 20656Х91490) Р/с 40501810550042004500 в Отделении Томск г. Томск БИК 046902001 ОКТМО 69 701 000 Символ X в лицевом счёте следует заполнять латинской прописной буквой

#### АКТ № 1

сдачи-приёмки оказанных услуг по договору от « » 2020 г. №

Мы, нижеподписавшиеся, Заказчик в лице

, с одной стороны и Ис-

полнитель в лице проректора по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «ТУСУР» Лощилова Антона Геннадьевича, с другой стороны, составили настоящий Акт о том, что в период с «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_2020 г. по «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_2020 г. провели приёмку услуг, предоставленных в соот-

ветствии с договором от «\_\_\_\_» \_\_\_\_2020 г. № \_\_\_\_.

Краткое описание предоставленных услуг\_\_\_\_\_

Общая стоимость предоставленной услуги составила \_\_\_\_\_ (Прописью) рублей, в т.ч. НДС 20% в размере (Прописью) рублей \_\_\_\_ копеек.

Аванс не перечислялся.

Следует к перечислению \_\_\_\_\_ (Прописью) рублей 00 копеек.

В результате рассмотрения договорной документации установлено:

 Услуги предоставлены в полном объёме, в установленные сроки и соответствуют требованиям Технического описания. Заказчик по объему, качеству и срокам предоставленной услуги претензий не имеет.

2. Услуги считать оказанными и принятыми.

Настоящий акт составлен в двух экземплярах, имеющих одинаковую юридическую силу, по одному экземпляру для каждой из сторон.

От Заказчика:

От Исполнителя:

Проректор по НРиИ ФГБОУ ВО «ТУСУР»

\_\_\_\_\_ФИО

А.Г. Лощилов

2020 г.

### ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Заявка на проведение научных исследований и/или оказание услуг

В заявке на сайте <u>https://tusur.ru/ru/o-tusure/struktura-i-organy-upravleniya/departament-nauki-i-</u>

innovatsiy/nauchnoe-upravlenie/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-kollektivnogo-polzovaniya-

impuls/zayavka-na-provedenie-rabot-v-tskp указываются:

Полное название организации

Сокращенное название организации

Адрес

Фамилия

Имя

Отчество

Должность

Учёное звание

Учёная степень

Телефон

Электронная почта

Наименование работы

Краткое описание работ

Цели и/или объект исследований

Ориентировочные сроки выполнения

Ожидаемые результаты предложенных работ

Даю своё согласие на обработку персональных данных с целью рассмотрения данной заявки

Файл

# ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

# Перечень выполняемых типовых работ и (или) оказываемых услуг

N⁰	Наименование типовой работы и оказываемых услуг
п/п	
1.	Измерение вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик устройств полупро-
	водниковой электроники, как органической, так и твердотельной.
2.	Измерение векторных параметров ВЧ и СВЧ устройств при импульсном воздей-
	ствии при длительности импульсов от 17 нс до 35 пс.
3.	Измерение частотной зависимости векторных параметров в диапазоне до 67 ГГц
	(полный набор коэффициентов матрицы рассеяния), включая измерения на пла-
	стине.
4.	Измерение нелинейных и шумовых характеристик СВЧ-устройств, в том числе
	монолитных интегральных схем.
5.	Проведение CBЧ «load pull» измерений мощности и коэффициента шума на под-
	ложке в импульсном режиме.
6.	Изготовление элементов твердотельной электроники и радиофотоники.
7.	Проектирование и изготовление элементов электроники, конструктивных дета-
	лей методами аддитивных технологий.
8.	Прототипирование микросхем СВЧ – разработка схем, топологии, расчет пара-
	метров, измерение изготовленных макетов и образцов.
9.	Проведение аналитических исследований в области нано-микроэлектроники
	СВЧ, аддитивных технологий.
10.	Подготовка проектов по направлениям нано-микроэлектроники СВЧ, аддитив-
	ных технологий.

### ПРИЛОЖЕНИЕ И

Положение о Центре коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами»

## МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

**УТВЕРЖДАЮ** Ректор ТУСУР В.М. Рудевский 20 20 г.

# Положение

о Центре коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»)

### Лист согласования

Директор ЦКП

Начальник ФАО

службы

Dell do 7.02. подпись dama

Н.Д. Малютин

инициалы, фамилия

Е.Н. Андреева

инициалы, фамилия

О.А. Кузьменко

инициалы, фамилия

## согласовано:

Проректор по научной работе и инновациям

Начальник юридической

Директор департамента управления и стратегического развития

Начальник научного управления

Начальник отдела кадров

подпись

ntbc

подпись

20.02.202 dama

21. 02.

18.02.20

dama

дата

А.Г. Лощилов инициалы, фамилия

21.02.20 дата подпись

Ю.А Шурыгин инициалы, фамилия

А.В. Медовник

инициалы, фамилия

С.В. Потапова инициалы, фамилия

побпись

tit

подпись

1

18.02.20 dama

19:02.20

дата

6

## 1 Общие положения

1.1 Центр коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (далее ЦКП «Импульс») образован на основании приказа ректора ТУСУР № 12547 от 07.10.2011 г.

1.2 Настоящее положение подготовлено в соответствии с приказом ректора №1149 от 27.12.2019 г. о реорганизации ЦКП «Импульс».

1.3 ЦКП «Импульс» является структурным подразделением ТУСУР.

1.4 Базовой организацией ЦКП «Импульс» является Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), его подразделения СКБ «Смена», НОЦ «Нанотехнологии» и НИИ МЭС ТУСУРа.

1.5 Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 136 Д.

1.6 ЦКП «Импульс» руководствуется в своей деятельности действующим законодательством Российской Федерации, нормативными правовыми актами базовой организации, а также постановлением Правительства РФ от 17 мая 2016 г. № 429 "О требованиях к центрам коллективного пользования научным оборудованием и уникальным научным установкам, которые созданы и (или) функционирование которых обеспечивается с привлечением бюджетных средств, и правилах их функционирования", Устав ТУСУР.

1.7 Тип ЦКП «Импульс» – исследовательский по направлению "Технологии, разработка и измерения СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей" для обеспечения реализации приоритетов научнотехнологического развития.

1.8 Прекращение деятельности ЦКП «Импульс» осуществляется в установленном порядке на основании приказа ректора ТУСУРа.

## 2 Основные направления деятельности и задачи

2.1 Основными направлением деятельности ЦКП «Импульс» является обеспечение на имеющемся оборудовании проведения исследований, оказание услуг исследователям и научным коллективам:

2.1.1 Исследование новых источников света на основе полупроводниковых диодов с целью развития направления энергосбережения.

2.1.2 Разработка методов и аппаратно-программных средств измерения параметров элементов и устройств СВЧ и радиофотоники.

2.1.3 Разработка методов и аппаратно-программных средств измерения векторных параметров устройств ВЧ и СВЧ диапазонов при импульсном воздействии.

2.1.4 Развитие нового направления — нелинейной импульсной рефлектометрии.

2.1.5 Измерение параметров элементов, устройств ВЧ и СВЧ и радиофотоники ВЧ и СВЧ классическими методами с переходом к реализации TDRпроцедур.

2.1.6 Технологическое сопровождение НИОКТР по заказам внутренних и внешних пользователей.

2.2 Целями и задачами ЦКП «Импульс» являются:

2.2.1 Обеспечение на современном уровне проведения исследований, а также оказание услуг (измерений, исследований, испытаний и изготовления) на имеющемся научном оборудовании заинтересованным пользователям;

2.2.2 Повышение уровня загрузки и эффективности использования научного оборудования в ЦКП «Импульс»;

2.2.3 Обеспечение единства и достоверности измерений при проведении научных исследований на оборудовании ЦКП «Импульс».

2.3 Основными потребителями услуг ЦКП «Импульс» являются высшие учебные заведения, предприятия, научные организации г. Томска, Российской Федерации, а также иностранные партнеры.

## 3 Функции

3.1 Для выполнения поставленных задач ЦКП «Импульс» осуществляет следующие функции:

3.1.1 Изготовление изделий микро-наноэлектроники и радиофотоники на имеющемся технологическом оборудовании и измерение параметров ВЧ и СВЧ устройств по заявкам подразделений ТУСУРа по внутренним соглашениям, а внешних пользователей – по договорам.

3.1.2 Разработку конструкций 2D - 3D и их изготовление методами аддитивной технологии.

3.1.3 Изготовление нанопорошков, чернил на их основе.

3.1.4 Участие в подготовке специалистов и кадров высшей квалификации (студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов) на базе современного научного оборудования ЦКП «Импульс».

3.2 Реализация мероприятий программы развития ЦКП «Импульс».

3.2.1 Научные направления деятельности ЦКП «Импульс» базируются на междисциплинарном подходе и соответствуют Приоритету 20а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, направление «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

ЦКП «Импульс» способствует развитию критических технологий: «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств», «Технологии диагностики наноматериалов и нано устройств», «Технологии наноустройств и микросистемной техники».

3.2.2 Направления исследований в указанных областях:

3.2.2.1 Исследование и разработка цифровых средств измерений, обладающих рядом совмещенных функций: одновременное измерение импульсных и частотных характеристик тестируемых устройств и систем при воздействии сложными синтезируемыми сигналами.

3.2.2.2 Исследование методов измерения и создание аппаратно- программных средств измерения нелинейных составляющих отклика устройств при воздействии сложными импульсными сигналами. 3.2.2.3 Освоение мелкосерийного производства семейства средств измерений, их сертификация в РФ, разработка сертифицированных методик измерений.

3.2.2.4 Освоение и разработка технологий изготовления элементов микронаноэлектроники и радиофотоники, основанных на электронной и лазерной литографии.

3.2.2.5 Продвижение разработок в миллиметровый диапазон частот, в оптическую область спектра.

3.2.2.6 Развитие аддитивных технологий в электронике и для изготовления сложных конструктивных элементов.

## 4 Управление и контроль

4.1 Руководство деятельностью ЦКП «Импульс» осуществляется директором, назначаемым приказом ректора ТУСУР на основании заключенного трудового договора по представлению проректора по НР и И.

4.2 На должность директора ЦКП «Импульс» назначается лицо, имеющее высшее образование и степень доктора или кандидата технических наук и стаж организационной работы не менее 3-х лет.

4.3 Директор ЦКП «Импульс» несет личную ответственность за выполнение возложенных на подразделение задач, предусмотренных Положением, в том числе за:

– достоверность документации, подготавливаемой ЦКП, правильность применения инструкций, положений, СТО;

- рациональную организацию труда сотрудников ЦКП;

- состояние охраны труда и безопасности;

- достижение целей в области качества на уровне ЦКП.

4.4 В отсутствие директора его обязанности выполняет сотрудник ЦКП, назначаемый приказом ректора в установленном порядке.

4.5 Права и ответственность ЦКП «Импульс» связаны с выполнением его функций и установлены через права и обязанности руководителя и сотрудни-ков, изложенные в соответствующих должностных инструкциях.

4.6 Штатное расписание ЦКП «Импульс» согласуется с проректором по НР и И.

4.7 Структура ЦКП «Импульс»:

4.7.1 Сектор перспективных разработок методов и аппаратнопрограммных средств в области СВЧ, радиофотоники и органической электроники.

4.7.2 Сектор перспективных разработок методов и аппаратнопрограммных средств в области нелинейной импульсной рефлектометрии.

4.7.3 Сектор измерений векторных параметров ВЧ и СВЧ устройств и монолитных интегральных схем в диапазоне частот от 300 кГц до 67 ГГц, в том числе с применением зондовых измерений. 4.7.4 Сектор разработки программных продуктов для создания виртуальных средств измерения сверхширокополосных устройств.

4.7.5 Технологический сектор прототипирования и изготовления ВЧ, СВЧ элементов на основе гетероструктур и элементов радиофотоники методами электронной и лазерной литографии.

4.7.6 Сектор аддитивных технологий.

4.8 Оборудование ЦКП «Импульс» представлено в Приложении 1.

4.9 ЦКП «Импульс» использует средства на достижение целей и решение задач, предусмотренных настоящим Положением.

4.10 Порядок обеспечения проведения научных исследований и оказания услуг определяет проректор по НР и И в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, в том числе Гражданским кодексом Российской Федерации, а также внутренними положениями ТУСУРа.

4.11 Услуги коллективного пользования научным оборудованием могут предоставляться как на возмездной, так и безвозмездной основе в соответствии с Приложением 2 к настоящему Положению.

4.12 Проведение ЦКП «Импульс» научных исследований и оказание услуг заинтересованным внешним пользователям на возмездной основе осуществляется на основании договора между организацией-заказчиком и ТУСУРом.

4.13 Проведение ЦКП «Импульс» научных исследований и оказание услуг пользователям базовой организации на возмездной основе осуществляется на основании приказов или распоряжений.

## 5 Имущество и источники финансирования

5.1 Финансирование деятельности ЦКП «Импульс» осуществляет ТУСУР из средств, получаемых по договорам, в том числе в рамках выполнения государственных контрактов, направленных на выполнение работ по развитию сети ЦКП, а также по договорам с внешними пользователями оборудования ЦКП.

5.2 Основные фонды и иное имущество имущество ЦКП «Импульс» являются федеральной собственностью, закреплены за ТУСУР на праве оперативного управления и находятся на ответственном хранении у материальноответственных лиц.

5.3 Директор ЦКП организует обеспечение достоверного учета и сохранности товарно-материальных ценностей, закрепленных за материально ответственными лицами.

5.5 Сотрудники ЦКП «Импульс» обязаны использовать имущество бережно и экономно и в соответствии с его целевыми функциями.

5

Приложение 1 к Положению о ЦКП «Импульс» от «<u>21</u>»<u>01</u> 20<u>10</u>г.

## ПЕРЕЧЕНЬ

научного оборудования Центра коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс») ТУСУРа

	Аппаратно-программный комплекс для проведения микроволнового анализа на базе зондовой станции Cascade M150
1.	Марка: Cascade M150
	Количество единиц: 1
	Год выпуска: 2012
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 3545500
	Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: не указано
	Векторный анализатор цепей N9952A
	Марка: N9952A
2	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2017
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (рус.); 404/9/0
	Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения. да
	Векторный анализатор цепей ZVA40
	Mapкa: ZVA40
3.	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2017
	Балансовая (восстановительная) стоимость сдиницы (рус.). 7410000
<u> </u>	Наличие сертификата и других признаков метрологического осеене тення: не указано
	Генератор CBЧ сигналов Rohde&Schwarz
	Mapka: Rohde&Schwarz
4.	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2017
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (рус.). 2700000
	Наличие сертификата и других признаков метрологического осеспечения. да
	Испытательная климатическая камера (тепло-холод)
	Mapka: ESPEC SU-262
5.	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2017
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (рус.). 1055000
	Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения. да
	Микроскоп INM 100 UV
	Mapka: INM100UV
6.	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2009
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (рус.). 5510000
	Наличие сертификата и других признаков метрологического соссие тенни, не унисти-
	Нелинейный рефлектометр
	Марка: Р4-И-02
7.	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2012
	Валансовая (восстановительная) стоимость единицы (руо.): 3700000

	Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: да
8.	Полуавтоматическая установка ультразвуковой микросварки ТРТ Марка: ТРТ НВ-05 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2015 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4750000 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: да
9.	Стенд измерения векторных характеристик цепей в импульсном режиме на базе Обзор 103, Caban 140, S5048, P4-И-01 Марка: Caban 140, S5048, P4-И-01 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2015 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1187450 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: да
10.	Стенд измерения мощностных характеристик на базе зондовой станции Cascade Microtech Summit 11К и СВЧ тюнеров Марка: Summit 11К Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2009 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 13391703,20 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: не указано
11.	<b>Технологическая линия фотолитографии</b> Марка: Адсорбционная азотная установка АдА-0,010, БАВнп-01-Ламинар-С (9 ед.), станция деионизованной воды, станция оборотной воды Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2009 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4224290 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: не указано
12.	Установка допроявления фоторезиста YES-G500 Марка: YES-G500 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2009 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4366000 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: да
13.	Установка нанесения фоторезистов Марка: OPTIspin SB20 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2009 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1970600 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: да
14.	Установка отмывки пластин Марка: ОРТwet SB30 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2009 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 6136000 Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения: не указано
15.	Установка электронно-лучевого и ВЧ магнетронного напыления Марка: Orion-B

	Количество единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2009
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руо.): 10620000
	Наличие сертификата и других признаков метрологического обеспечения. не указано
16.	Платформа плоттерной печати с импульсным изменением выталкивающего дав- ления при цифровом управлении механизмом микродозирования Фирма-изготовитель: ТУСУР Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2014 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1288331,24
	Платформа УНУ, в которой реализуется ультразвуковое дозирование чернил при
17.	печати на подложку Фирма-изготовитель: Sono-Plot, ТУСУР Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2013 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1160389,85
18.	Установка вакуумная для термического напыления материалов VSE-VPD-LTE Фирма-изготовитель: ЭПОС-инжиниринг Кол-во единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2017
L	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (рус.): 8 500 000
19.	Установка плазмохимического травления STE ICP200E0 Semifled Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 19 000 000
	Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq
20.	Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 9 000 000
	Профилометр оптический 3 D
21.	Модель Profilm 3D Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4 000 000
	Планетарная шаровая мельница Pulverisette 7 Premium Line
22.	Производитель: FRITSCH Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: : 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.)1 919 355,00
23.	Электромагнитный Вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO Производитель: FRITSCH) Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию : 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1 004 493,00
24.	Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec Производитель: FRITSCH) Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2019 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 5 140 677.00

25.	Анализатор цепей Keysight Technologies N5247В с комплектом аксессуаров Кол-во единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2019
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 37 304 843,00
26.	Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A
	Дата ввода в эксплуатацию
	Кол-во единиц: 1
	Дата ввода в эксплуатацию: 2019
	Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 11 998 173,00

# Регламент доступа к имеющемуся оборудованию, предусматривающий порядок выполнения работ и оказания услуг, осуществления экспериментальных разработок в интересах третьих лиц, а также условия допуска непосредственно к работе на оборудовании

ЦКП «Импульс» имеет научно-организационную структуру, обладающую современным научным оборудовнаием, высококвалифицированными кадрами и обеспечивающую на имеющемся оборудовании проведение научных исследований и оказание услуг (исследований, испытаний, измерений, изготовления), в том числе в интересах внешних пользователей.

ЦКП «Импульс» оказывает услуги заинтересованным пользователям с использованием оборудования ЦКП «Импульс» в соответствии с Положением о ЦКП «Импульс», стоимость оказываемых услуг – договорная.

Типовой договор на проведение научных исследований и оказание услуг ЦКП «Импульс» соответствует формам, принятым в ТУСУР. Права на возможные результаты интеллектуальной деятельности, получаемые в ходе проведения научных исследований и оказания услуги, регулируются договором между ТУСУР и пользователем.

ЦКП «Импульс» осуществляет прием от заинтересованных пользователей технических заданий на проведение научных исследований и оказание услуг (далее - ТЗ). Форма ТЗ утверждается директором ЦКП «Импульс». ТЗ должно содержать в том числе: информацию о заявителе (организация, адрес, телефон и др.); описание работ (наименование, цель работы, объект исследований, предполагаемую продолжительность работ на оборудовании, желаемую дату начала и окончания и др.). ТЗ рассматриваются руководителем ЦКП «Импульс» по мере их поступления в течение установленного периода времени с момента регистрации заявки (1 раз в месяц).

По результатам рассмотрения ТЗ директор ЦКП «Импульс» принимает решение о возможности заключения с пользователем договора на проведение научных работ и оказание услуги и включает заявку в план работ ЦКП «Импульс». Решение о невозможности заключения договора должно быть мотивированным и доведено до сведения пользователя не позднее трех дней со дня принятия такого решения. Возможность допуска сотрудников внешнего пользователя непосредственно к работе на оборудовании ЦКП «Импульс» устанавливается в договоре на оказание услуги.

По завершению оказания услуги внешнему пользователю выдается отчет с протоколами измерений, содержащий результаты выполненных работ, а также оформляется акт выполненных работ, подтверждающий выполнение договорных обязательств в соответствии с ТЗ.

11

#### ПРИЛОЖЕНИЕ К

#### Копии публикаций сотрудников лабораторий молодых ученых со ссылками на ЦКП «Им-

пульс

Materials Physics and Mechanics 44 (2020) 110-115

Received: August 22, 2018

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOPOROUS OXIDE DIELECTRICS MODIFIED BY CARBON

#### Yu.V. Sakharov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40, Lenin Str., Tomsk, Russian Federation \*e-mail: iurii.v.sakharov@tusur.ru

Abstract. A physical method of receiving nanoporous films of the silicon dioxide  $(SiO_2)$  and tantalum pentoxide  $(Ta_2O_3)$  in vacuum conditions is brought forward in this work. The structure and properties of nanoporous films received as a result of self-organization at magnetron spattering of a compound target are researched in it. Correlations of the quantity and size of pores, the structure and properties of nanoporous films are determined, as well. The self-organization process proves to form spatially spattered pores, to change electrophysical properties of dielectric films and it enlarges their functions.

Keywords: nanoporous oxide films, carbon, self-organization process, magnetron spattering

#### 1. Introduction

The study of nanoporous dielectric films has been set a new impulse of late as a result of substantially enlarged sphere of their practical use. Such films can be used both in microelectronics as insulating stuff with low dielectric permittivity, and they can be used in photonics as anti-reflection coating in optoelectronic devices [1,2]. The nanoporous dielectric films can be also used as basic material for receiving nanomembranes and selective gassensing, sensor devices [3,4]. A number of methods of receiving nanoporous dielectric structure were worked out – anodizing, zol-gel method, matrix template synthesis are among them [2,5,6]. All the enumerated methods are chemical which makes it difficult to use them when producing micro – and nanoelectronics devices.

The purpose of the given research is to work out the integral schemes of the formation methods of nanoporous films of the silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) and tantalum pentoxide (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) basing on the technological modes of forming films with their structural and electrophysical properties.

#### 2. Experiment and measurement methods

The basis of the suggested method is the self-organization principle proceeding in the plasma glow discharge which is formed by DC magnetron spattering source, compound spattering targets Si:C (graphite) or Ta:C (graphite) being its cathode [7]. The graphite area on the compound spattering target expressed in percentage -  $S_c$  varied in such a case, which resulted in changing the pore quantity and size. Spattering was done in the oxygen atmosphere with the pressure in an evacuated vessel equal to  $4 \times 10^{-1}$  Pa. Such are the conditions under which dielectric films of the silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) and tantalum pentoxide (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) are received, and injecting carbon is to make a sound nanoporous structure. The given method was patented earlier and it was used for receiving the films SiO<sub>2</sub> with low dielectric permittivity [8]. This method, however, is supposed to be applied to other oxide films used in micro – and

© 2020, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

© 2020, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS

http://dx.doi.org/10.18720/MPM.4412020\_13

Structure and properties of nanoporous oxide dielectrics modified by carbon

nanoelectronics, in  $Ta_2O_5$  in particular. The pore formation in this process is explained by gaseous compounds CO or  $CO_2$  which on educing, make the film friable forming in it open pores and gas inclusions.

The thickness of the dielectric films which were researched in the electrophysical operations was 100 nm. The films Al, about 100 nm thick, were used as electrodes at electrical measurements. These films were made by means of thermal evaporation in vacuum. Condensing structures Al-SiO<sub>2</sub>-Al and Al-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al were formed like matrixes with the active area of 1x1 mm on the ceramized substrates of 60×48×0.6 mm in size.

The determination of the pore quantity and size was done by means of electrochemical copper jumping. The width of the Tauc gap (Et) was defined by the extrapolation  $(\alpha E)^{1/2}$  dependence on the photon energy E in the range of the wave lengths of 200-1100 nm [9]. The spectral dependence of the film absorption index ( $\alpha$ ) was defined by transmission and reflection spectrums with the help of spectrometer USB2000. The determination of the thickness and dielectric film refraction index was stated by means of a spectral ellipsometric complex. The microanalysis was done with the help of the Bruker Quantax 50 EDX microanalyzer as a part of an electron microscope Hitachi TM-1000. The spectral analysis of the researched films was done by using an IR –spectrometer in the range of the frequencies of 500 – 5000 sm<sup>-1</sup>.

#### 3. Experiment results and analysis

**Electric properties.** The research of the electric capacity of the structures Al-SiO<sub>2</sub>-Al and Al-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al has revealed the general tendency of dielectric permittivity changing and that of angle tangent of dielectric losses with the increase percentage of graphite content on the compound target when  $S_c < 40\%$ , however, at great values of  $S_c$  the qualitative type of dependences differed. At the same time the dependence of electric strength on  $S_c$  was similar, and it decreased gradually for the both structures (Fig. 1, Fig. 2)



Fig. 1. Dependence of dielectric permittivity ε, tangent losses tgδ (a) and electric strength Ed on S<sub>c</sub> (b) for the structure Al-SiO<sub>2</sub>-Al

It is evident that the reduction of dielectric permittivity for films SiO<sub>2</sub> can be explained only by the formation of gas inclusions, because all the other possible ways (the formation of chemical bonds of silicon with carbon, the formation of carbon injections) would lead to an opposite result. The tangent reduction of the dielectric loss angle is supposedly connected both with the gas inclusions, having a considerably smaller tangent of loss angle, and also with the reduced film defect because of the chemical reactions which are supposed to be more intensive in the places of defect localization. The growth of these values at  $S_c > 40\%$  is caused by the oxygen deficit and formation of films  $SiO_x$ , in which x proceeds to 1 which can result in the formation of local regions containing underoxidized silicon and, hence, can enlarge tangent of dielectric loss angle. This is verified by the microanalysis, Auger electron spectroscopy (AES) and IR-spectroscopy data. Electric strength reduction is quite characteristic of nanoporous films that have heterogeneous structure, and probably, it is connected with penetration of the material of the upper electrode into the dielectric film [10].



Fig. 2. Dependence of dielectric permittivity ε, tangent losses tgδ (a) and electric strength Ed on S<sub>c</sub> (b) for the structure Al-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al

On the analogy of the previous account, the same changes are supposed to occur in the films Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, however, the dependence type in them is somewhat different, which can be explained by the chemical properties of Ta, itself.

**Optical properties.** The research of physical properties of dielectric films  $SiO_2$  and  $Ta_2O_5$  has revealed the change of the refraction index n and the width of the optical gap Et (Fig. 3).



Fig. 3. Refraction index dependence n (at the wavelength  $\lambda$ =632 nm) and that of the width of the optical gap Et on S<sub>c</sub> for the structure Al-SiO<sub>2</sub>-Al (a) and Al-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al (b)

The behaviour of the refraction index correlates with the change of dielectric permittivity, which is quite conformable to the theory. Reduction of the width of the optical

#### 112

gap can be connected both with the electronic structure change of dielectric films, themselves, and the presence of gas in the pores.

Structure of surface. The research of the dielectric film porosity illustrated quite even distribution of the pores over the dielectric area. Small mesopores with the diameter of less than 10 nm and larger ones with the diameter of more than 50 nm can be visually distinguished [11]. The porosity of the film SiO<sub>2</sub> considerably rises with the value growth of  $S_c$  reaching its peak at  $S_c \sim 50\%$ , then the growth is replaced by the saturation area (Fig. 4). The qualitative dependence type for the films SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> is equal, at that. Porosity was determined by capacitance method [12]. The structure of the surface also undergoes considerable changes (Fig. 5).



Fig. 4. Relationship between porosity of dielectric film SiO2 and Sc



Fig. 5. The surface of the nanoporous dielectric SiO<sub>2</sub> (S<sub>c</sub> = 60%) received with the help of the probe microscope: a - surface of the plate, b - chip in the edge of the plate, c - surface of the plate (with an upper aluminium electrode with a thickness of 200 nm) d - chip in the edge of the plate (with an upper aluminium electrode with a thickness of 200 nm)

Spectral analysis. The analysis of the structure of the researched films  $SiO_2$  done by a microanalyzer revealed some rise of oxygen content with the growth of Sc, the same concerned the films Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Moreover, IR spectrums of the researched films proved a sharp growth of absorption at the wavelength v=2350 sm<sup>-1</sup> corresponding to oscillations of bonds C-O. There are also changes in the area: v<sub>1</sub> =3000 sm<sup>-1</sup>, v<sub>2</sub> =3400 sm<sup>-1</sup>, v<sub>3</sub> =3600 sm<sup>-1</sup>, and also some changes of peak v<sub>4</sub> =935-940 sm<sup>-1</sup>. Peaks v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>, v<sub>3</sub> are usually referred to as OH – groups and H<sub>2</sub>O molecules, peak v<sub>4</sub> refers to Si-O-Si bond (valency oscillations) [13].

Supposedly, it can be explained by the presence of water in the pores owing to the capillary effect, and also to the reaction products – gases CO or CO<sub>2</sub>. It can occur, as well, owing to the adsorption of gases CO or CO<sub>2</sub> from the atmosphere [14]. The given peak amplitude rises with the growth of Sc, which can be connected with the occurrence of oxygen vacancies in the silicon and negative charge. The occurrence of the effective negative charge on the silicon atom adds to a better adsorption capacity. Thus this resulted in the stimulated adsorption. The preliminary experiments have already proved the selectivity of hydrocarbons and gas CO adsorption, and also of organic compounds with different functional groups.

#### 4. Conclusions

 The experiments proved that the carbon injection into the process of the formation of the films SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> leads to the formation of self-organized nanoporous structure. The size and density of the pores is determined by the quantity of the injected carbon.

 Electrical and optical parameters of the films SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> are largely defined by the porosity and they have similar tendencies in some intervals, however, the general dependence type is stated by the chemical properties of the spattered material, itself.

3. Common tendencies in the change of electrophysical properties and in the surface structure of the films SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with the carbon injected into them, make it possible to assume that analogous changes will be developed in other oxide dielectrics which are formed in the plasma of the glow discharge, though the qualitative dependence type will be different.

4. The formation of the nanoporous structure contributes to the rise of the selective adsorption capacity of the researched dielectrics, mainly, owing to capillary condensation in mesapores and also stimulated adsorption, which can serve the basis of creating gas-sensing sensor devices [15].

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the scientific project Theoretical and experimental studies of ultra-wideband optoelectronic devices of fiber-optic information transmission systems and radio photonics based on photonic integrated circuits of its own design"carried out by the team of the LIOR scientific laboratory with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (project number FEWM-2020-0040). The experimental results were obtained using the equipment of Impulse CCP (registration number 200568)..

#### References

 Gidley DW, Peng H, Vallery R. Positron Annihilation Spectroscopy. In: Baklanov M, Maex K, Green M (eds.) Dielectric Films for Advanced Micr-oelectronics. Chichester: Wiley; 2007. p.86-100.

[2] Sadykov AI, Kushnir SE, Roslyakov IV, Baranchikov AE, Napolskii KS. Selenic acid anodizing of aluminium for preparation of 1D photonic crystals. *Electrochem. Commun.* 2019;100: 104-107.

[3] Sakharov Y, Troyan P, Zhidik Y. Energy efficient sensors based on carbon-modified silica films. In: Proc. 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE; 2019. p. 18739807.

114
### ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 537.9

DOI: 10.17223/00213411/63/7/31

### Ю.С. ЖИДИК<sup>1,2</sup>, П.Е. ТРОЯН<sup>1</sup>, В.В. КОЗИК<sup>3</sup>, С.А. КОЗЮХИН<sup>8,4</sup>, А.В. ЗАБОЛОТСКАЯ<sup>4</sup>, С.А. КУЗНЕЦОВА<sup>3</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ІТО

Приведены результаты исследования электрофизических характеристик пленок ITO, полученных методом магнетронного распыления. Показано, что значительному увеличению электропроводности пленок ITO способствует проведение высокотемпературного отжига вспедствие двух процессов. Во-первых, высокотемпературная обработка пленок ITO после их синтеза способствует образованно кристаллической структуры, за счет чего увеличивается подвижность носителей заряда. Во-вторых, в результате проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ITO становится полностью электрически активной, что приводит к увеличению концентрации заектронов проводимости и смене механизма электропроводности от полупроводникового к металическому.

Ключевые слова: пленки ITO, электропроводность, удельное сопротивление, подвижность носителей заряда, концентрация носителей заряда.

#### Введение

В настоящее время характеристики современных приборов микро- и наноэлектроники в значительной степени определяются низкоразмерными свойствами полупроводниковых материалов. В отличие от традиционных полупроводниковых материалов оксиды переходных металлов обладают более широким спектром электрофизических свойств, например сочетанием высокой электропроводности и высокого коэффициента пропускания в видимой части спектра. С учетом этого все большую значимость приобретает новое направление развития электроники, базирующееся не на основе кремния, а на основе оксидных полупроводниковых материалов, – прозрачная электроника [1–3]. В связи с этим изучение электрофизических свойств прозрачных проводящих оксидов металлов является актуальной задачей.

Наиболее используемый на данный момент в электронике материал такого класса – тонкие пленки оксида индия, легированного оловом (Indium Tin Oxide, ITO). Оксид индия относится к вырожденным полупроводникам *n*-типа [4] с широкой запрещенной зоной (от 3.6 до 4.3 зВ) при ширине зоны вырождения (3–5)*kT*. Наличие высокой концентрации электронов проводимости в пленках ITO обусловлено отклонением их состава от стехнометрии [5]. Электроны проводимости в таких пленках доставляются из донорных состояний, связанных с кислородными вакансиями или избытком ионов металла [3].

Относительно низкая энергия образования обычных прозрачных проводящих оксидов способствует большому дефициту кислорода даже в условиях равновесного роста [6]. Формула оксида индия в таком случае может быть записана как In<sub>2</sub>O<sub>3-4</sub>(V)<sub>x</sub>, где V – дважды заряженная вакансия кислорода донорного типа, поставляющая в зону проводимости два свободных электрона. Значения параметра x обычно менее 0.01 [7]. Концентрация свободных носителей заряда составляет 10<sup>19</sup>–10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>. Повысить концентрацию электронов проводимости ITO-пленок удается путем их легирования четырехвалентным оловом, замещающим ионы In<sup>3+</sup>, и кислородными вакансиями, образованными во время роста пленок или в результате высокотемпературного отжига, проводимого после осаждения пленок, что приводит к образованию соединения In<sub>2-y</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>3-2y-π</sub>(V)<sub>x</sub>. В результате такого легирования концентрация свободных носителей заряда возрастает до 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>, а их подвижность составляет от 10 до 30 см<sup>2</sup>/(B-с) [5].

В связи с наличием двух одновременно взаимодействующих механизмов электропроводности вопросом, требующим своего решения, является детальное исследование механизмов проводимости и электрофизических свойств тонких пленок ITO.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11037. Исследуемые образцы подготовлены в лаборатории ЛИОР ТУСУРа с использованием оборудования ЦКП «Импульс».

#### Экспериментальная часть

### Изготовление образцов

Экспериментальные образцы тонких пленок ITO для исследований напылялись на диэлектрических подложках методом реактивного магнетронного распыления мишени из сплава In(90 %)/Sn(10 %) в смеси газов O<sub>2</sub> и Ar по технологии, апробированной нами ранее и описанной в [8]. Для более детального исследования электрофизических свойств пленок ITO и происходящих в них физических процессов синтез образцов производился в рабочей газовой смеси с соотношениями O<sub>2</sub>/Ar, при которых формируются оптически прозрачные пленки с низким удельным сопротивлением [9]: 13 % O<sub>2</sub> + 87 % Ar с последующим отжитом образцов в атмосфере воздуха при температуре 600 °C в течение 20 мин (далее технология № 1); 16 % O<sub>2</sub> + 84 % Ar с последующим отжитом образцов в атмосфере N<sub>2</sub> при температуре 600 °C в течение 20 мин (далее технология № 2).

### Методы экспериментального исследования

Измерение сопротивления осуществляли четырехзондовым методом. Электронно-кинетические характеристики носителей зарядов (концентрация и подвижность) определяли путем проведения холловских измерений. Механизмы электропроводности оценивали по результатам анализа температурных зависимостей электропроводности образцов пленок ITO. Методики измерений указанных величин приведены в [10].

Результаты исследования удельного сопротивления и электронно-кинетических характеристих носителей заряда пленок ITO, осажденных в указанных режимах методом магнетронного распыления, приведены в таблице.

Электрофизические характеристики		Технология напыления пленок ITO	
		Ne l	N≘ 2
Без отжига	ρ <sub>V</sub> , Ом∙см	2.5.10-3	> 8.0
	n, cm <sup>-3</sup>	5.08-10 <sup>19</sup>	-
	µ, см²/(В·с)	1.9	-
После отжига	ρ <sub>V</sub> , Ом∙см	2.0.10-4	1.5-10-4
	n, cm <sup>-3</sup>	9.09-10 <sup>19</sup>	3.4-10 <sup>19</sup>
	μ, cm <sup>2</sup> /(B·c)	14.4	57.7

### Результаты исследования влияния условий получения на электрофизические характеристики пленок ITO

Анализ электронно-кинетических характеристик носителей заряда пленок ITO показал, что высокотемпературный отжиг пленок ITO приводит к увеличению электропроводности пленок, что обусловлено увеличением одновременно как концентрации свободных носителей заряда, так и их подвижности. Увеличение концентрации свободных носителей, вероятнее всего, связано с тем, что в результате высокотемпературного отжига происходит активация примесных атомов Sn<sup>IV</sup>, замещающих атомы In<sup>III</sup> в узлах кристаллической решетки ITO, что хорошо согласуется с результатами, приведенными в [11, 12]. Одновременно происходит диффузия атомов кислорода, внедренных между узлами кристаллической решетки или расположенных на границах зерен, из объема пленки ITO в атмосферу. На наш взгляд, образующиеся кислородные вакансии и замещение трехвалентного индия на атомы четырехвалентного олова в узлах кристаллической решетки выступают в качестве доноров электронов, увеличивая их концентрацию. Увеличение подвижности носителей заряда, вероятно, происходит за счет процессов кристаллизации пленок в процессе отжига [12]. Это подтверждается исследованием фазового состава пленок ITO до и после отжита методом рентгенофазового анализа, результаты которого представлены на рис. 1.

Анализ полученной рентгенограммы показал, что в процессе отжига пленок ITO происходит частичное образование кристаллической структуры в объеме пленки, однако большую часть пленки продолжает составлять аморфная фаза. При этом ориентация плоскостей отражения (222) преобладает и соответствует плотноупакованной плоскости [111], в направлении которой происходит наиболее интенсивный рост кристаллов.



Рис. 1. Рентгенограмма пленок ITO до и после отжига

По результатам исследований меньшим удельным сопротивлением обладают образцы, напыленные по технологии № 2 с последующим высокотемпературным отжигом в среде N<sub>2</sub>. На рис. 2 приведен спектр пропускания пленок ITO, изготовленных по этой технологии.

При изучении механизмов электропроводности наиболее удобным методом является исследование температурной зависимости электропроводности, которая у полупроводников определяется температурной зависимостью как концентрации носителей заряда, так и их подвижности.



Рис. 2. Спектр пропускания образцов пленок ITO, напыленных по технологии № 2

Теоретически для собственного полупроводника в координатах  $\ln \sigma - f(1/T)$  эта зависимость является прямой линией с углом наклона, тангенс которого пропорционален  $\Delta E_0/2k$  [13]. В примесном полупроводнике зависимость  $\ln \sigma - f(1/T)$  – более сложная. При низких температурах концентрация носителей заряда определяется интенсивностью процесса ионизации примесей, а  $\mu \sim T^{3/2}$ . При высоких температурах большая часть носителей заряда получается за счет генерации пар, а  $\mu \sim T^{-3/2}$ . Таким образом, на зависимости  $\ln \sigma - f(1/T)$  для примесного полупроводника просматриваются следующие участки. Для низких температур хорошо выделяется участок примесной электропроводности, показывающий ее рост с увеличением температуры. После того как примесни нонизированы, электропроводность может несколько уменьшаться за счет падения подвижности носителей. При дальнейшем увеличении температуры электропроводность примесного полупроводность полупроводности носителей. При дальнейшем увеличении температуры электропроводность примесного полупроводность ополупроводности.

Измерения температурной зависимости электропроводности производили в диапазоне температур от 300 до 550 К при частоте 1 кГц и (рис. 3).



Рис. 3. Температурная зависимость электропроводности пленок ITO без высокотемпературного отжига (α) и после проведения отжига (δ)

На построенных зависимостях электропроводности исследуемых пленок ITO от температуры можно выделить следующие характерные участки. В диапазоне от 300 до 430 К при увеличении температуры электропроводность экспериментальных образцов монотонно возрастает за счет ионизации примесных атомов Sn независимо от проведения высокотемпературного отжига. Рассчитанные на этом участке значения энергии активации для образцов пленок ITO без высокотемпературного отжига и с отжигом составили 0.0212 и 0.0017 эВ соответственно. Снижение энергии активации проводимости на порядок после проведения высокотемпературного отжига пленок указывает на уменьшение ширины энергетического зазора между зоной проводимости и валентной зоной, по всей видимости за счет образования в запрещенной зоне материала примесных уровней [14]. Это, в свою очередь, указывает на то, что в результате проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ITO становиться полностью электрически активной.

При дальнейшем увеличении температуры нагрева исследуемых образцов изменение их электропроводности происходит не одинаково, что указывает на различие в доминирующих механизмах электропроводности. Электропроводность образцов, не подвергавшихся отжигу после напыления, с увеличением температуры выше 450 К продолжает возрастать (рис. 3, *a*). Очевидно, после напыления пленок ITO не вся примесь в них является активированной, и активация легирующей примеси происходит лишь при проведении высокотемпературного отжига, что и ведет к росту концентрации электронов проводимости. Электропроводность пленок, подверженных высокотемпературному отжигу после напыления, с увеличением температуры выше 450 К значительно снижается (рис. 3, *б*). Вероятно, это связано с истощением образующихся при синтезе пленок ITO примесных уровней, когда концентрация носителей заряда не увеличивается, а подвижность носителей продолжает падать, что указывает на металлический тип электропроводности.

### Выводы

В результате исследования электрофизических свойств пленок ITO, напыленных методом реактивного магнетронного распыления, показано, что проведение отжига пленок при температуре 600 °C сразу после напыления способствует значительному увеличению их электропроводности за счет увеличения подвижности носителей заряда и их концентрации. Выявлено, что в результате проведения отжига при температуре 600 °C примесь в пленках ITO полностью становиться электрически активной, что приводит к смене механизма электропроводности от полупроводникового к металлическому. Переход к металлическому механизму электропроводности пленок ITO после их высокотемпературного отжига подтверждается изменением характера температурной зависимости электропроводности, а также снижением на порядок энергни активации проводимости. Установлено, что наилучшим сочетанием низкого удельного сопротивления и высокой оптической прозрачности обладают пленки ITO, полученные по технологии № 2 (распыление мишени In(90 %)Sn(10 %) в среде рабочей газовой смеси O<sub>2</sub>(16 %)/Ar(84 %)) с последующим отжигом в атмосфере № 100 °C в течение 20 мин: ρ<sub>V</sub> = 1.5·10<sup>-4</sup> Ом·см, *n* = 3.4·10<sup>19</sup>, μ = 57.7 см<sup>2</sup>/(B·с), пропускание в видимой области более 80 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семикина Т.В., Комащенко В.Н., Шмырева Л.Н. // Электроника и связь. – 2010. – № 3. – С. 20–28.

- 2. Лазаренко П.И., Козюхин С.А., Мокшина А.И. и др. //Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61. – № 1. – C. 171–176.
- 3. Facchetti A. and Marks T.J. Transparent Electronics: From Synthesis to Applications. NYSE: Wiley, 2010. – 452 p.
- Minami T. // Semicond. Sci. Technol. 2005. V. 20. No. 4. P. 35–44. 5
- Амосова Л.П. // ФПІ. 2015. Т. 49. № 3. С. 426-430. 6. Korotcenkov G., Ivanov M., Blinov I., and Stetter J.R. // Thin Solid Films. - 2007. - V. 515. - No. 7-8. - P. 3987-3996.
- Kim M.G., Kanatzidis N.A., Facchetti A., and Marks T.J. // Nature Mater. 2011. V. 10. No. 5. P. 382-388.
- Жидик Ю.С., Троян П.Е. // Доклады ТУСУРа. 2012. № 2(26). Ч. 2. С. 169–171.
   Амосова Л.П., Исаев М.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 127–132.
- 10. Смирнов С.В. Методы исследования материалов и структур электроники. Томск: ТУСУР, 2007. 143 с.
- 11. Gupta L., Mansingh A., and Srivastava P.K. // Thin Solid Films. 1989. V. 176. No. 1. P. 33-44.
- 12. Саlпап S. and Tiwari A.N. // Thin Solid Films. 2010. No. 518. Р. 1839–1849. 13. Битнер Л.Р. Материалы электронной техники. Томск: ТУСУР, 2019. 108 с.
- 14. Кульчин Ю.Н., Пушкин А.А., Маловицкий Ю.Н. и др. // ФТТ. 2009. Т. 51. № 8. C. 1530-1532.

Поступила в редакцию 08.05.2019,

после доработки - 28.02.2020.

- г. Томск, Россия <sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
- <sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Троян Павел Ефимович, д.т.н., профессор, ведущ. науч. сотр. лаб. ЛИОР ТУСУРа, e-mail: p.e.troyan@mail.ru;

Козни Владимир Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой НИ ТГУ, e-mail: vkozik@mail.ru;

Козюхин Сергей Александрович, д.х.н., профессор НИ ТГУ и ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, е-mail: sergkoz@igic.ras.ru;

Заболотская Анастасия Владимировна, к.т.н., науч. сотр. НИ ТГУ, e-mail: salon7878@mail.ru;

Кузнецова Светлана Анатольевна, к.х.н., доцент НИ ТГУ, e-mail: onm@chem tsu.ru.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

г. Томск, Россия <sup>4</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва, Россия

Жадак Юрий Сергеевич, науч. сотр. лаб. ЛИОР ТУСУРа, науч. сотр. ИОА СО РАН, e-mail: zhidikyur@mail.ru;

### ПРИЛОЖЕНИЕ Л

# Материалы конгресса 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020)

Institute of High Current Electronics SB RAS Tomsk Scientific Center SB RAS National Research Tomsk Polytechnic University Chongqing University of Arts and Sciences

# 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online)

Abstracts

September 14-25, 2020 Tomsk, Russia

Tomsk Publishing House of IAO SB RAS 2020



ISBN 978-5-94458-182-2

7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. — 635 pp. 1 CD-ROM. – System requirements: PC Pentium 1 or higher; Acrobat Reader 4.0 or higher.

Signed to use June 5, 2020 Publishing House of IAO SB RAS, 634055, Tomsk, pl. Akademika Zueva, 1. Phone: 8-3822-492384

This book comprises the abstracts of the reports (presentations) for the oral and poster sessions of VII International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online). Due to the unfavorable epidemiological situation associated with the COVID-19 pandemic, the Congress was held in a remote format using modern information technologies. The Congress incorporated together four international meetings: International Symposium on High-Current Electronics, International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, and International Conference on New Materials and High Technologies. It will be a good platform for researchers to discuss a wide range of scientific, engineering, and technical problems in the fields of pulsed power technologies; ion and electron beams; high power microwaves; plasma and particle beam sources; modification of material properties; pulsed power applications in chemistry, biology, and medicine; physical and chemical nonlinear processes excited in inorganic dielectrics by particle and photon beams; physical principles of radiation-related and additive technologies; self-propagating high-temperature synthesis; and combustion waves in heterogeneous systems.

OC Microsoft Windows; Adobe Acrobat. Published in author's version. Composed by Valery Shklyaev and Pavel Kiziridi

### CARBON MICROWAVE ELEMENTS<sup>1</sup>

### E.A. IVANCHIKOVA, I.A. EKIMOVA, V.N. FEDOROV, A.G. LOSCHILOV, N.S. TRUFANOVA, A.S. TRUFANOVA

<sup>1</sup>Tomsk State University y of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

The expansion of the scope of application of microwave devices not only in special, but also in household electronic equipment has led to the need to manufacture cheaper and lighter devices, including through the use of a technology for creating carbon-containing materials new for microwave technology [1,2]. At the same time, the question of methods and approaches to determining the complex parameters of these microwave devices remained relevant.

The paper reports on the results of a study of the frequency characteristics of microwave elements under pulsed exposure: two-port strip transmission lines based on carbon fiber (Fig. 1); horn antenna manufactured using additive 3D technology with metallization of the structure over the carbon sublayer (Fig. 2). Frequency characteristics were measured on the basis of the TsKP "Impulse" TUCSR and JSC "NPF" Mikran "using a nonlinear reflectometer and an automated measuring system using an anechoic chamber.



Fig.1. The segment of the strip transmission line based carbon fiber embedded



Fig.2. The appearance of carbon antennas

into the interruption of the asymmetric strip line on the dielectric.

The frequency dependences of the transmission S 21 (f) coefficient of the carbon strip line segment are shown in Fig. 3. The frequency dependence of the SWR antenna measured under the influence of a pulse with a front of 40 ps is shown in Fig. 4. The antenna radiation pattern was measured at frequencies from 4 GHz to 8.5 GHz, in Fig. 5 shows a diagram at a frequency of 8.5 GHz.



Fig.3.Frequency dependences of the insertion loss of the asymmetric strip line with an insert in the form of a CF-based strip line, with a width of the strip W=1,7 mm and a length l=62 mm: 1 – experimental; 2 – calculated

5.0m



Fig.4.Frequency dependence of the SWR of a horn antenna manufactured using additive 3D technology



antenna.

The measurement of the strip line parameters showed a satisfactory agreement between the experimental and theoretically calculated transmission coefficients (Fig. 3). Fig. 4 shows that the operating frequency of the antenna is 8.5 GHz. It is shown that measuring the characteristics of the antenna under pulsed exposure allows us to calculate the frequency characteristics (SWR and transmission coefficient) of elements of microwave devices made with the use of technology for creating composite carbon-containing materials.

#### REFERENCES

 Pantoja, J. P., Savu, R., Canesqui, M. A., Moshkalev, S. A., & Hernandez-Figueroa, H. E. Parformance comparison of metallic and graphene backypaper microstrip transmission lines. 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC).doi:10.1109/imoc.2017.8121104

<sup>[2]</sup> K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, 1 A. A. Pinov. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. Science, 306(5896), 666–660.doi:10.1126/science.1102896.

<sup>1</sup> The work was supported by Minimy of Science and Higher Education of Ramin. The measurements were carried our using the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project identifier RFMEFRO115X0005.

### PULSE AND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MICROWAVE ANTENNA BASED ON CARBON FIBERS

V.N. FEDOROV<sup>1,2</sup>, N.D. MALYUTIN<sup>2</sup> <sup>1</sup>North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia <sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia

Carbon fibers make it possible to design various microwave elements due to the unique electrical and mechanical characteristics [1, 2]. Strip transmission lines based on carbon fibers were studied in [3] and the experimental results of researching the pulse and frequency characteristics of carbon strip lines were presented. Authors these and others works have shown the applicability of carbon fibers for design of the strip transmission lines.

In this paper, we examined the characteristics of "Ground Plane" type carbon antennas and presented their experimental pulse and frequency characteristics in the near field zone. The view of carbon fiber based antennas is shown in fig. 1a. The antenna itself is placed in a plastic tube. The antennas were excited by a pulse in the form of a voltage step with a front of about 40 ps. The measurements were performed in the time domain on a double-beam stroboscopic memory oscilloscope Tektronix 11801B. Fig. 1b shows the voltage at the input of the emitting carbon antenna with highlighting the reflected signal, and the amplified voltage at the output of the receiving antenna is shown in blue.



Fig.1. Carbon antenna design with carbon base (a), voltages at the input of the receiving carbon antenna (blue color) and at the output of the radiating antenna (b) with highlighting the reflected signal.

The transition to the frequency domain is performed using the Fourier transform. The frequency dependences of the coefficients  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  scattering matrix are obtained. The effect on the transfer characteristics of the antennas was studied when replacing a metal base with a carbon base, as well as changing the carbon emitting element to copper. The frequency characteristics are studied by the classical method using a vector network analyzer.

It is shown that the impulse and frequency characteristics of carbon antennas obtained by two methods are well comparable. The placement of antennas above the surface of carbon materials leads to an increase in their broadband and in losses. The obtained results of the antenna's response to pulsed action make it possible to predict the electromagnetic radiation of structural elements from carbon materials, as well as the emission of metal elements over carbon surfaces.

### REFERENCES

 Aidin Mehdipour, Abdel R. Sebak; Christopher W. Trueman; Iosif. D. Rosca; Suong V. Hoa. Advanced conductive carbon fiber composite materials for antenna and microwave applications. Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 8-14 July 2012. DOI:10.1109/APS.2012.6349125.

[2] Mahan Rudd; Thomas C. Baum; Benjamin Mapleback; Kamran Ghorbani; Kelvin J. Nicholson. Reducing the Attenuation in CFRP Waveguide Using Carbon Fiber Veil. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume 27, Issue: 12, Dec. 2017. Pp. 1089 – 1091. DOI: 10.1109/LMWC.2017.2762243.

[3] Fedorov, V., Malyutin, N. Nonlinear Properties of a Strip Transmission Line Based on Carbon Fiber. 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Enginiaring. University Politechnica of Bucharest, Romania, June 30 – Julay 2, 2016. DOI: 10.1109/ISFEE.2016.7803222.

<sup>\*</sup> This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (state assignment). The measurements were carried out using the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project identifier RFMEFI62119X0029/





## PULSE AND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MICROWAVE ANTENNA BASED ON CARBON FIBERS

### <sup>1</sup>Fedorov V.N., <sup>2</sup>Malyutin N.D., MEMBER, IEEE,

<sup>1</sup>North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov Yakutsk, 677000, Russian Federation <sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) Tomsk, Russian Federation

### 2020

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project No. 075-15-2019-1644 of 11/08/2019, ID RFMEFI62119X0029.

## Introduction

Carbon fibers make it possible to design various microwave elements due to the unique electrical and mechanical characteristics [1, 2]. Strip transmission lines based on carbon fibers were studied in [3] and the experimental results of researching the pulse and frequency characteristics of carbon strip lines were presented. Authors these and others works have shown the applicability of carbon fibers for design of the strip transmission lines.

9/24/2020

<sup>[1]</sup> Aidin Mehdipour; Abdel R. Sebak; Christopher W. Trueman; Iosif. D. Rosca; Suong V. Hoa. Advanced conductive carbon fiber composite materials for antenna and microwave applications. Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 8-14 July 2012. DOI:10.1109/APS.2012.6349125.

<sup>[2]</sup> Mahan Rudd; Thomas C. Baum; Benjamin Mapleback; Kamran Ghorbani; Kelvin J. Nicholson. Reducing the Attenuation in CFRP Waveguide Using Carbon Fiber Veil. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume 27, Issue: 12, Dec. 2017. Pp. 1089 – 1091. DOI: 10.1109/LMWC.2017.2762243.

<sup>[3]</sup> V.N. Fedorov, and N.D. Malyutin "Nonlinear Properties of a Strip Transmission Line Based on Carbon Fiber," 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Enginiaring. University Politechnica of Bucharest, Romania, June 30 – Julay 2, 2016. 78-1-46-73-9575-5/16\$31.00© IEEE.

The model of carbon antennas over an aluminum grounded plate, carbon coating and the appearance of the experimental setup are shown in Fig. 1.



Fig. 1. The appearance of carbon antennas and the setup for the study of pulse characteristics of random antennas.

3

4

9/24/2020

The aluminum plate has the following dimensions 70×269×2 mm. Two coaxial-strip transitions are mounted on the plate. Carbon fibers with a length of 74 mm were connected via a conductive adhesive to conductors of the coaxial-strip transition located on the front face of the aluminum plate. Carbon fibers are placed in plastic tubes to retain a sufficiently flexible beam of carbon fibers. One of the antennas served as a transmitting antenna at pulse excitation, and the other served as a receiving antenna.

9/24/2020

The scheme of the experimental setup for the investigation of pulse characteristics of carbon antennas is shown in Fig. 2



The oscilloscope Tektronix 11801B with a generator unit and a receiver SD-24 served as a base meter. On the output channel 1 SD-24 there is a step-like pulse with a leading edge of nearly 150 ps (Fig. 3).



Fig. 3. A signal as a dependency of voltage on time  $U_1(t)$  at the output "Channel 1" SD-24.

5

6

Fig. 2. The scheme of the setup for the study of pulse characteristics of random carbon antennas.

Fig. 4 shows the dependence of voltage of the incident wave U1in(t) on time at the output of the directional bridge, i.e., at the input of the transmitting carbon antenna.



Fig. 4. The dependence of the incident wave voltage Uin(t) on time at the output of the directed bridge (acting pulse).



Fig. 5. Spectral envelope of signal Uin(t) at input carbon antenna 1.

9/24/2020

The pulse Uin(t) excites forced and free oscillations in the random carbon antenna 1. Spectral components of the pulse Uin(t) in , coinciding with the frequency f0 that corresponds to a quarter of the antenna wavelength in the random carbon monopole antenna 1, radiate into free space. Measurements of pulse characteristics with an aluminum ground plate and a plate made of carbon fabrics have been carried out. Fig. 6 shows the dependency of voltage at the second antenna Uout (t) for both specified options. A spectral analysis of signals Uout (t) has been carried out using a direct Fourier transformation. The results are presented in Fig. 7 in the form of envelops of spectral components.



Fig. 6. The signal at the output of the antenna 2 with a ground plane in the shape of an aluminum sheet and the carbon fabric coating.



Fig. 7. Envelops of spectral components of signals received by the antenna 2 with a carbon plate (red) and an aluminum plate (blue).

7

8

### 9/24/2020

Comparing signal envelopes of the spectra (Fig. 7) shows that when the aluminum plate is coated with a carbon cloth the maximum of the spectral component at the resonance frequency of the receiving antenna is shifted from 0.6836 GHz up to frequency 0.7823 GHz, and the maximum amplitude decreases to 2.375 times.

The transmission coefficient S 21(f) was determined by two methods. The first method consists in calculating the expression |S21(f)|=20log(|Uout(f)/Uin(f)| wherein Uout(f) – the amplitude of the spectral components of the signal voltage at the output of the antenna 2 (Fig. 7) and Uin(f) – the amplitude of the spectral components of the incident signal voltage shown in Fig. 5. The change in the coefficient |S21(f)| when the ground plate is coated with carbon fabric is evaluated. Fig. 8 shows the dependences |S21(f)| in a frequency band, obtained at the excitation of the antenna 1 by a rectangular pulse (Fig.4).



Fig. 8. The frequency dependence of the transmission coefficient |S21(f)|, between two carbon antennas on the aluminum plate and coated carbon fabric. A rectangular pulse with a duration of 1 ns is fed to the transmitting antenna. The second method for determining |S21(21)| is based on the use of standard measurements of the frequency dependence with a vector network analyzer. Fig. 10, Fig. 11 illustrates the frequency dependence of the transmission coefficient |S21(f)| and return loss |S11(f)| of a pair of carbon fiber antenna and antenna made of copper conductors with a diameter of 0.5 mm. The substitution of carbon vibrators with copper has not led to a significant change |S21(f)|.



Fig. 10. The comparison of frequency characteristics of the transmission coefficient

|S21(f)|of carbon fiber antennas and a copper conductor on a carbon plate.

Fig. 11. The comparison of frequency characteristics |S11(f)|of carbon fiber antenna made and a copper antenna on a carbon plate.

9

9/24/2020

### CONCLUSION

Thus, it has been shown that pulse and frequency characteristics of carbon antennas obtained by two used methods are well comparable. Placing antennas of unmanned aerial vehicles (UAV) over the surface made of carbon materials leads to an increase in their broadband, and to an increase in losses. The use of transmitting and receiving antennas on UAVs and other objects made of carbon fiber introduces losses up to 5 dB, which must be considered in designing communication and control channels. The obtained results of the antenna response to a pulse action allow forecasting the electromagnetic radiation of construction elements made of carbon materials, as well as the radiation of metal elements over carbon surfaces.

## Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project No. 075-15-2019-1644 of 11/08/2019, ID RFMEFI62119X0029.

9/24/2020

## Thanks for yours attention

## Nickolay Malyutin ndm@main.tusur.ru

11

### ПРИЛОЖЕНИЕ М

### Копия статьи «Особенности интерференции синфазных и противофазных волн»

### ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СИНФАЗНЫХ И ПРО-ТИВОФАЗНЫХ ВОЛН С НЕРАВНЫМИ ФАЗОВЫМИ СКО-РОСТЯМИ В СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### А.Н.СЫЧЕВ, Н.Д. МАЛЮТИН1, Е.И. ТРЕНКАЛЬ, Г.А. МАЛЮТИН

Россия, Томск, проспект Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

<sup>1</sup>ndm@main.tusur.ru

Abstract. Рассмотрено распространение короткого импульса пикосекундного диапазона в связанных линиях с отношением фазовых скоростей противофазных и синфазных волн 3:1. Экспериментально показана особенность интерференции синфазных и противофазных волн в таких структурах, приводящая к разделению входного импульса между тремя портами без существенной потери энергии на отражение от входа. Установлено, что интерференция волн приводит к изменению направленных свойств рассматриваемых структур и разделению спектральных составляющих импульса между портами.

### 1. Введение

В теории связанных линий (СЛ) при решении телеграфных уравнений было введено понятие синфазных и противофазных волн [1-3]. В этих и других работах считалось, что фазовые скорости синфазных v<sub>e</sub> и противофазных v<sub>o</sub> волн равны и процесс распространения волн в линиях рассматривался как результат интерференции волн с одинаковыми коэффициентами распространения. Однако по мере развития теории и практики связанных полосковых линий с неоднородным в поперечном сечении диэлектрическим заполнением стало очевидным влияние неравенства v<sub>e</sub> и v<sub>o</sub> на частотные характеристики устройств на основе СЛ. В работах [4-8] были рассмотрены физические закономерности интерференции волн в связанных полосковых структурах при  $v_e \neq v_o$ , а также качественное и количественное изменение частотных характеристик устройств на основе СЛ и многосвязных полосковых структур. В 1969 г. впервые в работе [4] теоретически было показано, что некоторые всепропускающие схемы при неравенстве ve и vo приобретают фильтрующие свойства. В работе [8] это было подтверждено экспериментально. Практическое применение СЛ с неоднородным диэлектрическим заполнением стимулировало поиск и создание новых разновидностей конструкций СЛ, цели создания которых имели два противоречивых направления. В первом из них закладывалось стремление как можно сблизить ve и vo, чтобы избежать интерференции волн, приводящей к резонансным явлениям [9, 10]. В рамках второго направления осуществлялся поиск степени неравенства ve и vo для решения задач создания лучших частотноселективных характеристик устройств на основе СЛ [11, 12], создания устройств защиты аппаратуры от коротких импульсов [13, 14] и др.

Фазовые скорости  $v_e$  и  $v_o$  обычно определяют через эффективные относительные диэлектрические проницаемости при синфазном возбуждении  $\varepsilon_{reffe}$  и противофазном возбуждении  $\varepsilon_{reffe}$  связанных линий [5, 6]:

$$v_{e,o} = c / \sqrt{\varepsilon_{reffe,o}} , \qquad (1)$$

где с – скорость света.

Если СЛ одинаковые, тогда  $\varepsilon_{reffe,o}$  можно определить через погонные параметры связанных линий [15]:

$$\varepsilon_{reffe} = cL_{11} + L_{11}C_{11} - |C_{12}|, \quad \varepsilon_{reffo} = cL_{11} - L_{11}C_{11} + |C_{12}|, \quad (2)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  – элементы матрицы погонных емкостей,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  – элементы матрицы погонных индуктивностей.

Изучение зависимости параметров связанных линий от отношения  $v_e/v_o \ge 3$  привело к созданию конструкции СЛ, в которых отношение фазовых скоростей  $v_e/v_o \ge 3$  [17-18]. Было показано, что при  $v_e/v_o \ge 3$  интерференция синфазной и противофазной волн приводит к качественному изменению частотной зависимости параметров отрезка СЛ. Практическое применение таких СПЛ нашло при создании транснаправленного ответвителя (ТрНО) [16] на СЛ. Ответвитель реализуется на структуре с вертикальной вставкой с высокой диэлектрической проницаемостью, позволяющей обеспечивать троекратное отношение фазовых скоростей  $v_e$  и  $v_o$  и приемлемое импедансное согласование. В последующих публикациях была описана компьютерная модель такой структуры, базирующаяся на методе численных конформных преобразований [19]. В работах [17, 18] характеристики СЛ с отношением  $v_e/v_o \ge 3$  исследовались в частотной области.

В настоящей работе рассмотрено распространение сверхширокополосного импульса пикосекундного диапазона в связанных линиях при  $v_e/v_o \ge 3$ . Импульс подавался на входной порт первой линии. Проведено экспериментальное измерение импульсных сигналов на входе/выходе трех других портов и отраженного сигнала от входного порта устройства. Выполнен расчет спектров полученных импульсных откликов и анализ физических особенностей интерференции синфазных и противофазных волн в СЛ при импульсном воздействии.

### 2. Устройство и схема измерения

Соотношение фазовых скоростей синфазной и противофазной волн  $v_e/v_o$  зависит от конструкции связанных линий. В работах [16-19] это достигается вертикальным и горизонтальным расположением подложек 1 и 4 из разных диэлектриков с относительными диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon$ 1 и  $\varepsilon$ 2 и проводников 2 и 3 с шириной w1 и w2 (figure 1). На этом рисунке показана модификация конструктивного исполнения связанных полосковых линий, которая позволяет варьировать  $v_e/v_o$  в широких пределах. Figure 2 иллюстрирует поперечное сечение СЛ.

Связанные полоски шириной wl = 2 мм выполнены на подложке, размещенной вертикально по отношению к заземляемому основанию. Между нижним торцом подложки и основанием зазор D = 0,5 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\varepsilon l = 16,0$ . Материал подложки Флан-16. Остальные размеры поперечного сечения СПЛ: hl = 1,0 мм; h2 = 0,5 мм. Конструкция снабжена коаксиально-полосковыми разъемами. Длина отрезка связанных линий составляет l = 0,1 м. Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого показана на figure 3.



**Figure 1.** Конструкция связанных полосковых линий: 1 – вертикально расположенные подложка и нанесенные на ней полоски 2; 3 – горизнтально расположенные полоски на подложке 4; 5 – заземляемое основание с зазором под областью связи полосок 3.



Figure 2. Поперечное сечение связанных полосковых линий с изменяемым в широких пределах соотношением фазовых скоростей синфаных и противофазных волн при изменении размеров и диэлектрических проницаемостей вертикально и горизонтально расположенных подложек и проводников.



Figure 3. Схема для исследования импульсных характеристик отрезка связанных полосковых линий.

Схема установки состоит из импульсного генератора, представляющего собой связку опорного генератора Geozondas GZ1105DLP2 и формирователя импульсов GZ1117DN-35, делителя (сплиттера) Picosecond 5372. Импульсный генератор соединен с входом делителя, который имеет развязку 14 дБ с выходом 1. Ослабление импульса, поступающего на выход 2 делителя составляет 2 дБ. Этот импульс подается через отрезок коаксиального кабеля на порт 1 исследуемого устройства. Осциллограф типа DSA 8300 имеет два входа, что позволяет наблюдать два импульсных сигнала с выхода 2 делителя и с одного из трех портов 2, 3, 4. При этом осциллограф синхронизируется от импульсного генератора.

### 3. Экспериментальные результаты

В процессе экспериментальных исследований проведено измерение импульсных сигналов при одинаковых нагрузках портов 1-4  $Z_{load1},...,Z_{load4} = 50$  Ом. Была поставлена задача выявления особенностей распространения входного импульса по связанным линиям устройства. Figure 4 иллюстрирует запись импульса, подаваемого в порт 1 с выхода 2 делителя длительностью 40 пс и амплитудой -0,7 В. Зависимость напряжения от времени на выходе порта 3 показывает, что входной импульс при передаче в порт 3 расщепился на два импульса с амплитудами -0,26 В и -0,22 В. Групповое время запаздывания этих импульсов относительно входного импульса соответственно на  $\tau_{ge} = 346$  пс и  $\tau_{go} = 996$  пс. Импульсные сигналы на портах 2 и 4 показаны на figure 5 и figure 6. В этом случае наблюдается более сложная картина прохождения входного импульса в виде последовательности импульсов с формой, близкой к форме входного импульса, и выбросов импульсов более сложной формы и с большей задержкой по времени. Амплитуда первого импульса с меньшей задержкой, прошедшего в порт 2, составляет -0,30 В, а первого импульса, поступившего в порт 4 равна -0,27 В.



**Figure 4.** Импульсные сигналы на входе (порт 1) и в порту 3 при нагруженных портах 2 и 4 на 50 Ом.

**Figure 5.** Импульсные сигналы на входе (порт 1) и в порту 2.



Для анализа механизма распространения входного импульса по связанным линиям транснаправленного ответвителя важной характеристикой является отражение входного импульса от порта 1. Поэтому проведены измерения отраженного импульса. Для этого между делителем и испытуемым устройством был включен отрезок коаксиального кабеля. В результате входной импульс и отраженный импульс были разделены по времени прихода их на вход осциллографа. Figure 7 иллюстрирует сравнение входного и отраженного импульсов. Максимальная амплитуда отраженного импульса составляет 0,1 В. Это позволяет качественно оценить модуль коэффициента отражения транснаправленного ответвителя при воздействии сверхширокополосного импульса как отношение амплитуд  $|\Gamma| = 0,1/0,7 = 0,14$ .



**Figure 7.** Сравнение входного и отраженного импульсов.

Известно [17], что частотная зависимость входного коэффициента отражения отрезка СЛ в широком диапазоне частот характеризуется периодическими полюсами. Поэтому при исследовании устройства ожидался значительный отраженный импульс. Но полученный отраженный сигнал, показанный на figure 7, не подтвердил наше предположение. Чтобы объяснить обнаруженный эффект, был проделан анализ спектров импульсного сигнала на входе устройства и на портах 2 - 4 (figures 4, 5 и 6). На figure 8 показаны огибающие спектров импульсных сигналов на входе первой линии (порт 1), на ее выходе (порт 3) и отраженного сигнала от входа исследуемого устройства.



**Figure 8.** Огибающие спектров импульсных сигналов на входе первой линии устройства (порт 1), на ее выходе (порт 3) и отраженного от входа сигнала.

Из figure 8 видно, что воздействующий сигнал (порт 1) имеет сплошной спектр, сигнал в порту 3 имеет решетчатый спектр. Наличие относительно небольших отражений гармонических составляющих от входа (показано черным цветом) не является причиной существенного уменьшения коэффициента передачи пропускаемых в порт 3 гармоник в диапазоне частот от 0,1 ГГц до 8 ГГц, так как коэффициент отражения невелик.

Ввиду наличия решетчатого спектра пропускания и отсутствия полюсов полного отражения гармонических составляющих сверхширокополосного сигнала возникает вопрос о направлении передачи не прошедших на порт 3 гармоник в другие порты. Были рассчитаны огибающие спектров сигналов на портах 2 и 4 (figure 9).



**Figure 9.** Огибающие спектров импульсных сигналов на входе устройства (порт 1) и на портах 2 и 4.

Анализ спектральных характеристик figure 9 показывает, что гармонические составляющие, не прошедшие в порт 3, почти с одинаковыми амплитудами вплоть до частоты 8 ГГц попали в порты 2 и 4.

### 4. Анализ волн в связанных линиях

Анализ волн, распространяющихся в связанных полосковых линиях с неравными фазовыми скоростями синфазных и противофазных мод, рассмотрен в работах [4-8]. Исходными данными являются матрицы погонных емкостей C и индуктивностей L, определенные по работе [19]:

$$C = \begin{bmatrix} 298 & -272 \\ -272 & 298 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \ \Phi/\text{m}, \ L = \begin{bmatrix} 0.322 & 0.144 \\ 0.144 & 0.322 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \ \Gamma\text{H/m}.$$
(1)

Рассмотрен отрезок связанных линий как восьмиполюсник, на входной порт которого под номером 1 подается ЭДС E1(f) с амплитудным и фазовым спектральным составом входного импульса (figure 4, figure 9, синий цвет). Используя известную связь напряжений и токов на входе и выходе связанных линий в терминах работы [7], находим абсолютные значения напряжений и токов в точках x = 0 и x = l (figure 3) в виде матриц

$$\begin{bmatrix} U(0)\\I(0)\end{bmatrix} \mathbf{u} \begin{bmatrix} U(l)\\I(l)\end{bmatrix},\tag{2}$$

где U(0), I(0) – напряжения и токи на входе устройства, а U(l), I(l) – напряжения и токи на выходе связанных линий. Получена связь между амплитудами синфазных и противофазных мод падающих волн  $A_e$ ,  $A_o$  и отраженных волн  $D_e$ ,  $D_o$  в первой линии [7]:

$$\begin{bmatrix} A_e \\ A_o \\ D_e \\ D_o \end{bmatrix} = [Am]^{-1} \begin{bmatrix} U_1(0) \\ U_2(0) \\ I_1(0) \\ I_2(0) \end{bmatrix},$$
(3)

где [*Am*] – матрица нормированных амплитуд. Она определяются таким образом:

$$\begin{bmatrix} Am \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ k_e & k_o & k_e & k_o \\ Y1_e & Y1_o & -Y1_e & -Y1_o \\ Y2_e & Y2_o & -Y2_e & -Y2_o \end{bmatrix}.$$
 (4)

Входящие в выражение коэффициенты матрицы [Am] вычисляются по работе [7]. На figure 10 показаны зависимости амплитуд  $A_e$ ,  $A_o$ ,  $D_e$ ,  $D_o$  от частоты гармонических составляющих воздействующего импульса.



Figure 10. Частотная зависимость амплитуд синфазных и противофазных составляющих волн в первой линии.

Из figure 10 видно, что в первой линии доминируют падающие составляющие синфазной и противофазной волны. Отраженные составляющие меньше по амплитуде, а период колебаний амплитуды синфазной составляющей в три раза меньше периода колебаний противофазной составляющей. Полученные значения  $A_e$ ,  $A_o$ ,  $D_e$ ,  $D_o$  позволяют построить полную картину волн, распространяющихся в связанных полосковых линиях и выявить особенности их интерференции в связи с существенным неравенством фазовых скоростей синфазных и противофазных составляющих. Запишем выражения для нахождения напряжений и токов в связанных полосковых линиях, являющиеся по существу решением системы телеграфных уравнений при известных граничных условиях на концах линий:

$$U1(x) = A_e \cdot \exp(-\gamma_e x) + A_o \cdot \exp(-\gamma_o x) + D_e \cdot \exp(\gamma_e x) + D_o \cdot \exp(\gamma_o x);$$
  

$$U2(x) = A_e k_e \exp(-\gamma_e x) + A_o k_o \exp(-\gamma_o x) + D_e k_e \exp(\gamma_e x) + D_o k_o \exp(\gamma_o x);$$
  

$$I1(x) = A_e Y 1_e \exp(-\gamma_e x) + A_o Y 1_o \exp(-\gamma_o x) - D_e Y 1_e \exp(\gamma_e x) - D_o Y 1_o \exp(\gamma_o x);$$
  

$$I2(x) = A_e Y 2_e \exp(-\gamma_e x) + A_o Y 2_o \exp(-\gamma_o x) - D_e Y 2_e \exp(\gamma_e x) - D_o Y 2_o \exp(\gamma_o x),$$
  
(4)

где  $\gamma_e$ ,  $\gamma_o$  – коэффициенты распространения синфазной и противофазной волн;  $k_e = \frac{\gamma_e^2 - \alpha_{1,1}}{\alpha_{1,2}}$ ,

$$k_{o} = \frac{\gamma_{o}^{2} - \alpha_{1,1}}{\alpha_{1,2}}, \quad Y1_{e} = \frac{Y_{1,1} + k_{e}Y_{1,2}}{\gamma_{e}}, \quad Y2_{e} = \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{e}}, \quad Y1_{o} = \frac{Y_{1,1} + k_{o}Y_{1,2}}{\gamma_{o}}, \quad Y2_{o} = \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad \alpha_{1,1}, \alpha_{1,2} - \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad Y2_{o} = \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad \alpha_{1,1}, \alpha_{1,2} - \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad Y2_{o} = \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad \alpha_{1,1}, \alpha_{1,2} - \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma_{o}}, \quad Y2_{o} = \frac{Y_{1,2} + k_{e}Y_{2,2}}{\gamma$$

элементы матрицы  $\alpha = ZY$ , где  $Z = R + i\omega L$  – матрица сопротивлений,  $Y = G + i\omega C$  – матрица проводимостей, записываются через R, L, G, C – матрицы погонных параметров, соответственно, активных сопротивлений, индуктивностей, проводимостей и емкостей. Был проведен расчет отклика связанных линий на воздействие импульса на основе формул (2)-(4) и распространения волн по координате x, описываемого как результат интерференции синфазных и противофазных падающих и обратных волн выражениями (7). Отклик определялся в виде ряда Фурье

$$u(t) = \sum_{n=0}^{M} \left| U_n \right| \cos\left(2\pi n f t + \varphi_n\right),\tag{8}$$

где f – частота основной гармоники воздействующего импульсного сигнала;  $|U_n|$ ,  $\varphi_n$  – модуль и фаза отклика на гармонике с номером n соответствующего порта.

На figure 11 показаны результаты расчета зависимости напряжения в порту 2 u2(t) от времени, рассчитанные двумя способами при определении частотной зависимости токов и напряжений – на основе матричных соотношений (2) (синий цвет) и путем суперпозиции синфазных и противофазных оставляющих волн (4) (красный цвет).



Figure 11. Зависимость от времени напряжения в порту 2 при воздействии 40 пс импульса на порт 1.

Из figure 11 видно хорошее совпадение сигналов, рассчитанных различным способом. Это дает основание утверждать, что амплитуды синфазных и противофазных падающих и обратных волн определены корректно (формула (3), figure 10). Неравенство фазовых скоростей синфазных и противофазных волн приводит в изменению как фазо-частотных, таки и амплитудно –частотных зависимостей сигналов в портах 2-4. Частотное разделение гармоник исходного сигнала было показано на figure 10, figure 11. Вносимые фазо-частотные искажения в исходный воздействующий сигнал в портах 2 и 4, расчетные и экспериментальные, показаны на figure 12, figure 13.





Сравнение частотной зависимости вносимого фазового сдвига, показанного на figure 12 и figure 13 показывает их существенное различие. Оно состоит в том, что фазовый сдвиг напряжения в порту 2 образуется в результате интерференции волн с разными фазовыми скоростями, поэтому производная от фазы по частоте в окрестности границы полосы пропускания, выделенной пунктирными линиями, меняет знак. Это указывает на разное влияние обратных волн с разными фазовыми скоростями, передаче сигнала в порт 4 приближается к виду, характерному для отрезка одиночной линии, т.к. при сложении волн доминируют падающие волны синфазной и противофазной мод в пропорции амплитуд примерно 2:1, а вклад обратных волн уменьшается к концу линии.

### 5. Обсуждение результатов

Проведенные измерения и расчеты показали особенности распространения сверхширокополосного импульса в связанных полосковых структурах с сильной неуравновешенностью электромагнитной связи между линиями. Эксперимент показал, что короткий импульс с непрерывным спектром до 30 ГГц, подаваемый на порт 1, отражается от него с относительно небольшим (менее 0,2) коэффициентом отражения. При этом происходит разделение мощности гармонических составляющих импульсного сигнала между портами 2, 3 и 4. Гармонические составляющие, не прошедшие в порт 3, попадают с примерно одинаковыми амплитудами в порты 2 и 4, являющиеся началом и концом второго полоскового проводника. Анализ фазовых соотношений гармонических составляющих в портах 2 и 4, поступивших с примерно одинаковым переходным ослаблением, показывает разницу фаз 90 град в диапазоне 1,04- 1,14 ГГц, 4,06-4,16 ГГц. Отмеченные особенности распространения короткого импульса в связанных линиях состоят в сочетании свойства направленного деления мощности и одновременно направленной фильтрации гармонических составляющих сигнала по трем портам.

### 6. Заключение

Таким образом, показана возможность распространения сверхширокополосных импульсов пикосекундного диапазона без существенной потери энергии на отражение от входа в отрезках связанных полосковых линий с отношением фазовых скоростей синфазных и противофазных волн 3:1. Экспериментально и в результате анализа установлено, что при этом происходит разделение спектральных составляющих импульса между портами. Сделан вывод о том, что интерференция синфазных и противофазных волн происходит по длине связанных линий с различной задержкой распространяющихся мод. В результате получается сочетание свойства направленного деления и частотной селекции (фильтрации), что может быть использовано при формировании сложных импульсных сигналов со спектральными составляющими на портах с равными амплитудами и ортогональными или противоположными по фазе. Полученные в настоящей статье результаты дополняют понимание эффекта расщепления коротких импульсов в модальных фильтрах на основе связанных многопроводных линий [13, 14].

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Измерения проведены на оборудовании ЦКП «Импульс», проект № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. ID RFMEFI62119X0029. **Литература** 

[1] E.M.T. Jones and J.T. Bolljahn, "Coupled strip transmission linefilters and directional couplers," IRE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-4, pp. 78–81, Apr. 1956.

[2] Shigenori Hayashi. Surges on transmission systems. 1955, Denki-shoin, Inc. Kyoto, Japan.

[3] Vlostovskiy E. Theory of coupled transmission lines. Telecommun. and Radio Engrg., 1967, 21, pp. 87–93.

[4] Zysman G.I. and Johnson, A.K. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1969. Vol. 17. No 10, p. 753-759.

[5] Allen, J.L. Non-symmetrical coupled lines in an inhomogeneous dielectric medium. International Journal of Electronics. 1975. Vol. 38. No 3. P. 337-347.

[6] Tripathi, VK. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1975, 23(9), p. 734–739.

[7] Malyutin, N.D. Matrix parameters of non-identical, coupled striplines with a non-homogeneous dielectric. Radio Eng. Electron. Phys. Volume 21, Issue 12, Dec, Pages 14-19.

[8] Vorob'ev, P.A., Malyutin, N.D. Analysis of the Characteristics of Coupled Strip Lines Using a Nonuniform Dielectric with Concentrated Controlled Discontinuities. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika. Volume 18, Issue 2, Feb, Pages 97-99.

[9] Cohn S. B. and Levy R., "History of microwave passive components with particular attention to directional couplers," IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1046–1054, Sep. 1984.

[10] Matthaei G, Young L, and Jones EM T. Microwave filters, impedance matching networks and coupling structures. Norwood (MA): Artech House; 1985.

[11] Belyaev, B.A., Tyurnev, V.V., Voloshin, A.S., and Galeev, R.G. A Microwave Bandpass Filter on Dielectric Layers with Metal Grids. Technical Physics Letters, 2018, 201844(5), c. 408-411. DOI: 10.1134/S1063785018050152.

[12] Belyaev, B.A., Serzhantov, A.M., Leksikov, A.A., Bal'va, Y.F., and Leksikov, A.A. Novel High-Quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(9),7159088, c. 579-581. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2451363.

[13] Belousov, A.O., and Gazizov, T.R. Simulation of the time response in multiconductor microstrip modal filters with separate accounting for losses in conductors and dielectrics. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - ProceedingsVolume 2018-March, 12 April 2018, Pp. 1-5. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337216.

[14] Khazhibekov, R.R., Zabolotsky, A.M., Zhechev, Y.S., Kosteletskii, V.P., Gazizov, T.R. Development of modal filter prototype for spacecraft busbar protection against ultrashort pulses. 2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 560(1),012145. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012145

[15] Sychev A.N., and Struchkov S.M. Parameter sets of the uniform coupled transmission lines with unbalanced electromagnetic coupling. TUSUR Reports, № 1 (31), march 2014. Pp. 39-50.

[16] Pat. 2585884 RU Transdirectional coupled line coupler with vertical plate / A.N.Sychev, S.M.Struchkov, et al. TUSUR, Appl. № 2015108565/28, Filed: 11.03.2015, Publ.: 10.06.2016, Bul. № 16.

[17] A.N. Sychev, S.M. Struchkov, et al. "A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit," in Proc. of the 45-th Eur. Microw. Conf., Sept. 2015, Paris, France, pp. 283–286. DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345755.

[18] A.N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi, "A transdirectional coupled-line coupler with a vertical insert," in Proc. 25th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015), Sept. 2015, Sevastopol, Russia, pp. 547–549.

[19] A.N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi, A.S. Salnikov "Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique," IEEE MTT-S Int. Conf. on

Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), May 2017, Sevilla, Spain.– P.124–126.

### ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Материалы доклада на симпозиуме по фундаментальным исследованиям электрических

систем

## Experimental research of space-time modulation in transmission lines with controlled nonlinear elements

Evgeniy I. Trenkal, Nickolay D. Malyutin, Member, IEEE, Vladislav S. Pozdnyakov

Annotation—The results of an experimental study of a structure in the form of a coplanar transmission line containing regulated nonlinear elements under impulse action are presented. Time and frequency characteristics are analyzed. The transformation coefficient of the reflected signal spectrum  $S_{TR}$  is defined as the ratio of the amplitudes of the spectral components of the response in the presence of nonlinear elements and the amplitudes of the spectral components in the absence of non-linear elements. It is shown that due to nonlinear distortions of the structure's response to pulse action the  $|S_{TR}|$  is greater than 1 in narrow frequency bands. It is concluded that the structure is partially non-reciprocal due to the appearance of nonlinear distortions in the reflected signal.

Ключевые слова—nonreciprocity, nonlinear elements, impulse, reflectometry, spectrum, space-time modulation.

#### I. INTRODUCTION

Recently, there has been an increased interest in devices rand media that have non-reciprocal properties when transmitting electromagnetic waves [1-5]. Non-reciprocity is achieved by space-time modulation of the passing wave. In the article [3], a structure in the form of a transmission line (TL) is proposed in which distributed modulated capacitors (DMC) are mounted (Fig. 1). Non-reciprocity is achieved by using an additional dimension – time dispersion – in the transmission line property. In [3], the frequency properties of the proposed structure are considered when transmitting a wave in the forward and reverse directions.



Fig. 1. A transmission line with variable in time parameters in which the linear capacity is a function of time and space (the longitudinal coordinate).

In this paper, we consider the reflection of a test pulse signal applied to the input of a transmission line that includes adjustable non-linear elements. In this case, the output of the transmission line is open.

The goal was to experimental research of the features of the

structure properties in the reflection of a pulse due to the space-time modulation of the conductivity of regulated nonlinear elements.

### II. THE LAYOUT OF THE TRANSMISSION LINE

The appearance of a transmission line with two adjustable non-linear elements is shown in figure 2. To analyze the effect of non-linear elements on the transmission of a pulse signal, a layout was made as a segment of a coplanar transmission line with included HSMS-8202 microwave diodes. The diode cathode was connected to the signal conductor, and the anode to the earth conductor. The diodes are located at a distance of 60 mm from the ends of the transmission line. The total length of the line is 350 mm.



Fig. 2. Photo of a transmission line with two adjustable non-linear elements.

### III. EXPERIMENTAL SETUP LAYOUT

For the research, we used an experimental setup, the diagram of which is shown in Fig. 3. The experimental setup includes:

- pulse generator;
- stroboscopic oscilloscope;
- splitter;
- bias tee;
- a transmission line with non-linear elements.

To obtain the test signal, a Geozondas GZ1105DLP2 reference generator, a GZ1117DN-35 pulse shaper, and attenuators providing an output signal amplitude of ~0.3 V with a duration of ~40 ps were used. The generated signal via the Picosecond 5372 pickoff tee was send to the DSA8300 stroboscope and the research object connected via the Picosecond 5545 bias tee, which is necessary for generating the offset voltage on the transmission line.

Figure 4 shows a photo of the experimental setup.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project No. 075-15-2019-1644 of 11/08/2019, ID RFMEFI62119X0029.



Fig. 3. Experimental setup diagram.



Fig. 4. Photo of the experimental setup.

The presence of a bias tee in the experimental setup diagram is necessary for change of non-linear elements of the transmission line to various modes. In the absence of DC voltage on the elements the passing pulse signal changes the mode of operation of the diode to "open" condition, so that its internal resistance decreases. This leads to the appearance of a significant response amplitude on the object's reflectogram. When the bias voltage is set on the bias tee, the diodes go into the "closed" state, and the amplitude of the pulse signal passing through them is not enough to change the state of the diode. In this mode, the response from a non-linear element is determined by the parasitic parameters of the element.

### IV. RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH

The transmission line layout (Fig. 2) contains two regulated nonlinear elements in the form of microwave diodes that introduce a concentrated inhomogeneity in the path of electromagnetic wave propagation.

Figure 5 shows reflectograms of the transmission line without elements, with two diodes in the absence of bias voltage ( $V_{\text{off.}} = 0 \text{ V}$ ) and with two diodes with an applied bias voltage equal to -2 V.

The following signals can be highlighted on the reflectogram: responses from the first (pos. 1) and second (pos. 2) nonlinear element; response from the open output of the measuring line (pos. 3).

At a bias voltage of -2 V, responses from each of the nonlinear elements are observed due to their parasitic parameters, namely, the parasitic capacitance of the diodes, as evidenced by the corresponding shape of the reflected signals. When the bias voltage changes to zero, the response looks like a response from a resistive load, and the degree of signal reflection depends on its amplitude at the element localization point.



Fig. 5. Reflectogram of the transmission line with two nonlinear elements 1, 2 – responses from the first and second diodes; 3 – response from the end of the measuring line.

Figures 6 and 7 show a comparison of the spectra of reflected signals in transmission lines with nonlinear elements at different bias voltages, with the spectrum of the reflected signal in a transmission line that does not contain nonlinear elements. The signal spectra were obtained by applying a direct Fourier transform to the reflected signal for each of the presented time characteristics.

At a bias voltage of -2 V (figure 6), the similarity of the envelope spectra of transmission lines without elements and with two diodes is observed, which indicates the absence of nonlinear properties.



Fig. 6. Envelopes of the reflected signal spectra for a transmission line without elements and a transmission line with two diodes with a bias voltage of -2 V.

In turn, the envelope of the spectrum of the reflected signal presented in figure 7, in the absence of a bias voltage, shows a shift in the frequencies of harmonics, as well as a decrease in the amplitudes of the spectral components at some frequencies (for example, in the frequency range of 0.7-1.2 GHz).



Fig. 7. Envelopes of the reflected signal spectra for a transmission line without elements and a transmission line with two diodes with a bias voltage of 0 V.

To compare the reflectograms presented in Figure 6 and Figure 7, we introduced the conversion coefficient  $S_{TR}$ , which is equal to the ratio of the amplitudes of the spectral components of the line responses with nonlinear elements to the amplitudes of the spectral components of the line in the absence of nonlinear elements [6, 7]. Figure 8 shows the calculated characteristics of the transformation coefficient module  $S_{TR}$  for two modes – with an offset of  $V_{off} = 0$  V and  $V_{off} = -2$  V.



Fig. 8. Reflection coefficient module  $S_{TR}$  of a transmission line with two nonlinear elements at different bias voltages.

In this graph, there is a difference between two operation modes of the transmission line with the bias voltages  $V_{\rm off} = 0$  V and  $V_{\rm off} = -2$  V, which consists in a significant decrease in the amplitudes of the components of the frequency response of the reflected signal at  $V_{\rm off} = 0$  V. Amplification of  $|S_{\rm TR}|$  in narrow frequency bands is also observed, which is explained by the presence of nonlinear distortions.

### V. CONCLUSION

In this paper, an experimental research of the structure in the form of a coplanar transmission line containing regulated nonlinear elements is performed. From the obtained reflectograms and spectral analysis, it was concluded that due to nonlinear distortions of the response of the structure in narrow frequency bands, the modulus of the conversion coefficient  $S_{TR}$  becomes greater than 1. This indicates a partial nonreciprocity of the structure. Such structures containing nonlinear elements can be used to implement space-time modulation, and the modulation parameters can be set by controlling the bias voltage.

#### REFERENCES

- S. Taravati, "Space-time modulation: Principles and applications.," in IEEE Microwave Magazine, vol. 21, no. 4, pp. 30–56, Apr. 2020.
   S. Taravati, "Nonreciprocal electromagnetic scattering from a periodi-
- [2] S. Taravati, "Nonreciprocal electromagnetic scattering from a periodically space-time modulated slab and application to a quasisonic isolator," *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 96, no. 16. p. 165, Oct. 2017.
- [3] S. Qin, "Nonreciprocal com-ponents with distributedly modulated capacitors," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn*, vol. 62, no. 10, pp. 2260–2272.
- [4] W. Zhanni, "Serrodyne Frequency Translation Using Time-Modulated Metasurfaces," *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, vol. 68, no. 3, pp. 1599– 1606, Oct. 2019.
- J. Li, "Transfer matrix method for the analysis of space-time-modulated media and systems," *Physical Review B 100, 144311*, Oct. 2019.
   A.M. Nicolson "Measurement of the intrinsic properties of materials by
- [6] A.M. Nicolson "Measurement of the intrinsic properties of materials by Time-Domain Techniques," *IEEE Trans. of Instr. and Meas.*, vol. 19, no. 4, pp. 377-382, Oct. 1970.
- [7] C.C. Courtney "Time-Domain Measurement of the Electromagnetic Properties of Materials," IEEE Trans. on Mic. Theory and Tech., vol. 46, no. 5, pp. 517-522, May 1998.

### ПРИЛОЖЕНИЕ О

# Перспективные измерительные платформы в области микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации






























## ПРИЛОЖЕНИЕ П

Копии публикаций сотрудников со ссылкой на ЦКП «Импульс»

Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 11

## Влияние морфологии поверхности микрополосковой линии СВЧ на ее передаточные характеристики

 Ø Н.А. Торхов<sup>1,2,3,4</sup>, А.А. Коколов<sup>2,5</sup>, Л.И. Бабак<sup>2</sup>
<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, 634034 Томск, Россия
<sup>2</sup> Томский университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия
<sup>3</sup> Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия
<sup>4</sup> Севастопольский государственный университет, 299053 Севастополь, Россия
<sup>5</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, 634021 Томск, Россия
Е-mail: trkf@mail.ru
Поступила в Редакцию 26 апреля 2020 г.

В окончательной редакцию 20 апрели 2020 г. Принята к публикации 28 мая 2020 г.

Определены основные морфологические параметры 50-омных Au/i-GaAs{100} тонкопленочных микрополосковых золотых CBЧ копланарных линий передач длиной  $l_W$ , влияющие на активное сопротивление их скин-слоя R и индуктивность L. Получено, что латеральный характер распределения зерен и развитый рельеф их поверхностей приводит к возникновению дополнительных процессов рассеяния электронов как на границах зерен, так и на неоднородностях рельефа. Малый размер зерен,  $d_x < 133$  нм, на частотах f > 10 ГГц переводит аномальный скин-эффект в нормальный. При этом нелинейная зависимость R от  $l_W$  в локальном приближении обеспечивается фрактальной геометрией рельефа поверхности и приповерхностной области копланарных линий передач, а нелинейная зависимость L от  $l_W$  — не только фрактальными особенностями рельефа двухмерной поверхности копланарных линий передач, но и фрактальными особенностями трехмерного распределения се зерен.

Ключевые слова: СВЧ линии, скин-эффект, морфология поверхности, фракталы, размерность Хаусдорфа-Безиковича, S-параметры рассеяния, компактная модель, экстракция параметров.

DOI: 10.21883/FTP.2020.11.50095.9416

## 1. Введение

В аномальном скин-эффекте условия  $\delta \ll l_{ball}$  и  $\delta \ll v_{\rm F}/\omega$  приводят к возникновению в скин-слое толщиной б пространственной и частотной дисперсий сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний (СВЧ сигнал) и нарушению закона Ома ( $j \neq \sigma E$ ). Здесь  $l_{\text{ball}} = v_F \tau_{\text{ball}}$  — среднее значение длины свободного, т.е. без рассеяния (баллистического), пробега низкоэнергетичных, с энергией E0 < 1 эВ, электронов (при нормальных условиях *l*ball ~ 1000 нм, рис. 1, a) [1]), определяемой временем их баллистического переноса в однородном металлическом образце  $\tau_{\text{ball}}$  ( $\omega = 2\pi f$  циклическая частота, vF — "фермиевская" скорость). Увеличение частоты f CBЧ сигнала при нормальных и пониженных температурах приводит к уменьшению глубины проникновения СВЧ поля под поверхность проводника  $\delta \propto \omega^{(-1/3)}$  — поперечных размеров скин-слоя, увеличению его активного сопротивления R и уменьшению индуктивности L линии передачи [2]. При этом функциональные зависимости R = R(f) и L = L(f)в аномальном скин-эффекте во многом определяются состоянием металлической поверхности, притом что значение поверхностного импеданса  $\xi$  (Re $\xi = R$ ) ее

скин-слоя практически не зависит от характера рассеяния электронов на кристаллической решетке [3]. Напомним, что для нормального скин-эффекта  $\delta \propto \omega^{(-1/2)}$ .

Исследования размерных (перколяционных) эффектов на постоянных и переменных электрических токах в металлических тонкопленочных системах были связаны в основном с изучением влияния их поперечных (перпендикулярно поверхности, т.е. плоскости (x, y)) размеров на особенности токопрохождения [4]. Между тем используемые в производстве электронных приборов реальные металлические пленки имеют значительные латеральные, в плоскости (x, y), неоднородности, так как образованы мозаичной структурой кристаллитов нанозерен размерами 20-500 нм, разделенных между собой плохо проводящими промежутками - модель Маядаса-Шатцкеса [5,6]. В этом случае размеры латеральных неоднородностей металлических пленок могут достигать сотен микрометров [7,8], а нормальных, определяемых высотой неровностей рельефа, неоднородностей — сотен нанометров, которые для частот > 10ГГц уже соизмеримы с толщиной скин-слоя (например, для золота Au  $\delta(f = 20 \Gamma \Gamma_{II}) \approx 550$  нм, рис. 1, b [9]) и влияние которых на аномальный скин- эффект в настоящее время практически не изучено.

591



Рис. 1. Зависимость от энергии E<sub>0</sub> длины свободного пробега l<sub>ball</sub> электронов для 3d- (Fe-Cu) и 5d- (Pt, Au) металлов по данным [1] (a) и частотная зависимость толщины скин-слоя δ в однородном золотом образце (b).

Из физических соображений следует, что такие латеральные неоднородности могут оказывать значительное влияние на движение электронов в скин-слое металлической пленки из-за их рассеяния на границах зерен, а также и на неровностях поверхности, что должно неизбежно отразиться на параметрах аномального скин-эффекта и, как результат, на качестве прохождения СВЧ сигнала.

Пространственное распределение таких неоднородностей в реальных металлических системах хорошо описывается математическим аппаратом фрактальной геометрии. Известно [8,10], что пределы локальных приближений L — линейные размеры, до которых тонкопленочные металлические системы проявляют свойства статистически фрактальных объектов, — могут достигать сотен микрометров, что соизмеримо с длинами микрополосковых линий передач в интегральных схемах.

Таким образом, возникает значительный научнопрактический интерес в проведении экспериментальных исследований влияния геометрии поверхностей металлических пленок на характер распространения в них СВЧ сигналов.

## Объект исследований и методика эксперимента

Исследование влияния геометрии Аи-поверхности микрополосковых копланарных линий передач (КЛП) СВЧ сигнала на их приборные характеристики в частотном диапазоне 0.1-50 ГГц осуществлялось с использованием понятий меры М, метрических  $\Re(X, \rho)$  (состоящих из некоторого множества  $X = \{x_i\}$ , в котором определено расстояние  $\rho$  между любой парой элементов с аксиомами треугольника, симметрии и нулевого расстояния) и нормированных линейных функциональных пространств S( $\Re$ , M) (далее — функциональных

пространств), позволяющих с единых позиций рассматривать скалярные и векторные величины, непрерывные функции и числовые последовательности [11,12].

Объектами исследований являлись 50-омные микрополосковые КЛПП шириной W = 50 мкм, длиной  $l_W = 100$ , 200, 400, 800, 1600 и 3200 мкм, выполненные гальваническим золотом Аu толщиной d = 3 мкм с тонким адгезионным поделоем ванадия на полуизолирующей подложке арсенида галлия GaAs{100} толщиной h = 350 мкм (рис. 2, *a*). Расстояние между "сигнальной" и "земляными" копланарными линиями составляло  $S_W = 36$  мкм.

Ввиду того что КЛП образована совокупностью различных конструктивных элементов ("земляные" и "сигнальные" металлические линии, полуизолирующая полупроводниковая подложка), ее СВЧ характеристики удобно изучать с использованием компактной модели, представленной в виде эквивалентной схемы (ЭС) секции КЛП, состоящей из совокупности эквивалентных элементов с соответствующими электрическими связями между ними (рис. 2, b). Пассивные элементы ЭС R и L описывают последовательное сопротивление и индуктивность металлизации КЛП, а элементы C и G — емкость и проводимость подложки.

Измерения геометрии рельефа h(x, y) и фазового контраста  $\theta(x, y)$  поверхности металлических пленок осуществлялись на высоковакуумном атомно-силовом микроскопе (ACM) "Solver-HV" производства NT-MDT (Москва, г. Зеленоград) с использованием кантилевера марки NSG10 (рис. 3). Радиус закругления острия иглы, покрытого карбидом вольфрама W<sub>2</sub>C, составлял  $r \approx 35$  нм. АСМ-измерения проводились в полуконтактном режиме сканирования с использованием двухпроходной методики при разрешении 256 пикселей по кадровой и строчной разверткам.



Рис. 2. Конструкция секции КЛП (a) и ее малосигнальная эквивалентная схема (b).



Рис. 3. АСМ-изображение рельефа поверхности (а), его контурное изображение (b) и распределение фазового контраста (c).

Измерения малосигнальных S-параметров КЛП в частотном диапазоне 0.1-50 ПТц выполнялись с использованием векторного анализатора цепей PNA-X N5245A производства Keysight Technologies на полуавтоматической зондовой станции Summit 12000 производства Cascade Microtech. Калибровка измерительных трактов портов осуществлялась по S-параметрам согласованием на проход ("Thru"), на нагрузку 50 Ом (Load), на холостой ход ("Open") и на короткое замыкание ("Short"). После этого проводилась процедура дэ-эмбеддинга (de-embedding) и экстракция параметров эквивалентных элементов ЭС секции КЛП [13,14].

Хаусдорфова размерность  $D_{\rm H}$  метрического пространства  $\Re$  рельсфа поверхности КЛП определялась методом подсчета кубов. Для самоподобных объектов в локальном приближении ( $l_W < L$ ) хаусдорфова размерность равна фрактальной размерности  $D_f(1)$ , а в глобальном ( $l_W \ge L$ ) приближении — топологической размерности объекта  $D_T$  [15]:

$$D_f = D_T + D_S = D_T + \ln(\eta) / \ln(\xi),$$
 (1)

где  $D_S$  — размерность подобия, определяемая путем подечета относительного увеличения количества островков M (мер) в  $\eta = M_0/M_k$  раз при относительном уменьшении линейных размеров измерительного масштаба

(длины  $l_W$ ) в  $\xi = l_{W,0}/l_{W,k}$  раз [15]. Топологическая размерность КЛП равнялась единице,  $D_T = 1$ .

Согласно [13,15], значения  $D_f$ , определенные на  $\mathfrak{R}$  размерностей функциональных пространств активных сопротивлений  $S(M \equiv R)$  и индуктивностей  $S(M \equiv L)$ , находились аналогичным методом (1), но только в качестве мер M выбирались значения функционалов активных сопротивлений  $M \equiv R$  и индуктивностей  $M \equiv L$  копланарных линий.

### 3. Результаты экспериментов

Согласно рис. 3, а размер неровностей рельефа h исследуемого участка 5 × 5 мкм поверхности КЛП может заметно превышать h > 400 нм, что уже соизмеримо с толщиной скин-слоя ( $\delta(f = 20$  ГГц)  $\approx 550$  нм). Из общих физических соображений понятно, что рассеяние электронов на таких неровностях поверхности должно оказывать заметное влияние на распространение CBЧ сигнала.

О характере распределения неровностей рельефа можно судить по контурному изображению исследуемого участка поверхности, полученному трассировкой неровностей рельефа (рис. 3, b). Анализ контурных изображений показал, что они образованы вложенными друг в

Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 11



Рис. 4. Малосигнальные параметры рассеяния КЛП длиной  $l_W = 100, 200, 400, 800, 1600$  и 3200 мкм в частотном диапазоне 0.1–50 ГГц: S<sub>11</sub> (a), S<sub>12</sub> (b), S<sub>21</sub> — (c), S<sub>22</sub> — (d).

друга меньшими по размеру статистически самоподобными элементами предыдущих уровней подобия.

По АСМ-изображениям фазовых контрастов  $\theta(x, y)$ можно судить о характере латерального расположения зерен (геометрии зеренной субструктуры). Согласно статистическому анализу, золотая пленка КЛП образована четырьмя множествами зерен, средние размеры  $d_x$ которых приблизительно составляют 53, 72, 108, 133 нм и которые значительно меньше не только толщины скин-слоя,

$$d_x \ll \delta(f = 20 \Gamma \Gamma \eta),$$
 (2)

но и среднего значения длины баллистического пробега электронов в однородном образце:

$$d_x \ll l_{ball}$$
. (3)

Неравенство (3) означает, что длина свободного пробега электронов  $l_{\text{ball}}$  в исследуемых образцах ограничена размерами кристаллитов (зерен) и можно записать для исследуемых образцов  $l_{\text{ball}} \approx d_x$ . Таким образом, получается, что в используемом частотном диапазоне  $l_{\text{ball}} \ll \delta$  и аномальный скин-эффект в исследуемых КЛП переходит

Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 11

в нормальный. Понятно, что геометрия распределения зерен в золотой пленке КЛП также будет влиять на характер рассеяния электронов и, как следствие, на качество распространения СВЧ сигнала.

Фрактальные размерности метрических пространств  $\Re$  рельефа поверхности и зеренной субструктуры, определенные методом подсчета кубов, составили  $D_{fs} = (2.11 \pm 0.08)$  и  $D_{fg} = (2.46 \pm 0.07)$  соответственно.

Таким образом, распределения центров рассеяния в виде неровностей рельефа и границ зерен описываются разными законами фрактальной геометрии, которые, как ожидается, будут определять интегральные характеристики электронного тока в скин- слое и в конечном итоге качество распространения СВЧ сигнала в КЛП.

Рассмотрим, как все-таки прохождение СВЧ-сигнала связано с фрактальной субструктурой КЛП.

Частотные зависимости малосигнальных S-параметров рассеяния, исследуемых КЛП длиной  $l_W = 100$ , 200, 400, 800, 1600 и 3200 мкм в частотном диапазоне 0.1–50 ГГц, представлены на диаграммах Смита (рис. 4). Центральное расположение S<sub>11</sub>(f) и S<sub>22</sub>(f)

Сопротивление Индуктивность Емкость Проволимость Длина СВЧ линии IW, MKM R. OM L. Гн С, фФ G, 1/OM  $D_S(R)$  $D_S(L)$ 100  $1.24 \cdot 10^{-10}$  $1.44 \cdot 10^{-6}$ 0.12 1.281.421.41  $7.19 \cdot 10^{-10}$  $3.00 \cdot 10^{-6}$ 200 0.18 1.241.14 2.905.81 - 10-6  $1.96 \cdot 10^{-9}$ 400 0.28 1.20 1.03 5.76 4.23 · 10<sup>-9</sup>  $1.11 \cdot 10^{-5}$ 800 0.69 1.16 0.99 12.03  $8.12 \cdot 10^{-9}$  $2.87 \cdot 10^{-5}$ 1.65 1.05 22.54 1600 1.06  $1.68 \cdot 10^{-8}$ 5.01 · 10-5 3200 3.43 1.04 1.03 44.72

Восстановленные значения параметров элементов линейной эквивалентной схемы секции КЛП (частота f = 20 ITц)

подтверждает, что разработанные КЛП обладают именно 50-омными волновыми сопротивлениями.

Для интерпретации полученных результатов рассмотрим восстановленные (экстрагированные) значения (см. таблицу) параметров элементов малосигнальной ЭС КЛП (рис. 2, b).

Из таблицы хорошо видно, что значения последовательного сопротивления скин-слоя R до некоторых значений  $l_W < L \approx 800$  мкм (так называемое локальное приближение) изменяются не пропорционально изменению длины КЛП  $l_W$ . С точки зрения последовательных сопротивлений R это говорит о нарушении закона Ома для участка цепи, что могло бы указывать на присутствие аномального скин-эффекта, если бы не результаты АСМ-измерений, подтверждающие наличие в исследуемых КЛП условий для реализации нормального скин-эффекта в используемом частотном диапазоне. При  $l_W \ge L$  (глобальное приближение) значения последовательных сопротивлений R изменяются практически пропорционально изменению длины  $l_W$ .

Особенно сильно в локальном приближении при  $l_W < L \approx 400$  мкм размерные эффекты проявляются для параметра индуктивности L. В глобальном приближении ( $l_W \ge L$ ) индуктивность L увеличивается практически пропорционально увеличению длины КЛП  $l_W$ .

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемые размерные эффекты могут быть связаны с фрактальной геометрией субструктуры металлизации КЛП.

Определение размерностей подобия  $D_S$  функциональных пространств последовательных сопротивлений S(R) и индуктивностей S(L) показало наличие у них значений  $D_f = 1 + D_S$ , значительно отличающихся от топологических  $D_T = 1$ , что совместно с линейными зависимостями  $\ln(R_0/R_k)$  и  $\ln(L_0/L_k)$  от  $\ln(l_{W,0}/l_{W,k})$  указывает на присутствие у них фрактальных самоафинных свойств.

Согласно полученным результатам, для функционального пространства сопротивлений S(R) в глобальном приближении при  $l_W \ge L$  изменение  $l_W$  практически не приводит к значительному изменению значений  $D_f(R) \approx (2 \pm 0.08)$  (см. таблицу). Это указывает на то, что активное сопротивление КЛП на СВЧ сигнале ( $f = 20 \Pi \Gamma_{II}$ ) во многом определяется двумерной геомстрией распределения неровностей рельсфа поверхности скин-слоя, влияющей на латеральные процессы рас-

сеяния электронов. Близкие к  $D_f(R)$  функционального пространства S(R) значения  $D_{fs} = 2.11$  метрического пространства  $\Re$  подтверждают это.

В локальном приближении при  $l_W < L$  уменьшение  $l_W$  приводит к заметному увеличению значений  $D_f(R) > 2$ , что указывает на возрастающую роль объема пленки, т.е. ее зеренной субструктуры, на процесс рассеяния электронов. Растущие значения  $D_f(R)$  подтверждают это положение (см. таблицу).

Для функционального пространства индуктивностей S(L) уменьшение длины КЛП до  $l_W < 400$  мкм приводит к значительному увеличению значений  $D_f(L)$  (от  $D_f(L) \approx 2$  при  $l_W \ge 400$  мкм до  $D_f(L) = 2.42$  для  $l_W = 100$  мкм). Это указывает на значительную роль двумерных для  $l_W \ge L$  (глобального приближения) и трехмерных для  $l_W < L$  (локального приближения) эффектов в формировании индуктивности КЛП, что не является тривиальным. Близость значения  $D_f(L) = 2.42$  функционального пространства S(L) со значением  $D_{fg} = 2.46$  метрического пространства  $\Re$  зерен подтверждает то, что на масштабах < 400 мкм на формирование индуктивности КЛП оказывают влияние и трехмерные особенности КЛП.

## 4. Заключение

В работе исследовано влияние фрактальной геометрии золотой металлизации КЛП на се аномальный скин-эффект, активное сопротивление скин-слоя *R* и индуктивность *L* в частотном диапазоне до 50 ГГц.

Получено, что зеренная субструктура металлизации и неоднородности рельефа поверхности КЛП являются причиной возникновения дополнительных процессов рассеяния электронов на границах зерен, которые на частотах f > 10 ГГц переводят аномальный скин-эффект в нормальный. При этом латеральное распределение неровностей рельефа и зеренной субструктуры подчиняется законам фрактальной геометрии, что определяет нелинейное поведение R и L КЛП в локальном приближении при  $l_W < L$ .

При этом в локальном приближении нелинейная зависимость R от l<sub>W</sub> обеспечивается в основном фрактальной геометрией рельефа поверхности и приповерх-

Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 11

ностной области КЛП, а нелинейная зависимость индуктивности L от  $l_W$  — не только фрактальными особенностями двухмерной поверхности КЛП, но и фрактальными особенностями трехмерного расположения ее зерен. Значения пределов локальных приближений L для параметра активного сопротивления можно оценить как  $L(R) \approx 800$  мкм, а для параметра индуктивности — как  $L(L) \approx 400$  мкм.

#### Финансирование работы

Изготовление макетов и теоретическое исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, базовая часть государственного задания (уникальный идентификатор FEWM-2020-0043). Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП "Импульс" при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.А. Тиньков. Успехи физ. мет., 7, 117 (2006).
- [2] А.В. Соколов. Оптические свойства металлов (М., Физматлит, 1961).
- [3] M.I. Kaganov, P. Contreras. Zh. Eksp. Teor. Fiz., 106, 1814 (1994).
- [4] А.В. Латышев, А.А. Юшканов. Журн. вычислительной математики и мат. физики, 44 (10), 1861 (2004).
- [5] A.F. Mayadas, M. Shatzkes, J.F. Janak. Appl. Phys. Lett., 14 (11), 345 (1969).
- [6] M.S.P. Lucas, J. Appl. Phys., 36 (5), 1632 (1965).
- [7] M.A. Angadi, L.A. Udachan. Thin Sol. Films, 79 (2), 149 (1981).
- [8] N.A. Torkhov. Semiconductors, 53 (1), 28 (2019).
- [9] D. K. Larson. In: *Physics of Thin Films*, ed. by M.H. Francombe and R.W. Hoffman (N.Y., Academic, 1971) v. 6.
- [10] И.В. Антонец, Л.Н. Котов, С.В. Некипелов, Е.А. Голубев. ЖТФ, 3, 24 (2004).
- [11] А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. Элементы теории функций и функционального анализа. 4-е изд., перераб. (М., Наука, 1976).
- [12] И.А. Иванишко, В.Г. Кротов. Мат. заметки, 86 (6), 829 (2009).
- [13] N.A. Torkhov, L.I. Babak, A.A. Kokolov. Symmetry, 11, 1495 (2019). doi:10.3390/sym11121495
- [14] N. Torkhov, L. Babak, A. Kokolov, F. Sheyerman. ITM Web of Conf., 30, 07016 (2019), CriMiCo'2019. doi.org/10.1051/itmconf/20193007016
- [15] Е. Федер. Фракталы (М., Мир, 1991).

Редактор Л.В. Шаронова

Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 11

## The influence of the microwave micro strip line surface morphology on the transmission performance

N.A. Torkhov<sup>1,2,3,4</sup>, A.A. Kokolov<sup>2,5</sup>, L.I. Babak<sup>2</sup>

 <sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Semiconductors, 634034 Tomsk, Russia
<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050 Tomsk, Russia
<sup>3</sup> Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia
<sup>4</sup> Sevastopol State University, 299053 Sevastopol, Russia
<sup>5</sup> Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 634021 Tomsk, Russia

Abstract The main parameters of the morphology of  $50-\Omega$ Au/i-GaAs 100 thin-film microstrip gold microwave coplanar transmission lines of length Iw are defined, which determine the skin layer active resistance R and inductance L. It was found that the lateral grains distribution and surface relief of the coplanar lines led to the appearance of additional processes of electron scattering both at grain boundaries and at relief inhomogeneities. When the small grain size dx < 133 nm at frequencies f > 10 GHz the anomalous skin effect turns to the normal one. In this case, the nonlinear dependence of R on  $l_W$  in the local approximation was provided by the fractal geometry of the surface relief and the nearsurface region of the coplanar transmission lines, and the nonlinear dependence of the inductance L on law was provided not only by the fractal features of the two-dimensional coplanar transmission lines relief surface, but also by the fractal features of the threedimensional distribution of its grains.





## Artide 28 GHz Single-Chip Transmit RF Front-End MMIC

for Multichannel 5G Wireless Communications

Evgeny Erofeev <sup>1,2,\*</sup>, Vadim Arykov <sup>1</sup>, Michael Stepanenko <sup>1</sup>, Aleksei Voevodin <sup>3</sup>, Aleksei Kogai <sup>3</sup> and Vladimir Kurikalov <sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050 Tomsk, Russia; arykov.v@ir-mw.com (V.A.); stepanenko.m@ir-mw.com (M.S.)
- <sup>2</sup> Institute of Atmospheric Optics V.E. Zuev SB RAS, 634055 Tomsk, Russia
- <sup>3</sup> Research and Production company Micran, 634045 Tomsk, Russia; alv@micran.ru (A.V.); kogai@micran.ru (A.K.); kurikalov@micran.ru (V.K.)
  - Correspondence: erofeev@sibmail.com

Received: 15 June 2020; Accepted: 8 July 2020; Published: 14 July 2020



Abstract: Millimeter-wave wireless networks of the new fifth generation (5G) have become a primary focus in the development of the information and telecommunication industries. It is expected that 5G wireless networks will increase the data rates and reduce network latencies by an order of magnitude, which will create new telecommunication services for all sectors of the economy. New electronic components such as 28 GHz (27.5 to 28.35 GHz) single-chip transmit radio frequency (RF) front-end monolithic microwave integrated circuits (MMICs) will be required for the performance and power consumption of millimeter-wave (mm-wave) 5G communication systems. This component includes a 6-bit digital phase shifter, a driver amplifier and a power amplifier. The output power P3dB and power-added efficiency (PAE) are 29 dBm and 19.2% at 28 GHz. The phase shifter root-mean-square (RMS) phase and gain errors are 3° and 0.6 dB at 28 GHz. The chip dimensions are 4.35 × 4.40 mm.

Keywords: 5G communications; massive MIMO; transceivers; RF front-end; single-chip; mm-wave; MMIC; GaAs; phase shifter; power amplifier

#### 1. Introduction

The population of our planet is gradually increasing and has already exceeded 7 billion people. The information needs of the population are growing; at the same time, new technologies such as the Internet of Things (IoT), intelligent transport systems (such as Vehicular Ad hoc Network (VANETs)) and virtual and augmented reality are actively developing [1]. The growth of data traffic and device connections will require data rates to increase by more than an order of magnitude [2]. Responding to these requests, the International Telecommunication Union (ITU) decided to develop a new generation of 5G wireless communications with high transmission speeds (>10 Gbit/s) and ultralow response times (<1 ms). However, an increase in the transmission date rate is mainly possible due to the expansion of the band that the frequencies use. The requirements for 5G networks can only be implemented in the millimeter-wave frequency range [3].

The advantages of millimeter waves (mm-waves) when used for radio communications have been well known for many years [4]. The advantageous features of millimeter-wave radio waves are responsible for their widespread use in radar systems, remote sensing, navigation and communications. Interest in millimeter waves has increased due to the need to expand the radio frequency spectrum for commercial applications. Compared with previous generations, mm-wave 5G wireless communication systems have higher data rates and data transfer density, millisecond latency and enhanced spectral energy. The International Telecommunication Union (ITU) has specified a number of the mm-wave

Symmetry 2020, 12, 1167; doi:10.3390/sym12071167

www.mdpi.com/journal/symmetry

frequency bands for 5G [5] wireless networks, but the 27.5–28.35 GHz band was proposed for wide usage in many countries and was licensed by the Federal Communications Commission (FCC) [6].

Power consumption is one of the most significant technical barriers for practical mm-wave 5G wireless communications because multiple devices connected at the same time increase the power consumption of the base stations and data centers. Photonic technologies can be utilized in order to solve this problem. In data centers, chip-to-chip optical or electro-optical interconnects enable an increase in the bandwidth and capacity of those systems as well as a reduction in power consumption [7,8].

In a conventional 4G communication system, one or more passive antennas are used. Wireless 5G networks are based on active massive-element antenna systems that improve the capacity, efficiency and coverage of RF streams [9] (Figure 1).



Figure 1. Conventional 4G and 5G antenna systems.

To improve the bandwidth and data rate, the multiple-input multiple-output (MIMO) transceivers based on phased beamforming arrays are used [10–13]. Usually, active antenna systems consist of massive antenna arrays with integrated MIMO transceiver RF front-ends.

Figure 2 shows the design of a multichannel transmit RF front-end (RFFE) module for 5G MIMO transceivers. There is a symmetrical antenna array where each channel consists of a phase shifter, a driver amplifier and a power amplifier. The input splitter divides the RF signal into a number of channels. The symmetry of the RFFE module architecture allows for a balance between input and output losses and power consumption.



Figure 2. Design of the multichannel symmetry transmit RF front-end.

The performance and power consumption of millimeter-wave 5G communication systems are mainly dependent on the electrical parameters of using RF electronic components based on semiconductor monolithic integrated circuits, which are the key elements for mm-wave RF transmit/receive modules. The development of such elements is a difficult challenge.

A previous study presented the results of the development of a 28 GHz phase adjustable power amplifier monolithic microwave integrated circuit (MMIC) for 5G front-ends [14]. It consisted of a 4-bit digitally controlled phase shifter and power amplifier. The MMIC was designed by Plextek RFI and fabricated by Win Semiconductors using a 0.15  $\mu$ m GaAs pHEMT process. The main disadvantage of this MMIC is a low phase shift resolution of 22.5°, which results in reduced beamforming opportunities and low antenna gain.

In this study, the design approach for a 28 GHz single-chip transmit RFFE MMIC with high phase shift resolution (5.625°) for multichannel 5G wireless communications is presented, along with its electrical performance. The integrated circuit (IC) consists of a 6-bit digital phase shifter, a driver amplifier and a power amplifier and was designed using a 0.25 µm GaAs pHEMT process of JSC Micran (Tomsk, Russian Federation) for low-cost volume production.

### 2. Single-Chip RF Front-End MMIC

## 2.1. Design Approach

Figure 3 shows a photo of a fabricated one-channel single-chip transmit RF front-end MMIC. The chip dimensions are 4.35 mm × 4.40 mm. The single-chip IC consists of a 6-bit phase shifter with a transistor-transistor logic (TTL) driver, a driver amplifier and a power amplifier (PA) and was designed using a 0.25 µm GaAs pHEMT process for low-cost volume production.



Figure 3. Photo of one-channel single-chip transmit RF front-end (RFFE) monolithic microwave integrated circuit (MMIC).

The phase shift level of a single-chip transmit RFFE MMIC is controlled by an integrated TTL driver. The 6-bit digital driver can precisely adjust a phase from 0 to 360° with a step of 5.625°. Table A1 in Appendix A shows the phase shifter state table. There are two control levels (0 and 1) for all bits.

Low (0) and high (1) TTL control levels are 0 and +5 V. Applying different control levels for all 6 bits of the digital phase shifter may change the phase shift across the full 360° range.

The high- and low-pass (HP-LP) RF filters were used to design the 6-bit digital phase shifter [15]. The applied TTL control voltages across all bits allowed the switching of states between HP-LP filters to form the required output phase shift level. This solution exhibits good return losses, phase shift performance in RMS phase and gain errors.

The electrical schemes and layout plots of 180, 90, 45, 22.5, 11.25 and 5.625° bits are presented in Figures 4–9. For 180 and 90° bits, a circuit was selected with switchable filters using an inactive arm in the filter. The classical solution of using switchable filters does not provide a sufficient level of decoupling of the active and inactive arms, which leads to an increase in the initial bit losses. The 45 and 22.5° bits were designed according to the scheme with switched elements in the filter. This is the only possible solution for the 27.5–28.35 GHz band. For 11.5 and 5.625° bits, a circuit was designed with a serial connection of filters due to a very small inductance. In this circuit, the inductance is shunted because the required phase shift requires a large length of the microstrip.



Figure 4. Electrical scheme of the 180 and 90° bits of the phase shifter.



Figure 5. Layout plot of the 180 (a) and 90° (b) bits of the phase shifter.



Figure 6. Electrical scheme of the 45 and 22.5° bits of the phase shifter.



Figure 7. Layout plot of the 45 (a) and 22.5° (b) bits of the phase shifter.





Low Pass State

╢

Figure 8. Electrical scheme of the 11.25 and 5.625° bits of the phase shifter.



Figure 9. Layout plot of the 11.25 (a) and 5.625° (b) bits of the phase shifter.

The choice in the order of the phase shifter bits was carried out strictly on the principle of minimal influence of the reflection coefficient between the bits. To do this, the sections with the lowest similarity of the reflection coefficient are placed between the sections with the highest similarity of the reflection

5 of 13

coefficient. The most stable bits are 180 and 90°, and the least stable bits are 11.25 and 5.625°. Therefore, the optimal bit ordering is selected as follows: 22.5 to 11.25 to 90 to 5.625 to 180 to 45°. This ordering allows the RMS phase shift error to be reduced.

The power amplifier (PA) of a single-chip transmit front-end MMIC consists of three power stages and matching networks (Figure 10a). The base active element of the PA is a GaAs pHEMT with a 0.25  $\mu$ m length gate. To achieve a balance between output power capability and cutoff frequency, the transistor gate width is 100  $\mu$ m (Figure 11). The increase in gate width can improve the output power of the transistor, but higher parasitic capacitance will reduce the cutoff frequency. The peripheries of the transistors are 1600  $\mu$ m (16 × 100  $\mu$ m) for the first stage (Q1), 3200  $\mu$ m (32 × 100  $\mu$ m) for the second stage (Q2) and 3200  $\mu$ m (32 × 100  $\mu$ m) for the third stage (Q3). The supply voltage for all power stages is Vd = 6 V.



Figure 10. Layout plot of the three stages of the power amplifier (a) and the Lange quadrature coupler (b).



Figure 11. Dependences of output power density and cutoff frequency on the gate width of the  $0.25 \,\mu m$  GaAs pHEMT.

The matching networks of the power amplifier consist of thin-film NiCr-based resistors, metal-insulator-metal (MIM) capacitors based on silicon nitride, Au-based transmission lines and Lange quadrature couplers (LQCs). The proposed LQCs (Figure 10b) are used in input and output

matching networks to improve the bandwidth and achieve a compact PA size. The symmetrical design of the PA layout and electromagnetic simulation were completed at the AWR Microwave Office [16].

## 2.2. Electrical Performance

Figure 12 shows the dependences of the simulated phase shift performance on the frequency for 64 states of a one-chip RF front-end MMIC.



Figure 12. Phase shift versus frequency of the single-chip RF front-end MMIC.

Figure 13 shows the dependence of the RMS phase shift error (PSE) of the single-chip RF front-end MMIC on frequency in the range of 26 to 30 GHz. The measured RMS PSE was calculated according to Equation (1):

$$\tau_{\varphi} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{\varphi 1} - \langle \varepsilon_{\varphi } \rangle)^2 + (\varepsilon_{\varphi 2} - \langle \varepsilon_{\varphi } \rangle)^2 + \dots + (\varepsilon_{\varphi (N-1)} - \langle \varepsilon_{\varphi } \rangle)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N-1} (\varepsilon_{\varphi i} - \langle \varepsilon_{\varphi } \rangle)^2}{N}}$$
(1)

where N is the number of phase states number,  $\varepsilon_{\varphi}$  is the measured phase shift in degrees and  $\langle \varepsilon_{\varphi} \rangle$  is the average phase shift for states of the 6-bit phase shifter.



Figure 13. Dependence of RMS phase shift error of the single-chip RF front-end MMIC on the frequency.

According to the results presented in Figure 13, RMS phase shift error is about 3° across the entire 27.5–28.35 GHz range. Figure 14 shows the dependence of small signal gain in all phase states of the single-chip RF front-end MMIC on frequency in the 26 to 30 GHz frequency range. There is a nominal small signal gain of over 20 dB in the frequency range of 27.5 to 28.35 GHz. The maximum gain of 22.7 dB is achieved at 29 GHz.



Figure 14. Dependence of gain of the single-chip RF front-end MMIC on the frequency.

Figure 15 shows the dependence of RMS gain error (GE) of the single-chip RF front-end MMIC on frequency in the 26 to 30 GHz frequency range. The measured RMS (GE) was calculated according to Equation (2):

$$\sigma_{|S21|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (|S_{21}|_i - \langle |S_{21}| \rangle)^2}{N}}$$
(2)

where N is the number of phase states,  $|S_{21}|$  is the measured gain in dB and  $\langle |S_{21}| \rangle$  is the average gain for states of the 6-bit phase shifter.



Figure 15. Dependence of RMS gain error of the single-chip RF front-end MMIC on the frequency.

According to the results presented in Figure 15, RMS GE is 0.6 dB for the entire 27.5–28.35 GHz range.

Figure 16 shows the dependence of the output power capability at 3 dB gain compression (P3dB) for the 0° phase state of the single-chip RF front-end MMIC on frequency. The output power P-3dB is 29 dBm across the full 27.5 to 28.35 GHz band. The maximum P3dB of about 29.5 dBm is achieved at 30 GHz.



Figure 16. Dependence of output power (P-3dB) at the 0° phase state of the single-chip RF front-end MMIC on the frequency.

Figure 17 shows the power-added efficiency (PAE) at 1 dB gain compression for the 0° phase state of the single-chip RF front-end MMIC frequency. A maximum PAE of 19.3% is achieved in the 27.5 to 28.35 GHz frequency range. Further optimization of the input and output matching networks in power amplifier stages can improve the PAE and the output power capability.



Figure 17. Dependence of PAE at 1 dB gain compression at the 0° phase state of the single-chip RF front-end MMIC on the frequency.

Table 1 shows the electrical performance of the developed single-chip transmit RFFE MMIC in comparison with state-of-the-art single-chip transmit RFFE MMICs [14]. The fabricated MMIC has a comparable performance and a higher phase shift resolution. The improved output power and PAE of the RF front-end presented in [14] can be attributed to the use of the 0.15  $\mu$ m GaAs pHEMT process of Win Semiconductors, with lower gate length resulting in better high-frequency performance.

	This Work		Re		
Parameter	Min	Max	Min	Max	Units
Frequency	27.5	28.35	27.5	28.35	GHz
RMS Phase Error		3		2.38	deg.
RMS Gain Error		0.63		0.23	dB
Gain	20.0	21.3	20.5	21.5	dB
P1dB at 0°	-	-	29.8	30.2	dBm
P3dB at 0°	28.7	29.0	-	-	dBm
PAE at P1dB at 0°	19.2	19.3	23	24.2	%

Table 1. State-of-the-art single-chip transmit RFFE MMICs.

## 3. Conclusions

Millimeter-wave wireless networks have attracted the most interest as 5G communication systems of the new generation (5G). The 27.5 to 28.35 GHz band was licensed for 5G wireless networks by the FCC. The performance and power consumption of millimeter-wave 5G communication systems mainly depend on the electrical parameters of the electronic RF components used inside RF transmit/receive modules.

The design approach for a 28 GHz single-chip transmit RF front-end MMIC is presented in this paper, along with its electrical performance. The IC includes a 6-bit digital phase shifter, a driver amplifier and a power amplifier. It was designed using a 0.25 µm GaAs pHEMT process for low-cost volume production. The output power P3dB and PAE are 29 dBm and 19.2% at 28 GHz. The phase shifter RMS phase and gain errors are 3° and 0.6 dB at 28 GHz. The fabricated single-chip RF front-end MMIC can be used in multichannel transmit 5G front-end modules based on phased antenna arrays.

Author Contributions: Conceptualization, V.A.; methodology, V.A.; software, M.S.; validation, M.S.; formal analysis, A.V.; investigation, A.K. and V.K.; resources, M.S.; data curation, E.E.; writing—original draft preparation, E.E.; writing—review and editing, E.E.; visualization, A.K. and V.K.; supervision, E.E.; project administration, E.E.; funding acquisition, V.A. and E.E. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project name: Theoretical and experimental studies of ultra-wideband optoelectronic devices of fiber-optic information systems and radiophotonics based on photonic integrated circuits own development, Agreement No. 075-03-2020-237/1 from 05.03.2020, project number: FEWM-2020-0040) and Project No. AAAA-A19-119110690036-9. Experimental results were obtained by the team of the Integrated Optics and Radiophotonics Laboratory of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics using equipment of the "Impulse" center of collective usage (registration number 200568).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

## Appendix A

Table A1. Phase shifter state table («0» is low control level and «1» is high control level).

Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Relative Phase Shift, deg.
0	0	0	0	0	0	0.000
1	0	0	0	0	0	5.625
0	1	0	0	0	0	11.250
1	1	0	0	0	0	16.875
0	0	1	0	0	0	22.500
1	0	1	0	0	0	28.125
0	1	1	0	0	0	33.750
1	1	1	0	0	0	39.375
0	0	0	1	0	0	45.000
1	0	0	1	0	0	50.625
0	1	0	1	0	0	56.250
1	1	0	1	0	0	61.875
0	0	1	1	0	0	67.500
1	0	1	1	0	0	73.125
0	1	1	1	0	0	78.750
1	1	1	1	0	0	84.375
0	0	0	0	1	0	90.000
1	0	0	0	1	0	95.625
0	1	0	0	1	0	101.250
1	1	0	0	1	0	106.875
0	0	1	0	1	0	112.500
1	0	1	0	1	0	118.125
0	1	1	0	1	0	123.750
1	1	1	0	1	0	129.375
0	0	0	1	1	0	135.000
1	0	0	1	1	0	140.625
0	1	0	1	1	0	146.250
1	1	0	1	1	0	151.875
0	0	1	1	1	0	157.500
1	0	1	1	1	0	163.125
0	1	1	1	1	0	168.750
1	1	1	1	1	0	174.375
0	0	0	0	0	1	180.000
1	0	0	0	0	1	185.625
0	1	0	0	0	1	191.250
1	1	0	0	0	1	196.875

Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Relative Phase Shift, deg.
0	0	1	0	0	1	202.500
1	0	1	0	0	1	208.125
0	1	1	0	0	1	213.750
1	1	1	0	0	1	219.375
0	0	0	1	0	1	225.000
1	0	0	1	0	1	230.625
0	1	0	1	0	1	236.250
1	1	0	1	0	1	241.875
0	0	1	1	0	1	247.500
1	0	1	1	0	1	253.125
0	1	1	1	0	1	258.750
1	1	1	1	0	1	264.375
0	0	0	0	1	1	270.000
1	0	0	0	1	1	275.625
0	1	0	0	1	1	281.250
1	1	0	0	1	1	286.875
0	0	1	0	1	1	292.500
1	0	1	0	1	1	298.125
0	1	1	0	1	1	303.750
1	1	1	0	1	1	309.375
0	0	0	1	1	1	315.000
1	0	0	1	1	1	320.625
0	1	0	1	1	1	326.250
1	1	0	1	1	1	331.875
0	0	1	1	1	1	337.500
1	0	1	1	1	1	343.125
0	1	1	1	1	1	348.750
1	1	1	1	1	1	354.375

Table A1. Cont.

## References

- Osseiran, A. 5G Mobile and Wireless Communications Technology; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2016.
- Agiwal, L.; Roy, A.; Saxena, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2016, 18, 1617–1655. [CrossRef]
- 3. Marcus, M. 5G and "IMT for 2020 and beyond". IEEE Wird. Commun. Mag. 2015, 22, 2-3. [CrossRef]
- Albreem, M. 5G wireless communication systems: Vision and challenges. In Proceedings of the 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT) 2015, Kuching, Malaysia, 21–23 April 2015; pp. 493–497.
- International Telecommunications Union. 2019. Available online: http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/ rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx (accessed on 1 July 2020).

- Federal Communications Commission 2020: Upper Microwave Flexible Use Service Millimeter Frequency Bands. Available online: https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/broadband-division/uppermicrowave-flexible-use-service-umfus (accessed on 1 July 2020).
- Testa, F.; Pavesi, L. Optical Switching in Next Generation Data Centers; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018.
- Liu, X. Emerging optical access network technologies for 5G wireless. IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw. 2016, 8, B70–B79. [CrossRef]
- Roh, W.; Seol, J.; Park, J.; Lee, B.; Lee, J.; Kim, Y.; Cho, J.; Cheun, K.; Aryanfar, F. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52, 106–113. [CrossRef]
- Gupta, A.; Jha, R. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access.* 2015, 3, 1206–1232. [CrossRef]
- Zhou, B.; Liu, A.; Lau, V. Successive localization and beamforming in 5G mmWave MIMO communication systems. *IEEE Trans. Signal Process.* 2019, 67, 1620–1635. [CrossRef]
- 12 Yang, B.; Yu, Z.; Lan, J.; Zhang, R.; Zhou, J.; Hong, W. Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2018, 66, 1–16. [CrossRef]
- Vook, E; Ghosh, A.; Thomas, T. MIMO and beamforming solutions for 5G technology. IEEE Int. Microw. Symp. 2014, 1–4. [CrossRef]
- Glynn, S.; Devlin, L. A 28GHz, 4-channel Phase Adjustable Power Amplifier IC for 5G front-ends. In Proceedings of the Automated RF & Microwave Measurement Society (ARMMS) Conference, Oxford Belfry, Nr Thame, UK, 20–21 April 2015.
- Devlin, L. The Design of Integrated Switches and Phase Shifters. In Proceedings of the IEEE Tutorial Colloquium on Design of RFICs and MMICs. 1999, pp. 1–14. Available online: https://ieeexplore.ieee.org/ document/827279 (accessed on 1 June 2020).
- AWR Microwave Office Software. Available online: https://www.awr.com/awr-software/products/ microwave-office (accessed on 6 July 2020).



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# Investigation of the interaction of a pair of bright optical spatial pyroelectric solitons during their in-phase propagation in an undoped lithium niobate crystal at a wavelength of 532 nm

A S Perin, M N Gapparova, D K Romanenko, A V Sokolnikov, D V Okunev and A E Mandel Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk 634050,

Russia

e-mail: perin.anton@gmail.com

Abstract. The formation of two-dimensional bright spatial solitons by in-phase laser beams with a wavelength of 532 nm propagating in the bulk of photorefractive lithium niobate crystal under the reversal of the sign of the nonlinear optical response of the material with the contribution of the pyroelectric effect has been experimentally demonstrated. It is shown that varying the distance between the beams at the input face of the crystal leads to the interaction of pyroelectric solitons, which allows the formation of non-rectilinear propagation paths of light beams.

### 1. Introduction

When laser beams propagate in an optically nonlinear medium, self-action effects may occur, the result of which is a change in the spatial structure of light fields [1-4]. The spatial self-action of light beams in such media can lead to their self-focusing or self-defocusing. A particular case of the self-action effect is the spatial optical soliton regime, in which the diffraction broadening of the light beam propagating in the medium is completely compensated by the nonlinearity of the medium. In applied terms, interest in such a regime is associated with the formation by spatial solitons of optical waveguides and nonlinear lenses [5, 6].

In some crystalline materials, a nonlinear optical response is manifested even at light intensities of several W/cm<sup>2</sup>, which makes them attractive both in terms of studying the fine features of soliton phenomena and in the implementation of fully optical elements and devices of nonlinear optics and photonics [6-9]. One such material is a ferroelectric crystal of lithium niobate (LiNbO<sub>3</sub>). The photorefractive optical nonlinearity of a lithium niobate crystal has a self-defocusing character, which leads to an increase in the diffraction divergence of laser beams propagating in the crystal [10]. The soliton regime of propagation of coherent light beams in a LiNbO<sub>3</sub> crystal can be achieved by the reversal of the sign of the nonlinear optical response of the material due to the pyroelectric and photorefractive effects interaction under conditions of uniform heating of LiNbO<sub>3</sub> samples [11, 12]. It was shown in [13] that, in the bulk of nominally undoped crystalline LiNbO<sub>3</sub> samples, the formation of single solitons and pairs of such solitons are possible due to the pyroelectric effect.

It is known that the coherent interaction of optical spatial solitons propagating in a nonlinear medium leads to a change in the distance between the centres of such beams [14]. It was shown in that in the case of propagation of solitons excited by light beams phase-shifted by  $\pi/2$ , they are repelled

from each other, while in-phase generating light fields excite solitons, which are attracted during propagation.

This paper presents the results of studies of the formation and interaction of bright spatial optical solitons in a lithium niobate crystal while compensating for the diffraction divergence of laser radiation due to the pyroelectric effect under conditions of uniform heating of samples.

#### 2. Experimental setups and conditions

In experiments on the formation and interaction of optical solitons, an undoped LiNbO<sub>3</sub> Z-section sample was used. The dimensions of the sample were  $10\times4\times4$  mm<sup>3</sup> along the X, Y, Z axes, respectively. The light beam in the sample propagated in a direction parallel to the X axis. The polarization of the light field forming the soliton corresponded to an extraordinary wave in the crystal. The experimental setup is shown in Fig. 1. The radiation source (1) in the experiments was a CW YAG:Nd<sup>3+</sup> solid-state laser with frequency doubling ( $\lambda = 532$  nm). To form in-phase Gaussian light beams with a given waist diameter propagating in a crystalline sample in parallel directions, we used an optical system consisting of an amplitude diffraction grating (2), a spatial filter (4), and focusing lenses (3, 5, 6). After diffraction of laser radiation by an amplitude grating, maxima of +1 and -1 orders of magnitude were filtered from the light field by a spatial filter. Focusing lenses (3, 5, 6) with focal lengths F1, F2, and F3 were respectively selected and placed so that the beams propagated in parallel and had a given distance between their centers and the required diameter of light spots on the input plane of the sample. The imaging lens (10) was used to scale the intensity distribution patterns on the front (input) and back (output) surfaces of the sample, which were studied, using a BS-FW-FX33 laser beam analyzer (11), coupled to a personal computer.



1 - a source of laser radiation; 2 - amplitude diffraction grating; 3, 5, 6 - focusing lenses; 4 - spatial filter; 7 - three-coordinate micrometric table; 8 - sample of a LiNbO3 crystal; 9 - Peltier heating element; 10 - imaging lens; 11 - laser beam analyzer

Figure 1. Scheme of an experimental setup for studying the formation and interaction of optical solitons.

In the experiments, the diameter of the light beam at the input surface of the crystal was ~ 15  $\mu$ m in terms of half intensity. The distance between the centers of parallel light beams in the crystal was determined by the period of the diffraction grating and in different experiments varied in the range from 105 to 245  $\mu$ m. The sample was moved in the transverse direction relative to the laser beams using a linear translator with micrometric positioning accuracy (7). The studied crystalline sample LiNbO<sub>3</sub> (8) was placed on the surface of the Peltier element (9), providing uniform heating of the sample. For better thermal transfer, a thin layer of heat-conducting paste was applied between the lower face of the crystal and the ceramic substrate of the heater. The remaining faces of the crystal had direct contact with the surrounding air. During the experiments, the crystalline sample was heated to the required temperature, the control of which was carried out by a non-contact infrared thermometer with an accuracy of  $\pm 2$  ° C.

Bright spatial optical solitons were excited in a lithium niobate sample by two in-phase laser beams obtained by spatial filtering of diffraction maxima. Due to the photorefractive effect, an electric field  $E_{\rm ph}$  arises in the illuminated region of the crystal, due mainly to the photovoltaic mechanism of redistribution of charge carriers. The self-defocusing nature of the photorefractive optical nonlinearity of the LiNbO<sub>3</sub> crystal leads to the field-induced spatial charge of a nonlinear negative lens in the illuminated region [15]. The inhomogeneity of the refractive index leads to an increase in the diffraction divergence of the light beam.

In the case of two-dimensional Gaussian light beams, compensation of both linear and nonlinear light diffraction can be achieved by uniform heating of the crystalline sample. An increase in the crystal temperature leads to a change in its spontaneous polarization and the appearance of a pyroelectric field  $E_{py}$ , which lowers the refractive index of LiNbO<sub>3</sub>. In the illuminated region, the pyroelectric field  $E_{py}$  is compensated due to the photoconductivity of the medium, leading to drift redistribution of charge carriers. In this case, the refractive index in the illuminated region of the crystal changes less and turns out to be higher than that in the unlit region. Thus, the contribution from the photorefractive and pyroelectric effects under certain conditions leads to the appearance of a two-dimensional bright spatial soliton – the pyroelectric soliton, which eliminates the effect of diffraction spreading of the light beam [11].

In our experiments, the output power of the laser source was 400  $\mu$ W. The diameters of the light beams formed by the optical system of the experimental setup at the input face of the crystal were 15  $\mu$ m. The intensity of each of the light beams at the input face of the crystal was 50 W/cm<sup>2</sup>. To establish the soliton regime, the sample was heated using a Peltier element to a temperature of 55 °C.

### 3. Experimental results and discussions

As a result of the interaction of in-phase bright spatial optical solitons, the centers of the soliton beams came closer together on the exit plane of the sample. In fig. 2 shows the patterns of the light field and the corresponding intensity distribution profiles, illustrating the approach of the solitons on the output face of the crystal for the case when the distance between the beams on the input face of the sample was  $105 \mu m$ .



Figure 2. Intensity distribution patterns and corresponding profiles of light beams at the input (a) and output (b) faces of the sample.

To identify the propagation features of in-phase bright spatial optical solitons in LiNbO<sub>3</sub>, numerical simulation was performed using the propagating beam method (BPM) [16]) as applied to nonlinear waveguide structures in the paraxial approximation for the case of a nonlinear lossless medium with a modulated refractive index in the transverse direction.

As is well established, scalar wave propagation in a nonlinear one-dimensional waveguide array can be modelled within a paraxial approximation by:

$$i\frac{dE}{dx} + \frac{1}{2k}\frac{d^2E}{dz^2} + k\frac{\Delta n(z) + \Delta n_{nl}}{n_n}E = 0.$$

The propagation coordinate is along the x-axis, the amplitude of the electrical field is denoted by E, while  $k = 2\pi n_s / \lambda$  represents the wave number. Here,  $\lambda$  is the wavelength of the used light in vacuum while  $n_s = 2.2355$  is the extraordinary refractive index of our lithium niobate substrate. The periodically modulated refractive index which defines the nonlinear waveguide array is denoted by n(z) while  $\Delta n_{\rm sl}$  is the nonlinear refractive index change ( $\Delta n_{\rm sl} << n_s$ ). The periodically modulated refractive index periodically modulated refractive index change ( $\Delta n_{\rm sl} << n_s$ ). The periodically modulated refractive index change ( $\Delta n_{\rm sl} << n_s$ ).

When modeling, it was accepted: undoped lithium niobate with an extraordinary refractive index of 2.2355 at a wavelength of 532 nm was used as a propagation medium; sample length 10 mm; type of nonlinearity – saturation-type photorefractive nonlinearity; diameter of light beams 15 microns; the distance between the centers of the beams on the input surface is 15  $\mu$ m, 45  $\mu$ m, 105  $\mu$ m, 170  $\mu$ m, 245  $\mu$ m.

Figure 3a shows the experimental results and calculated data – the time dependences of the ratio of the distance between the centers of the light beams at the input  $(H_{in})$  and output  $(H_{out})$  planes of the sample propagating in the mode of in-phase bright spatial solitons. In figure 3b presents the intensity distribution patterns of optical solitons propagating at different initial distances between the centers of the beams at the input face.



Figure 3. Graphs of the dependence (a) of the ratio of the distances between the centers of light beams on the input face of the crystal ( $H_{in}$ ) on the distance between the centers of light beams on the output face ( $H_{out}$ ) over time. The results of numerical simulations (b) illustrating the patterns of the intensity distribution of optical solitons propagating at different initial distances between the centers of the beams at the input face of the sample.

The experimental dependences were constructed only for the distances between the beams of  $245 \ \mu m$ ,  $170 \ \mu m$ , and  $105 \ \mu m$ , which is due to the impossibility of the experimental implementation of the soliton propagation regime at a small distance between the beams due to the strong interference

interaction between them. However, the BPM calculation data made it possible to construct the dependences for the distances between the beams of 45  $\mu$ m and 15  $\mu$ m, since the coherent nature of the light field of the beams was not taken into account in the calculations. Such a feature of the interaction can be eliminated by using incoherent light fields. The available experimental data are in satisfactory agreement with the calculated values at the indicated distances between the beams. An analysis of the dependences (fig. 3a) shows that as the distance between the centers of the beams decreases, their attraction to each other increases sharply. Calculations show that when the distance between the beams is equal to their diameter (15  $\mu$ m), the solitons approach each other within 5 s to a value of ~ 7.7  $\mu$ m between their centers. The saturation region is determined by the geometric dimensions of the crystal and indicates that the beams reach the exit face of the sample.

#### 4. Conclusion

Thus, we studied the formation and interaction of a pair of bright spatial solitons while compensating for the diffraction divergence of laser radiation under the conditions of the combined contributions of the photorefractive and pyroelectric effects to the nonlinear response of an undoped lithium niobate crystal at a wavelength of 532 nm. It was shown experimentally and by numerical simulation that the resulting perturbations of the optical properties of the medium lead to non-linear paths of propagation of light beams. This effect can be used to create optically reconfigurable waveguide elements or their arrays in such crystals, suitable for both long-term storage and operational optical reconfiguration of their topology.

#### Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education as part of the state assignment for 2020 and by Russian Foundation for Basic Research and the government of the Tomsk region of the Russian Federation, grant № 18-42-703018. The experimental results were obtained using the equipment of the Center for Collective Use "Impulse" with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement 075-15-2019-1644, project identifier RFMEFI62119X0029.

#### References

- [1] Akhmanov S A, Sukhorukov A P and Khokhlov R V 1968 Soviet physics uspekhi 10 609-36
- [2] Kivshar Y S and Stegeman G I 2002 Optics and Photonics News 13 59-63
- [3] Perin A S, Trushnikov I A and Inyushov A V 2019 Ferroelectrics 544 54-61
- [4] Pustozerov A V, Perin A S and Shandarov V M 2019 Ferroelectrics 544 20-6
- [5] Chen Z, Segev M and Christodoulides D 2012 Reports on Progress in Physics 75 086401
- [6] Kivshar Y S and Agrawal G 2003 Optical solitons: from fibers to photonic crystals (Academic press) p 540
- [7] Chen L and Reano R M 2012 Optics Express 20 4032-38
- [8] Chauvet M, Bassignot F, Henrot F, Devaux F, Gauthier-Manuel L, Maillotte H and Sylvain B 2015 Opt. Lett. 40 1258-61
- [9] Kip D 1998 Appl. Phys. B 67 131
- [10] Petrov M P, Stepanov S I and Khomenko AV 1991 Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems (Berlin: Springer-Verlag) p 275
- [11] Safioui J, Devaux F and Chauvet M 2009 Optics Express 17 205-12
- [12] Ryabchenok V, Shandarov V and Perin A 2017 J. Phys.: Conf. Series 867 012026
- [13] Perin A S, Ryabchenok V Y and Shandarov V M 2016 Joint IEEE Int. Symp. on the Applications of Ferroelectrics. Darmstadt, Germany, 21 August 2016 1-4
- [14] Stegeman G I and Segev M 1999 Science 286 1518-23
- [15] Shandarov V, Perin A and Ryabchenok V 2015 J. Phys.: Conf. Series 594 012036
- [16] Stepić M, Smirnov E, Rüter C E, Prönneke L, Kip D and Shandarov V 2006 Phys. Rev. E 74 046614

УДК 535(06)+004(06) ББК 72r Н 34

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – 704 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 29-31 января 2020 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 1 декабря 2019 года. Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2648-4

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020

Подписано в печать 22.01.2020. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 44. Тираж 340 экз. Заказ №1.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31

## Д.К. РОМАНЕНКО, А.В. СОКОЛЬНИКОВ, М.Н. ГАППАРОВА, О.А. КАРАНКЕВИЧ, А.С. ПЕРИН

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

В работе экспериментально продемонстрирована компенсация дифракционной расходимости лазерного светового пучка мощностью 100 мкВт и длиной волны 532 нм с диаметром 27,5 мкм при его распространении в нелегированном кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта. Установлено, что полная компенсация дифракционного уширения и формирование пироэлектрического пространственного солитона происходит при нагревании образца на величину 10 градусов по Цельсию через 10 с.

# D.K. ROMANENKO, A.V. SOKOLNIKOV, M.N. GAPPAROVA, O.A. KARANKEVICH, A.S. PERIN Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

# TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE COMPENSATION OF THE DIFFRACTION DIVERGENCE OF LASER BEAMS IN A CRYSTAL OF LITHIUM NIOBATE

The work experimentally demonstrated the compensation of the diffraction divergence of a laser light beam with a power of 100  $\mu$ W and a wavelength of 532 nm with a diameter of 27.5  $\mu$ m when it propagates in an undoped crystal of lithium niobate taking into account the contribution of the pyroelectric effect. It was found that complete compensation of diffraction broadening and the formation of a pyroelectric spatial soliton occurs when the sample is heated by 10 degrees of Celsius after 10 seconds.

В современных интегрально-оптических схемах базовыми элементами являются оптические волноводы. Одним из распространенных материалов для изготовления таких элементов является сегнетоэлектрический кристалл ниобата лития. Существующие способы формирования волноводных структур в этом кристалле отличаются сложной технической реализацией [1]. Относительно простым в реализации является метод оптического индуцирования, суть которого заключается в том, что формирование волноводных структур происходит за счет модуляции показателя преломления кристалла в освещенной области при

278 ISBN 978-5-7262-2648-4 ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА

распространении в образце пироэлектрических пространственных солитонов [2]. Важным параметром, характеризующим вклад пироэлектрического эффекта, является изменение температуры кристалла [3]. Целью данной работы является исследование температурной зависимости компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта.

В экспериментах использовался нелегированный кристалл LiNbO<sub>3</sub>, размером 20×7×1 мм<sup>3</sup> вдоль осей X, Y, Z соответственно. Источником излучения являлся твердотельный лазер YAG:Nd<sup>3+</sup> (длина волны света  $\lambda = 0,532$  мкм). На рис. 1а-г) приведены результаты эксперимента, демонстрирующие компенсацию дифракционного уширения лазерного пучка диаметром 27,5 мкм, мощность которого равнялась 100 мкВт. Полная компенсация дифракционных искажений достигалась при нагреве кристалла на величину  $\Delta T = 10$  °C в течение 10 с (рис. 1д).



Рис. 1. Профили распределения интенсивности лазерного пучка мощностью излучения 100 мкВт: в начальный момент времени на входной грани (а); в начальный момент времени на выходной грани при ΔT=0 °C (б); на выходной грани через t=5 с и ΔT=5 °C (в); на выходной грани через t=10 с и ΔT=10 °C (г), график зависимости изменения ширины пучка от изменения температуры (д)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

#### Список литературы

- 1. Courjal N., et. al. // Emerging Waveguide Technology. 2018. P. 153-174.
- 2. Shandarov V., et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 70. P. 754-757.
- 3. Ryabchenok V., et .al // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 867(1). P. 012026.

ISBN 978-5-7262-2648-4 ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА 279

УДК 535(06)+004(06) ББК 72r Н 34

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – 704 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 29-31 января 2020 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 1 декабря 2019 года. Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2648-4

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020

Подписано в печать 22.01.2020. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 44. Тираж 340 экз. Заказ №1.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31

## А.С. ПЕРИН, Д.В. ОКУНЕВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТЛЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Исследовано взаимодействие пары оптических светлых пространственных солитонов при компенсации дифракционной расходимости лазерного излучения в условиях совместных вкладов фоторефрактивного и пироэлектрического эффектов в нелинейный отклик кристалла ниобата лития.

> A.S. PERIN, D.V. OKUNEV Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

# INTERACTION OF BRIGHT SPATIAL SOLITONS IN THE PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL OF LITHIUM NIOBATE WITH TAKING INTO ACCOUNT THE PYROELECTRIC EFFECT

The interaction of a pair of optical bright spatial solitons under compensation of the diffraction divergence of laser radiation under conditions of the combined contributions of the photorefractive and pyroelectric effects to the nonlinear response of a lithium niobate crystal is studied.

пространственные Оптические солитоны. в частности пироэлектричекие (ПЭ) солитоны [1], широко исследовались в последние ПЭ-солитоны образуются несколько лет. при компенсации дифракционной расходимости лазерного излучения за счет вклада пироэлектрического эффекта [1, 2]. Целью работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование взаимодействия ПЭ-солитонов в кристалле ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>).

В экспериментах использовался нелегированный образец LiNbO<sub>3</sub> Z-среза. Световые пучки в образце распространялись в направлении, параллельном оси Х. Поляризация формирующего солитон светового поля соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Диаметры световых пучков, формируемых оптической системой экспериментальной установки на входной грани кристалла, составляли 15 мкм, а

274 ISBN 978-5-7262-2648-4 ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА

интенсивность каждого из них 5 мВт/см<sup>2</sup>. Для установления солитонного режима образец нагревался с помощью элемента Пельтье до температуры 55 °C. На рис. 1а приведены результаты экспериментов и расчетные данные – временные зависимости отношения расстояния между центрами световых пучков на входной (H<sub>вх</sub>) и выходной (H<sub>вых</sub>) плоскостях образца, распространяющихся в режиме синфазных светлых пространственных солитонов. Ha рис. 1б представлены картины распределения интенсивности оптических солитонов. распространяющихся при различных начальных расстояниях между центрами пучков на входной грани образца.



Рис. 1. Графики зависимости (а) отношения расстояний между центрами световых пучков и смоделированные картины распределения интенсивности (б)

Таким образом, в работе исследовано взаимодействие пары светлых ПЭ-солитонов при их распространении в кристалле ниобата лития на длине волны света 532 нм. Экспериментально и путем компьютерного моделирования показано, что формирующиеся возмущения оптических свойств среды приводят к непрямолинейным траекториям распространения световых пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Список литературы

1. Safioui J., Devaux F., Chauvet M. // Optics Express. 2009. V. 17(24). P. 22209-22216.

2. Shandarov V. et. al. // Advanced Solid State Lasers. OSA. 2015. P. ATu2A.2.

ISBN 978-5-7262-2648-4 ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА 275
## Special aspects in interference of in-phase and anti-phase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact

#### A N Sychev, N D Malyutin, E I Trenkal and G A Malyutin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin avenue, Tomsk, Russia

E-mail: ndm@main.tusur.ru

Abstract. We considered the propagation of a short pulse in the picosecond range in coupled lines with a ratio of phase velocities of anti-phase and in-phase waves of 3:1. We showed experimentally a special aspect in the interference of in-phase and anti-phase waves in such structures, which leads to the input pulse separation between three ports without a significant energy loss associated with the reflection from the input. The wave interference was found to lead to a change in the directional properties of the structures under consideration and a separation of the pulse spectral components between the ports.

#### 1. Introduction

The concept of in-phase and anti-phase waves was introduced in the theory of coupled lines (CL) when solving telegraph equations [1-3]. In this and other works, the phase velocities of in-phase ve and antiphase vo waves were considered as equal and the process of wave propagation in lines was considered as a result of the wave interference with the same propagation constants. However, with the development of the theory and practice of coupled strip lines with dielectric filling inhomogeneous in cross section, the effect of inequality between  $v_{a}$  and  $v_{0}$  on the frequency characteristics of the devices based on CL became obvious. Works [4-8] considered the physical regularities of wave interference in coupled stripline structures when  $v_c \neq v_0$ , as well as qualitative and quantitative changes in the frequency characteristics of the devices based on CL and multiply connected stripline structures. It was theoretically shown for the first time in 1969, in [4], that some all-pass schemes acquire filtering properties when  $v_e$  and  $v_o$  are not equal. It was confirmed experimentally in [8]. The practical application of CL with inhomogeneous dielectric filling stimulated the search for and creation of new varieties of CL designs, the creation of which was aimed to achieve two contradictory goals. The first of them was aimed to bring  $v_e$  and  $v_o$  closer together as much as possible in order to avoid the wave interference leading to resonance phenomena [9, 10]. The second one was to determine the degree of inequality between  $v_{o}$  and  $v_{o}$  to solve the problems of creating the best frequency-selective characteristics for the devices based on CL [11, 12], creating devices for protecting equipment from short pulses [13, 14], etc.

The phase velocities  $v_e$  and  $v_0$  are usually determined through the effective relative dielectric permeabilities for in-phase excitation  $\varepsilon_{reffe}$  and anti-phase excitation  $\varepsilon_{reffe}$  of coupled lines [5, 6]:

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOL Published under licence by IOP Publishing Ltd 1

1679 (2020) 022023 doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022023

$$v_{e,0} = c / \sqrt{\epsilon_{reffe,0}}, \qquad (1)$$

where c is the speed of light.

If CLs are equal, then  $\varepsilon_{reffe,o}$  can be determined through the linear parameters of the coupled lines [15]:

$$\varepsilon_{reffe} = cL_{11} + L_{11}C_{11} - |C_{12}|, \varepsilon_{reffo} = cL_{11} - L_{11}C_{11} + |C_{12}|,$$
 (2)

where  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  are the elements of the per-unit capacitance matrix,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  are the elements of the perunit inductance matrix.

The study of the dependence of the coupled lines parameters on the ratio  $v_e / v_0 \ge 3$  led to the creation of CL designs, in which the ratio of phase velocities is  $v_e / v_o \ge 3$  [16-18]. It was shown that when  $v_e / v_o \ge 3$ , the interference of in-phase and anti-phase waves leads to a qualitative change in the frequency dependence of the CL segment parameters. The practical application of such CL was found in the creation of a transdirectional coupler (TrDC) [16] on the CL. The coupler is implemented on a structure with a vertical insert and a high dielectric permeability, that enables to provide a threefold ratio of phase velocities  $v_e$  and  $v_o$ , and acceptable impedance matching. A computer model of such a structure, which was based on the method of numerical conformal transformations [19], was described in the following publications. In [17, 18], the characteristics of CL with the ratio of  $v_e / v_o \ge 3$  were studied in the frequency domain.

This work considers the propagation of an ultra-wideband pulse with picosecond range in coupled lines when  $v_e / v_o \ge 3$ . The pulse was applied to the input port of the first line. We carried out an experimental measurement of the pulsed signals at the input/output of the other three ports and the signal reflected from the input port of the device. We calculated the spectra of the received impulse responses and analysed the physical features of the interference of in-phase and anti-phase waves in CL under pulse impact.

#### 2. Design and measurement scheme

The phase velocity ratio of in-phase and anti-phase waves  $v_e / v_o$  depends on the coupled lines design. It is achieved in works [16-19] by vertical and horizontal positioning of substrates 1 and 4 made of different dielectrics with relative dielectric permeabilities  $\varepsilon 1$  and  $\varepsilon 2$ , and conductors 2 and 3 with width of w1 and w2 (figure 1). This figure shows the structural design modification of the coupled strip lines, which enables to vary  $v_e / v_o$  over wide range. Figure 2 illustrates the CL cross section.

Coupled strips with a width of w1 = 2 mm are put on the substrate placed vertically to the grounded base. A gap between the bottom end of the substrate and the base is D = 0.5 mm. Relative dielectric permeability of the substrate is  $\varepsilon 1 = 16,0$ . Material for the substrate if Flan-16. Other dimensions of the SPL cross section: h1 = 1,0 mm; h2 = 0.5 mm. The design has coaxial-to-stripline connectors. The length of segment of the coupled lines is l = 0.1 m. Experimental studies were carried out on a stand, the scheme of which is shown in figure 3.

The unit scheme consists of a pulse generator, which is a combination of a Geozondas GZ1105DLP2 reference generator and a GZ1117DN-35 pulse shaper, a Picosecond 5372 divider (splitter). The pulse generator is connected with divider's input that has 14 dB decoupler with output 1. The pulse arriving at the divider's output 2 is attenuated by 2 dB. This pulse is fed through a piece of coaxial cable to port 1 of the device under study. The DSA 8300 type oscilloscope has two inputs, which enables to observe two pulse signals from divider's output 2 and from one of three ports 2, 3, 4. In this case, the oscilloscope is synchronized from the pulse generator.





Figure 1. Coupled strip lines design: 1 – vertically placed substrate and strips put on it 2; 3 – strips horizontally placed on the substrate 4; 5 – grounded base with a gap under the coupled region between the strips 3.

Figure 2. Cross section of the coupled strip lines with a wide-ranging phase velocity ratio of in-phase and anti-phase waves when changing the dimensions and dielectric constants of vertically and horizontally located substrates and conductors.



Figure 3. Scheme for studying the pulse characteristics of the segment of the coupled strip lines.

#### 3. Experimental results

The pulse signals measuring at the same port loads of  $1-4 Z_{load1}, ..., Z_{load4} = 50$  Ohms was carried out as a part of experimental studying. The problem was to identify the special aspects of the input pulse propagation along the coupled lines of the device. Figure 4 illustrates recording a pulse applied to port 1 from divider's output 2 with a duration of 40 ps and an amplitude of -0.7 V. The voltage-time relationship at the output of port 3 shows that the input pulse, when transmitted to port 3, was split into two pulses with amplitudes of -0.26 V and -0.22 V. The group delay of these pulses relative to the input pulse is  $\tau_e = 346$  ps and  $\tau_0 = 996$  ps, respectively. Pulse signals on ports 2 and 4 are shown in figure 5 and figure 6. In this case, we observe a more complex picture of the input pulse transmission in the form of a pulses sequence with a shape close to the shape of the input pulse, and pulse surges of a more complex shape and with a greater delay. The amplitude of the first less-delayed pulse transmitted to port 2 is -0.30 V, and the first pulse transmitted to port 4 is -0.27 V.

The input pulse reflection from port 1 is an important characteristic for the analysis of the mechanism for the input pulse propagation along the coupled lines of the transdirectional coupler. Therefore, the reflected pulse was measured. For this purpose, a segment of coaxial cable was connected between the divider and the device under study. As a result, the input pulse and the reflected pulse were separated by the time of their arrival at the oscilloscope input.

1679 (2020) 022023 doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022023



Figure 6. Pulse signals at input (port 1) and at port 4.

Figure 7 illustrates a comparison of the input pulse and the reflected pulse. The maximum amplitude of the reflected pulse is 0,1 V. It enables to qualitatively evaluate the reflection coefficient modulus of a transdirectional coupler on exposure to an ultra-wideband pulse as a ratio of amplitudes  $|\Gamma| =$ 0,1/0,7 = 0,14.

It is known [17] that the frequency dependence of the input reflection coefficient of CL segment in a wide frequency range is characterized by periodic poles. Therefore, a significant reflected pulse was expected when studying the device. But the received reflected signal shown in figure 7 did not confirm our assumption. To explain the observed effect, we made an analysis of the pulsed signal spectra at the device input and at ports 2 - 4 (figures 4, 5 and 6).



Time t, ns

Figure 7. Comparison of the input pulse and reflected pulse.



Figure 8 shows the envelope curves of the pulsed signal spectra at the first line input (port 1), at its output (port 3) and the reflected signal from the input of the device under study.



As it is shown in figure 8, the actuating signal (port 1) has a continuous spectrum, the signal at port 3 has a grating spectrum. The presence of relatively small reflections of harmonic components from the input (shown in black) does not cause a significant decrease in the transmission coefficient of the harmonics transmitted to port 3 in the frequency range from 0.1 GHz to 8 GHz, since the reflection coefficient is low.

Because of the presence of a grating transmission spectrum and the absence of poles of total reflection of the harmonic components of an ultra-wideband signal, the question arises about the direction of transmission of harmonics that have not passed to port 3 to other ports. Envelope curves of the signal spectra at ports 2 and 4 were calculated (figure 9).



Figure 9. Envelope curves of the pulsed signal spectra at the input of the device (port 1) and at ports 2 and 4.

Analysis of the spectral characteristics (figure 9) shows that harmonic components that have not passed to port 3, with almost the same amplitudes up to 8 GHz, entered ports 2 and 4.

#### 4. Wave analysis in coupled lines

The analysis of waves propagating in coupled strip lines with unequal phase velocities of in-phase and anti-phase modes is considered in [4-8]. The initial data are the matrices of linear capacitances C and inductances L determined from [19]:

$$C = \begin{bmatrix} 298 & -272 \\ -272 & 298 \end{bmatrix} \times 10^{-12} F/m, L = \begin{bmatrix} 0.322 & 0.144 \\ 0.144 & 0.322 \end{bmatrix} \times 10^{-6} H/m$$
(3)

We considered a segment of coupled lines as an eight-pole, to the input port of which, at number 1, an E1(f) with the amplitude and phase spectral composition of the input pulse is supplied (figure 4, figure 9, blue). Using the known relationship of voltages and currents at the input and output of coupled lines in terms of [7], we find the absolute values of voltages and currents at points x = 0 and x = l (figure 3) in the form of matrices

$$\begin{bmatrix} U(0)\\ I(0) \end{bmatrix}$$
 and  $\begin{bmatrix} U(l)\\ I(l) \end{bmatrix}$ , (4)

where U(0), I(0) are voltages and currents at the device input, and U(l), I(l) are voltages and currents at the output of coupled lines.

We obtained a relationship between the amplitudes of in-phase and anti-phase modes of incident waves  $A_e$ ,  $A_o$  and reflected waves  $D_e$ ,  $D_o$  in the first line [7]:

$$\begin{bmatrix} A_{\theta} \\ A_{0} \\ D_{\theta} \\ D_{0} \end{bmatrix} = [Am]^{-1} \begin{bmatrix} U_{1}(0) \\ U_{2}(0) \\ I_{1}(0) \\ I_{2}(0) \end{bmatrix},$$
 (5)

where [Am] is the normalized amplitude matrix. It is determined as follows:

$$[Am] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ k_e & k_o & k_e & k_0 \\ Y1_e & Y1_o & -Y1_e & -Y1_o \\ Y2_e & Y2_0 & -Y1_e & -Y1_o \end{bmatrix},$$
(6)

The matrix [Am] coefficients included in the expression are calculated according to [7]. Figure 10 shows the dependence of the amplitudes  $A_e$ ,  $A_o$ ,  $D_e$ ,  $D_o$  on the frequency of the harmonic components of the actuating impulse.

.....



Figure 10. Frequency dependence of amplitudes of in-phase and anti-phase wave components in the first line.

Figure 10 shows that the incident components of the in-phase and anti-phase waves dominate in the first line. The reflected components have a smaller amplitude, and the oscillation period of the in-phase component amplitude is three times less than the oscillation period of the anti-phase component. The obtained values  $A_e$ ,  $A_o$ ,  $D_e$ ,  $D_o$  enable to construct a complete picture of waves propagating in coupled strip lines and to reveal the special aspects of their interference in connection with a significant phase

velocity inequality of the in-phase and anti-phase components. We write down expressions for finding voltages and currents in coupled strip lines, which are essentially a solution to a system of telegraph equations with known boundary conditions at the ends of the lines:

$$\begin{aligned} U1(x) &= A_e \cdot exp(-\gamma_e x) + A_o \cdot exp(-\gamma_o x) + D_e \cdot exp(\gamma_e x) + D_o \cdot exp(\gamma_o x); \end{aligned} \tag{7} \\ U2(x) &= A_e k_e \cdot exp(-\gamma_e x) + A_o k_o \cdot exp(-\gamma_o x) + D_e k_e \cdot exp(\gamma_e x) + D_o k_o \cdot exp(\gamma_o x); \end{aligned} \\ I1(x) &= A_e Y1_e \cdot exp(-\gamma_e x) + A_o Y1_o \cdot exp(-\gamma_o x) + D_e Y1_e \cdot exp(\gamma_e x) + D_o Y1_o \cdot exp(\gamma_o x); \end{aligned} \\ I2(x) &= A_e Y2_e \cdot exp(-\gamma_e x) + A_o Y2_o \cdot exp(-\gamma_o x) + D_e Y2_e \cdot exp(\gamma_e x) + D_o Y2_o \cdot exp(\gamma_o x), \end{aligned}$$

where  $\gamma_e, \gamma_o$  are propagation constants for in-phase and anti-phase waves;

$$\begin{split} k_{\theta} &= \frac{Y_{\theta}^2 - \alpha_{1,1}}{\alpha_{1,2}}, \, k_{\theta} = \frac{Y_{\theta}^2 - \alpha_{1,1}}{\alpha_{1,2}}, \, Y1_{\theta} = \frac{Y_{1,1} + k_{\theta}Y_{1,2}}{\gamma_{\theta}}, \, Y2_{\theta} = \frac{Y_{1,2} + k_{\theta}Y_{2,2}}{\gamma_{\theta}}, \, Y1_{\theta} = \frac{Y_{1,1} + k_{\theta}Y_{1,2}}{\gamma_{\theta}}, \\ Y2_{\theta} &= \frac{Y_{1,2} + k_{\theta}Y_{2,2}}{\gamma_{\theta}}, \end{split}$$

 $\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}$  are the elements of matrix  $\alpha = ZY$ , where  $Z = R + i\omega L$  is the impedance matrix,  $Y = G + i\omega C$  is the conductance matrix, written as R, L, G, C – matrices of per-unit parameters, respectively, active resistances, inductances, conductivities and capacitances.hjghgf

We calculated the response of coupled lines to the action of a pulse using formulas (2)-(4) and wave propagation along the coordinate x, described as a result of the interference of in-phase and anti-phase incident and inverse waves by expressions (7). The response was determined as a Fourier series

$$u(t) = \sum_{n=0}^{M} |U_n| \cos(2\pi n f t + \varphi_n),$$
 (8)

where f is the frequency of the fundamental harmonic of the actuating pulse signal;  $|U_n|$ ,  $\varphi_n$  is the module and phase of the response at harmonic number n of the corresponding port.

Figure 11 shows the results of calculating the dependence of voltage in port 2 u2(t) on time, calculated in two ways when determining the frequency dependence of currents and voltages – on the basis of matrix relations (4) (blue) and by superposition of in-phase and anti-phase components of waves (7) (red ).



Figure 11. Time dependence of voltage at port 2 on exposure to a 40 ps pulse on port 1.

Figure 11 shows a good match of signals calculated in different ways. That is ground to assert that the amplitudes of in-phase and anti-phase incident and inverse waves are determined correctly (formula (6), figure 10). The inequality of the phase velocities of the in-phase and anti-phase waves leads to a change in both the phase-frequency and amplitude-frequency dependences of the signals in ports 2-4. The frequency separation of the original signal harmonics was shown in figure 10, figure 11. Phase-

frequency distortion introduced into the original actuating signal at ports 2 and 4, calculated and obtained experimentally, is shown in figure 12, figure 13.

Comparison of the frequency dependence of the introduced phase shift shown in Figure 12 and Figure 13 shows their significant difference. It lies in the fact that the voltage phase shift in port 2 is formed as a result of the interference of waves with different phase velocities. Therefore, the derivative of phase with respect to frequency in the transmission edge vicinity, marked with dashed lines, changes its sign. This indicates a different effect of inverse waves with different phase velocities, despite their small amplitudes. When transmitting a signal to port 4, the phase-frequency characteristic approaches the form characteristic of a single line segment, since when the waves are added, the incident waves of the in-phase and anti-phase modes dominate in an amplitude ratio of about 2:1, and the contribution of the inverse waves decreases to the end of the line.





Figure 13. Frequency dependence of the phase shift introduced in the signal when it is transmitted from port 1 to port 4: experimental data is in blue, calculated data – in red.

#### 5. Discussions of the results

The measurements and calculations have shown the specific features of the propagation of an ultrawideband pulse in coupled strip structures with a strong imbalance of the electromagnetic coupling between the lines. The experiment has shown that a short pulse with a continuous spectrum up to 30 GHz applied to port 1 is reflected from it with a relatively low (less than 0,2) reflection coefficient. In such a case, there occurs a power dividing of the harmonic components of the pulse signal between ports 2, 3 and 4. Harmonic components that have not passed to port 3 are transmitted with approximately the same amplitudes to ports 2 and 4, which are the beginning and end of the second strip conductor. The analysis of the phase relationships of the harmonic components in ports 2 and 4, which arrived with approximately the same transmission attenuation, shows a phase difference of 90 degrees in the frequency range of 0.62-0.83 GHz with periodic repetition in the range of 3.54-3.75 GHz, etc., and 180 degrees in the range of 1.04-1.14 GHz, 4.06-4.16 GHz. The noted special aspects of the short pulse

propagation in coupled lines are a combination of the properties of directional power dividing and simultaneously directed filtering the harmonic components of the signal through three ports.

#### 6. Conclusion

Thus, we have shown the possibility for propagation of picosecond ranged ultra-wideband pulses without significant energy loss for reflection from the input in the segments of coupled strip lines with a phase velocity ratio of in-phase and anti-phase waves of 3:1. It was found experimentally and as a result of the analysis that in this case, the spectral components of the pulse are separated between the ports. It is concluded that the interference of in-phase and anti-phase waves occurs along the length of the coupled lines with different delays of the propagating modes. The result is a combination of directional division characteristic and frequency selection (filtering), which can be used to generate complex pulse signals with spectral components at ports with equal amplitudes and orthogonal or opposite in phase. The results obtained in this article complement the understanding of the short pulse splitting effect in modal filters based on coupled multiwire lines [13, 14].

#### Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Impuls Common Use Centre, project No. 075-15-2019-1644 dated 08.11.2019. ID RFMEFI62119X0029.

#### References

- Jones E M T and Bolljahn J T 1956 Coupled strip transmission linefilters and directional couplers IRE Trans Microw Theory Tech. MTT-4 78-81
- [2] Shigenori Hayashi 1955 Surges on Transmission Systems (Kyoto, Japan: Denki-shoin, Inc.)
- [3] Vlostovskiy É 1967 Theory of coupled transmission lines Telecommun and Radio Engrg 21 87-93
- Zysman G I and Johnson A K 1969 Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 17(10) 753-9
- [5] Allen J L 1975 Non-symmetrical coupled lines in an inhomogeneous dielectric medium International Journal of Electronics 38(3) 337-47
- Tripathi V K 1975 Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium IEEE Trans. Microwave Theory Tech 23(9) 734-9
- [7] Malyutin N D Matrix parameters of non-identical coupled striplines with a non-homogeneous dielectric Radio Eng. Electron Phys. 21(12) 14-9
- [8] Vorob'ev P A Malyutin N D Analysis of the Characteristics of Coupled Strip Lines Using a Nonuniform Dielectric with Concentrated Controlled Discontinuities University Proceedings Radioelektronika 18(2) 97-9
- Cohn S B and Levy R 1984 History of microwave passive components with particular attention to directional couplers IEEE Trans. Microwave Theory and Technique 32(9) 1046-54
- [10] Matthaei G, Young L and Jones E M T 1985 Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures (Norwood, MA: Artech House)
- [11] Belyaev B Å, Tyurnev V V, Voloshin A S and Galeev R G 2018 A Microwave Bandpass Filter on Dielectric Layers with Metal Grids *Technical Physics Letters* 201844(5) 408-11 DOI: 10.1134/S1063785018050152
- [12] Belyaev B A, Serzhantov A M, Leksikov A A, Bal'va Y F and Leksikov A A 2015 Novel High-Quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter IEEE Microwave and Wireless Components Letters 25(9)7159088 579-81 DOI: 10.1109/LMWC.2015.2451363
- [13] Belousov A O and Gazizov T R 2018 Simulation of the time response in multiconductor microstrip modal filters with separate accounting for losses in conductors and dielectrics

g

### ПРИЛОЖЕНИЕ Р

## Копии интернет - сообщений о работе ЦКП «Импульс»

Новости Сибирской науки ГПНТБ СО РАН (<u>http://www.sib-science.info/ru/heis/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-</u>02072020)

07/07/2020



## Принтер для 3D-печати интегральных схем создадут в Томске

3 451

ТУСУР Томск Инновации

Инновационное предприятие Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) НПК "Аддитив" и лаборатория печатной электроники вуза разрабатывают принтер и технологию 3Dпечати элементов СВЧ-электроники по цифровой модели. Об этом сообщили 2 июля в пресс-службе ТУСУР.

В настоящее время печатные технологии только начинают внедряться в практику производства СВЧ-устройств. Пока для изготовления толстопленочных интегральных схем чаще всего используется трафаретная технология. Через шаблон на поверхность пластины наносится слой специальной пасты, после чего происходит запекание в печи. Для получения конечного устройства применяется, как правило, не один шаблон, операция совмещения, нанесения и запекания выполняется несколько раз. Если на этапе проектирования разработчиком в изделии допущены какие-то ошибки, то шаблоны приходится корректировать. А это существенные временные и материальные затраты.

Оперативное изготовление печатных узлов по толстопленочной технологии - очень востребованная услуга в самых разных высокотехнологичных областях. Разрабатываемая установка позволит изготавливать схемы по бесшаблонной технологии, выполняя печать непосредственно по цифровой модели. Для изготовления схемы достаточно будет загрузить файл с топологией в управляющую программу. После чего принтер, перемещая печатающий элемент по заданной траектории, нанесет функциональный рисунок на поверхность подложки.

"Использование цифровой печати позволяет наносить несколько материалов последовательно, подобно тому, как это сейчас выполняется в полиграфии. В случае обнаружения ошибки, исправить ее на порядок легче, чем в случае с трафаретной печатью, что существенно сокращает затраты на прототипирование. Проектировщику достаточно внести изменения в программе, и тут же приступить к изготовлению", - приводит пресс-служба слова руководителя НПК "Аддитив" **Сергея Артищева**, доцента кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУРа.

Проект реализуется с использованием уникального оборудования Центра коллективного пользования "Импульс", созданного на базе ТУСУРа. Здесь прорабатывается основная часть работ, связанных с изготовлением мелкодисперсных порошков и паст функциональных материалов, адаптированных для предложенного способа нанесения, созданием и отладкой функциональных элементов разрабатываемого оборудования, оптимизацией характеристик напечатанных функциональных СВЧ-узлов.

Работа получила финансовую поддержку в рамках программы "Старт - Цифровые технологии" Фонда содействия инновациям.

Томская интернет газета (<u>https://gt-tomsk.ru/news/centr-kollektivnogo-polzovaniya-tusura-pristupaet-k-vypolneniyu-zakazov-na-obnovlennom-oborudovanii/</u>)

## ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ТУСУРА ПРИСТУПАЕТ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАКАЗОВ НА ОБНОВЛЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

26.10.2020 Текст: Дмитрий Шиптенко

В прошлом году подразделение выполнило работы по 17 договорам с внешними пользователями.

Компании:





Фото: сайт ТУСУРа

Как сообщает пресс-служба вуза, в 2020 году в рамках проекта «Поддержка и развитие центра коллективного пользования «Импульс» структурное подразделение **ТУСУРа** провело значительное обновление приборной базы. ЦКП закупил и освоил новое технологическое и измерительное оборудование, позволяющее центру выполнять работы на мировом уровне.

В частности, приборная база пополнилась комплексом оборудования для сектора развития аддитивных технологий. Он позволяет выполнять технологические операции получения нанопорошков, их сортировки и измерения размеров частиц для приготовления «чернил» и добавки в состав композитов, а затем осуществлять изготовление по технологии 3Dконструктивных элементов любой сложности.

Фонд содействия инновациям (<u>http://fasie.ru/press/fund/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-v-tomske/</u>)

## ПРИНТЕР ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СОЗДАДУТ В ТОМСКЕ

Инновационное предприятие Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) НПК "Аддитив" и лаборатория печатной электроники вуза разрабатывают принтер и технологию 3D-печати элементов СВЧэлектроники по цифровой модели. Работа получила финансовую поддержку в рамках конкурса "Старт - Цифровые технологии" Фонда содействия инновациям.

В настоящее время печатные технологии только начинают внедряться в практику производства СВЧ-устройств. Пока для изготовления толстопленочных интегральных схем чаще всего используется трафаретная технология. Через шаблон на поверхность пластины наносится слой специальной пасты, после чего происходит запекание в печи. Для получения конечного устройства применяется, как правило, не один шаблон, операция совмещения, нанесения и запекания выполняется несколько раз. Если на этапе проектирования разработчиком в изделии допущены какие-то ошибки, то шаблоны приходится корректировать. А это существенные временные и материальные затраты.



Оперативное изготовление печатных узлов по толстопленочной технологии - очень востребованная услуга в самых разных высокотехнологичных областях. Разрабатываемая установка позволит изготавливать схемы по бесшаблонной технологии, выполняя печать непосредственно по цифровой модели. Для изготовления схемы достаточно будет загрузить файл с топологией в управляющую программу. После чего принтер, перемещая печатающий элемент по заданной траектории, нанесет функциональный рисунок на поверхность подложки.

## Ссылки на статью Scopus, с указанием уникального идентификатора соглашения RFMEFI62119X0029

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 919, Issue 5, 25 September 2020, Номер статьи 052017 1st International Conference on Advances in Material Science and Technology, CAMSTech 2020; Krasnoyarsk Science and Technology City HallKrasnoyarsk; Russian Federation; 31 July 2020 до ; Код 163700

An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines (Сопference Рарег) (Открытый доступ)

Malyutin, N.D. 🖾, Trenkal, E.I., Sychev, A.N. 🙁

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

#### Краткое описание

Просмотр пристатейных ссылок (16)

The propagation of short picosecond pulses in coupled strip lines with a phase velocity ratio of odd and even modes of 3:1 is considered. The feature of the separation of the input pulse between the three output ports without significant loss of energy due to reflection from the input in transdirectional couplers based on coupled strip lines is experimentally shown. As a result of the analysis, it was found that the spectral components of the pulse are separating between the ports of the transdirectional coupler. © Published under licence by IOP Publishing Ltd.

Актуальность темы SciVal 💿			
Тема: Ultrashort Pulses   Meanders   Microstrip Lines			
Процентиль актуальности: 69.760 💶 🕕			
Сведения о финансировании			
Финансирующий спонсор	Номер финансирования	Акроним	
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation	FEWM-2020-0039		
Текст о финансировании			

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project No. 075-15-2019-1644 of 11/08/2019, ID RFMEFI62119X0029.

ISSN: 17578981 Тип источника: Conference Proceeding Язык оригинала: English DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052017 Тип документа: Conference Paper Редакторы тома: Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Testoyedov N.A.,Testoyedov N.A.,Voroshilova A.A.

#### IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Volume 919, Issue 5, 25 September 2020, Номер статьи 052018 1st International Conference on Advances in Material Science and Technology, CAMSTech 2020; Krasnoyarsk Science and Technology City HallKrasnoyarsk; Russian Federation; 31 July 2020 до ; Код 163700

#### The antenna system with signal polarization separation (Conference Paper) (Открытый доступ)

Konovalenko, M.O.<sup>a,b</sup> 🖾, Sokolov, V.V.<sup>b</sup>, Trenkal, E.I.<sup>a</sup>, Malyutin, N.D.<sup>a</sup> 🙎

<sup>a</sup>Tomsk State University of Control System and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russian Federation <sup>b</sup>Micran JSC, Tomsk, Russian Federation

#### Краткое описание

~ Просмотр пристатейных ссылок (7)

The results of the study of the electrical characteristics of the waveguide-coaxial structure of the polarization separator (orthoplexer) loaded by the waveguide irradiator under the influence of harmonic radiation in the frequency band and pulse signal are presented. The antenna system is designed to study partially-non-reciprocal backscattering of electromagnetic waves. © Published under licence by IOP Publishing Ltd.

#### Актуальность темы SciVal 🕦

Тема: Reflector Antennas | Subreflectors | Physical Optics

Процентиль актуальности: 57.883 \_\_\_\_\_ 🛈

#### Сведения о финансировании

Финансирующий спонсор	Номер финансирования	Акроним
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation	FEWM-2020-0039	

#### Текст о финансировании

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Center of collective using of equipment "Impulse", project No. 075-15-2019-1644 of 11/08/2019, ID RFMEFI62119X0029.

ISSN: 17578981 Тип источника: Conference Proceeding Язык оригинала: English DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052018 Тип документа: Conference Paper Редакторы тома: Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Kovalev I.V.,Testoyedov N.A.,Testoyedov N.A.,Voroshilova A.A. Издатель: IOP Publishing Ltd

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 919, Issue 2, 25 September 2020, Номер статьи 022057 1st International Conference on Advances in Material Science and Technology, CAMSTech 2020; Krasnoyarsk Science and Technology City HallKrasnoyarsk; Russian Federation; 31 July 2020 до ; Код 163700

## High-resolution lightweight dual-frequency aircraft synthesized aperture radar for remote-sensing of the Earth: Implementation experience and development prospects (Conference Paper) (Открытый доступ)

Rovkin, M.E.<sup>a</sup> 🔯 Samuleev, M.S.<sup>a</sup>, Malyutin, N.D.<sup>a</sup>, Ermakov, R.V.<sup>b</sup>, Djakov, I.V.<sup>b</sup>, Dostovalov, M.Y.<sup>b</sup> 0 <sup>a</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>b</sup>Research Institute of Precision Instruments, 51 Dekabristov St., Moscow, 127490, Russian Federation

#### Краткое описание

Просмотр пристатейных ссылок (13)

A prototype of a dual-frequency aviation synthetic aperture radar station for remote sensing of the Earth, suitable for use on light-engine and unmanned aerial vehicles, is described. The system's concept, main technical solutions, and results achieved in the creation of onboard equipment are considered. The results of flight tests of the SAR prototype carried out in 2019 are presented. The characteristics of the radar survey are described. Possible ways of further development of the system are discussed. © Published under licence by IOP Publishing Ltd.

Актуальность темы SciVal 🕦

Тема: Remote Sensing | Synthetic Aperture Radar | Airborne

Процентиль актуальности: 17.672

#### Сведения о финансировании

Финансирующий спонсор	Номер финансирования	Акроним
Ministry of Education and Science of the Russian Federation	FEWM-2020-0039	Minobrnauka

#### Текст о финансировании

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Project No. FEWM-2020-0039 dated 01.03.2020. The measurements were carried out on the equipment of the Impulse Center for Collective Use, Project No. 075-15-2019-1644 of 08.11.2019, ID RFMEFI62119X0029.

ISSN: 17578981 Тип источника: Conference Proceeding Язык оригинала: English

DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022057 Тип документа: Conference Paper Редакторы тома: Kovalev I.V., Kovalev I.V., Kovalev I.V., Kovalev I.V., Testoyedov N.A., Testoyedov N.A., Voroshilova A.A. Издатель: IOP Publishing Ltd

## ПРИЛОЖЕНИЕ С

Методика измерения вязкости



# Методика измерения вязкости растворов (чернил)

Разработал Туев В.И. «3E 2020 г.

Томск 2020

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ

## 1 Меры предосторожности

1. Во избежание разлива жидкости снимайте емкость для слива с прибора перед тем, как переворачивать его.

2. После установки полной пипетки на прибор ни в коем случае не пытайтесь ввести ее содержимое вручную, так как это может привести к необратимой поломке датчика.

3. Образцы не должны содержать частиц размером более 5% от толщины канала датчика (см. Меню System Information, в котором приведена толщина канала).

4. Для зарядки прибора используйте только зарядное устройство, входящее в комплект поставки.

5. В прибое Rheosense microVISC можно использовать только пипетки, поставляемые с прибором (заявленная точность измерения гарантируется только в случае использования новой пипетки для каждого измерения).

6. Старайтесь не проливать жидкость на поршень или на место установки датчика.

7. После анализа жидкостей, из которых при испарении может выделиться осадок, всегда сразу проводите очистку датчика подходящим чистящим средством.

8. Для очистки избытка образца с кончика пипетки перед ее установкой в прибор, используйте только безворсовые салфетки (доступны через Rheosense).

9. Для очистки входа датчика (чипа) используйте только безворсовые свабы (доступны через Rheosense).

10. Всегда закрывайте вход датчика резиновой пробкой в те моменты, когда датчик не используется, а пипетка снята с прибора.

11. На случай возникновения необходимости транспортировки прибора сохраняйте его оригинальную упаковку.

12. Не пытайтесь вскрыть датчик (чип). Данные действия повлияют на его калибровку, приведут к аннулированию гарантии и могут привести к его необратимому повреждению.

13. Сервисные операции должны выполняться квалифицированным персоналом компании Rheosense.

Сервис необходим при ненадлежащей работе вискозиметра, его повреждениях, включая, но, не ограничиваясь, разливы жидкости внутри прибора, попадание под дождь, конденсацию влаги внутри прибора, а также падение прибора с достаточной высоты.

## 2 Конструкция прибора

На рисунке 1.1 представлен общий вид прибора: а) датчик (чип), пипетка, зажим пипетки, рычаг снятия пипетки, трубка слива образца, жкэкран, клавиатура и разъем подключения питания; б) толкатель, желоб толкателя, ёмкость для слива, крышка отсека датчика, кнопка режима ожидания, вход usb и выключатель электропитания.





Рисунок 1.1 – Общий вид прибора





Рисунок 1.2 – Клавиатура прибора

На рисунке 1.2 обозначения кнопок клавиатуры приведены следующим образом:

a) **Ожидание:** Переводит прибор в спящий режим и выводит из него, при условии, что включено электропитание прибора.

**RUN/STOP:** Запуск измерения с экрана готовности (Ready) или экрана результатов (Results), а также остановка измерения в любой момент его проведения.

Данная кнопка также останавливает толкатель при его возвращении на исходную позицию, за исключением его движения после включения электропитания прибора.

б) MENU/Return: Выбор меню или переход на предыдущее.

Стрелки навигации: обеспечивают просмотр многострочных данных и навигацию по функциям меню.

Кнопки ввода данных: используются для ввода численных значений параметров или буквенно-цифровых меток данных.

Кнопка ENTER: подтверждает введенные значения.

Кнопка HOME: отправляет толкатель на исходную позицию с экранов готовности (Ready) или результатов (Results), позволяя снять или вставить

пипетку.

Снятие или замена датчика (чипа) и снятие емкости для слива можно увидеть на рисунке 1.3 следующим образом:

а) Нажмите и потяните вверх крышку датчика как показано.

б) Возьмите датчик за верхнюю часть и выньте его.

в) Возьмите датчик за верхнюю часть и выньте его.

г) Возьмите контейнер за выступающую часть и потяните на себя. Старайтесь при этом не пролить его содержимое.



a)



б)



Рисунок 1.3 – Снятие или замена датчика и емкости для слива

## 3 Быстрый запуск

Для быстрого старта необходимо (см. рис. 1.4):

1. Включите прибор, нажав на выключатель, расположенный на боковой панели прибора (рис 1.4 а).





B)



г)

Рисунок 1.4 – Быстрый запуск прибора

2. Поместите образец в пипетку, погрузив ее кончик в образец. Одной рукой держите пипетку за прямоугольную часть, а другой не спеша вытягивайте поршень пипетки (рис. 1.4 б).

3. Установите пипетку в прибор так, чтобы ее кончик совместился с входом датчика. Плотно прижмите прямоугольную часть пипетки, чтобы раздался щелчок как показано на рис. 1.4 в.

4. Нажмите кнопку RUN/STOP на клавиатуре, чтобы начать измерение (рис.1.4 г).

## 4 Установка пипетки

4.1 Общие соображения:

• При обращении с пипеткой всегда держите ее за прямоугольную часть. Это минимизирует передачу тепла образцу. Не держите заполненную пипетку за поршень, поскольку это может привести к разливу образца или всасыванию пузырька воздуха.

• После заполнения пипетки с помощью безворсовой салфетки удалите избыток образца с внешней поверхности пипетки. Это предохранит образец и, следовательно, датчик от попадания частиц и ворса.

• Не переполняйте пипетку, так как она может просто не поместиться в прибор microVISC.

4.2 Минимизация образования пузырей

Одноразовые пипетки вискозиметра microVISC обладают конструкцией с минимальным мертвым объемом, однако маленькие пузырьки (объемом около 1-1.5 мкл) всегда попадают в сухую пипетку при отборе образца. Попадание пузырька в датчик может привести к неверным значениям. Перед установкой пипетки вискозиметр необходимо убедиться в отсутствии пузырьков. Для удаления небольших пузырьков можно использовать одну из двух следующих методик А и Б.

А. Данная методика может применяться для образцов с любыми значениями вязкости.

1. Погрузите кончик пипетки в образец и отберите небольшое количество жидкости в пипетку. Отберите столько жидкости, сколько нужно для начала формирования пузырька.

2. Полностью слейте жидкость из пипетки в слив.

3. Опять вставьте кончик пипетки в образец и медленно отберите нужный объем.

Б. Данная методика работает только с низковязкими образцами.

1. Вставьте кончик пипетки в образец и отберите необходимое количество жидкости в пипетку.

2. Удерживайте кончиком вверх. Постучите по боковой части пипетки так, чтобы пузырек всплыл к кончику.

3. Немного надавите на поршень, чтобы пузырек вышел из кончика пипетки.

## 5 Режимы работы

## 5.1 Общие данные

В вискозиметре microVISC предусмотрены три режима работы: Автоматический (Auto), Расширенный (Advanced) и Очистка (Cleaning). В Автоматическом режиме измерение проводится путем нажатия "одной кнопки" и система устанавливает большинство параметров самостоятельно. Для ньютоновских жидкостей (жидкости, вязкость которых не меняется при изменении скорости сдвига) автоматический режим позволяет получить точные и воспроизводимые значения. В расширенном режиме пользователь может задавать все параметры измерения самостоятельно. Данный режим имеет определенные преимущества при необходимости установки конкретной скорости сдвига или скорости потока, или, если для каждого эксперимента необходим, определенный объем жидкости. Режим Очистки позволяет оптимизировать промывку датчика с определенной скоростью потока растворителя.

С экрана готовности Ready на рисунке 1.5 можно перемещаться между тремя режимами с помощью стрелок навигации (вниз и вверх). На любом из экранов можно нажать кнопку RUN/STOP, чтобы запустить измерение в текущем режиме. Экран главного меню Main Menu также доступен с любого из этих экранов путем нажатия кнопки MENU.

LOAD SAMPLE & IIII PRESS RUN 23.00°C Auto mode Menu,↑↓: Change mode	
LOAD SAMPLE & PRESS RUN 23.00°C Advanced 100.0 s <sup>-1</sup> Menu,↑↓: Change mode	
LOAD SAMPLE & PRESS RUN 23.00°C Cleaning mode Menu, ++: Change mode	

Рисунок 1.5 – Экран готовности Ready

5.2 Автоматический режим (Auto)

На рисунке 1.6 приведены изображения, которые появляются на экране вискозиметра microVISC во время проведения автоматического измерения.

RheoSense uVISC vX.X	
RheoSense uVISC vX.X	
mm/dd/yy hh:mm:ss	
23.00 °C 400.0[ul]	
LOAD SAMPLE & III PRESS RUN 23.00°C Auto mode	
Menu,↑↓: Change mode	
STARTING MEASUREMENT	
PAUSING FOR RELAXATION	
TIME [s] : 1	

Рисунок 1.6 – Изображения экрана во время проведения автоматического из-

мерения

1. Прибор инициализируется во время первого включения. После завершения инициализации появляется второй экран.

2. После появления третьего экрана можно приготовить пипетку с образцом и поместить ее в прибор.

3. Четвертый экран появляется после нажатия кнопки RUN/STOP.

4. Во время появления пятого экрана толкатель начинает перемещаться к поршню (рисунок 1.8).

STARTING MEASUREMENT BASELINE MEAS	
STARTING MEASUREMENT MOVING TO PLUNGER VOL [ul] : 400.0	
STARTING MEASUREMENT PLUNGER DETECTED PAUSING FOR RELAXATION TIME [s] : 1	
PRIMING 23.00 °C 5.5 s <sup>-1</sup> 0.1 ul 1 sec P: 23.0 (0.5%)	
STARTING MEASUREMENT PAUSING FOR RELAXATION	
TIME [s] : 1	

Рисунок 1.8 – Изображения экрана во время проведения автоматического из-

## мерения

5. шестой экран появляется в момент начала заполнения датчика жидким образцом.

Начинается измерение вязкости, за прогрессом которого можно следить на экране (рисунок 1.9).

STARTING MEASUREMENT BASELINE MEAS		
VISC [mPa•s]: 2.13 23.00 °C 605.1 [ s <sup>-1</sup> 12.3 ul SCALE: 49	] 9.5% 39%	
VISC [mPa•s]: 2.12 23.00 °C 604.7 [ s <sup>-1</sup> 70.4 ul SCALE: 50 Run, Menu, Home:_	] ).8% 1/3	
S-STRESS [Pa] : 128.64 F-RATE [ ul/m ] : 201.3 SLOPE [Pa / mm] : 30.4 Run, Menu, Home:_	2/3	
S/N : 10RC10100094 01/13/11 12:51:43 M-TIME [s] : 8 Run, Menu, Home:_	3/3	

Рисунок 1.9 – Экран вискозиметра microVISC во время проведения автоматического измерения

 После проведения измерения на экране появляются его результаты.

## 6 Очистка

В общем случае образцы можно измерять последовательно, не очищая канал датчика между образцами. Однако, очистка канала необходима, если:

• Вискозиметр microVISC не использовался дольше, чем один день.

• Датчик снимался с прибора и хранился более, чем один день.

• Датчик снимается с прибора на час или дольше после использования для анализа образцов, содержащих нелетучие компоненты и летучий растворитель, например, образцов чернил.

• Текущий образец не смешивается с предыдущим (например, измерение водных растворов после калибровки по масляным стандартам).

 Существует неуверенность по поводу необходимости очистки!
Очистка проводится легко и просто, и она защищает прибор от возможных повреждений.

Для очистки канала датчика необходимо заполнить пипетку растворителем, который смешивается с используемым образцом (если смешать растворитель и образец, то не будет образовываться мутный негомогенный раствор). Установите пипетку в microVISC.

С экрана готовности Ready с помощью стрелок Вверх и Вниз перейдите к экрану готовности Ready режима очистки (Cleaning). Нажмите кнопку RUN/STOP, чтобы начать процедуру очистки. В ходе данной процедуры прибор прокачает через канал чипа все содержимое пипетки со скоростью 100 мкл/мин. Таким образом, для полной пипетки цикл очистки будет длиться около четырех минут. В конце цикла очистки появятся три стандартных экрана результатов Results. В зависимости от используемого датчика процентное значение от шкалы (SCALE) может быть очень низким. Это происходит, поскольку наиболее эффективная очистка достигается при достаточно низкой скорости прокачки через микрофлюидный канал, что и ведет к низким значениям давления в процентах от шкалы. Из-за менее точного определения давления полученная в ходе очистки вязкость моющей жидкости может быть не совсем точной.

Если после очистки не планируется проводить измерения, то оставьте пустую пипетку в вискозиметре microVISC. При снятии датчика и помещении его на хранение плотно закройте входное отверстие канала резиновой пробкой

## 7 Рекомендации для достижения лучших результатов

• Учитывайте возможную разницу температуры образцов и вискозиметра microVISC. Если прибор и образцы хранились в разных местах перед измерением, то оставьте их вместе с включенным прибором на 20 или более минут перед проведением измерения. В некоторых случаях разница 1 °C по температуре может привести к ошибке свыше 5%.

• При измерении нескольких образцов с различной вязкостью начинайте с образцов с более низкой вязкостью, постепенно переходя к более высоковязким образцам. При этом каждый образец будет требовать меньше объема на промывку, что приведет к экономии времени и образцов.

• Если повторные измерения на одном образце показывают постепенное увеличение или снижение вязкости, то, скорее всего, промывочный объем недостаточен. Повторяйте измерения до стабилизации показаний, а затем запишите пропущенный объем для будущих измерений.

• Для снижения объема образцов при измерении образцов с разницей по вязкости более 50% можно запускать цикл очистки между каждым измерением. Это позволит сильно сократить объем, необходимый для промывки.

• Для критических измерений используйте необходимо пользоваться новой пипеткой.

## 8 Калибровка и обслуживание

Вискозиметр *microVISC* калибруется по прослеживаемым стандартам NIST. Калибровка прибора действительна в течение года с даты заказа. Каждый датчик приходит с собственным сертификатом, действительным в течение 6 месяцев с даты калибровки. Для повторной калибровки, пожалуйста, обратитесь в компанию Rheosense по электронной почте: service@rheosense.com.

Рекомендуется следующая карта регулярного обслуживания:

• Ежедневно: Протрите избыток образца со входа в датчик с помощью безворсовых салфеток, смоченных в чистящем средстве. Погрузите безворсовый сваб в чистящее средство и протрите внутреннюю поверхность стенок

входа датчика. Используйте чистящее средство, совместимое с последними измеренными образцами. На стр. 53 приведен список рекомендованных чистящих средств. Проведите 1-2 цикла очистки с подходящим растворителем, при окончании работы на текущий день (при измерении вязкости чернил лучше провести 2-3 цикла). Выключите сетевой выключатель и оставьте пустую пипетку из-под растворителя в приборе *microVISC* до следующего использования. При снятии датчика обязательно плотно закройте его вход резиновой пробкой.

• Ежемесячно: Протрите сливное отверстие рядом с выходной трубкой датчика с помощью безворсовой салфетки, смоченной в подходящем растворителе.

• По мере необходимости: Слейте вещество из сливной емкости. Зарядите аккумуляторы с помощью адаптера, входящего в комплект поставки. Протрите клавиатуру и корпус мягкой тряпочкой, смоченной в водном растворе мягкого чистящего средства.

В таблице 1 собраны классы химических веществ, совместимых с вискозиметром *microVISC* для измерения или очистки. Смачиваемые поверхности прокачивания жидкости выполнены из полипропилена, высокоплотного полиэтилена, ПЭЭК, *PerlastTM*, боросиликатного стекла, кремния и золота. При использовании растворителей необходимо всегда работать в хорошо проветриваемой зоне или под тягой. Информация о химических веществах, не упомянутых в данной таблице, может быть получена при обращении в компанию *Rheosense*.

Таблица 1 – Классы химических веществ, совместимых с вискозиметром *microVISC* для измерения или очистки

Чистящее средство Aquet	Фенолы (избегайте контакта с
(1%) и вода	передней панелью)
Алифатические спирты	Амиды
Бензолы (ароматика)	Сложные эфиры
Простые эфиры	Углеводороды
Хлорированные углеводоро-	Кетоны
ДЫ	

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Т

Пример Соглашения с внутренним пользователем услуг ЦКП

СОГЛАШЕНИЕ № <u>07/12-12</u> «<u>12</u>»<u>gerape</u> 2019 г.

г. Томск

Лаборатория «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств», в лице заведующего Заболоцкого Александра Михайлович, именуемый Заказчик, с одной стороны, и руководителя ЦКП «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополостных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс») Малютина Николая Дмиририевича, именуемый Исполнителем, с другой стороны, совместно именуемые в дальнейшем «Стороны», заключили настоящее Соглашение о следующем:

#### 1. ПРЕДМЕТ СОГЛАШЕНИЯ

1.1. Исполнитель обязуется в установленный п. 1.2 настоящего Соглашения оказать услуги по измерению параметров рассеяния модальных фильтров в виде предоставления оборудования – векторного анализатора цепей N9952A.

1.2. Срок оказания услуг: с 15.12.2019 по 29.12.2019.

1.3. Услуги оказываются Исполнителем с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс») на условиях почасовой оплаты рабочего времени консультанта по эксплуатации прибора.

1.4. Исполнитель предоставляет в обеспечение измерений квалифицированное сопровождение, необходимое для проведения предусмотренных настоящим Соглашением Услуг.

#### 2. ПРАВА И ОБЯЗАННОСТИ СТОРОН

2.1. Заказчик обязуется при публикации результатов измерений сослаться на использование оборудования ЦКП «Импульс».

2.2. Заказчик и Исполнитель по окончании исследований оформляют протокол измерений.

2.2.1. Исполнитель обязуется оказать Заказчику услуги в полном объеме, в установленные сроки, с соблюдением всех условий настоящего Соглашения, а также обеспечить в ходе оказания Услуг мероприятия по охране труда, технике безопасности, пожарной безопасности.

### 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

3.1. Стороны обязуются обеспечить конфиденциальность использования и неразглашение третьим лицам информации, которая будет представлена Сторонами в ходе исполнения настоящего Договора, в том числе информации, составляющей коммерческую тайну, и использовать эту информацию только по назначению, предусмотренному условиями Соглашения.

3.2. Исполнитель гарантирует сохранение конфиденциальности относительно технической сути Услуг, в том числе результата Услуг, а также информации, полученной от Заказчика.

3.3. Заказчик не вправе публиковать информацию о результатах оказанных Услуг, а также использовать их в ходе выступлений на научных конференциях без ссылки на использование ресурса ЦКП «Импульс».

#### 4. ПРАВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

4.1. Исполнитель и Заказчик обязуются информировать друг друга о ранее созданных и принадлежащих им правах на объекты интеллектуальной собственности, используемых при оказании услуг по настоящему Соглашению.

4.2. Условия использования объектов интеллектуальной собственности при оказании услуг по настоящему Соглашению, устанавливаются отдельными договорами между Исполнителем и Заказчиком.

4.3. Права авторства на интеллектуальную собственность, созданную в результате реализации настоящего Соглашения, устанавливаются по взаимному согласию, правообладателем при этом выступает базовая организация ЦКП.

### 5. ПОРЯДОК РАЗРЕШЕНИЯ СПОРОВ

5.1. Все споры и разногласия, которые могут возникать из настоящего Соглашения или в связи с ним, будут по возможности решаться путем письменных претензий между Сторонами. Стороны устанавливают срок ответа на претензии 10 календарных дней с даты её получения.

#### 6. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТОРОН

6.1. Стороны несут ответственность в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и настоящим Соглашением.

#### 7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

7.1. Настоящее Соглашение вступает в силу с момента его подписания Сторонами и действует до полного исполнения Сторонами своих обязательств.

От Исполнителя

Руководитель ЦКП «Импульс»

От Заказчика Заведующий лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средетв»

<u>За</u>Малютин Н.Д.

Заболоцкий А.М.

## ПРИЛОЖЕНИЕ У

Измерение параметров радиофотонного тракта

## Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

ОТЧЁТ по исследованию радиофотонного тракта

Томск 2020
### 1 Измерения фазовых шумов (ФШ) СВЧ генератора

Проведем измерение собственных фазовых шумов измерительной системы СВЧ генератора и анализатора спектра. Схема измерений представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Схема измерения ФШ СВЧ генератора сигналов компании R&S SMB 100А и анализатора спектра компании Keysight E4448A

С генератора СВЧ сигналов на вход анализатора спектра через коаксиальный кабель подавался сигнал с частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью равной 0 дБм. Потери в тракте радиосигнала на частоте 15 ГГц составили 1,5 дБ. Результаты измерения фазовых шумов представлены на рис. 2.



Рисунок 2 – Результаты измерения ФШ СВЧ генератора с помощью анализатора спектра E4448A и программы Phase Noise при уровне мощности 0 дБм

Для сравнения приведем график собственных фазовых шумов анализатора спектра из справочного руководства (см. рис. 3).



Рисунок 3 – Собственные фазовые шумы анализатора спектра Е4448А

С генератора СВЧ сигналов на вход анализатора спектра через коаксиальный кабель подавался сигнал с частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью равной -30 дБм. Потери в тракте радиосигнала на 15 ГГц составили 1,6 дБ. Результаты измерения ФШ представлены на рис. 4.



Рисунок 4 — Результаты измерения ФШ СВЧ генератора R&S SMB 100A с помощью анализатора спектра E4448A и программы Phase Noise при уровне мощности -30 дБм

# 2 Измерения ФШ радиофотонного тракта с лазером A1915LMM с встроенным электро-абсорбционным модулятором

### 2.1 Схема №1 без оптического поляризатора

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 5. В качестве лазерного источника использовался DFB лазер с интегрированным электро-абсорбционным модулятором (ЭАМ) A1915LMM. Этот вид модуляторов подвержен меньшему влиянию дисперсии по сравнению с лазерами с прямой модуляций и позволяет обойтись без громоздких внешних модуляторов Маха-Цендера.



Рисунок 5 – Лазерный диод A1915LMM с интегрированным ЭАМ

Напряжение питания лазера – 1,3 В, ток потребления – 79 мА, потребляемая мощность около 100мВт. Напряжение смещения -1 В (ток потребления 27 мА) и модулирующий СВЧ сигнал с генератора SMB100A подавались на ВЧ вход лазера через втулку питания (ВП). Выходная мощность оптического сигнала при таких условиях составила 3 дБм. Для детектирования оптического сигнала применялся фотоднод Optilab PD-40 с полосой пропускания 40 ГГц.



Измерения ФШ проводились для СВЧ сигналов с частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью 0 дБм. Суммарные потери радиосигнала в радиофотонном тракте передачи составили от -29 дБ на частоте 100 МГц и до -34 дБ на частоте 15 ГГц.



Рисунок 7 – Измерения ФШ с помощью анализатора спектра E4448A и программы Phase Noise для схемы №1

#### 2.2 Схема №2 с применением оптического поляризатора

Условия работы лазерного источника аналогичные п. 2. Выходная мощность оптического сигнала составляла 3 дБм. Дополнительно в радиофотонный тракт передачи был добавлен оптический поляризатор для контроля поляризации оптического сигнала.



Рисунок 8 – Схема №2

С генератора СВЧ сигналов через коаксиальный кабель и втулку питания подавался СВЧ сигнал на лазер с частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностьк равной 0 дБм. Суммарные потери в тракте передачи радиосигнала составили от -3( дБ на частоте 100 МГц и до -35 дБ на частоте 15 ГГц. Так как в данной схемя добавился оптический поляризатор, то потери немного увеличились. Данные потери обусловлены дополнительными оптическими разъемами, которые использовалися для подключения оптического поляризатора. Результат измерения фазового шума представлен на рис. 8.



Рисунок 9 – Результат измерения ФШ для схемы №2

# 3 Измерения ФШ радиофотонного тракта с лазером A1915LMM и внешним модулятором Маха-Цендера

## 3.1 Схема №3 без оптического поляризатора

В данной схеме использовался тот же самый лазер A1915LMM, но модуляция осуществлялась при помощи внешнего модулятора Маха-Цендера. Напряжение питания лазера 1,3 В ток потребления 79 мА. Выходная мощность лазера при этом составила 7 дБм. Мощность подаваемая с СВЧ генератора составляла 0 дБм. Схема эксперимента представлена на рис. 9.



С генератора СВЧ сигналов через кабель подавался сигнал на модулятор Маха-Цендера частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью равной 0 дБм. Суммарные потери в тракте передачи радиосигнала составили -41 дБ на частоте 100 МГц и -44 дБ на частоте 10 ГГц.



Рисунок 11 – Результат измерения ФШ для схемы №3



Рисунок 12 –Измерения ФШ на частоте 100 МГц (Синяя кривая- Схема №1, розовая кривая – Схема №2, зеленая кривая – Схема №3)



Рисунок 13 – Измерения ФШ на частоте 1 ГГц (Синяя кривая- Схема №1, розовая кривая – Схема №2, зеленая кривая – Схема №3)



Рисунок 14 – Измерения ФШ на частоте 10 ГГц (Синяя кривая- Схема №1, розовая кривая – Схема №2, зеленая кривая – Схема №3)

#### 3.2 Схема №4 с применением оптического поляризатора



С генератора СВЧ сигналов через кабель подавался сигнал на модулятор Маха-Цендера частотой от 100 МГц до 15 ГГц мощностью равной 0 дБм. Суммарные потери тракта передачи радиосигнала составили от -39 дБ на частоте 100 МГц до -42,5 дБ на частоте 10 ГГц. Выходная мощность лазера без модуляции равна 7 дБм.



Рисунок 16 – Сравнение ФШ (синяя кривая – без поляризатора, зеленая кривая – поляризатор до модулятора Маха-Цендера, розовая кривая – поляризатор после модулятора Маха-Цендера)

В схеме №4 после модулятора Маха-Цендера подключается оптический поляризатор, так как данный вариант подключения позволяет снизить фазовый шум (рисунок 14).



Рисунок 17 – Измерения ФШ с помощью анализатора спектра E4448A и программы Phase Noise для схемы №4

### 3.3 Сравнение схем №3 и №4 и оценка влияния поляризатора

Сравним схемы №3 и №4, как влияет поляризация на измерения фазовых шумов, на частоте 100 МГц, 1ГГц и 10 ГГц.



Рисунок 18 – Измерения ФШ на частоте 100 МГц (Синяя кривая- Схема №3, розовая кривая – Схема №4)



Рисунок 19 – Измерения ФШ на частоте 1 ГГц (Синяя кривая- Схема №3, розо кривая – Схема №4)



Рисунок 20 – Измерения ФШ на частоте 10 ГГц (Синяя кривая- Схема №3, розовая кривая – Схема №4)

В таблицах 1-3 приведены измерения ФШ на основных частотах (100 МГц, 1

# ГГц, 10 ГГц).

	У	Уровень фазовых шумов на отстройке, дБн/Гц								
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц			
Схема №1	-62,6	-57,4	-68,7	-80,6	-100,8	-109,5	-113,8			
Схема №2	-71,7	-73	-79,4	-95,2	-108,3	-112,6	-112,1			
Схема №3	-59,9	-62,5	-65,1	-81,4	-94,8	-100,6	-99,8			
Схема №4	-67,4	-69,6	-74,9	-87,4	-101,3	-104,5	-102,6			
СВЧ генератор (0 дБм)	-92,5	-98,5	-110,8	-117,0	-116,3	-138,6	-138,6			
СВЧ генератор (-30 дБм)	-97,3	-99,8	-109,8	-109,9	-110,7	-112,6	-112,6			

Таблица 1 – Измерения ФШ на частоте 100 МГц

Таблица 2 – Измерения ФШ на частоте 1 ГГц

	У	Уровень фазовых шумов на отстройке, дБн/Гц								
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц			
Схема №1	-60	-62,4	-71,8	-81,4	-102,0	-107,7	-112,8			
Схема №2	-80,0	-80,6	-87,0	-100,8	-108,6	-111,9	-112,8			
Схема №3	-65,4	-63,9	-70,0	-88,4	-96,5	-99,2	-99,8			
Схема №4	-72,2	-71,1	-75,0	-89,0	-98,3	-103,3	-101,9			
СВЧ генератор (0 дБм)	-101,9	-99,8	-110,3	-116,8	-114,3	-136,3	-136,3			
СВЧ генератор (-30 дБм)	-100,1	-102,3	-108,7	-110,3	-109,8	-113,6	-112,2			

Таблица 3 – Измерения ФШ на частоте 10 ГГц

	У	Уровень фазовых шумов на отстройке, дБн/Гц								
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц			
Схема №1	-75,1	-73,5	-75,9	-84,9	-101,3	-104,5	-105,1			
Схема №2	-93,4	-92,2	-94,9	-96,1	-99,6	-102,3	-102,5			
Схема №3	-75,9	-74,8	-78,4	-90,7	-93,8	-93,4	-94,2			
Схема №4	-81,1	-81,9	-82,3	-88,8	-93,6	-95,5	-95,8			
СВЧ генератор (0 дБм)	-96,6	-99,4	-100,8	-104,9	-104,6	-122,4	-122,4			
СВЧ генератор (-30 дБм)	-98,8	-99,6	-100,5	-102,4	-103,2	-106,3	-105,5			

Из приведенных значений ФШ на частотах 100 МГц и 1 ГГц при отстройке 100 кГц наилучшие значения показала схема №2 (лазер A1915LM с модуляцией и поляризатор). Ухудшение ФШ по сравнению с СВЧ генератором составило 8 дБ на несущей 100 МГц; 4,3 дБ на несущей 1 ГГц; 5 дБ на 10 ГГц. На частоте несущей 10 ГГц влияние поляризации на отстройках более 100 кГц уже не так существенно, поэтому значение ФШ для схем №1 и №2 практически идентично.

Схемы №3 и №4, построенные на основе использования модулятора Маха-Цендера и внешнего лазера A1915LM, при заданной условиях обладают более худшими характеристиками с точки зрения ФШ.

# 4 Измерения ФШ радиофотонного тракта с лазерным источником N7714A

### 4.1 Схема №5

При реализации измерений ФШ в данной схеме использовался перестраиваемый оптический генератор Keysight N7714A. Генератор был настроен на длину волны λ = 1550,160 нм, выходная мощность оптического сигнала составляла 10 дБм (10 мВт).



Рисунок 22 - Настройка оптического генератора Keysight N7714A

С генератора СВЧ сигналов через кабель подавался сигнал на модулятор Маха-Цендера частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью равной 0 дБм. Суммарные потери тракта передачи радиосигнала составили от -41,4 дБ на частоте 100 МГц до -44 дБ на частоте 10 ГГц. Как видно из рис. 22 в спектре перестраиваемого лазерного источника N7714A наблюдаются паразитные возмущения, точную причину которых установить не удалось, может быть это связано с цепью питания лазерного генератора или системой контроля и стабилизации длины волны оптического сигнала.



Рисунок 23 – Измерения ФШ с помощью программы Phase Noise компании Keysight (оптический кабель и оптический модулятор) (f=100 МГц, P=0 dBm)

Таблица 4	<ul> <li>Измерения</li> </ul>	ΦШ	(методом 1	ручного	управления	анализатор	а спект	pa)

	Частота	100 Гц	1 кГц	10 кГц	101.1	1 МГц	5 МГц
	отстройки				кГц		
Измерения	Фазовый	-87,4	-81,5	-82,55	-101,52	-102,47	-102,26
E4448A	шум,						
	dB/Hz						

На рисунках 21-24 представлены фотографии измерений ФШ для частоты, несущей 100 МГц.



Рисунок 24



Рисунок 25







Рисунок 27



Рисунок 28 – Измерения ФШ с помощью программы Phase Noise компании Keysight (оптический кабель и оптический модулятор) (f=10 ГГц, P=0 dBm)

	Частота	100 Гц	1 кГц	10 кГц	101.1	1 МГц	5 МГц
	отстройки				кГц		
Измерения	Фазовый	-60,57	-75,6	-79,18	-92,27	-92,79	-92,62
E4448A	шум,						
	dB/Hz						

Таблица 5 – Измерения ФШ (методом ручного управления анализатора спектра)

На рисунках 26 – 29 представлены фотографии измерений ФШ для частоты, несущей 10 ГГц.

Agilent 15:52:	2 Nov 19, 2019		L	Marker	
Norm	Atten 10 dB	Naise -	Nkr1 10.0 kHz 79.176 dB/Hz	Select Marker	-
18 dB/	System.	Alighments, Align Al	New, New ded	Normal	2
Delta 1 10.000 •Pitvs Noise	farker Freq 1008200 GHz -79.176 dB/Hz		Rot	Delta Delta Pair rather Reit A	
H S2 S3 FC FL C(1): () 58k			- Com	Span Par Center Off	= (
Start 9.999 900 -Res BH 1.6 kH Copyright 2004	8 GHz USN 1.6 ialz -2003 Apillort Tachnalogie	Stopp 10.000 1 Sincesp 94.2 mil ( F	ed a con Sal yes		- (-
Sep Start 9.599 508 •Ros BH 1.6 kH Copyright 2004	8 CHZ VEN 1.6 CHZ - 2009 Auflort Tachnalogie	Stop 14,000 14 Second 94.2 mil 0	88 8 (m) 501 pm		- (0

Рисунок 29



Рисунок 30







Рисунок 32



Рисунок 33 – Измерения ФШ с помощью программы Phase Noise компании Keysight (оптический кабель и оптический модулятор) (f=15 ГГц, P=0 dBm)

	Частота	100 Гц	1 кГц	10 кГц	101.1	1 МГц	5 МГц
	отстройки				кГц		
Измерения	Фазовый	-62,5	-76,8	-76,66	-88,79	-89,47	-89,36
E4448A	шум,						
	dB/Hz						

Таблица 6 – Измерения ФШ (методом ручного управления анализатора спектра)

На рисунках 31 – 34 представлены фотографии измерений ФШ для частоты, несущей 15 ГГц.





Рисунок 34



Рисунок 36

Ref -25.5 dBn •Norm Log	Atten 10 dB	4 Mkr1 99 Hz Naise -62.581 dB/Hz	Select Marker
18 dB/	System,	Alignments, Align All Now, Needed	Normal
Delta M 14.999 •PAvg Noise 100 H1 \$2 \$3 FC 9L ECD: +CS0k FFT Center 14.999	Marker Freq 997312 GHz -62.581 dB/Hz	Span 1.812 kHz	Delta Delta Pair (Tracking Ref) f Span Pair an <u>Center</u> Off More
Copyright 208	VBM 18 Hz 9-2009 Agilent Tachnelog	SHeep 201.2 ms (601 pts)	1 07 2

Рисунок 37

# 5 Измерения ФШ радиофотонного тракта с применением интерального оптического приемника IOR на базе SiGe EPIC процесса

#### 5.1 Схема №6 с использованием внешенго модулятора Маха-Цендера

В данной схеме использовался лазерный источник Keysight N7714A для генерации сигнала. Для приема и оптоэлектронного преобразования была использована разработанная в ТУСУРе интегральная микросхема оптического приемника (IOR). Оптический генератор был настроен на длину волны λ = 1550,160 нм и выходную мощность 30 мВт (~15 дБм). Мощность оптического сигнала была повышена для увеличения чувствительности ИС приемника.



Рисунок 38 – Схема № 6

На рисунке 38 представлена фотография аналогового интегрального оптического приёмника (IOR) в корпусе. Данная микросхема была разработана коллективом НИИ МЭС и изготовлена на основе зарубежной 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии. Оптический приемник состоит из интегрального Ge фотодиода и трансимпедансного усилителя с дифференциальным выходом, цепь подачи питания интегрирована на чип. Полоса пропускания бескорпусного варианта DC-22 ГГц, усиление порядка 20 дБ, потребление 170 мВт. В эксперименте использовался корпусированный вариант, который сейчас находится на стадии сборки (ожидается поклейка оптоволокна) и исследования. Ожидаемая полоса корпусированного варианта 18-20 ГГц.



Рисунок 39 – Интегральный оптический приемник: a) в металлокерамическом корпусе; б) фотография оптического приемника с подведенным оптоволокном

Подача оптического сигнала на фотодиод осуществляется через дифракционную Брэгговскую решетку и кремниевый оптический волновод. Коэффициент передачи оптического сигнала на чип составляет максимум -3 дБ и зависит от длины волны, угла подачи сигнала (порядка 13-14 градусов) и поляризации. На рис. 386 изображена фотография разработанного оптического приемника (размеры 1.46×0.85 мм<sup>2</sup>) с подведенным оптоволокном.

С генератора СВЧ сигналов через кабель подавался сигнал на модулятор Маха-Цендера частотой от 5 ГГц до 20 ГГц и мощностью равной 0 дБм. Суммарные потери тракта передачи радиосигнала составили от -19 дБ на частоте 5 ГГц до -28 дБ на частоте 20 ГГц. Таким образом, потери радиофотонного тракта были снижены до -18...-19 дБ на частотах ниже 5 ГГц.



Рисунок 40 – Результаты измерения ФШ для схемы №6

Имеющиеся проблемы с оптическим генератором N7714A не позволили в полной мере оценить характеристики предложенного тракта. Но отметим тот факт, что разработанная ИС приёмника позволила снизить потери тракта на 18-20 дБ, за счет усиления демодулированного электрического сигнала.

## 5.2 Схема №7 с использованием лазерного источника A1915LM с электроабсорбционным модулятором

В данном варианте также использовалась разработанная микросхема итегрального оптического приемника, но в качестве источника оптического сигнала применялся лазерный диод A1915LM с ЭАМ. Напряжение питания лазера 1,3 В, ток потребления 79 мА. Через втулку питания подается напряжение смещения 1 В (ток потребления 27 мА) и модулирующий СВЧ сигнал с генератора SMB100A. Выходная мощность оптического сигнала при таких условиях равна 3 дБм.



С генератора СВЧ сигналов через коаксиальный кабель и втулку питания подавался сигнал на лазер с частотой от 100 МГц до 15 ГГц и мощностью равной 0 дБм. Суммарные потери тракта передачи радиосигнала составили от -20 дБ на частоте 100 МГц до -38 дБ на частоте 20 ГГц. На частоте 20 ГГц высокие потери обусловлены корпусированием, а также низкой мощностью оптического сигнала.



Рисунок 42 – Измерения ФШ с помощью анализатора спектра E4448A и программы Phase Noise для схемы №7

# 6 Сравнение результатов измерений

В таблицах 7-9 представлены результаты измерения ФШ для всех схем на частотах 100 МГц, 1ГГц, 10ГГц.

	У	Уровень фазовых шумов на отстройке, дБн/Гц								
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц			
Схема №1	-62,6	-57,4	-68,7	-80,6	-100,8	-109,5	-113,8			
Схема №2	-71,7	-73	-79,4	-95,2	-108,3	-112,6	-112,1			
Схема №3	-59,9	-62,5	-65,1	-81,4	-94,8	-100,6	-99,8			
Схема №4	-67,4	-69,6	-74,9	-87,4	-101,3	-104,5	-102,6			
Схема №5	-	-87,4	-81,5	-82,5	-101,5	-102,47	-102,3			
Схема №6	-	-	-	-	-	-	-			
Схема №7	-84,5	-72,7	-76,3	-98,9	-111,3	-115,0	-117,8			
СВЧ генератор (0 дБм)	-92,5	-98,5	-110,8	-117,0	-116,3	-138,6	-138,6			
СВЧ генератор (-30 дБм)	-97,3	-99,8	-109,8	-109,9	-110,7	-112,6	-112,6			

Таблица 7 – Измерения ФШ на частоте 100 МГц

Таблица 8 – Измерения ФШ на частоте 1 ГГц

	У	ровень фа	зовых шу	мов на от	стройке, д	,Бн/Гц	
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц
Схема №1	-60	-62,4	-71,8	-81,4	-102,0	-107,7	-112,8
Схема №2	-80,0	-80,6	-87,0	-100,8	-108,6	-111,9	-112,8
Схема №3	-65,4	-63,9	-70,0	-88,4	-96,5	-99,2	-99,8
Схема №4	-72,2	-71,1	-75,0	-89,0	-98,3	-103,3	-101,9
Схема №5	-	-87,4	-81,5	-82,5	-101,5	-102,47	-102,3
Схема №6	-77,8	-68,6	-71,5	-102,3	-111,5	-118,7	-119,4
( <mark>5ГГц</mark> )							
Схема №7	-71,7	-80,6	-77,8	-97,4	-111,5	-118,6	-119,3
СВЧ генератор	101.0	00.9	110.2	116.9	114.2	126.2	126.2
(0 дБм)	-101,9	-99,0	-110,5	-110,0	-114,5	-130,3	-130,3
СВЧ генератор	100.1	102.2	109.7	110.2	100.9	112.6	112.2
(-30 дБм)	-100,1	-102,5	-106,7	-110,5	-109,6	-115,0	-112,2

### Таблица 9 –Измерения ФШ на частоте 10 ГГц

	y	ровень фа	зовых шу	мов на от	стройке, д	њн/Гп	
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц
Схема №1	-75,1	-73,5	-75,9	-84,9	-101,3	-104,5	-105,1
Схема №2	-93,4	-92,2	-94,9	-96,1	-99,6	-102,3	-102,5
Схема №3	-75,9	-74,8	-78,4	-90,7	-93,8	-93,4	-94,2
Схема №4	-81,1	-81,9	-82,3	-88,8	-93,6	-95,5	-95,8
Схема №5	-	-88,2	-80,1	-80,1	-90,0	-90,0	-88,9
Схема №6( <mark>16</mark> ГГц)	-78,6	-77,4	-80,9	-101,5	-100,4	-108,9	-109,1
Схема №7	-84,7	-84,3	-86,2	-99,0	-103,8	-110,1	-108,9
СВЧ генератор (0 дБм)	-96,6	-99,4	-100,8	-104,9	-104,6	-122,4	-122,4

СВЧ генератор (-30 дБм) -98,8	-99,6	-100,5	-102,4	-103,2	-106,3	-105,5
----------------------------------	-------	--------	--------	--------	--------	--------

\*<u>Схема №1</u> – Состоит из лазера A1915LM, генератора SMB100A, втулки питания, оптического кабеля, PD-40 и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №2</u> – Состоит из лазера A1915LM, генератора SMB100A, втулки питания, поляризатора, оптического кабеля, PD-40 и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №3</u> – Состоит из лазера A1915LM, генератора SMB100A, оптического модулятора MZM FTM7937EZ оптического кабеля, PD-40 и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №4</u> – Состоит из лазера A1915LM, генератора SMB100A, оптического модулятора MZM FTM7937EZ, поляризатора, оптического кабеля, PD-40 и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №5</u> – Состоит из лазера N7714A, генератора SMB100A, оптического модулятора MZM FTM7937EZ, оптического кабеля, PD-40 и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №6</u> – Состоит из лазера N7714A, генератора SMB100A, оптического модулятора MZM FTM7937EZ, поляризатора, оптического кабеля, OIR и анализатора спектра E4448A

\*<u>Схема №7</u> – Состоит из лазера A1915LM, генератора SMB100A, втулки питания, поляризатора, оптического кабеля, OIR и анализатора спектра E4448A

### Выводы

- Наиболее лучший уровень ФШ достигается при использовании лазера A1915LMM с ЭАМ и интегрального оптического приемника (IOR) (схема №7). Для данной схемы вносимые ФШ на несущей 100 МГц при отстройке 100 кГц составляет 3 дБ, на несущей 1 ГГц – 3,2 дБ, на несущей 10 ГГц – порядка 1 дБ. Также стоит отметить, что суммарный коэффициент передачи радиофотонного тракта составил -20...-23 дБ на частотах до 15 ГГц, из-за наличия широкополосного усилителя в составе интегрального оптического приемника. Потребляемая мощность ИС оптического приемника составляет 170 мВт, лазерного источника – около 100 мВт.
- Измерения ФШ на несущей 10 ГГц при отстройке равной 10 Гц 1 кГц наилучшие показатели ФШ соответствуют схеме №2 (в среднем вносимые ФШ составили порядка 8-9 дБ), а на отстройках выше 10 кГц наилучшие показатели ФШ соответствуют схеме №7.
- 3) Способы улучшения абсолютного значения фазового шума: улучшение ФШ источника СВЧ сигнала, улучшение параметров ФШ лазера, а также его выходной мощности. Также стоит отметить, что используемый анализатор спектра E4448A не позволяет измерять значения ФШ лучше, чем -120 дБн/Гц на отстройке 100 кГц (см. рис. ниже).



Nominal Phase Noise at Common Cellular Communication Frequencies, £ (f) Optimized versus f

Рис. – ФШ анализатора Е4448А