ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (540)

2019

1(540).indd 1 05.03.2019 8:12:16

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(540) **2019** **Издается с 1950 г.**

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, ФГУП «МНИИРИП», г. Мытищи;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **С.П. Морев**, АО «НПП «Торий», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2019 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(540) **2019** **Founded in 1950**

Editor-in-chief

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, FSUE «MNIIRIP», Mytischi;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **S.P. Morev**, JSC «RPC «Torij», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.U. Uschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИ № ФС 77-73640 dated September 7, 2018).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Борисов А.А. – К 90-летию Сергея Ивановича Реброва..... 6

Технология и материаловедение

Пархоменко М.П., Калёнов Д.С., Ерёмин И.С., Федосеев Н.А., Колесникова В.М., Баринов Ю.Л. – Волноводный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах..... 20

Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М. Д., Волков С.А., Булаев И.Ю. – Создание электронных ВЧ-компонентов с применением аддитивной технологии..... 39

Электровакуумные приборы

Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В. – Циклотронное защитное устройство. Модель с заданной полосой пропускания..... 44

Асташов С.Г., Пугнин В.И., Мельников С.А., Арефьев А.С., Юнаков А.Н. – Разработка конструкции выходной системы мощного многолучевого клистрона..... 57

Твердотельная электроника

Максимов Н.А., Панас А.И. – Сверхширокополосный генератор шума на основе системы связанных осцилляторов..... 63

Рогачёв И.А., Мешков О.И., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Вакина Д.А., Лаврентьев Д.А., Курочка А.С., Максимов А.С., Белов Р.Г., Половинкина В.А. – Формирование омических контактов на селективно-выращенных сильнолегированных полупроводниковых слоях для создания мощного СВЧ-транзистора на гетероструктурах AlGaN/GaN..... 70

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Малинин В.С., Полников И.Г. – Изучение действия микроволнового излучения на поверхностные свойства липидных монослоев – моделей биологических мембран с помощью метода капиллярных волн..... 76

Краткие сообщения

Балыко И.А., Терешкин Е.В., Дерябкина С.М., Балыко А.К. – Элементы на связанных полосковых линиях передачи..... 84

История

Балыко А.К. – Вадим Федорович Коваленко..... 89

1(540).indd 4 05.03.2019 8:12:16

CONTENTS

Borisov A.A. – To the 90th anniversary of Serguei Ivanovich Rebrov..... 6

Technology and material science

Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S., Fedoseev N.A., Kolesnikova V.M., Barinov Yu.L. – Waveguide method for measuring the complex dielectric constant of materials in centimeter and millimeter ranges..... 20

Danilin N.S., Dimitrov D.M., Dimitrov M.D., Volkov S.A., Bulaev I.Yu. – Creating electronic RF-components using the additive technology..... 39

Electrovacuum devices

Kalina V.G., Budzinsky Yu.A., Bykovsky S.V. – Cyclotron protective device. Model with a given pass band..... 44

Astashov S.G., Pugnin V.I., Melnikov S.A., Arefyev A.S., Yunakov A.N. – The development of the output circuit design of a high power multibeam klystron..... 57

Solid-state electronics

Maksimov N.A., Panas A.I. – Ultra-wideband noise generator based on a system of coupled oscillators..... 63

Rogachev I.A., Meshkov O.I., Tsatsulnikov A.F., Lundin V.V., Vakina D.A., Lavrentyev D.A., Kurochka A.S., Maksimov A.S., Belov R.G., Polovinkina V.A. – Formation of ohmic contacts on selectively grown heavily doped semiconductor layers to create a powerful microwave transistor on AlGaN/GaN heterostructures..... 70

Medical electronics

Kazarinov K.D., Malinin V.S., Polnikov I.G. – Studying the microwave radiation effect on the surface properties of lipid monolayers – models of biological membranes using the capillary wave method..... 76

News in brief

Balyko I.A., Tereshkin E.V., Deryabkina S.M., Balyko A.K. – Elements on coupled-transmision strip lines..... 84

History

Balyko A.K. – Vadim Fyodorovich Kovalenko..... 89

1(540).indd 5 05.03.2019 8:12:16

УДК 621.38 (09)

К 90-ЛЕТИЮ СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА РЕБРОВА

А. А. Борисов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

TO THE 90th ANNIVERSARY OF SERGUEI IVANOVICH REBROV

A. A. Borisov

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

Ребров Сергей Иванович
(1929 – 2007)

Генеральный директор (1962 – 1988), генеральный конструктор НПО «Исток» (1985 – 2007). Специалист в области вакуумной и твердотельной СВЧ-электроники и систем радиоэлектронного вооружения. Герой Социалистического Труда (1989). Лауреат Ленинской (1980) и Государственной премий СССР (1968), премии Министерства оборонной промышленности Российской Федерации (1997). Награжден орденами: Ленина (трижды – 1966, 1976, 1989), Октябрьской Революции (1971), Почетной грамотой Президиума Верховного Совета РСФСР (1972). Д.т.н.(1974). Профессор. «Почетный радист СССР» (1977), «Почетный радист Российской Федерации» (1993). Депутат Верховного Совета СССР 8 созыва (1970). «Заслуженный деятель науки и техники РФ» (2004). Почетный гражданин города Фрязино.

Сергей Иванович Ребров родился 9 февраля 1929 года в городе Тверь в семье крупного советского и хозяйственного руководителя. В 1938 году отца Сергея Ивановича назначают заместителем Председателя Совета Министров Киргизской ССР и семья переезжает в город Фрунзе. Здесь Сергей Ребров с золотой медалью оканчивает среднюю школу и приезжает в Москву для продолжения учебы в Московском энергетическом институте.

Шел первый год после окончания Великой Отечественной войны, самый тяжелый, пожалуй, послевоенный год для всей страны. Страна в развалинах, карточная система… Студенты недоедали, но желание учиться спасало от всех невзгод и лишений. На третьем курсе учебы в МЭИ Сергей Ребров устраивается работать на кафедру «Электронные приборы СВЧ» к доценту Игорю Всеволодовичу Лебедеву, под руководством которого позднее пишет и с блеском защищает дипломный проект.

1(540).indd 6 05.03.2019 8:12:21

В 1952 году молодой инженер С. И. Ребров с красным дипломом об окончании МЭИ по распределению приезжает во Фрязино и поступает на работу в НИИ-160, в лабораторию Давида Яковлевича Ашкенази, где занимается разработкой и исследованием газоразрядных антенных СВЧ-переключателей для РЛС. Пытливый и трудолюбивый инженер сразу же проявляет незаурядные способности исследователя и руководителя.

Уже через год Сергея Ивановича назначают главным конструктором ОКР, еще через два года – начальником лаборатории, а после успешной защиты кандидатской диссертации в 1959 году – начальником отдела, насчитывающего без малого 300 сотрудников. К этому времени С. И. Ребров – уже сложившийся ученый, автор 10 авторских свидетельств на изобретения и более 20 научных работ и публикаций.

Молодого, но уже проявившего себя с самой лучшей стороны начальника отдела, разрабатывающего антенные разрядники для защиты СВЧ-приемников РЛС от проникновения мощных импульсов передатчика, директор предприятия М. М. Федоров часто берет с собой на важные совещания в министерство и на заседания Комиссий Президиума Совета Министров СССР, на которых Сергей Иванович выступает с докладами.

Все это, по существу, и определяет его дальнейшую карьеру.

Приказом председателя Государственного комитета по электронной технике СССР А. И. Шокина 1 января 1962 года С. И. Ребров назначается на должность директора предприятия п/я 17, ныне АО «НПП «Исток» им. Шокина». В то время ему еще не исполнилось и 33 лет. В «Экономической газете» появляется статья «Самый молодой директор отрасли». Это о Сергее Ивановиче Реброве, шестом директоре предприятия.

Не все удается молодому директору сразу, но он с головой погружается в проблемы вверенного ему коллектива. В сжатые сроки ознакомившись с обстановкой на предприятии, он принимает решение – в первую очередь провести реорганизацию опытного завода с целью создания надежной базы для масштабного выпуска разрабатываемых изделий СВЧ электронной техники.

Тесные комнатушки цехов реконструируются и превращаются в просторные светлые и чистые помещения в соответствии с требованиями вакуумной гигиены. Одновременно начинается внедрение на опытном заводе комплексной системы контроля качества производства изделий, заметно повышается технологическая дисциплина, снижается процент брака. Фундаментальная комплексная работа «Операция», проведенная под руководством С. И. Реброва с целью повышения качества выпускаемых приборов на всех этапах разработки и производства, привела к существенному улучшению показателей надежности. Так, количество отказов и рекламаций уменьшилось по некоторым изделиям в 10 раз, обеспечив безотказную эксплуатацию радиоэлектронных систем, в которые входили СВЧ-приборы, выпускаемые предприятием.

На основе результатов и выводов, полученных в ходе выполнения этой работы, в МЭП СССР были разработаны и внедрены на всех предприятиях министерства отраслевые нормативные документы по организации управления производством и обеспечению качества изделий электронной техники на всех этапах разработки и производства.

Только после окончания всего комплекса работ по повышению надежности выпускаемых изделий СВЧ-техники Сергей Иванович смог, наконец, в полной мере заняться проблемами научной части предприятия, не забывая при этом и о заводских проблемах.

При реализации своих планов Сергей Иванович всегда опирался на опыт, знания, авторитет и поддержку членов своей команды. На предприятии были созданы новые организационные формы коллективного научного руководства: секция программного тематического планирования и отраслевой семинар главных конструкторов.

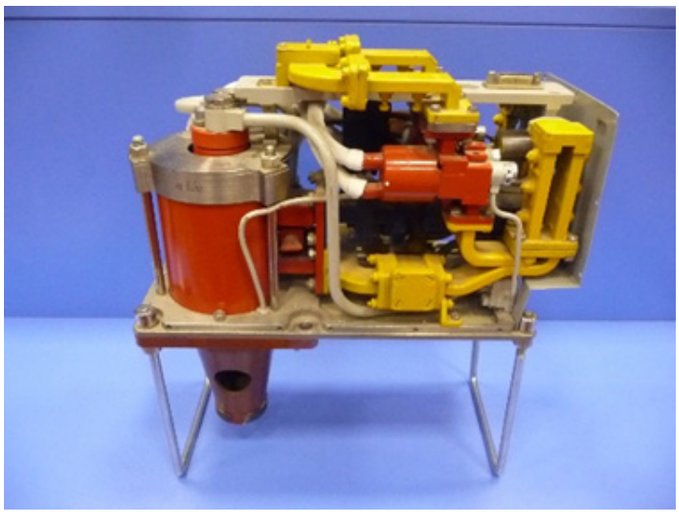
1(540).indd 7 05.03.2019 8:12:21

Сквозь прошедшие десятилетия видно, что эти нововведения С. И. Реброва были абсолютно верны и способствовали тому, что к концу 80-х годов НПО «Исток» стало одним из лучших предприятий СВЧ-приборостроения не только в стране, но и во всем мире.

Главным в научной деятельности предприятия в эти годы был последовательный переход от разработки электровакуумных приборов СВЧ к созданию твердотельных СВЧ-приборов и модулей в виде гибридно-интегральных схем на полупроводниковых приборах.

В это же время по инициативе Сергея Ивановича и при непосредственной поддержке министра электронной промышленности СССР Александра Ивановича Шокина на предприятии создаются специальное конструкторское бюро машиностроения и крупнейший в отрасли машиностроительный комплекс, обеспечивающий специальным технологическим оборудованием все предприятия отрасли, информационно-вычислительный центр, оснащенный самыми совершенными вычислительными машинами, и базовый отраслевой отдел научно-технической информации, курирующий все 15 предприятий 1-го Главного управления МЭП СССР, работающих в области СВЧ-электроники.

Другой важнейший поворот в тематике предприятия был связан с разработкой комплексированных СВЧ-устройств. В начале 70-х годов усилия по снижению массогабаритных характеристик электровакуумных СВЧ-приборов перестали приводить к их существенному уменьшению. Это стало сдерживать развитие многофункциональной бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Проблема разрешилась, когда в НПО «Исток» был создан новый класс изделий электронной техники – комплексированные изделия СВЧ, оптимально сочетающие требования радиотехники с возможностями СВЧ-электроники и в которых применение принципов функциональной и конструктивной интеграции при конструировании СВЧ-приемопередатчиков позволило существенно (в 5…10 раз) снизить массу и габариты СВЧ-приемопередатчиков РЛС при одновременном улучшении их эксплуатационных характеристик. Это направление впоследствии нашло свое развитие практически на всех предприятиях отрасли. Родоначальником нового класса радиоэлектронных изделий – комплексированных устройств – является Сергей Иванович Ребров.



Моноблок «Альтернатива» – первое отечественное комплексированное СВЧ-устройство

1(540).indd 8 05.03.2019 8:12:21

Внедрение принципа комплексированных СВЧ-устройств и схемотехники на основе электровакуумных и твердотельных ГИС фактически положило начало разработке в НПО «Исток» сложнейшей радиолокационной аппаратуры.

А. И. Шокин и С. И. Ребров

Сформулированные С. И. Ребровым принципы создания сложных радиолокационных комплексов были использованы и позднее при построении СВЧ-части радиоэлектронных систем различного назначения. Уникальные работы, выполненные на предприятии много лет назад, подтвержденные результатами натурных испытаний, стали хорошим заделом для основных источников финансовых поступлений на предприятие в тяжелые 90-е годы при выполнении экспортных заказов.

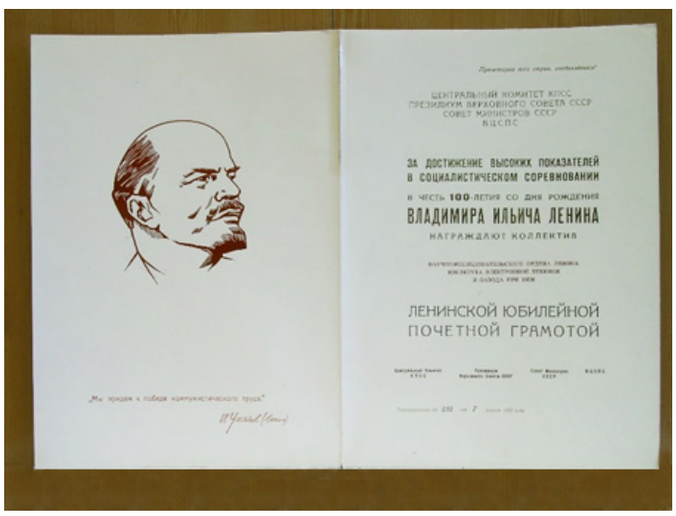
Сергей Иванович Ребров был широко известен как крупный ученый в области вакуумной и твердотельной электроники сверхвысоких частот, радиофизики, надежности и качества в СВЧ-приборостроении. Под его руководством были проведены фундаментальные и прикладные исследования, нашедшие широкое применение в радиоэлектронных системах различного назначения. Интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям в области электровакуумной и твердотельной СВЧ-электроники для С. И. Реброва не был формальным интересом крупного руководителя. Он всегда стремился понять суть сложнейших физических явлений, протекающих в приборах, начиная от газоразрядных антенных СВЧ-переключателей и заканчивая сложнейшими радиоэлектронными системами. Сформулированные им принципы схемотехнического решения сложных радиоэлектронных комплексов на основе комплексированных изделий и сегодня лежат в основе разработок различных видов радиоэлектронных систем.

Сергей Иванович Ребров руководил предприятием 26 лет, с 1962 по 1988 год, а с 1985 по

1(540).indd 9 05.03.2019 8:12:22

2007 год работал в должности генерального конструктора ФГУП «НПП «Исток». Предприятие в эти годы стало ведущим предприятием СВЧ-приборостроения в стране. За высокие производственные показатели и создание новой техники в 1966 году НИИ электронной техники с опытным заводом указом Президиума Верховного Совета СССР был награжден орденом Ленина, в 1970 году – Ленинской почетной грамотой, а в 1981 году за заслуги в создании средств специальной техники НПО «Исток» было награждено орденом Трудового Красного Знамени.

Вручение ордена Ленина НИИ электронной техники



Ленинская юбилейная почетная грамота, 1970 год

1(540).indd 10 05.03.2019 8:12:22

Свыше 1500 сотрудников предприятия были отмечены высокими правительственными наградами. 23 работника предприятия были награждены орденом Ленина. Рабочий В. И. Волк, начальник лаборатории Л. А. Парышкуро, академик Н. Д. Девятков, директор С. И. Ребров были удостоены высокого звания Героя Социалистического Труда. Многие ученые и инженеры стали лауреатами Ленинской и Государственной премий СССР.

С. И. Ребров среди лауреатов Ленинской и Государственной премий СССР

Главной заслугой Сергея Ивановича было становление и развитие целого ряда научных школ на предприятии. Его усилиями были созданы научные школы в области радиофизики, вакуумной и твердотельной СВЧ-электроники, квантовой электроники, математического моделирования и систем автоматического проектирования изделий СВЧ-техники, которые в настоящее время динамично развиваются и прирастают новыми компетенциями.

В начале 60-х годов на предприятии выпускалось всего пять типов электровакуумных СВЧ-приборов: магнетроны, отражательные и пролетные клистроны, ЛБВ и ЛОВ. К концу 80-х годов были разработаны совершенно новые классы и типы СВЧ-приборов и устройств: многочисленные конструкции отражательных, пролетных, пролетно-отражательных клистронов, ЛОВ с магнитной и электростатической фокусировкой и ряд других приборов с высокими электрическими параметрами. Многие из этих приборов с полным правом можно отнести к определяющим мировой научно-технический уровень того времени: несколько типов оригинальных ЛБВ – малошумящие ЛБВ с ленточным пучком, «космические» ЛБВ с высокой долговечностью, мощные связные ЛБВ. Были разработаны многолучевые приборы – клистро-

1(540).indd 11 05.03.2019 8:12:23

ны, ЛБВ и ЛОВ, в том числе работающие на частотах до 1,4 ТГц. Создано семейство электронно-лучевых параметрических усилителей и электростатических усилителей (ЭСУ) на быстрой циклотронной волне. На базе ЭСУ созданы электростатические комбинированные усилители (ЭКСУ), в которых на выходе ЭСУ включается транзисторный усилитель, что позволяет расширить рабочую полосу частот и поднять коэффициент усиления до 30 дБ, и малошумящие циклотронно-защищенные комбинированные усилители (ЦЗКУ), обеспечивающие защиту входных цепей приемников РЛС от излучения собственного передатчика, серия комплексированных изделий СВЧ на основе электровакуумных и твердотельных приборов. Была создана технология ГИС, принятая за основу на всех предприятиях отрасли; предложены новые виды транзисторов и СВЧ-диодов; разработан транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ); разработаны и освоены в серийном производстве первые в стране гелий-неоновые лазеры, нашедшие широкое применение в медицине и строительстве (лазерные нивелиры использовались при возведение Останкинской телебашни и прокладке туннелей); лазерные элементы и лазеры на парах меди, на CO и CO_2. Были разработаны цезиевые атомно-лучевые трубки для квантовых стандартов частоты и времени, применяемые в системе ГЛОНАСС, как в наземных станциях, так и на космических аппаратах. Изучалось медицинское применение СВЧ-электроники. На основе мощных магнетронов создавались установки промышленного СВЧ-нагрева. Были разработаны специальные технологии, обеспечивающие высокое качество, надежность и воспроизводимость изделий электронной техники, выпускаемых на предприятии: катодная и керамическая технологии, технохимия, технология производства ферритов и магнитов. Получило свое развитие специальное технологическое машиностроение, разработанные на предприятии откачные посты и водородные печи работали на многих предприятиях отрасли. Электроискровые станки, разработанные на предприятии, не уступали лучшим мировым образцам и нашли свое применение на многих предприятиях электронной, часовой и ювелирной промышленности страны, и даже поставлялись на экспорт.

По заказу Минсвязи СССР на предприятии в 80-е годы были разработаны и серийно выпускались цифровые радиорелейные станции (РРС) на ГЛПД, обеспечившие связью труднодоступные районы страны. За 10 лет было выпущено более 2000 штук РРС «Радан», а число абонентов превысило 1,5 млн.

Выдающийся вклад внес коллектив предприятия в эти годы под руководством С. И. Реброва в развитие электровакуумных СВЧ-приборов, отражательных клистронов малой мощности (до 100 мВт) и усилительных клистронов высокой мощности (до 30 МВт). Эти приборы нашли применение в самых разнообразных сферах: они применялись при локации планет Марс и Венера, в линейных ускорителях элементарных частиц, СВЧ-генераторы малой и повышенной мощности стали основой многочисленных радиолокационных систем, навигационной аппаратуры самолетов, морских судов различных классов, радиоэлектронного оборудования спутников и космических кораблей, включая связные станции и системы мягкой посадки космических аппаратов, поисковых локаторов, разнообразной измерительной аппаратуры и т. д.

Была создана первая отечественная малошумящая ЛБВ в 10-сантиметровом диапазоне длин волн. По чувствительности (коэффициент шума – менее 10 дБ) эта ЛБВ превосходила зарубежные аналоги. На ее базе в последующие годы была разработана серия малошумящих ЛБВ, перекрывающая весь сантиметровый и часть дециметрового диапазона длин волн.

В 60-е годы началась разработка малошумящих ЛБВ с магнитными периодическими фокусирующими системами для спутниковых систем связи. Эти ЛБВ успешно работали на первом оте-

1(540).indd 12 05.03.2019 8:12:23

чественном спутнике связи «Горизонт», позволившем впервые осуществить трансляцию Олимпийских игр 1980 года из Москвы на весь мир.

В дальнейшем получили развитие многолучевые, так называемые «прозрачные» ЛБВ для систем связи и многофункциональных РЛС, обеспечивающие чрезвычайно широкий набор режимов работы СВЧ-передатчика, от импульсного до непрерывного, при сниженных в 1,5…2 раза напряжениях питания, а также при низком уровне вносимых шумов.

В середине 60-х годов на предприятии были созданы первые отечественные мощные ЛБВ в 3-сантиметровом диапазоне длин волн с выходной мощностью 1 кВт в непрерывном режиме. Подобные ЛБВ предназначались для наземной стационарной аппаратуры линий связи через спутники Земли, станций тропосферной связи.

НПО «Исток» было первым в стране в освоении миллиметрового диапазона длин волн, который обеспечивает такие важнейшие преимущества, как малые габариты и масса СВЧ-устройств, возможность передачи большого объема информации по каналам связи и др. К настоящему времени лампами обратной волны перекрыт диапазон до 1,4 ТГц. ЛОВ терагерцового диапазона находят широкое применение в радиоастрономии и поставляются на экспорт.

В 1970-е годы на «Истоке» начало развиваться направление по разработке СВЧ-модулей на основе гибридно-интегральной микрополосковой технологии. Использование технологии СБИС в СВЧ-технике позволило в конце 80-х годов перейти от гибридных интегральных схем СВЧ (ГИС) к монолитным (МИС СВЧ).

Выполняя Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР об организации выпуска товаров культурно-бытового назначения, С.И. Ребров предложил выпускать на предприятии магнитофонную приставку высшего класса, до этого в стране никем не выпускавшуюся. Сергей Иванович лично руководил этой работой и сам разработал стеклоферритовую четырехдорожечную магнитофонную головку. Всего по кооперации с Кировским электромашиностроительным производственным объединением им. Лепсе, поставлявшим лентопротяжный механизм, было выпущено несколько тысяч штук магнитофона «Электроника ТА1-003», а на базе бытового магнитофона был разработан и многоканальный магнитофон для записи в течение нескольких часов переговоров диспетчерских служб в авиации и службах экстренного реагирования. Конструкция магнитофонной приставки оказалась настолько удачной, что она была передана для выпуска на несколько других предприятий.

А самым массовым товаром народного потребления, выпуск которого Сергей Иванович организовал на предприятии в 70-е годы, был бытовой термос со стеклянной колбой. При этом была использована технология стекловарения, применяемая на заводе, и разработана технология серебрения колб. Всего на заводе «Рений» при НПО «Исток» ежегодно выпускалось до 700 тыс. штук термосов и было выпущено более 20 млн. штук термосов различной емкости и назначения.

Следует отметить и еще одно важное направление работы, которое было поручено С. И. Реброву. Постановлением Совета Министров СССР в 1985 году на предприятие были возложены функции головной организации по обеспечению единой технической политики при создании СВЧ-техники для радиоэлектронных систем, а генеральный директор С. И. Ребров был назначен генеральным конструктором НПО «Исток». При НПО «Исток», как головном предприятии, в 1986 году был организован межведомственный Совет главных конструкторов (Совет ГК) по СВЧ-электронике, бессменным председателем которого был С. И. Ребров.

Деятельность Совета ГК была направлена на формирование научно-обоснованной технической

1(540).indd 13 05.03.2019 8:12:23

политики, направленной на развитие ЭКБ СВЧ для перспективных радиоэлектронных систем, средств связи, телекоммуникационных и информационных систем, специальной радиоэлектронной аппаратуры.

Академик Н. Д. Девятков и С. И. Ребров демонстрируют А. И. Шокину модели термосов

Членами Совета ГК являлись: руководители предприятий – генеральные конструкторы приоритетных направлений СВЧ-электроники, главные конструкторы предприятий – заказчиков СВЧ-техники, крупные ученые в области СВЧ-электроники, представители различных министерств и ведомств.

Для обеспечения выполнения предприятием головных функций по СВЧ-электронике и работы Совета ГК по приказу МЭП СССР в ноябре 1986 года на предприятии был создан координационно-аналитический отдел. Генеральному директору – генеральному конструктору НПО «Исток» необходимо было обеспечить выполнение отраслевых функций по следующим направлениям:

- Определение перспективных направлений развития СВЧ-электроники и технического уровня каждого из них с использованием научно-технического потенциала предприятий МЭП СССР и институтов Академии наук СССР и Высшей школы.
- Исследование технического уровня планируемых и разрабатываемых ИЭТ и групп приборов СВЧ. Исследование структурных схем построения РЭА и комплексное обеспечение их необходимой ЭКБ СВЧ.
- Разработка с участием всех заинтересованных предприятий и организаций долгосрочных комплексно-целевых и аппаратурно-ориентированных программ по электронике СВЧ, прогнозов, заданий и годовых планов важнейших НИОКР по разработке приборов, оборудования и новых технологий применительно к задачам их использования в различных отраслях промышленности.

1(540).indd 14 05.03.2019 8:12:23

• Проведение отраслевых НИР под методическим руководством ГНТУ МЭП СССР. Проведение экспертиз и согласование технических заданий, карт технического уровня на новые разработки ИЭТ, оказание консультационных, информационных и других видов услуг.

Советом ГК, руководимым С. И. Ребровым, за период работы было рассмотрено более 80 структурных схем построения СВЧ-части важнейших радиоэлектронных систем и приняты решения или сформированы аппаратурно-ориентированные программы по созданию СВЧ-приборов для применения в перспективных радиоэлектронных системах.

После ликвидации Союзных министерств и реформирования министерств Российской Федерации в 1998 году на предприятии начала действовать межведомственная секция «СВЧ-электроника» при НТС Российского агентства по системам управления (РАСУ), которую также до 2007 года возглавлял генеральный конструктор ФГУП «НПП «Исток» С. И. Ребров. Приказом РАСУ в 2004 году на ФГУП «НПП «Исток» были также возложены функции базового научного центра РАСУ по направлению «СВЧ-техника и технологии».

Привлечение к работе в межотраслевых НТС высококвалифицированных специалистов различных ведомств позволило создавать СВЧ-приборы и радиоэлектронные системы на их основе с техническим уровнем не ниже зарубежного, а в отдельных случаях и превышающим его. Особенно это относится к сверхмощным и малогабаритным магнетронам, малошумящим широкополосным ЛБВ, многолучевым клистронам, циклотронно-защищенным устройствам и комплексированным изделиям СВЧ.

Отдельно следует остановиться на организации в 1974 году С. И. Ребровым, по предложению авторитетных ученых и ведущих специалистов предприятия, ежегодно проводимого научно-технического семинара-совещания по рассмотрению результатов научных достижений и перспектив дальнейшего развития всех основных направлений деятельности предприятия. Семинары традиционно проводились на островной базе отдыха «Электрон» в Московском море вблизи Дубны, что обеспечивало режим конфиденциальности и возможность свободного

С. И. Ребров с участниками островного семинара-совещания, 2005 год

1(540).indd 15 05.03.2019 8:12:23

обсуждения научных тем и общения участников. Эти научно-технические семинары-совещания ученых и ведущих специалистов предприятия позволяли сохранять и развивать сформировавшиеся «научные школы» в области радиоэлектроники СВЧ, проводить обсуждения с потенциальными потребителями перспектив развития ЭКБ СВЧ и требований к электрическим параметрам и свойствам приборов для применения в различной РЭА с целью обеспечения безопасности страны и потребностей народного хозяйства. В последние годы на семинары приглашаются представители предприятий и организаций – потребителей продукции НПП «Исток». Свободный обмен мнениями позволяет оптимизировать процесс разработки новых СВЧ-приборов и устройств, ускоряет процесс согласования технических требований. В 2019 году будет проведен уже 44-й семинар-совещание. Дело, начатое Сергеем Ивановичем, живет!

Сергей Иванович, наряду с генеральным директором предприятия Александром Николаевичем Королевым, был одним из организаторов выполнения Постановления Правительства Российской Федерации по техническому перевооружению ФГУП «НПП «Исток» для обеспечения современными монолитными СВЧ-микросхемами приоритетных направлений по разработке перспективных радиоэлектронных систем. Эта работа успешно продолжается и в настоящее время.

К настоящему времени созданы замкнутые современные производственно-технологические комплексы по разработке и выпуску МИС СВЧ на основе арсенидгаллиевых гетероструктур, включая многофункциональные управляющие МИС СВЧ и многокаскадные МИС усилителей мощности, и приемопередающих СВЧ-модулей различной функциональной сложности в частотных диапазонах до 40 ГГц для современных систем радиолокации и связи. В стадии реализации инвестиционные проекты по созданию МИС СВЧ в частотных диапазонах до 100 ГГц для перспективных систем беспроводной связи, в том числе систем связи 5-го поколения.

За заслуги перед отечественной наукой и техникой С. И. Ребров был награжден тремя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, ему было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда, присуждены Ленинская и Государственная премии СССР, премия Миноборонпрома России. Его научная и педагогическая деятельность отмечены ученой степенью доктора технических наук и званием профессора. Сергей Иванович автор двух монографий, около двухсот научных трудов, 25 авторских свидетельств на изобретения.

По-отечески заботливо относился он к подрастающему поколению, в том числе и к подготовке новых профессиональных кадров. В 1962 году С. И. Ребров был одним из инициаторов по организации на базе НПО «Исток» завода -втуза, филиала МЭИ, а впоследствии МИРЭА (Московского технологического университета) и лично на протяжении многих лет возглавлял базовую кафедру филиала. Выпускники втуза учились и одновременно работали на предприятии, а по окончании учебы пополняли ряды инженерно-технических работников. По его инициативе в городе были открыты техникум электронной промышленности и ПТУ, готовившие кадры для предприятия. На протяжении многих лет Сергей Иванович возглавлял в НПО «Исток» диссертационный совет по присуждению докторских и кандидатских диссертаций.

В ознаменование заслуг Сергея Ивановича на предприятии в 2013 году была учреждена медаль имени С. И. Реброва. За эти годы лауреатами медали стали 35 видных ученых и ведущих специалистов, в том числе 15 представителей других российских предприятий СВЧ-электроники.

1(540).indd 16 05.03.2019 8:12:24

Сергей Иванович Ребров

«В последнее время я все больше анализирую свою роль в свершении важнейших работ предприятия, вижу свои преимущества и свои недостатки. Все больше понимаю, что от руководителей подразделений можно было бы добиться большего убеждением, а не окриком. Но для убеждения, казалось, не было времени… Телефон разрывался от звонков. Только начальник 1-го Главка ежедневно обращался ко мне по 7…10 раз. Каждые две недели я участвовал в совещаниях на уровне заместителей министров смежных отраслей. Числу же других совещаний не было счета...».

Эти слова были сказаны С. И. Ребровым в канун его 70-летнего юбилея, в 1999 году… Более четверти века Сергей Иванович возглавлял одно из крупнейших в стране предприятий СВЧ-приборостроения – НПО «Исток», с 1962 по 1988 год. На градообразующем предприятии тогда работало более 14000 человек, было два филиала: в Чернухе и Кстово, выполняющих заказы по металлообработке. При С. И. Реброве было создано около 15 новых заводов по всему Советскому Союзу по производству СВЧ-приборов, разработанных в НПО «Исток». Все эти новые предприятия укомплектовали кадрами, подготовленными в НПО «Исток». Свыше 200 специалистов направили на эти предприятия на руководящие должности.

Параллельно с колоссальной по широте и ответственности научной и производственной деятельностью С. И. Ребров интенсивно занимался вопросами развития предприятия – при нем произошло существенное расширение и реконструкция производственных площадей, а также и проблемами города Фрязино.

1(540).indd 17 05.03.2019 8:12:24

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

И все эти годы на всех уровнях власти, науки и техники было неразделимо знаковое сочетание: Фрязино – Исток – Ребров. И то, что в декабре 2003 года Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина городу Фрязино был присвоен статус Наукограда России – это тоже огромная заслуга Сергея Ивановича Реброва, сыгравшего тогда вместе с генеральным директором ФГУП «НПП «Исток» Александром Николаевичем Королевым и Главой города Владимиром Васильевичем Ухалкиным главную роль в реализации этого проекта.

Помимо управления огромным предприятием, С. И. Ребров был и подлинным хозяином города Фрязино. Ведь почти все жилищное и коммунальное хозяйство в городе, в котором проживало более 40000 человек, было на балансе градообразующего предприятия. В эти годы на средства МЭП СССР были построены в городе десятки жилых домов, две котельные, 10 детских садов, профилакторий на берегу озера Большое, Дворец культуры на 800 мест, спорткомплекс со стадионом, две базы отдыха на берегах Волги и Черного моря, реконструирован загородный пионерский лагерь.

За каждым этим объектом масса крупных и мелких дел, в которые Сергей Иванович предпочитал вникать сам, рассматривая их с позиции рачительного хозяина.

На протяжении многих лет он возглавлял Совет директоров промышленных предприятий города, являлся уважаемым членом Администрации Фрязино, председателем НТС города, к его мнению всегда прислушивались, его богатый опыт широко используется руководителями города до сегодняшнего времени.

Сергей Иванович Ребров был удостоен звания почетный гражданин города Фрязино, его портрет размещен в зале Славы Администрации города.

Высоко оценивая огромный вклад С. И. Реброва в улучшение жилищных и бытовых условий сотрудников предприятия и их семей, развитие инфраструктуры города, фрязинцы избирали его депутатом Верховного Совета СССР, Московского областного Совета, Фрязинского городского Совета.

1(540).indd 18 05.03.2019 8:12:24

Сергей Иванович относился к числу увлеченных, разносторонне талантливых людей. Фрязинцам хорошо известны его успехи в области художественной фотографии и изобразительного искусства. Он был горячим поклонником различных видов спорта, в том числе волейбола, большого тенниса и рыбалки.

В последние годы предметом его увлечений были фотоаппарат и персональный компьютер – и здесь, как и во всех делах, Сергей Иванович добился удивительных результатов в компьютерной графике и обработке фотографий. Совместно с женой Татьяной Борисовной Сергей Иванович воспитал замечательных детей – дочь Людмилу и сына Александра.

С. И. Ребров из тех людей, чья титаническая работа в различных областях человеческой деятельности не поддается простому осмыслению и пониманию. Просматривая, даже в общих чертах, его дела, невольно возникает вопрос: неужели это все было по силам охватить одному человеку? Нужно было обладать недюжинным здоровьем, колоссальной внутренней энергией, трудолюбием, решительностью, верой в свою правоту и в команду единомышленников, чтобы на протяжении четверти века самому двигаться вперед и вести за собой могучее предприятие, одно название которого вызывало уважение у друзей и трепет у потенциальных врагов страны Советов.

Умер С. И. Ребров 4 октября 2007 г. Попрощаться с этим замечательным человеком пришел практически весь город… На аллее Героев Труда в городе Фрязино установлен бюст Сергея Ивановича Реброва, а на главном корпусе предприятия и на доме, где жил Сергей Иванович, установлены памятные доски…

Памятная доска, установленная на доме, где жил С. И. Ребров

Бюст С. И. Реброва на аллее Героев Социалистического Труда

1(540).indd 19 05.03.2019 8:12:25

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.315.61

ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В САНТИМЕТРОВОМ И МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, И. С. Ерёмин, Н. А. Федосеев, В. М. Колесникова, Ю. Л. Баринов

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Представлены результаты численного эксперимента, которые позволяют существенно расширить диапазон возможностей волноводного метода при измерении комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Расчеты проводились в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для материалов со значениями действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости ε_1 = 10 и 25 и тангенсами угла диэлектрических потерь tgδ = 0,1 и 0,2. В рассмотренной волноводной методике проведена оценка двух основных погрешностей, которые влияют на точность измерений диэлектрической проницаемости и связаны с ошибкой при определении положения границ образца в измерительной секции и наличием воздушного зазора между образцом и широкой стенкой волновода. Величина этих погрешностей может достигать 40 % и более при определении tgδ. Показаны способы уменьшения этих погрешностей.

КС: волновой метод, измерение, комплексная диэлектрическая проницаемость материалов, сантиметровый и миллиметровый диапазоны

WAVEGUIDE METHOD FOR MEASURING THE COMPLEX DIELECTRIC CONSTANT OF MATERIALS IN CENTIMETER AND MILLIMETER RANGES

M. P. Parkhomenko, D. S. Kalenov, I. S. Eremin, N. A. Fedoseev, V. M. Kolesnikova, Yu. L. Barinov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The results of a numerical experiment are presented which allow to expand significantly the range of possibilities of the waveguide method in measuring the complex dielectric constant of materials. The calculations were carried out in centimeter and millimeter ranges for materials with the values of the real component of the complex dielectric constant ε_1 = 10 and 25 and dielectric loss tangents tgδ = 0.1 and 0.2. In the considered waveguide method two main errors are estimated which affect the accuracy of dielectric constant measurements and are connected with an error in determining the position of the sample boundaries in the measuring section and the presence of an air gap between the sample and the wide waveguide wall. The value of these errors can reach 40 % or more in determining tgδ. The ways of reducing these errors are shown.

Keywords: waveguide method, measurement, complex dielectric constant of materials, centimeter and millimeter ranges

1(540).indd 20 05.03.2019 8:12:25

1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания приборов, устройств, а также построенных на их основе радиоизмерительных систем, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, требуются самые разнообразные материалы: сильно поглощающие и слабо поглощающие, изотропные и анизотропные с различными диэлектрической и магнитной проницаемостями. В последние два десятилетия интенсивно разрабатываются наноматериалы, исследуются композиты на их основе с добавлением углеродных нанотрубок, ферритов и т. д. Поэтому проблема измерения электромагнитных параметров материалов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах была и остается актуальной. Следует отметить, что методов измерения в этих частотных диапазонах не так-то много и их возможности ограничены. Так, по-прежнему остается серьезной проблемой измерение слабо поглощающих материалов с тангенсом угла потерь на уровне 10^{-5} и меньше. Однако в связи с развитием современной измерительной аппаратуры, доступностью векторных панорамных измерителей, развитием вычислительной техники эти методы совершенствуются и их возможности расширяются. Для определения электромагнитных параметров материалов широко используются резонаторные и волноводные методы, а также метод свободного пространства [1–6]. В работе [7] предложен оригинальный резонаторный метод, который регистрирует незначительные изменения диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Этот метод особенно полезен при исследовании сильно поглощающих растворов с малым содержанием примеси. Однако резонаторные методы определяют параметры материалов на отдельных частотах. Основное преимущество волноводного метода заключается в том, что он позволяет определять параметры материалов в широкой полосе частот. Но существует ряд причин, которые существенно ограничивают применение этого метода. Рассмотрим две главные.

Современная измерительная аппаратура строится на базе прямоугольного металлического волновода, в котором распространяется волна H_{10}. При заполнении волновода исследуемым материалом практически всегда присутствует воздушный зазор между исследуемым образцом и широкой стенкой волновода, что приводит к резкому скачку напряженности электрического поля при переходе из материала образца в воздух и сильно влияет на точность определения электромагнитных параметров. Особенно это проявляется при измерении материалов с большим значением действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости. Вторая причина связана с неточностью задания положения границ образца.

Целью данной работы является расширение возможностей измерений волноводного метода. В работе представлены результаты численного эксперимента при использовании волноводного метода для определения электромагнитных параметров диэлектриков, произведена оценка погрешностей. Показано, как можно существенно расширить возможности метода, уменьшив погрешности, связанные с наличием воздушного зазора и неточностью задания положения границ исследуемого образца.

2. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ

Главными электромагнитными параметрами материалов являются комплексная диэлектрическая

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2 \qquad (1)$$

1(540).indd 21 05.03.2019 8:12:25

и магнитная

$$\mu = \mu_1 - j\mu_2 \tag{2}$$

проницаемости, в которых действительная часть определяет соответственно поляризованность и намагниченность вещества, а мнимая часть – величину вносимых потерь (где $j = \sqrt{-1}$). На практике в качестве характеристик вещества вводят также тангенсы угла диэлектрических $\mathrm{tg}\delta_э$ и магнитных $\mathrm{tg}\delta_м$ потерь, которые задаются соотношениями

$$\mathrm{tg}\delta_э = \varepsilon_2/\varepsilon_1, \tag{3}$$

$$\mathrm{tg}\delta_м = \mu_2/\mu_1. \tag{4}$$

В случае изотропных диэлектриков ($\mu_1 = 1$; $\mu_2 = 0$) основной характеристикой является комплексная диэлектрическая проницаемость ε.

Идея волноводного метода, который строится на основе использования в эксперименте векторного панорамного измерителя, заключается в том, что если известны комплексные коэффициенты отражения и прохождения измерительной секции с образцом исследуемого материала (рис. 1), то в случае ***отсутствия*** воздушного зазора аналитическое решение задачи позволяет определить комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости этого материала [3–4].

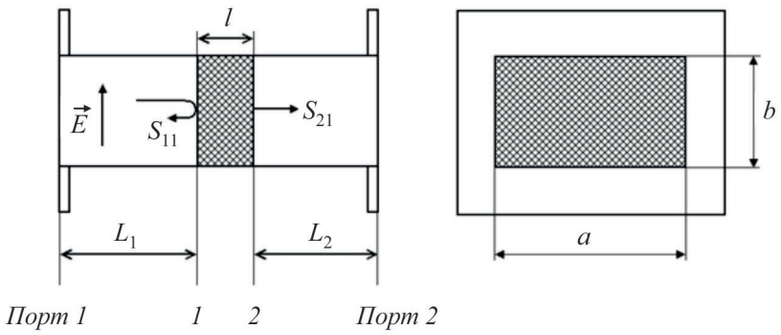


Рис. 1. Волноводная секция с исследуемым образцом:
$a \times b$ – поперечные размеры волновода; $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; l – длина образца; S_{11} и S_{21} – коэффициенты отражения и прохождения на границах *1* и *2* образца соответственно

Покажем кратко вывод этих соотношений. Комплексные коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{21} на границах образца (см. рис. 1, границы *1* и *2*) в волноводной секции с воздушным заполнением задаются формулами [5]

$$S_{11} = \frac{\Gamma\left(1 - P^2\right)}{1 - \Gamma^2 P^2}, \tag{5}$$

$$S_{21} = \frac{P\left(1 - \Gamma^2\right)}{1 - \Gamma^2 P^2}, \tag{6}$$

где Γ – коэффициент отражения в волноводе на границе воздух – образец (в случае образца бесконечной длины); P – коэффициент распространения через материал образца в волноводе. Коэффициент распространения задается соотношением

$$P = e^{-\gamma l} = e^{-(\alpha + j\beta)l}. \tag{7}$$

1(540).indd 22 05.03.2019 8:12:26

Здесь $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения волны в волноводе, заполненном исследуемым материалом, которая складывается из постоянной затухания α (Нп/м) и фазовой постоянной β ($м^{-1}$).

Вывод искомых формул для определения ε и μ осуществляется в два этапа. На первом этапе из уравнений (5) и (6) выражаются коэффициенты Γ и P через S_{11} и S_{21}. Для этого указанные уравнения записываются в виде суммы и разности:

$$S_{11} + S_{21} = (\Gamma + P)/(1 + \Gamma P), \tag{8}$$

$$S_{11} - S_{21} = (P - \Gamma)/(1 - \Gamma P). \tag{9}$$

Решая эту систему уравнений относительно Γ и P, получаем

$$\Gamma = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{\frac{\left(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1\right)^2}{4S_{11}^2} - 1}, \tag{10}$$

$$P = \frac{S_{21} + S_{11} - \Gamma}{1 - \left(S_{21} + S_{11}\right)\Gamma}; \tag{11}$$

выбор знака плюс или минус в уравнении (10) определяется условием $|\Gamma| < 1$. Отметим, что поскольку S_{11} и S_{21} определены в ходе эксперимента, то теперь Γ и P являются известными величинами (однако заметим, что это комплексные величины).

На втором этапе получим искомые соотношения для определения ε и μ.

Из формулы (7) найдем значение постоянной распространения γ:

$$\gamma = \frac{1}{l}\ln\left(\frac{1}{P}\right). \tag{12}$$

С другой стороны, используя дисперсионное уравнение для волновода с заполнением [8]

$$k_0^2 \varepsilon\mu = -\gamma^2 + k_{кр}^2,$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ (λ_0 – длина волны в вакууме), $k_{кр} = 2\pi/\lambda_{кр}$ ($\lambda_{кр}$ – критическая длина волны в волноводе), находим

$$-\gamma^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 \varepsilon\mu - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2. \tag{13}$$

Подставив в это уравнение выражение для γ из (12), получаем

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 \varepsilon\mu - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 = -\left[\frac{1}{l}\ln\left(\frac{1}{P}\right)\right]^2.$$

После несложных преобразований последнее выражение запишется в виде

$$\frac{\varepsilon\mu}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_{кр}^2} = -\left[\frac{1}{2\pi l}\ln\left(\frac{1}{P}\right)\right]^2. \tag{14}$$

Вводя обозначение

1(540).indd 23 05.03.2019 8:12:26

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left[\frac{1}{2\pi l}\ln\left(\frac{1}{P}\right)\right]^2, \tag{15}$$

из (14) получаем первое уравнение для определения электромагнитных параметров исследуемого материала:

$$\frac{\varepsilon\mu}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_{кр}^2} = \frac{1}{\Lambda^2}. \tag{16}$$

Перепишем его в более удобном виде:

$$\frac{\varepsilon\mu}{\lambda_0^2} = \frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_{кр}^2}. \tag{17}$$

Используя определение коэффициента отражения Г на границе воздух – исследуемый образец, найдем второе уравнение:

$$\Gamma = \frac{Z_2 \quad Z_1}{Z_2 \quad Z_1} \tag{18}$$

где Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления волновода с воздушным заполнением и заполнением материалом образца. Для волн типа *TE* в волноводе эти сопротивления описываются выражениями [8]:

$$Z_1 = j\frac{\omega\mu_0}{\gamma_1}, \quad Z_2 = j\frac{\omega\mu_0\mu}{\gamma}.$$

Здесь ω – круговая частота колебаний; $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м; γ_1 – постоянная распространения в волноводе с воздушным заполнением. Подставив эти выражения в (18), получаем

$$\Gamma = \frac{\mu\gamma_1 - \gamma}{\mu\gamma_1 + \gamma}.$$

Решим это уравнение относительно μ:

$$\mu = \frac{\gamma}{\gamma_1}\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}. \tag{19}$$

Используя (13), запишем выражение для постоянных распространения γ_1 и γ:

$$\gamma_1 = j\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2}, \tag{20}$$

$$\gamma = j\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 \varepsilon\mu - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \tag{21}$$

С учетом (16) отношение этих выражений запишется в виде

$$\frac{\gamma}{\gamma_1} = \frac{1}{\Lambda\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_{кр}^2}}}.$$

1(540).indd 24 05.03.2019 8:12:26

Подставив это отношение в (19), получаем формулу для определения комплексной магнитной проницаемости μ исследуемого материала:

$$\mu = \frac{1+\Gamma}{(1-\Gamma)\Lambda\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2}-\frac{1}{\lambda_{кр}^2}}}. \tag{22}$$

Формула для определения комплексной диэлектрической проницаемости записывается из (17)

$$\varepsilon = \frac{\lambda_0^2}{\mu}\left(\frac{1}{\Lambda^2}+\frac{1}{\lambda_{кр}^2}\right). \tag{23}$$

В полученных формулах коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{21} берутся на границах *1* и *2* образца (см. рис. 1), а в реальной установке они измеряются в сечениях портов *1* и *2* волноводной секции (где S_{11}^* – коэффициент отражения в сечении порта *1*, S_{21}^* – коэффициент прохождения в сечении порта *2*). Выпишем выражения для преобразования указанных коэффициентов из одного сечения в другое:

$$S_{11} = \frac{S_{11}^*}{R_1^2}, \tag{24}$$

$$S_{21} = \frac{S_{21}^*}{R_1 R_2}. \tag{25}$$

Здесь $R_1 = e^{-\gamma_1 L_1}$ и $R_2 = e^{-\gamma_1 L_2}$, где γ_1– постоянная распространения в волноводе с воздушным заполнением, задаваемая соотношением (20); размеры L_1 и L_2 указаны на рис. 1.

В формулы (22) и (23), определяющие значения ε и μ исследуемого материала, входит комплексная величина Λ, задаваемая выражением (15). Она имеет множество значений, так как в правой части берется логарифм от комплексного числа 1/*P*. Отсюда возникает неоднозначность в определении ε и μ исследуемого материала. Для разрешения этой неоднозначности используем время групповой задержки τ сигнала в образце [4] и итерационную методику. На практике порядок расчета таков. Коэффициент распространения равен $P = e^{-\gamma l} = e^{-(\alpha + j\beta)l} = e^{-\alpha l} \cdot e^{-j\beta l} = |P|e^{j\varphi}$, где $|P|$ – модуль, а φ – аргумент коэффициента распространения. С учетом этого логарифм в правой части выражения (15) запишется как

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left[\frac{\ln\left(\frac{1}{|P|}\right)}{2\pi l} + j\frac{2\pi k - \varphi}{2\pi l}\right]^2, \tag{26}$$

где *k* – целое число, равное 0; ±1; ±2;… Дальнейшая задача заключается в правильном выборе значения числа *k*. Для этого используется итерационная методика, суть которой заключается в переборе значений *k* в некотором интервале, например от –20 до 20. Для каждого выбранного числа *k* из (26) определяется величина Λ, которая далее используется в формулах (22) и (23) для вычисления μ и ε. Таким образом, мы получаем массив данных из найденных значений ε и μ.

1(540).indd 25 05.03.2019 8:12:26

Далее, используя полученный массив данных для ε и μ, находим для каждого значения k время групповой задержки τ_k сигнала в образце:

$$\tau_k = l \cdot \frac{d}{df}\left[\sqrt{\left(\frac{\varepsilon\mu}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}\right)_k}\right]. \quad (27)$$

С другой стороны, время групповой задержки может быть непосредственно получено из анализа фазы φ коэффициента распространения P, найденного в (11):

$$\tau = \frac{(-1)}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{df}. \quad (28)$$

Сравнивая значения действительной части времени задержки τ_k, полученные по формуле (27), со временем τ, найденным из (28), находим такое число k, при котором выполняется условие:

$$\tau_k - \tau = 0. \quad (29)$$

Именно это k и будет являться решением поставленной задачи. А значит, полученные ранее значения ε и μ, соответствующие этому значению числа k, будут определять комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости исследуемого материала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ

Представим результаты численного эксперимента при определении комплексной диэлектрической проницаемости изотропных диэлектриков. Как сказано выше, основными электродинамическими характеристиками таких материалов являются комплексная диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь (его в дальнейшем мы будем обозначать без нижнего индекса, т. е. как tgδ). Разберем две основные методические погрешности, влияющие на результаты измерений. ***Первая погрешность*** связана с наличием зазора между образцом и широкой стенкой волновода. Как уже отмечалось ранее, в этом случае возникает скачок напряженностей электрического поля при переходе из исследуемого материала в воздушный зазор, особенно заметный при измерении материалов с большой диэлектрической проницаемостью ε_1. ***Вторая погрешность*** связана с неточностью задания положения границ *1* и *2* образца, что приводит к ошибке в определении коэффициентов отражения S_{11} и прохождения S_{21} на этих границах (см. рис. 1). Расчеты проводились в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для материалов с действительной частью диэлектрической проницаемости ε_1, равной 10 и 25, и тангенсами угла диэлектрических потерь tgδ, изменяющимися в пределах от 0,1 до 1. В расчетах также учитывалась конечная проводимость стенок волновода из меди, которая принималась равной $5{,}8 \cdot 10^7$ См/м.

Вначале рассмотрим ***влияние ширины зазора*** на результаты численного эксперимента. При наличии воздушного зазора между образцом и широкой стенкой волновода наша задача сводится к задаче волновода с частичным заполнением, которая аналитически не решается. Поэтому для численного решения этой задачи мы использовали трехмерный электродинамический программный пакет (программа HFSS). Последовательность расчетов выглядела так:

1) задавались *исходные* параметры материала ε_1 и tgδ и с помощью электродинамического

1(540).indd 26 05.03.2019 8:12:26

программного пакета рассчитывались комплексные коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{21} на границах образцов *1* и *2* (см. рис. 1) при *разных* величинах воздушного зазора;

2) используя полученные данные для коэффициентов отражения S_{11} и прохождения S_{21}, по формулам, представленным выше, для каждого случая определялись *свои* значения ε_1 и tgδ;

3) проводилось сравнение *полученных* в пункте 2 значений ε_1 и tgδ с *исходными* параметрами материала, заданными в пункте 1.

Рассмотрим результаты численного эксперимента для сантиметрового диапазона в полосе частот от 8,2 до 12,4 ГГц (рис. 2…5). Поперечные размеры волновода: $a \times b = 22{,}86 \times 10{,}16$ мм. Проанализируем полученные результаты для исследуемого материала со следующими исходными параметрами: $\varepsilon_1 = 10$; tgδ = 0,2. Длина образца – 44 мм. На рис. 2 и 3 показаны частотные зависимости ***вычисленных*** значений действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ при различной ширине воздушного зазора (здесь и далее расчеты проводились при относительно небольших воздушных зазорах: ширина зазора возрастает от 0 до 0,04 мм). Как видно из графиков, полученные значения для ε_1 по величине меньше исходных. Погрешность при определении ε_1 возрастает при увеличении ширины зазора, но её значение при ширине зазора 0,04 мм не превышает 3 %. Частотная зависимость для тангенса угла диэлектрических потерь (см. рис. 3) не столь однозначна: в нижней части частотного диапазона вычисленные значения tgδ меньше исходной величины 0,2, далее при увеличении частоты они возрастают до исходного значения и даже превышают его. Погрешность в определении tgδ во всей полосе частот – менее 2 %.

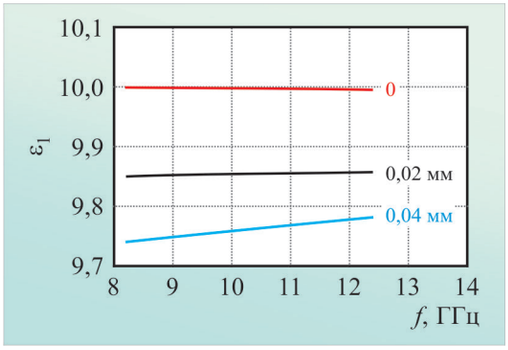


Рис. 2. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 10$; tgδ = 0,2)

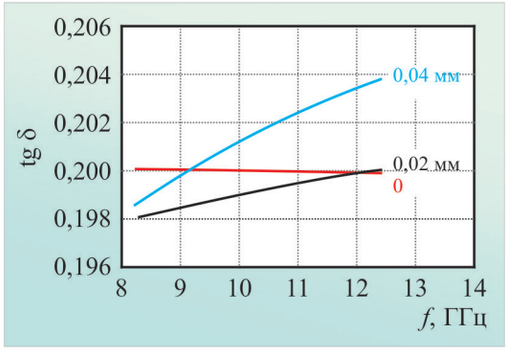


Рис. 3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 10$; tgδ = 0,2)

1(540).indd 27 05.03.2019 8:12:27

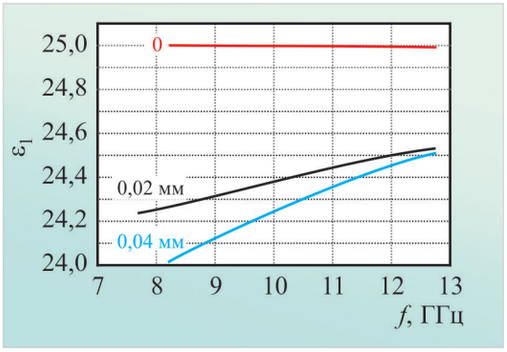


Рис. 4. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$)

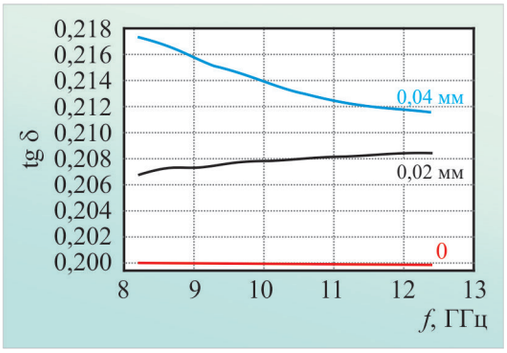


Рис. 5. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$)

Теперь рассмотрим результаты расчетов для материала, у которого действительная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости увеличилась в два с половиной раза и составляет $\varepsilon_1 = 25$. Тангенс угла диэлектрических потерь остался прежним и равен 0,2. Длина образца – 25,40 мм. В этом случае скачок напряженностей электрического поля при переходе из исследуемого материала в воздушный зазор становится более заметным, чем в предыдущем случае. Расчетные зависимости вычисленных значений действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты при различной ширине воздушного зазора представлены на рис. 4 и 5. Как и в предыдущем случае, вычисленные значения для ε_1 (см. рис. 4) по величине меньше исходного, а погрешность при определении ε_1 также возрастает при увеличении ширины зазора. Максимальное значение погрешности при ширине зазора 0,04 мм увеличилось до 4 %. Отметим, что на результаты измерений влияет конечная проводимость материала стенок волновода – даже при нулевой ширине воздушного зазора на частотах выше 11 ГГц вычисленная величина ε_1 отличается, правда незначительно, от исходного значения, равного 25. На рис. 5 представлены аналогичные зависимости для тангенса угла диэлектрических потерь. Здесь расчетные значения tgδ во всей полосе частот превышают исходное значение 0,2, а также наблюдается возрастание погрешности с ростом ширины зазора. Отметим, что по сравнению с предыдущим случаем максимальная погрешность при ширине зазора 0,04 мм выросла и составляет 8 %.

1(540).indd 28 05.03.2019 8:12:27

Данные численного эксперимента для миллиметрового диапазона в полосе частот от 26,5 до 40 ГГц приведены на рис. 6…9 (поперечные размеры волновода: $a \times b$ = 7,11×3,56 мм). Вначале рассмотрим полученные результаты для материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 = 10$, $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$. Длина образца равнялась 29,05 мм. Частотные зависимости ***вычисленных*** значений действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ при различной ширине воздушного зазора показаны на рис. 6 и 7. Ширина воздушного зазора изменяется в пределах от 0 до 0,04 мм. Отметим, во-первых, что во всем частотном диапазоне при ненулевом воздушном зазоре вычисленные значения ε_1 меньше исходного, равного 10, а вычисленные значения tgδ превышают исходное значение, равное 0,1. Во-вторых, при увеличении ширины зазора возрастают погрешности при определении как ε_1, так и tgδ. Максимальные погрешности при ширине зазора 0,04 мм составляют 5 % для ε_1 и 7 % для tgδ. Отметим, что в миллиметровом диапазоне влияние конечной проводимости материала стенок волновода на полученные результаты становится заметней, чем в сантиметровом. Это видно из сравнения полученных и исходных зависимостей при нулевом воздушном зазоре (см. рис. 6, 7), где линии вычисленных значений проходят ниже исходных.

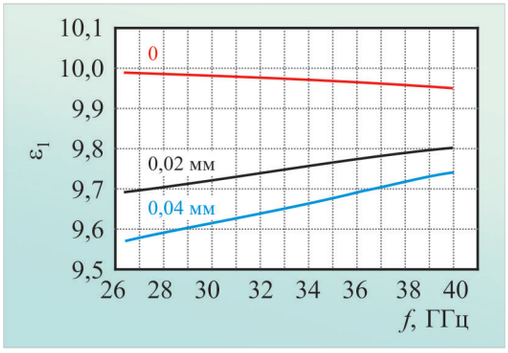


Рис. 6. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 10$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$)

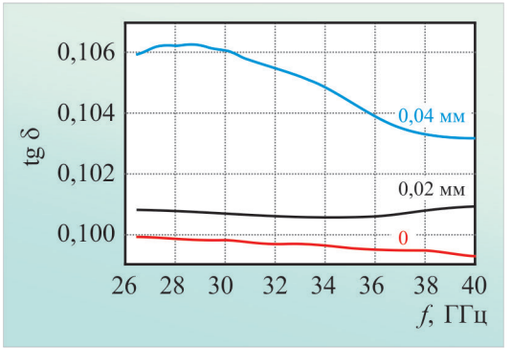


Рис. 7. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 10$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$)

Рассмотрим результаты расчета для материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 = 25$, $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$. Длина образца равнялась 16,57 мм. На рис. 8 и 9 показаны вычисленные частотные зависимости

1(540).indd 29 05.03.2019 8:12:27

для ε_1 и tgδ при различной ширине воздушного зазора. Здесь также, как и в предыдущем случае для $\varepsilon_1 = 10$, при ненулевом воздушном зазоре вычисленные значения для ε_1 меньше исходного значения, а для tgδ больше. Однако влияние воздушного зазора в данном случае сложнее. Так, при увеличении воздушного зазора до 0,02 мм растет погрешность в определении как ε_1, так и tgδ. При дальнейшем увеличении ширины воздушного зазора до 0,04 мм значения ε_1 и tgδ практически не изменяются. Этот наблюдаемый эффект приводит к тому, что в этом случае максимальная погрешность в определении ε_1 не превышает 3 %, а погрешность в определении tgδ увеличилась до 14 %.

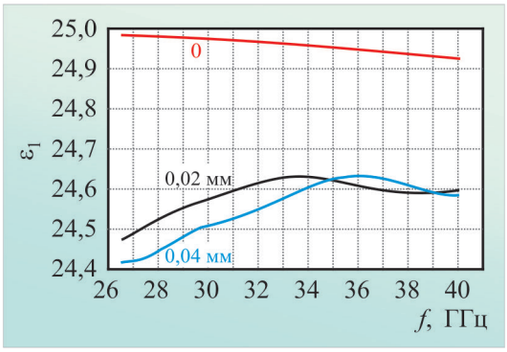


Рис. 8. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 25$; $tg\delta = 0{,}1$)

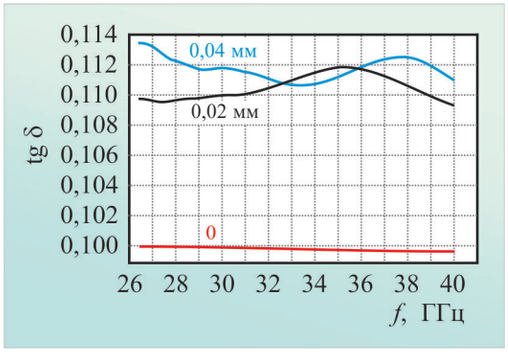


Рис. 9. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различной ширине воздушного зазора между широкой стенкой волновода и образцом ($\varepsilon_1 = 25$; $tg\delta = 0{,}1$)

Теперь разберем ***вторую методическую погрешность*** при определении комплексной диэлектрической проницаемости волноводным методом. Эта погрешность связана с неточностью задания положения границ *1* и *2* образца. Как показали наши оценки, основной вклад вносит ошибка при определении положения границы *1*, т. е. фактически неточность задания размера L_1 (см. рис. 1). Последовательность расчетов выглядела так:

1) задавались *исходные* параметры ε_1 и tgδ материала и, как и в предыдущем случае, с помощью трехмерного электродинамического программного пакета рассчитывались комплексные коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{21} на границах образца *1* и *2* (воздушный зазор между образцом и стенками волновода отсутствовал);

1(540).indd 30 05.03.2019 8:12:27

2) вносилась неточность в задание границы *1*: её положение смещалось влево на величину L_1; положение границы *2* не менялось (т. е. $L_2 = 0$). Определялись новые коэффициенты отражения и прохождения: $S'_{11} = S_{11}e^{-2\gamma_1 L_1}$ и $S'_{21} = S_{21}e^{-2\gamma_1 L_1}$;

3) используя полученные данные для новых коэффициентов отражения и прохождения , по вышеприведенным формулам для каждого случая определялись *свои* значения ε_1 и tgδ;

4) проводилось сравнение *полученных* в пункте 3 значений ε_1 и tgδ с *исходными* параметрами материала, заданными в пункте 1.

Рассмотрим полученные данные для сантиметрового диапазона в полосе частот от 8,2 до 12,4 ГГц (рис. 10…13). Проанализируем полученные результаты для исследуемого материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 = 10$, tgδ = 0,2. Длина образца равнялась 44 мм. На рис. 10 и 11 показаны частотные зависимости *вычисленных* значений действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца. Как видно из графиков, во всей полосе частот вычисленные значения ε_1 и tgδ превышают исходные. При увеличении размера L_1 от 0 до 1,0 мм наблюдается рост погрешности до 3 % для ε_1 и 6 % для tgδ.

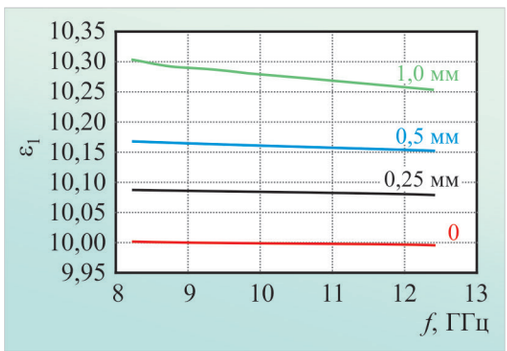


Рис. 10. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца ($\varepsilon_1 = 10$; tgδ = 0,2)

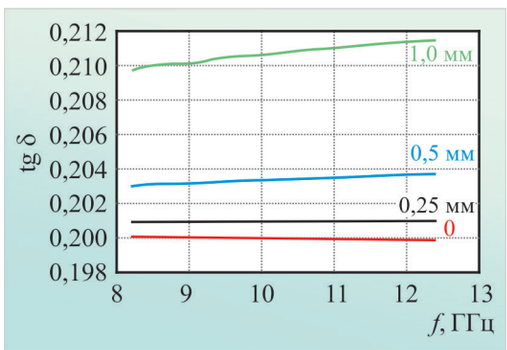


Рис. 11. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца ($\varepsilon_1 = 10$; tgδ = 0,2)

1(540).indd 31 05.03.2019 8:12:28

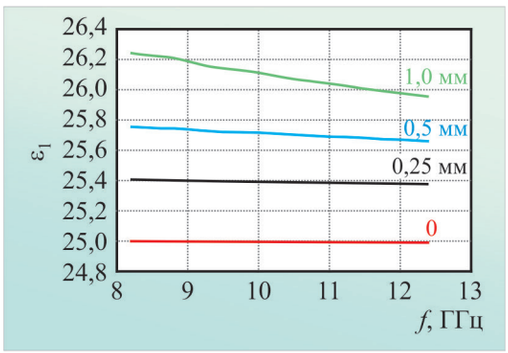


Рис. 12. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца ($\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$)

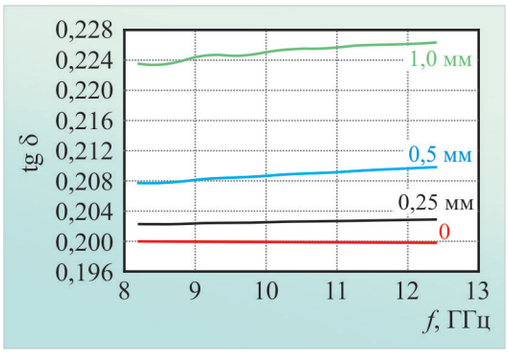


Рис. 13. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца ($\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$)

Теперь проанализируем результаты эксперимента для материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 = 25$, $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$ (см. рис. 12, 13). Длина образца равнялась 25,40 мм. Здесь также во всей полосе частот вычисленные значения ε_1 и tgδ превышают исходные. При увеличении смещения L_1 от 0 до 1,0 мм погрешность возрастает до 5 % для ε_1 и 13 % для tgδ.

Проанализируем полученные данные для миллиметрового диапазона. Частотные зависимости для ε_1 и tgδ при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца для материала с исходными характеристиками $\varepsilon_1 = 10$ и $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$ показаны на рис. 14, 15. Длина образца составляла 29,05 мм. Аналогичные зависимости для материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 =$ $= 25$ и $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$ приведены на рис. 16, 17. Длина образца в этом случае равнялась 16,57 мм. Как видно из графиков, здесь конечная проводимость материала стенок волновода сильнее, чем в сантиметровом диапазоне, влияет на полученные результаты: так, при $L_1 = 0$ отклонение вычисленных значений от исходных становится более заметным. Мы также наблюдаем, что при $L_1 > 0$ вычисленные значения ε_1 и tgδ превышают исходные. Однако в миллиметровом диапазоне ошибки в определении значений комплексных коэффициентов отражения и прохождения неоднозначно влияют на конечные результаты. Например, при увеличении L_1 от 0 до 0,5 мм достаточно заметно растет погрешность в определении как ε_1, так и tgδ. При дальнейшем увеличении L_1 до 1 мм рост погрешности в определении ε_1 замедляется, а для материала с исходным значением $\varepsilon_1 = 25$ на частотах выше 33,5 ГГц вычисленные значения ε_1 при $L_1 = 1$ мм становятся даже меньше, чем при $L_1 = 0{,}5$ мм (см. рис. 16). Существенным отличием по срав-

1(540).indd 32 05.03.2019 8:12:28

нению с сантиметровым диапазоном является резкое увеличение погрешности при определении tgδ: так, при L_1 = 1 мм для материала с ε_1 = 10 её максимальное значение составляет 22 % и возрастает до 42 % при ε_1 = 25. Величина погрешности при определении ε_1 находится на том же уровне, что и в сантиметровом диапазоне, и её максимальное значение равняется 3 % для материала с исходным значением ε_1 = 10 и 4 % для ε_1 = 25.

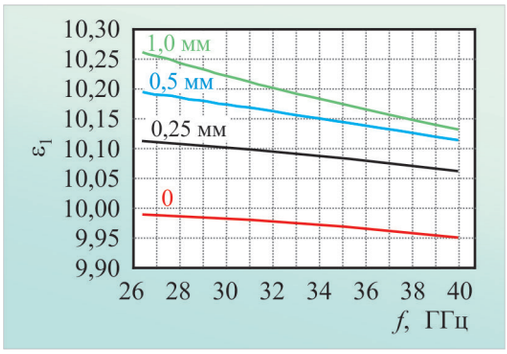


Рис. 14. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца (ε_1 = 10; tgδ = 0,1)

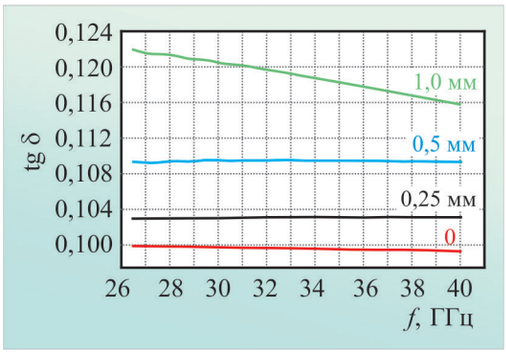


Рис. 15. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца (ε_1 = 10; tgδ = 0,1)

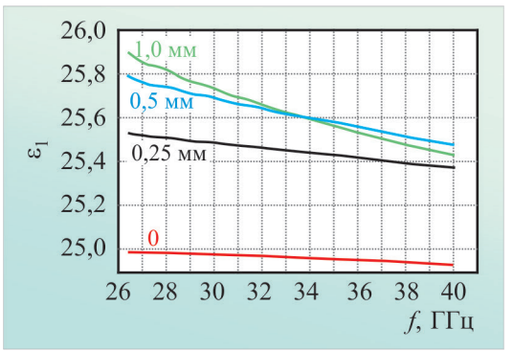


Рис. 16. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца (ε_1 = 25; tgδ = 0,1)

1(540).indd 33 05.03.2019 8:12:28

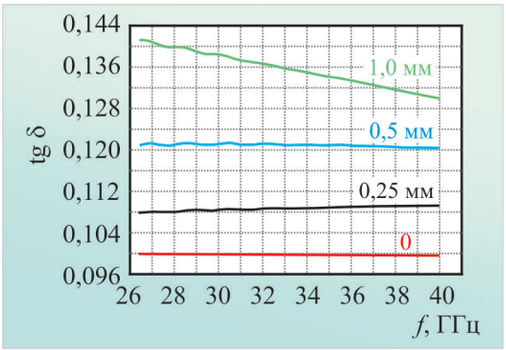


Рис. 17. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при различных неточностях L_1 задания положения границы *1* образца ($\varepsilon_1 = 25$; tgδ = 0,1)

4. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ, СВЯЗАННЫХ С НЕТОЧНОСТЬЮ ЗАДАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ ОБРАЗЦА И НАЛИЧИЕМ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОБРАЗЦОМ И ШИРОКОЙ СТЕНКОЙ ВОЛНОВОДА, ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Для расширения возможностей измерений волноводного метода необходимо стремиться уменьшить указанные методические погрешности. Как показал анализ результатов проведенного численного эксперимента, для уменьшения погрешности, связанной с неточностью задания положения границ *1* и *2* образца (см. рис. 1), желательно использовать секции – фланцы, длина которых точно равнялась бы длине *l* образца. В этом случае ошибки, связанные с определением размеров L_1 и L_2, будут минимальными. В том случае, когда длина измерительной секции превышает размер *l* образца, необходимо размещать образец так, чтобы его граница *1* совпадала с положением порта *1* (см. рис. 1), а размер L_2 был минимально возможным.

Воздушный зазор между образцом и широкой стенкой волновода присутствует практически всегда. Для уменьшения погрешности измерений, связанной с наличием воздушного зазора, существует две возможности. Первая возможность связана с заполнением этого зазора диэлектрической пастой, диэлектрические параметры которой были бы близки к диэлектрическим характеристикам исследуемого материала. Но на практике это реализовать сложно, особенно для материалов с большой действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости. Вторая возможность связана с заполнением зазора материалом с хорошей электропроводностью. Мы детально исследовали эту возможность. Расчет проводился в два этапа. На первом этапе металлический выступ волновода полностью заполнял воздушный зазор (рис. 18). В этом случае погрешность измерений существенно уменьшилась. На втором этапе зазор заполнялся реально существующей пастой на основе серебра, удельная проводимость которой составляет $2 \cdot 10^6$ См/м. Полученные результаты для обоих случаев представлены на рис. 19…26 (на всех графиках красная линия соответствует нулевому воздушному зазору; черная – для металлического выступа; синяя – для случая заполнения воздушного зазора указанной пастой). Анализ этих зависимостей показывает, что максимальная погрешность при заполненном зазоре становится меньше 1 % при определении как ε_1, так и tgδ. Для большей наглядности проведем сравнение результатов расчетов при наличии воздушного зазора и при заполнении его проводящей пастой. Так, в миллиметровом диапазоне для материала с исход-

1(540).indd 34 05.03.2019 8:12:28

ными параметрами $\varepsilon_1 = 10$, $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$ при наличии воздушного зазора шириной 0,04 мм погрешность при определении ε_1 составляла 5 и 7 % при определении $\mathrm{tg}\delta$. В случае же заполнения этого зазора указанной пастой на основе серебра она стала меньше 0,4 % как для ε_1, так и для $\mathrm{tg}\delta$ (см. рис. 6, 7 и 23, 24).

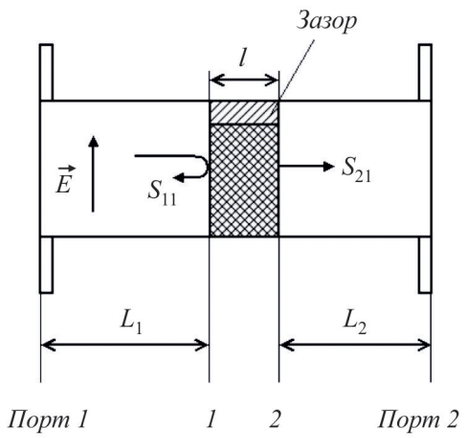


Рис. 18. Волноводная секция с исследуемым образцом в случае заполнения воздушного зазора материалом с хорошей электропроводностью

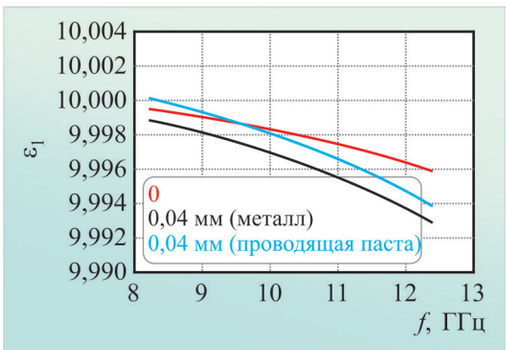


Рис. 19. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты f при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 10$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$

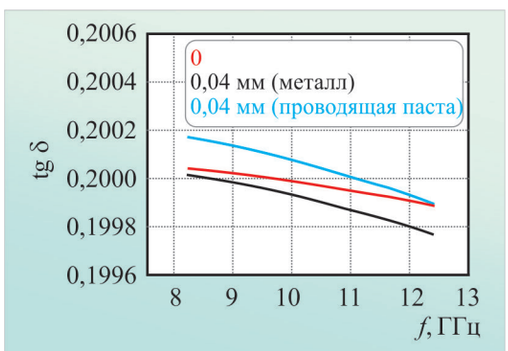


Рис. 20. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$ от частоты f при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 10$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$

1(540).indd 35 05.03.2019 8:12:29

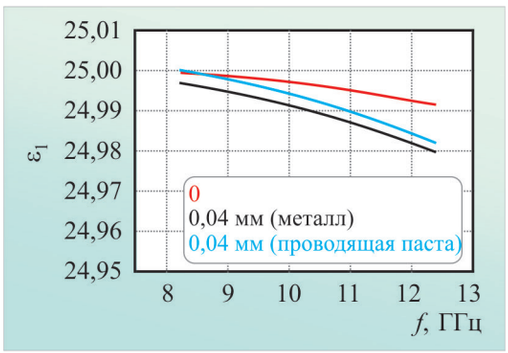


Рис. 21. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты f при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$

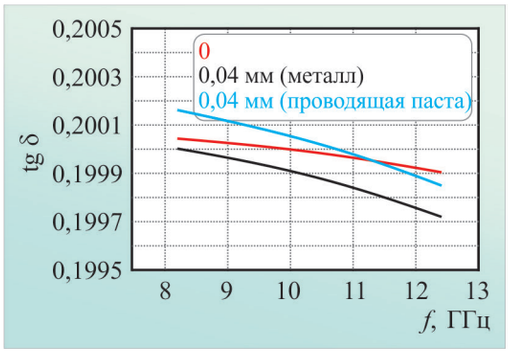


Рис. 22. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$ от частоты f при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 25$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}2$

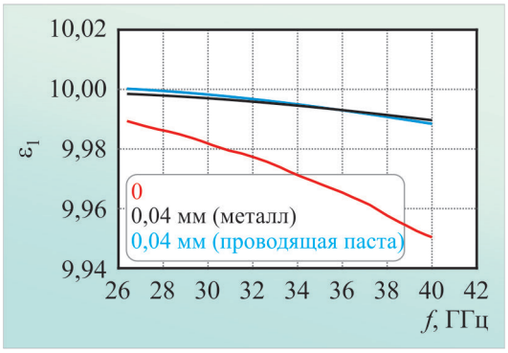


Рис. 23. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты f при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 10$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$

1(540).indd 36 05.03.2019 8:12:29

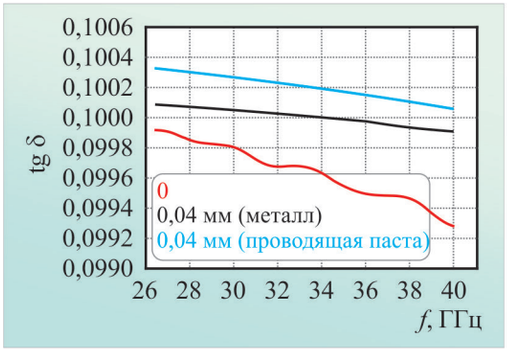


Рис. 24. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 10$; $tg\delta = 0{,}1$

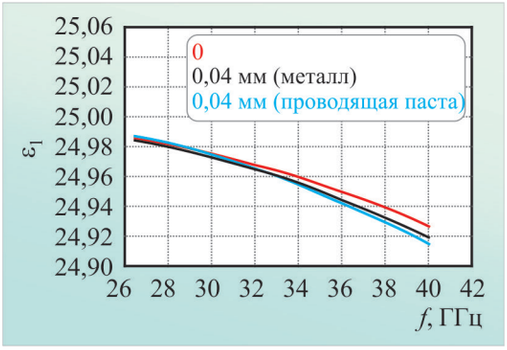


Рис. 25. Зависимости действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости от частоты *f* при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 25$; $tg\delta = 0{,}1$

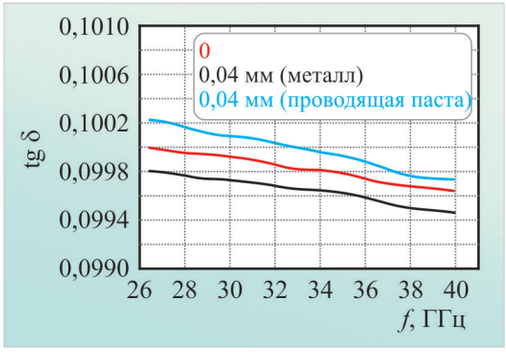


Рис. 26. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от частоты *f* при заполнении зазора величиной 0,04 мм металлом (черная кривая) и электропроводящей пастой (синяя кривая). Исходные параметры исследуемого материала: $\varepsilon_1 = 25$; $tg\delta = 0{,}1$

1(540).indd 37 05.03.2019 8:12:29

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты численного эксперимента, которые позволяют существенно расширить диапазон возможностей волноводного метода при измерении комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Расчеты проводились в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для материалов со значением действительной составляющей ε_1 комплексной диэлектрической проницаемости 10 и 25 и тангенсами угла диэлектрических потерь tgδ, равными 0,1 и 0,2. Материалы с такими значениями тангенса угла диэлектрических потерь обычно используются в качестве поглотителей энергии. В рассмотренной волноводной методике проведена оценка двух основных методических погрешностей, которые влияют на точность измерений и связаны с ошибкой при определении положения границ образца в измерительной секции и наличием воздушного зазора между образцом и широкой стенкой волновода. Величина этих погрешностей может достигать 40 % и более при определении tgδ. Показаны способы уменьшения этих погрешностей. Так, для уменьшения погрешности, связанной с неточностью задания положения границ образца в измерительной секции, предлагается использовать измерительные секции – фланцы, длина которых равнялась бы длине образца. Для уменьшения величины второй погрешности, которая обусловлена наличием воздушного промежутка между образцом и широкой стенкой волновода, предлагается заполнять этот промежуток электропроводящей пастой. Проведенные расчеты показали, что при заполнении воздушного промежутка пастой на основе серебра с удельной проводимостью $2 \cdot 10^6$ См/м максимальная погрешность заметно снижается и становится менее 1 % при определении как ε_1, так и tgδ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Брандт, А. А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.

2. **Chen, L. F.** Microwave electronics: measurement and materials characterization / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K.Varadan. – John Wiley & Sons, Ltd., 2004.

3. **Nicolson, A. M.** Measurements of the intrinsic properties of materials by timedomain techniques / A. M. Nicolson and G. F. Ross // IEEE Trans. – 1970. – Vol. IM-19, No 4. – P. 377 – 382.

4. **Weir, W. B.** Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies / W. B. Weir // Proceedings of the IEEE. – 1974. – Vol. 62, No 1. – P. 33 – 36.

5. **Пархоменко, М. П.** Улучшенный резонаторный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов / М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, Н. А. Федосеев, И. С. Еремин, В. М. Колесникова, Д. А. Ковтыков // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 7. – С. 651 – 656.

6. **Parkhomenko, M. P.** Measurement of the complex permittivity of polycrystalline diamond by the resonator method in the millimeter range / M. P. Parkhomenko, D. S. Kalenov, N. A. Fedoseev, I. S. Eremin, V. G. Ralchenko, A. P. Bolshakov, E. E. Ashkinazi, A. F. Popovich, V. K. Balla and A. K. Mallik // Phys. Wave Phenom. – 2015. – Vol. 23, No 3. – P. 202 – 208.

7. **Пархоменко, М. П.** Исследование диэлектрических свойств крови и разработка резонаторного метода для неинвазивного измерения содержания глюкозы в крови / М. П. Пархоменко, С. В. Савельев, С. В. Фон Гратовски // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 3. – С. 276 – 291.

8. **Лебедев, И. В.** Техника и приборы СВЧ. Т. 1 / И. В. Лебедев. – М.: Высш. шк., 1970. – 440 с.

Статья поступила 25 октября 2018 г.

1(540).indd 38 05.03.2019 8:12:29

УДК 621.38.002

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЧ-КОМПОНЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Н. С. Данилин[1], Д. М. Димитров[2], М. Д. Димитров[2], С. А. Волков[1], И. Ю. Булаев[1]

[1]*АО «Российские космические системы», г. Москва*

[2]*ООО «Космос Комплект», г. Москва*

Аддитивное производство, обычно применяемое для создания механических изделий, может быть комбинировано с некоторыми современными технологиями, что позволяет разрабатывать и выпускать 3*D*-системы в корпусе при значительном сокращении затрат и сроков реализации проектов. В работе рассмотрен подход к созданию 3*D*-подложек для расположения полупроводниковых кристаллов и других компонентов системы в корпусе с применением 3*D*-принтеров, которые работают с разными порошками и токопроводящими аэрозолями. Приведены некоторые результаты по пилотному применению процесса Aerosol Jet Printing в ООО «Космос Комплект».

КС: технология, аддитивное производство, 3D-система в корпусе, 3D-принтер, 3D-подложка

CREATING ELECTRONIC RF-COMPONENTS USING THE ADDITIVE TECHNOLOGY

N. S. Danilin[1], D. M. Dimitrov[2], M. D. Dimitrov[2], S. A. Volkov[1], I. Yu. Bulaev[1]

[1]*JSC «Russian Space Systems», Moscow*

[2]*LLC «Kosmos Complect», Moscow*

Additive production commonly used to create mechanical products, can be combined with some modern technologies, which allows developing and producing packaged 3*D* systems with a significant reduction in cost and time of the project realization. The paper considers an approach to creating 3*D* substrates for arranging semiconductor chips and other system components in a package using 3*D* printers which work with different powders and conductive aerosols. Some results are given on pilot application of the Aerosol Jet Printing process in LLC «Kosmos Complect».

Keywords: technology, additive production, 3D system in a package, 3D printer, 3D substrate

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к системам в корпусе помимо классических: повышенная функциональность в единице объема, минимальное энергопотребление и редуцированные массогабаритные характеристики – расширены новыми, такими, как применение оптико-электронных подсистем, МЭМС, модулей, работающих с радиочастотами, и др. [1]. Анализы этой ситуации показали, что подложка такого класса систем в корпусе должна быть выполнена в формате 3*D* и при произвольном расположении отдельных комплектующих системы в пространстве подложки. Этот анализ непосредственно приводит к быстро нарастающему рынку аддитивного производства, и это направление известно как 3*D*-Molded Interconnect Devices [2, 3].

1(540).indd 39 05.03.2019 8:12:29

Аддитивное производство 3*D*-систем в указанном контексте предполагает процесс послойного создания конечного изделия с встраиванием в нужных слоях соответствующих комплектующих изделий или функциональных узлов. При этом токопроводящие связи между ними также должны быть проложены во время этого процесса (рис. 1).

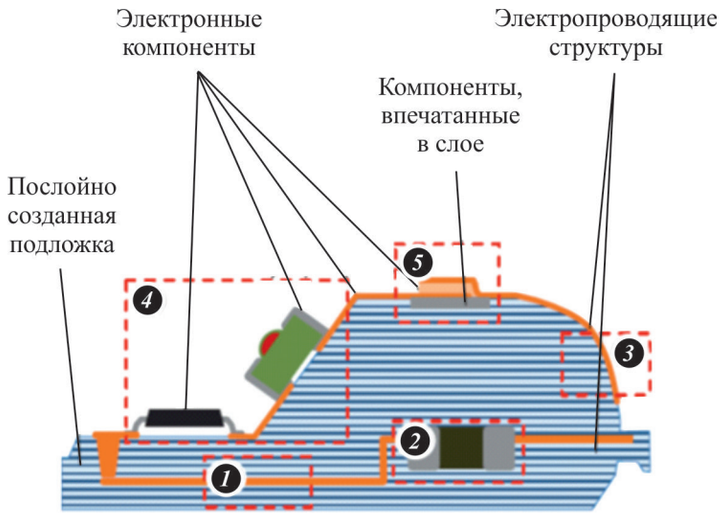


Рис. 1. 3*D*-система в корпусе, реализованная на базе аддитивного процесса:
1 – встроенный токопроводящий тракт; *2* – встроенный электронный узел; *3* – печатный токопроводящий тракт; *4* – SMT-компонент; *5* – компонент, впечатанный в слой

2. ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ 3*D*-СИСТЕМ В КОРПУСЕ НА БАЗЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Процесс включает несколько основных этапов:

1. 3*D*-печать с применением порошка.
2. Встраивание комплектующих электронных компонентов и узлов.
3. Создание токопроводящей инфраструктуры.
4. Установка и электрическое соединение SMT-компонентов.
5. Печать электронных компонентов.

На рис. 2 показана установка для 3*D*-печати с применением порошковых материалов.

В пилотном проекте ООО «Космос Комплект» был использован универсальный порошковый 3*D*-принтер Voxeljet (см. рис. 2). Рабочая камера принтера имеет размеры 250×110×95 мм, что определяет и ограничения габаритов создаваемых изделий. Печатающая головка, использованная в экспериментах, – Spectra SL128.

Схема процесса 3*D*-печати представлена на рис. 3, а схема встраивания электронных комплектующих – на рис. 4.

На рис. 5 показан типичный подход для реализации токопроводящих структур.

В результате эксперимента были получены с помощью 400-мкм диспенсера токопроводящие трассы с шириной 400 мкм, высотой 200 мкм и удельным сопротивлением 0,1 Ом/м.

В процессе изготовления качественных 3*D*-систем в корпусе существенное значение обретает аэрозольная печать (Aerosol Jet Printing) [4].

Схематично процесс представлен на рис. 6.

1(540).indd 40 05.03.2019 8:12:30

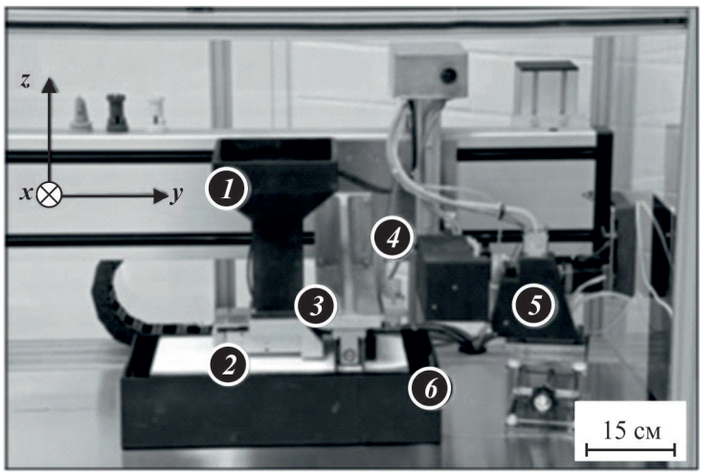


Рис. 2. Установка для 3*D*-печати с применением порошковых материалов:
1 – порошковый резервуар; *2* – платформа; *3* – устройство для подачи порошка; *4* – устройство для впрыска суспензии; *5* – печатающая головка; *6* – устройство учета переполнения уровня порошка

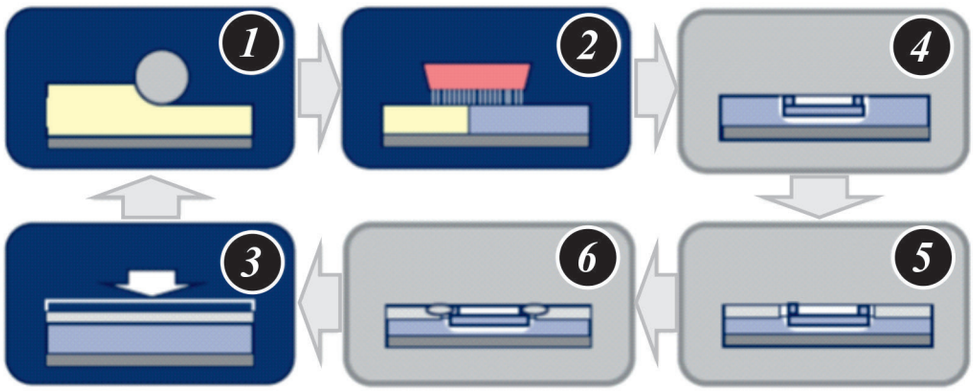


Рис. 3. Схема процесса 3*D*-печати:
1…3 – печать слоев изделия; *4* – интеграция электронных компонентов; *5* – создание токопроводящих структур; *6* – соединение с токопроводящими трассами

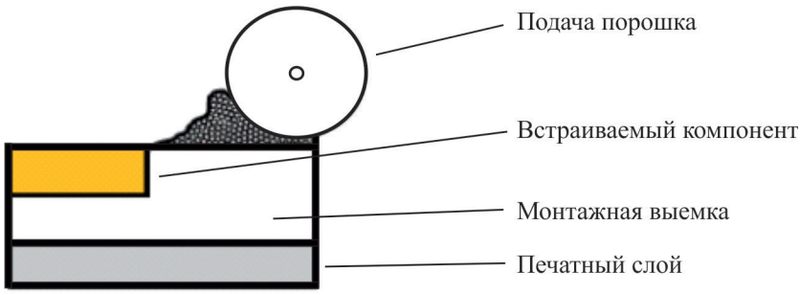


Рис. 4. Встраивание электронных комплектующих

1(540).indd 41 05.03.2019 8:12:30

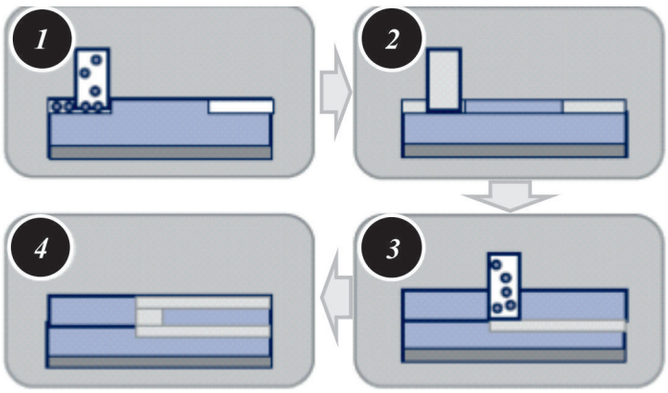


Рис. 5. Подход для реализации токопроводящих структур:
1 – создание каналов для трактов; *2* – заполнение каналов изотропным проводящим адгезионным материалом; *3* – создание выемок; *4* – заполнение выемок и создание другого токопроводящего тракта

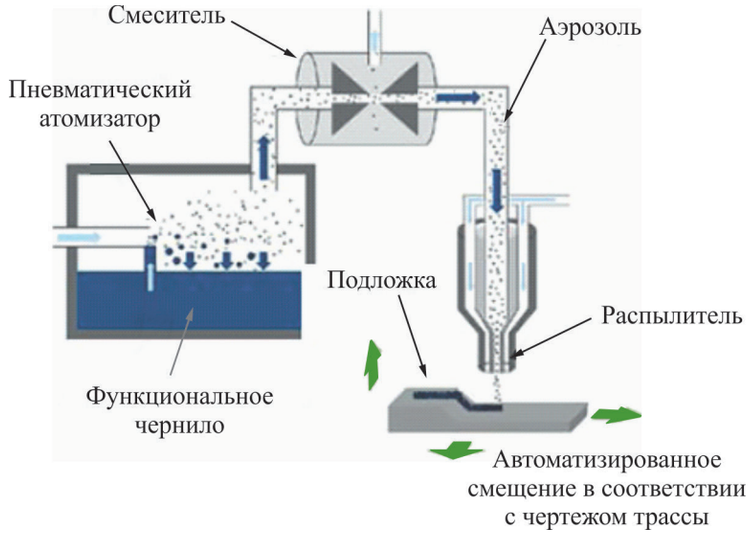


Рис. 6. Схема процесса аэрозольной печати

В зависимости от типа распылителя и аэрозоля можно формировать трассы в рамках от менее 100 мкм до 10 мм. Для нужд пилотного проекта была использована Aerosol Jet Printing система Neotech Service MTP.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения пилотного проекта ООО «Космос Комплект» в области разработки и создания 3*D*-систем в корпусе на базе порошкового 3*D*-принтера были получены следующие результаты:

– успешно апробирована полная технологическая схема создания изделия с помощью 3*D* порошковой печати и аэрозольного нанесения токопроводящих соединений;

– апробация показала, что возможно создавать сложные 3*D*-изделия с произвольным пространственным расположением компонентов и токопроводящих соединений;

1(540).indd 42 05.03.2019 8:12:30

– в качестве инженерного образца был реализован датчик распознавания цвета, выполненный в виде куба со стороной 12 мм, в котором на четырех сторонах расположены бескорпусные ИС, а дискретные компоненты – внутри куба. В кубе были предусмотрены шесть каналов для отвода тепла. Токопроводящие соединения были частично расположены по сторонам куба и внутри его;

– проведенные в лабораторных условиях функциональные испытания подтвердили его 100-процентную работоспособность;

– в РФ также создаются соответствующие стандарты в области аддитивных технологий [5, 6], что соответствует значимости этого инновационного направления для отечественной электроники.

Последующая апробация этой технологии связана с механическими и климатическими испытаниями полученных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин, Н. С.** Система искусственного интеллекта на борту космических аппаратов / Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3(530). – С. 88 – 91.

2. **Zach, M.** Innovative loesungen zur steigerung der bauteil bei additive fertigungsferfahren, innovative solutions for increasing the quality of components of additive manufacturing process / M. Zach, I. Glasschroeder, T. Krol. – Munich: Utz Verlag, 2011.

3. **Gerhard, A.** Generative fertigungsferfahren, rapid prototyping-rapid tooling-rapid manufacturing / A. Gerhard. – Munich: Utz Verlag, 2012.

4. **Miettinen, J.** Inkjet printed system-in-package design and manufacturing / J. Miettinen, V. Pekkanen, K. Kaija // Microelectronics Journal. – 2008.

5. **ГОСТ Р.** Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. – 1.12.2017.

6. **ГОСТ Р.** Изделия, полученные методами аддитивных технологических процессов (проект национального стандарта).

Статья поступила 21 января 2019 г.

НОВЫЕ КНИГИ

БУХАЛЁВ В. А., СКРЫННИКОВ А. А., БОЛДИНОВ В. А. **Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 192 с.: ил.

В монографии изложены основные принципы, методы и алгоритмы построения систем распознавания, оценивания и управления, повышающих устойчивость систем наведения беспилотных летательных аппаратов к информационному, маневренному и поражающему противодействиям со стороны воздушных, наземных и морских объектов.

Методы синтеза алгоритмов основаны на теории систем со случайной скачкообразной структурой с использованием марковских процессов, байесовской обработки информации, динамического программирования и игрового минимаксного управления.

Книга адресована научным сотрудникам, инженерам, аспирантам и учащимся вузов, специализирующимся в области информационно-управляющих систем.

1(540).indd 43 05.03.2019 8:12:31

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО. МОДЕЛЬ С ЗАДАННОЙ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ

В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Приведена методика моделирования секций циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) с заданной полосой частот. Расчёт модели имеет две ступени: аналитическую и численную. Быстрый аналитический расчёт упрощённо определяет секцию как *LCR*-модель двух- либо трёхзвенного полосового фильтра, в котором сопротивление электронного луча с циклотронными колебаниями представлено последовательным резонатором крайнего звена. Элементы модели, ток луча и устанавливающее скорость луча напряжение определяются допустимым значением КСВН в пределах заданной полосы частот, характеристическим сопротивлением параллельного резонатора модели, длиной ламелей, величиной зазора между ними. Величина КСВН в диапазоне полосы пропускания, с учётом требования малых потерь сигнала и долгого срока службы ЦЗУ, рекомендована в пределах σ_{max} = 1,2…1,3. Упрощённая модель служит базой для численного расчёта более точной модели с определением сопротивления луча на основе известной работы Смита и Шульмана. Методика моделирования секций ЦЗУ с заданной полосой частот изложена на примере модели, полоса частот которой двукратно превышает полосу выпускаемых ЦЗУ. Результаты расчёта моделей с заданной полосой частот служат основой последующего 3*D*-моделирования и построения секций ЦЗУ.

КС: циклотронное защитное устройство, секция, модель, полоса пропускания, расчет

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICE. MODEL WITH A GIVEN PASS BAND

V. G. Kalina, Yu. A. Budzinsky, S. V. Bykovsky

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

A technique of modeling sections of a cyclotron protective device (CPD) with a preset frequency range is given. The calculation of the model has two stages: analytical and numerical. A fast analytical calculation in a simple way defines the section as *LCR*-model of a two- or three-stage band pass filter in which the resistance of an electron beam with cyclotron oscillations is represented by a series resonator of the last stage. The elements of the model, the beam current and the voltage setting the speed of the beam are determined by the allowable VSWR value within the given frequency band, the characteristic resistance of the model, the length of the lamellae, the gap between them. The value of VSWR is recommended within σ_{max} = 1.2…1.3 in the pass band taking into account the requirement of low signal loss and CPD long service life. The simplified model serves as the basis for the numerical calculation of a more accurate model with defining the beam resistance based on the well-known work of Smith and Schulman. The technique of modeling the CPD sections with a given frequency band is presented on the example of the model, the frequency band of which is twice as large as the band of CPDs produced. The results of calculation of the models with a given frequency band often serve as the basis for the subsequent 3*D*-modeling and construction of CPD sections.

Keywords: cyclotron protective device, section, model, pass band, calculation

1(540).indd 44 05.03.2019 8:12:31

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ), отличающиеся исключительным быстродействием, низким уровнем шума и высокой допустимой мощностью, служат входным звеном приёмных устройств радиолокаторов дальнего обнаружения.

Одним из основных требований к ЦЗУ при модернизации и разработке приёмных устройств радиолокаторов является обеспечение необходимой полосы частот.

ЦЗУ содержит две секции – входную и выходную [1, 2]. Обе секции подобны полосовому фильтру с ограниченной полосой пропускания [3].

Структура и элементы модели секции, рассматриваемой как фильтр, определяются полосой пропускания по допустимому значению КСВН со стороны внешнего тракта, центральной частотой полосы пропускания, характеристическим сопротивлением объёмного резонатора, частотной характеристикой сопротивления электронного луча.

Предлагаемый расчёт модели содержит два этапа.

В основе лежит аналитический расчёт опорной модели секции ЦЗУ с заданной полосой пропускания как двух- либо трёхзвенного полосового *LCR*-фильтра, в котором крайнее звено, сопротивление луча с циклотронными колебаниями, упрощённо представлено сопротивлением последовательного *LCR*-резонатора.

В ходе расчёта определяется возможность построения двух- либо трёхзвенной секции ЦЗУ с заданной полосой пропускания при допустимой величине тока луча и определяющего скорость дрейфа луча напряжения между катодом и резонатором секции (далее – напряжения на резонаторе). Расчёт основан на выборе доступных значений сопротивления электронного луча при циклотронном резонансе и характеристического сопротивления объёмного резонатора в условиях ограниченной величины КСВН секции, с выбором предпочтительной длины ламелей и зазора между ними.

Расчётные соотношения относятся к моделям с остро пульсирующей частотной характеристикой КСВН [3], затухание сигнала в элементах секции не учтено.

Опорная *LCR*-модель служит основой численного расчёта модели фильтра с более точной аппроксимацией сопротивления электронного луча с циклотронными колебаниями на основе работы [4].

Численный расчёт уточняет значения напряжения на резонаторе, тока луча и приведенного к ламелям резонатора сопротивления внешней нагрузки, при которых обеспечивается необходимая полоса пропускания секции по заданному уровню КСВН.

Методика расчёта опорной и уточнённой модели секции показана на примере построения модели, полоса пропускания которой двукратно превышает полосу пропускания известных видов ЦЗУ.

Результаты расчёта *LCR*-моделей с заданной полосой пропускания служат основой последующего конструирования объёмных моделей и разработки образцов секций ЦЗУ.

2. ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛЕЙ

Структура двух- и трёхзвенной *LCR*-модели ЦЗУ с заданной полосой пропускания представлена на рис. 1. Элементы моделей определены на основе соотношений, непосредственно вытекающих из формул работы [3].

Крайнее звено структуры определяет сопротивление электронного луча с циклотронными

1(540).indd 45 05.03.2019 8:12:31

колебаниями, шунтирующее ламели секции. Звено представлено тремя элементами последовательного резонатора: активным сопротивлением R_c, индуктивностью L_c и ёмкостью C_c.

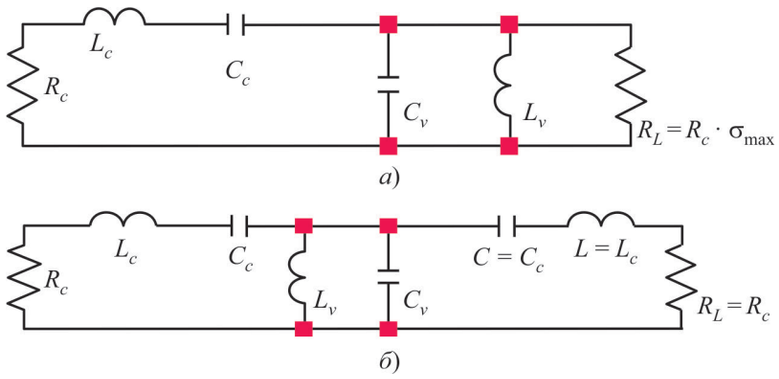


Рис.1. Структура двух- (*а*) и трёхзвенной (*б*) *LCR*-модели ЦЗУ

Приведенное к ламелям резонатора сопротивление внешней нагрузки составляет $R_L = \sigma_{max} R_c$ для двухзвенной модели и $R_L = R_c$ для трёхзвенной, где σ_{max} – максимальное значение КСВН в пределах полосы пропускания, определяемое заданием на разработку ЦЗУ.

Для модели с центральной частотой f_0, полосой пропускания ΔF, характеристическим сопротивлением параллельного (в 3*D*-исполнении – объёмного) резонатора ρ_v элементы цепи имитации сопротивления луча R_c, L_c, C_c, а также характеристическое сопротивление последовательной цепи фильтра ρ_c определяются выражениями:

$$R_c = 2\pi\delta\rho_v \frac{f_0}{\Delta F}, \tag{1}$$

$$\rho_c = \alpha\delta\rho_v \left(\frac{2\pi f_0}{\Delta F}\right)^2, \tag{2}$$

$$L_c = 2\pi\alpha\delta\rho_v \frac{f_0}{(\Delta F)^2}, \tag{3}$$

$$C_c = \frac{(\Delta F)^2}{(2\pi f_0)^3 \alpha\delta\rho_v}. \tag{4}$$

Индуктивность и ёмкость параллельного резонатора с выбранным сопротивлением ρ_v определим выражениями:

$$L_v = \frac{\rho_v}{2\pi f_0}, \quad C_v = \frac{1}{2\pi f_0 \rho_v}. \tag{5}$$

Величина коэффициентов α и δ определяется числом звеньев модели и необходимым значением КСВН σ_{max} (Приложение 1).

Характеристическое сопротивление параллельного резонатора ρ_v, как следует из выражений (1)…(5), является определяющим параметром *LCR*-модели, а также последующей 3*D*-модели и образцов секции. Величина сопротивления ρ_v определяется конструкцией объёмного резонатора секции ЦЗУ, а также в значительной мере размерами ламелей и зазора между ними. Методики измерения сопротивления объёмного резонатора секции описаны в работе [5].

1(540).indd 46 05.03.2019 8:12:31

3. РАСЧЁТ ТОКА ЛУЧА И НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЗОНАТОРЕ

Необходимые значения тока луча и напряжения на резонаторе определяются условиями построения *LCR*-модели и последующей 3*D*-модели секции – характеристическим сопротивлением резонатора ρ_v, длиной ламелей *l* и зазором *d* между ними. Условия выбора длины ламелей и зазора между ними приведены в работе [6].

Ток электронного луча и напряжение на резонаторе модели с полосой пропускания, заданной по допустимой величине КСВН σ_{max}, определяются на основе работы [3] следующими выражениями:

$$I = \frac{4}{\pi}\left(\frac{k_1 d}{\alpha}\right)^2 \frac{1}{\delta\rho_v}\frac{(\Delta F)^3}{f_0}\ (\text{А}), \tag{6}$$

$$V_0 = \left(\frac{k_1 l}{\alpha}\right)^2 \Delta F^2\ (\text{В}), \tag{7}$$

где $k_1 = 2{,}6835\cdot10^{-7}$.

Напомним, что вне зависимости от формы поперечного сечения луча, включая луч ленточной формы, определение величины тока относится к току, текущему между ламелями, в отличие от измеряемого на практике тока катода. Действующий потенциал напряжения на резонаторе отличается от измеренного приборами за счёт контактной разности потенциалов между эмитирующим покрытием катода и резонатором.

Оценим зависимость необходимых значений тока и напряжения на резонаторе от условий построения модели с заданной полосой пропускания.

Величина напряжения на резонаторе пропорциональна квадрату длины ламелей и квадрату полосы пропускания.

Необходимый ток луча пропорционален квадрату величины зазора и кубу заданной полосы частот.

Необходимый ток луча тем меньше, чем выше сопротивление параллельного резонатора: ток луча обратно пропорционален сопротивлению резонатора.

При большой полосе пропускания необходимое значение тока луча может быть труднодостижимым, особенно для двухзвенной модели: при заданном сечении луча высокое значение тока требует повышенной удельной эмиссии катода, что ограничивает срок службы ЦЗУ.

Пропорциональное уменьшение в γ раз величины зазора *d* и длины ламелей *l*, с сохранением отношения *d*/*l* = const и значения центральной частоты f_0, а также сопротивления резонатора ρ_v, позволяет уменьшить как ток луча, так и напряжение на резонаторе в γ^2 раз.

Необходимое сопротивление луча R_c и приведенное к ламелям резонатора сопротивление внешней нагрузки двухзвенной модели $R_L = R_c\sigma_{max}$ или $R_L = R_c$ трёхзвенной модели при этом сохраняются неизменными:

$$R_c = 2\pi\delta\rho_v\frac{f_0}{\Delta F} = 8\frac{V_0}{I_0}\left(\frac{d}{l}\right)^2.$$

Остаётся неизменной также частотная характеристика *LCR*-модели.

4. ОЦЕНКА ДОПУСТИМОЙ ПУЛЬСАЦИИ КСВН

Величина необходимого сопротивления циклотронных колебаний, тока и напряжения на резо-

1(540).indd 47 05.03.2019 8:12:31

наторе при выбранной полосе пропускания ΔF существенно зависит от принятого допуска на величину КСВН σ_{max}.

С целью уменьшения потерь сигнала на отражение значение σ_{max} должно быть минимальным. Вместе с тем по мере уменьшения допустимой пульсации КСВН σ_{max} ток луча I_0, см. формулу (6), возрастает пропорционально увеличению коэффициента $1/\alpha^2\delta$, как показано на рис. 2 и 3.

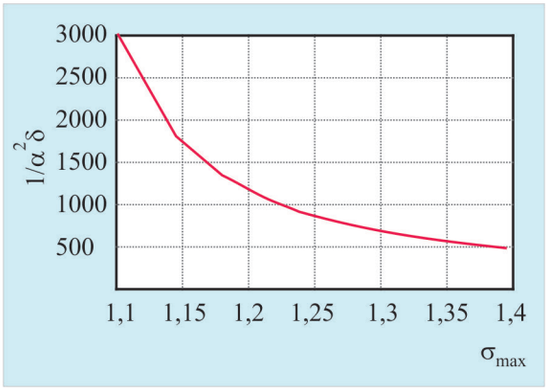


Рис. 2. Зависимость тока пучка от величины σ_{max} для двухзвенной модели

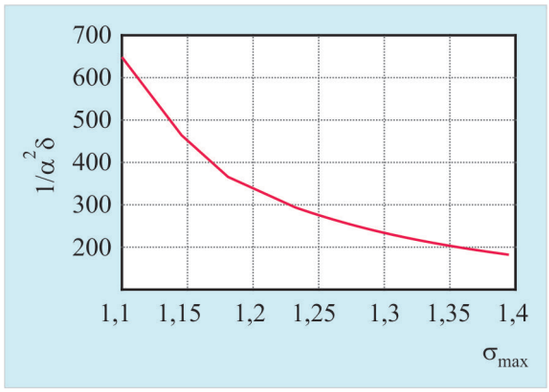


Рис. 3. Зависимость тока пучка от величины σ_{max} для трёхзвенной модели

Напряжение на резонаторе V_0, см. формулу (7), при уменьшении величины σ_{max} возрастает пропорционально увеличению коэффициента $1/\alpha^2$, рис. 4.

Необходимое значение активного сопротивления луча R_c при уменьшении допуска на величину σ_{max} падает, согласно формуле (1), пропорционально уменьшению коэффициента δ, рис. 5.

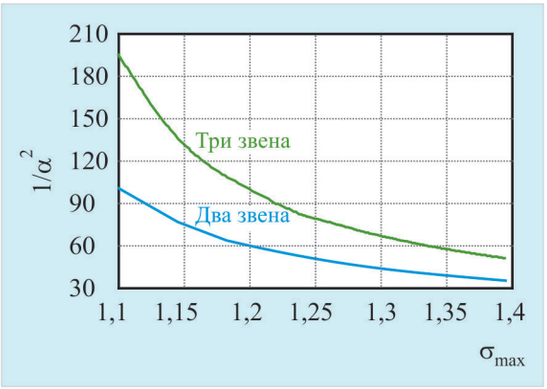


Рис. 4. Зависимость напряжения на резонаторе от величины σ_{max} для двух- и трёхзвенной моделей

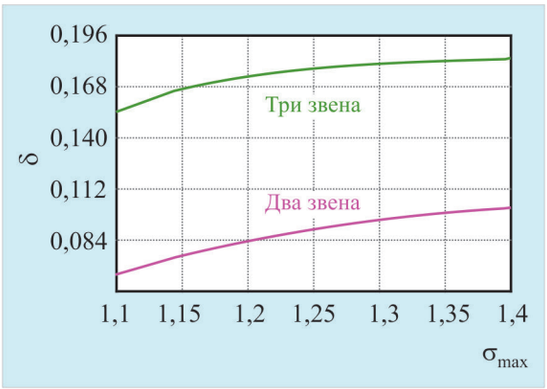


Рис. 5. Зависимость сопротивления циклотронных колебаний от допуска на величину σ_{max} для двух- и трёхзвенной моделей

Например, с уменьшением допустимого значения КСВН от $\sigma_{max} = 1{,}24$ до $\sigma_{max} = 1{,}1$, при сохранении размеров ламелей и сопротивления резонатора, необходимый ток луча двухзвенной модели с заданной полосой пропускания возрастает в 3,26 раза, а напряжение на резонаторе – в 2,38 раза. Требуемое сопротивление луча при этом уменьшается в 1,37 раза.

Ток луча и напряжение на резонаторе трёхзвенной модели с заданной полосой пропускания в тех же условиях возрастают несколько меньше – в 2,24 раза и в 1,95 раза, сопротивление луча уменьшается в 1,15 раза.

1(540).indd 48 05.03.2019 8:12:31

Исходя из противоречивых условий обеспечения малых потерь сигнала при низких значениях σ_{max} и увеличения срока службы прибора с пониженной величиной тока при повышенном значении σ_{max}, допуск на величину пульсации КСВН может быть рекомендован в пределах σ_{max} от 1,2 до 1,3.

5. ПРИМЕР РАСЧЁТА МОДЕЛИ

Требования к параметрам модели: центральная частота сигнала f_0 = 10 ГГц, полоса частот ΔF = 1,8 ГГц по допустимой величине КСВН со стороны нагрузки σ_{max} = 1,24 (потери сигнала, проходящего от внешней цепи к нагрузке ламелей или обратно, ΔS_{21} = -0,05 дБ), характеристическое сопротивление объёмного резонатора ρ_v = 80 Ом.

Дополнительное условие построения модели: допустимый ток луча $I_0 \leq 2{,}0$ мА.

Решение задачи.

5.1. Определение числа звеньев опорной модели.

Исходные условия: ток луча $I_0 < 2{,}0$ мА, допустимое значение КСВН σ_{max} = 1,24, сопротивление резонатора ρ_{vol} = 80 Ом. Величину зазора между ламелями примем равной d = 100 мкм.

Определим ток луча двух- и трёхзвенной моделей, согласно формуле (6) и Приложению 1.

Вид модели	Коэффициент α	Коэффициент δ	Величина тока, мА
Два звена	0,1101809	0,08888205	6,194
Три звена	0,1399646	0,1771660	1,926

Наложенное ограничение величины тока $I_0 < 2{,}0$ мА при условии σ_{max} = 1,24, ρ_{vo} = 80 Ом, d = 100 мкм, как показывает расчёт, требует применения секции ЦЗУ, выполненной на основе трёхзвенной модели.

5.2. Расчёт трёхзвенной LCR-модели.

Определим элементы трёхзвенной модели секции ЦЗУ.

Расчёт цепи имитации сопротивления луча с циклотронными колебаниями:

$$R_c = 2\pi\delta\rho_v \frac{f_0}{\Delta F} = 2\pi \cdot 0{,}177166 \cdot 80 \frac{10^{10}}{1{,}8 \cdot 10^9} = 494{,}74 \text{ (Ом)}, \tag{9}$$

$$L_c = 2\pi\alpha\delta\rho_v \frac{f_0}{(\Delta F)^2} = 2\pi \cdot 0{,}1399646 \cdot 0{,}177166 \cdot 80 \frac{10^{10}}{(1{,}8 \cdot 10^9)^2} = 3{,}847 \cdot 10^{-8} \text{ (Гн)}, \tag{10}$$

$$C_c = \frac{(\Delta F)^2}{\alpha\delta\rho_v (2\pi f_0)^3} = \frac{(1{,}8 \cdot 10^9)^2}{0{,}1399646 \cdot 0{,}177166 \cdot 80 (2\pi \cdot 10^{10})^3} = 6{,}58441 \cdot 10^{-15} \text{ (Ф)}. \tag{11}$$

Характеристическое сопротивление цепи имитации сопротивления луча и последовательного резонатора трёхзвенной структуры

$$\rho_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} = \sqrt{\frac{3{,}847 \cdot 10^{-8}}{6{,}5844 \cdot 10^{-15}}} = 2417 \text{ (Ом)}. \tag{12}$$

1(540).indd 49 05.03.2019 8:12:32

Индуктивность и ёмкость параллельного резонатора с характеристическим сопротивлением $\rho_v = 80$:

$$L_v = \frac{\rho_v}{2\pi f_0} = \frac{80}{2\pi \cdot 10^{10}} = 1,27324 \cdot 10^{-9} \text{ (Гн)}, \quad (13)$$

$$C_v = \frac{1}{2\pi \rho_v f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 80 \cdot 10^{10}} = 1,98944 \cdot 10^{-13} \text{ (Ф)}. \quad (14)$$

Сопротивление приведенной к ламелям резонатора внешней нагрузки (крайние звенья трёхзвенной структуры одинаковы)

$$R_L = R_c = 494,74 \text{ (Ом)}. \quad (15)$$

Схема трёхзвенной *LCR*-модели приведена на рис. 6.

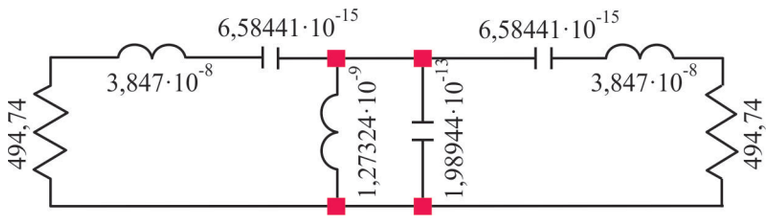


Рис. 6. Трёхзвенная опорная *LCR*-модель, определённая по заданным условиям расчёта

Частотная характеристика КСВН опорной модели σ(*f*) относительно нагрузки с сопротивлением 494,74 Ом показана на рис. 7.

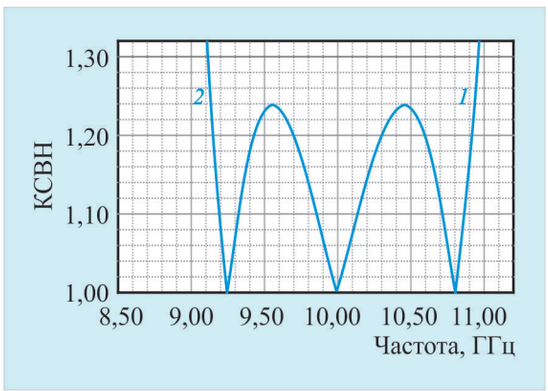


Рис. 7. Частотная характеристика КСВН трёхзвенной опорной модели

Полоса пропускания модели по уровню КСВН $\sigma_{max} = 1,24$ соответствует заданному значению $\Delta F = 1,8$ ГГц.

5.3. Условия реализации модели по току луча и напряжению на резонаторе.

Ток луча и напряжение на резонаторе опорной модели, при выборе величины зазора между ламелями $d = 100$ мкм и характерной для трёхсантиметрового диапазона волн длины ламелей $l = 2,5$ мм, определяются выражениями:

1(540).indd 50 05.03.2019 8:12:32

$$I = \frac{4}{\pi}\left(\frac{k_1 d}{\alpha}\right)^2 \frac{(\Delta F)^3}{\delta \rho_v f_0} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{2{,}6835\cdot 10^{-7}\cdot 0{,}1\cdot 10^{-3}}{0{,}1399646}\right)^2 \frac{\left(1{,}8\cdot 10^9\right)^3}{0{,}177166\cdot 80\cdot 10^{10}} = 1{,}93\cdot 10^{-3}\ (\text{A}), \qquad (16)$$

$$V_0 = \left(\frac{k_1}{\alpha} l \Delta F\right)^2 = \left(\frac{2{,}6835\cdot 10^{-7}}{0{,}1399646}\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}8\cdot 10^9\right)^2 = 74{,}44\ (\text{В}). \qquad (17)$$

Величина тока луча I_0 = 1,93 мА, установленная расчётом, близка к заданному пределу I_0 < 2,0 мА.

Для снижения требований к необходимому току уменьшим на 10 % величину зазора и длину ламелей. Значения элементов и частотная характеристика *LCR*-модели при этом остаются неизменными.

При величине зазора d = 100·0,9 = 90 мкм и длине ламелей l = 2,5×0,9 = 2,25 мм необходимый ток луча равен I_0 = 1,56 мА < 2,0 мА, напряжение на резонаторе V_0 = 60,3 В.

6. МОДЕЛЬ С БОЛЕЕ ТОЧНЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛУЧА

Опорная модель секции построена упрощённо в виде *LCR*-фильтра с аппроксимацией сопротивления луча как сопротивления последовательного *LCR*-резонатора, что даёт возможность быстро определить необходимый вид структуры и оценить частотную характеристику модели.

Расчёт модели с более точной аппроксимацией сопротивления луча, приведенной в одной из основополагающих работ [4], показывает, что вблизи частоты циклотронного резонанса последовательная *LCR*-цепь определяет проводимость либо сопротивление луча с погрешностью, но достаточно достоверно (см. Приложение 2).

Частотная характеристика КСВН опорной структуры, приведенной на рис. 3, при коррекции сопротивления первого звена согласно работе [4], показана на рис. 8.

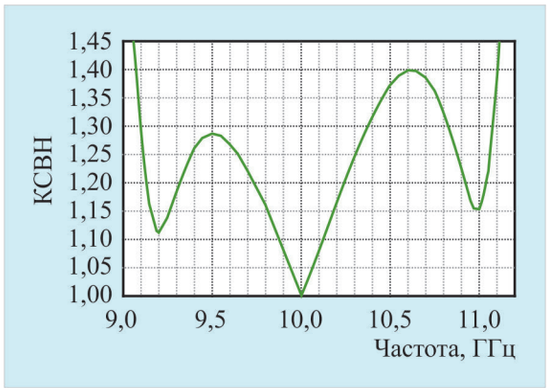


Рис. 8. Частотная характеристика КСВН модели при аппроксимации сопротивления луча на основе работы [3] и данных опорной модели:
$f_0 = 10^{10}$ Гц, l = 2,25 мм, d = 90 мкм, V_0 = 60,3 В, I_0 = 1,56 мА,
R_c = 494,74 Ом, ρ_c = 2417 Ом, ρ_v = 80 Ом

Полоса пропускания уточненной модели относительно опорной модели со структурой *LCR*-фильтра возросла до 2,0 ГГц при пульсации КСВН σ_{max1} = 1,4, превышающей заданное значение σ_{max} = 1,24.

1(540).indd 51 05.03.2019 8:12:32

Уточнённый расчёт модели при определении сопротивления пучка на основе работы [4] подобен регулировке прибора. В ходе нескольких операций численного расчёта выбирается комплекс необходимых значений напряжения на резонаторе и тока луча либо равнозначный комплекс напряжения на резонаторе и резонансного сопротивления луча.

Значения элементов комплекса – напряжения V_0, тока I_0 (либо напряжения V_0 и резонансного сопротивления луча R_c) – определяются выбранной формой частотной характеристики КСВН. В данном случае принято, что частотная характеристика является остро пульсирующей, с минимумом КСВН $\sigma_{min} \approx 1$ на частоте $f_{\sigma\,min} > f_0$, находящейся в пределах необходимой полосы пропускания по максимуму КСВН $\sigma_{max} \approx 1{,}24$.

Принимая значение частоты, на которой находится минимум КСВН, равным $f_{\sigma\,min} = 10{,}9$ ГГц (см. Приложение 3), находим соответствующее напряжение на резонаторе и ток луча: $V_0 = 72{,}1$ В, $I_0 = 1{,}73$ мА. Для данного комплекса определяем резонансное сопротивление луча и сопротивление нагрузки $R_c = R_L = 533{,}5$ Ом.

Частотная характеристика модели с основными элементами опорной структуры при аппроксимации сопротивления луча на основе работы [4], токе луча 1,73 мА, напряжении на резонаторе 72,1 В показана на рис. 9.

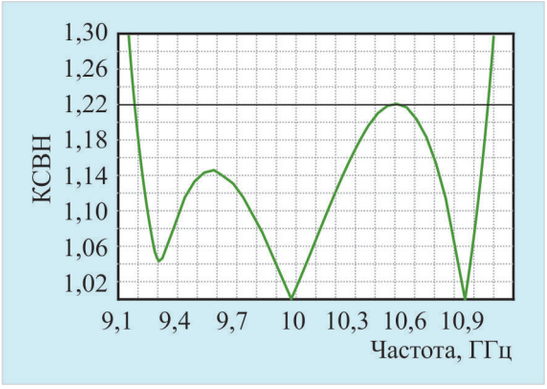


Рис. 9. Частотная характеристика КСВН модели при аппроксимации сопротивления луча по работе [4]. Задана частота минимума КСВН $f_{min} = 10{,}9$ ГГц. Напряжение на резонаторе $V_0 = 72{,}1$ В, ток луча $I_0 = 1{,}73$ мА, сопротивление луча и нагрузки $R_c = R_L = 533{,}5$ Ом. Параметры опорной модели: $f_0 = 10^{10}$ Гц, $l = 2{,}25$ мм, $d = 90$ мкм, $\rho_c = 2417$ Ом, $\rho_v = 80$ Ом

Полоса пропускания модели с сопротивлением луча, определенным по работе [4] при выборе частоты $f_{min} = 10{,}9$ ГГц, равна $\Delta F = 1{,}83$ ГГц по уровню КСВН $\sigma = 1{,}223$, с небольшим запасом относительно заданных требований по полосе пропускания и величине КСВН.

7. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПОСЛЕДУЮЩЕГО 3*D*-МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕКЦИИ ЦЗУ С ЗАДАННОЙ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ 1,8 ГГц

Сформулируем условия последующего построения опорной 3*D*-модели, нагруженной внешним трактом и последовательной резонансной цепью имитации сопротивления луча с циклотронными колебаниями.

3*D*-модель, согласно исходным требованиям и выбранным размерам ламелей, должна иметь объёмный резонатор с частотой резонанса $f_0 = 10$ ГГц, характеристическим сопротивлением $\rho_{vol} = 80$ Ом, длиной ламелей $l = 2{,}25$ мм и величиной зазора между ламелями $d = 90$ мкм.

1(540).indd 52 05.03.2019 8:12:32

Резонансное сопротивление цепи циклотронных колебаний и приведенное к ламелям резонатора активное сопротивление внешней нагрузки составляют: $R_c = R_L = 494{,}74$ Ом. Характеристическое сопротивление циклотронных колебаний и третьего звена секции $\rho_c = \rho_L = 2417$ Ом. Напряжение на резонаторе $V_0 = 72{,}1$ В, ток луча $I_0 = 1{,}73$ мА.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полоса пропускания – значимый параметр ЦЗУ– по существующим методикам проектирования устанавливается подбором конструктивно-электрических параметров прибора. Данный приём конструирования не содержит определения аналитической зависимости полосы пропускания от конструктивно-электрических параметров прибора и, как правило, не обеспечивает широкого перекрытия частот.

Предложенный метод расчёта модели секций ЦЗУ основан на принятии полосы пропускания в качестве исходного параметра.

Конструктивно-электрические параметры прибора, обеспечивающие требуемую полосу пропускания, определяются результатами аналитического расчёта опорной *LCR*-модели с предпочтительным выбором ряда параметров:

– для заданной полосы пропускания и доступного для реализации сопротивления объёмного резонатора определяются необходимое резонансное сопротивление электронного луча и приведенное к ламелям сопротивление внешней нагрузки;

– ток луча и напряжение на резонаторе для заданной полосы пропускания определяются предпочтительной величиной зазора между ламелями и длины пути луча вдоль ламелей.

Методика расчёта позволяет установить необходимость построения прибора с заданной полосой пропускания как двух-, так и трёхзвенной фильтрующей системы. Необходимое число звеньев определяется допустимой величиной КСВН и тока луча.

Исходя из противоречивых условий обеспечения малых потерь сигнала и увеличения срока службы прибора, допуск на величину пульсации КСВН в пределах полосы пропускания может быть рекомендован в пределах от 1,2 до 1,3.

Результаты расчёта опорной *LCR*-модели служат исходной базой уточнённого расчёта модели с определением частотной характеристики сопротивления электронного луча на основе работы [4], с коррекцией значений тока луча, напряжения на резонаторе, связи секции с внешним трактом.

Результаты расчёта опорной и уточнённой моделей определяют исходные данные последующего построения 3*D*-модели секции и образцов прибора.

Приведенный пример расчёта показывает возможность построения секций ЦЗУ с увеличенной полосой пропускания, которая более чем вдвое превышает известные из практики значения полосы при доступных для реализации конструктивно-электрических параметрах секции.

1(540).indd 53 05.03.2019 8:12:32

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Коэффициенты формул расчёта элементов *LCR*-модели секции ЦЗУ[3]

$-\Delta S_{21}$, дБ	σ_{max}, отн.ед.	Число звеньев модели	Коэффициент	
			α	δ
0,01	0,100747	2	0,07144348	0,06490423
		3	0,1001391	0,1544269
0,02	1,14542	2	0,0858351	0,07493691
		3	0,1151173	0,1653538
0,03	1,180954	2	0,09574802	0,08107624
		3	0,1252839	0,1710685
0,04	1,211778	2	0,1035827	0,08547915
		3	1,1332706	0,1746799
0,05	1,239617	2	0,1101809	0,08888205
		3	1,1399646	0,1771660
0,06	1,265531	2	0,1159466	0,09163085
		3	0,1457980	0,1789595
0,07	1,289501	2	0,1211080	0,09391726
		3	0,1510102	0,1802890
0,08	1,312407	2	0,1258079	0,09585913
		3	0,1557750	0,1812889
0,09	1,334303	2	0,1301422	0,09753426
		3	0,1601175	0,1820449
0,10	1,355361	2	0,1341786	0,09899629
		3	0,1641819	0,1826144
0,11	1,375711	2	0,1379669	0,1002861
		3	0,1679948	0,1830380
0,12	1,395451	2	0,1415450	0,1014314
		3	0,1715950	0,1833449
0,13	1,414662	2	0,1449424	0,1024554
		3	0,1750127	0,1835571
0,14	1,433407	2	0,1481823	0,1033758
		3	0,1782719	0,1836914
0,15	1,451740	2	0,1512840	0,1042067
		3	0,1813917	0,1837606
0,16	1,469705	2	0,1542628	0,1049597
		3	0,1843882	0,1837753
0,17	1,487339	2	0,1571319	0,1056441
		3	0,1872974	0,1837436
0,18	1,504674	2	1,1599021	0,1063680
		3	0,900616	0,1836724

1(540).indd 54 05.03.2019 8:12:33

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АППРОКСИМАЦИЯ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА С ЦИКЛОТРОННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

1. Проводимость последовательного *LCR*-контура, нормированная к максимальному значению $1/R_c$, определяется выражением

$$Y_{sN} = \frac{x^2 - ixQ(x^2-1)}{x^2 + Q^2(x^2-1)^2},$$

где Q – добротность контура; $x = f/f_c$ – относительная частота сигнала.

2. Поперечную проводимость электронного луча с циклотронными колебаниями определим без учёта краевых эффектов на основе известной работы [4] как нормированную к максимальному значению проводимости последовательной резонансной системы:

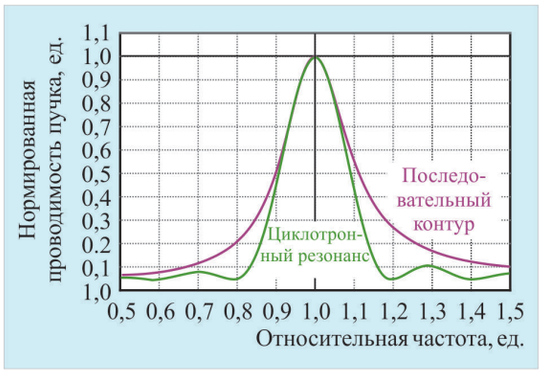
$$Y_{aN} = \frac{2x}{\Theta^2}\left[1 - \cos\Theta - i\left(\Theta - \sin\Theta\right)\right],$$

где $\Theta = 2\pi N(x-1)$; $N = f_c l/(2V_0\eta)^{0,5}$ – число периодов циклотронной частоты за время пролёта ламелей лучом; $f_c = f_0$ – резонансная частота циклотронных колебаний; V_0 – напряжение на резонаторе; l – длина ламелей; $\eta = 1{,}7588\cdot10^{11}$ – удельный заряд электрона.

Резонансное значение проводимости луча при выбранных значениях размеров ламелей, тока пучка и напряжения на резонаторе определяется соотношением [4]

$$Y_{c_rez} = \frac{1}{R_c} = \frac{I_0}{8V_0}\left(\frac{l}{d}\right)^2.$$

Частотная характеристика вещественной проводимости луча при двух видах аппроксимации показана на рисунке.



Частотная характеристика вещественной проводимости электронного луча при двух видах аппроксимации проводимости: в виде последовательного *LCR*-контура и на основе работы [4]

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РАСЧЁТ КОМПЛЕКСА УСЛОВИЙ: НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗОНАТОРЕ, ТОК ПУЧКА

Комплекс напряжения на резонаторе и тока луча либо напряжения и сопротивления нагрузки, удовлетворяющий условию $\sigma_{min} \approx 1$ на выбранной частоте $f_{min} > f_0$, определяется несколькими ступенями численного расчёта КСВН опорного модуля с центральной частотой f_0, размерами ламелей l и d, характеристическим сопротивлением параллельного и последовательного резонаторов ρ_v и ρ_c.

1(540).indd 55 05.03.2019 8:12:33

Для найденного комплекса проверяется полоса пропускания модуля по значению максимального уровня КСВН σ_m в пределах центральной части полосы.

При уровне КСВН σ_m, превышающем заданное значение $\sigma_m > \sigma_{max}$, значение частоты $f_{\sigma\,min}$, на которой устанавливается минимум КСВН $\sigma_{min} \approx 1$, следует уменьшить.

При полосе пропускания, меньшей заданного значения, значение частоты $f_{\sigma\,min}$ необходимо увеличить.

Пример результатов расчёта комплекса напряжения и тока как функций заданной частоты $f_{\sigma\,min}$, при которой минимум КСВН равен $\sigma_{min} \approx 1$, с последующим определением резонансного сопротивления луча R_c и полосы пропускания ΔF по максимальному уровню пульсаций КСВН σ_m в пределах центральной части полосы приведен в таблице.

$f_{\sigma\,min}$, ГГц	σ_m, ед	V_0, В	I_0, мА	ΔF, ГГц	R_c, Ом
10,8	1,146	72,245	1,639	1,607	564,3
10,9	1,223	72,1	1,73	1,83	533,5

Примечание. Параметры опорного модуля: f_0 = 10 ГГц, l = 2,25 мм, d = 90 мкм, ρ_v = 80 Ом, ρ_c = 2417 Ом

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2167480 РФ.** Сверхвысокочастотное защитное устройство / Ю. А. Будзинский, С. П. Кантюк, В. Б. Петровский. – Приоритет 1.02.85.

2. **Будзинский, Ю. А**. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 136 – 142.

3. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 19 – 38.

4. **Smith, L. P.** Frequency modulation and control by electron beams / L. P. Smith, C. I. Shulman // Proceedings of the IRE. – July 1947. – Vol. 35, Iss. 7. – P. 644 – 657.

5. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Расчёт характеристического сопротивления резонатора / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3 (530). – С. 31 – 39.

6. **Калина, В. Г.** Моделирование СВЧ циклотронного защитного устройства как трёхзвенного фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 3 – 15.

Статья поступила 27 августа 2018 г.

1(540).indd 56 05.03.2019 8:12:33

УДК 621.385.623

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВЫХОДНОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

С. Г. Асташов, В. И. Пугнин, С. А. Мельников, А. С. Арефьев, А. Н. Юнаков

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Представлены результаты модернизации конструкции выходной системы мощного широкополосного многолучевого клистрона, позволяющей настраивать выходную систему после откачки прибора.

КС: многолучевой клистрон, пассивный резонатор, коллекторная область, емкостные элементы настройки, окно связи, выходная система

THE DEVELOPMENT OF THE OUTPUT CIRCUIT DESIGN OF A HIGH POWER MULTIBEAM KLYSTRON

S. G. Astashov, V. I. Pugnin, S. A. Melnikov, A. S. Arefyev, A. N. Yunakov

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The results of upgrading the output circuit design of a high power wideband multibeam klystron which allows to tune in the output circuit after pumping out the klystron, are presented.

Keywords: multibeam klystron, passive resonator, collector area, capacitive tuning elements, impedance matching port, output circuit

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные клистроны в настоящее время являются основными приборами, используемыми в качестве выходных каскадов усиления передатчиков радиолокационных станций (РЛС), работающих в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн. Клистроны для РЛС должны обладать комплексом параметров [1]: широкой полосой, большим уровнем выходной мощности, большой длительностью импульса, электропрочностью, большим сроком службы, определяемым в основном плотностью тока, отбираемого с катода. Наименьшие напряжения луча и модуляции являются еще одними немаловажными параметрами для обеспечения возможности получения минимальных массогабаритных характеристик аппаратуры.

Всем вышеперечисленным требованиям к усилительным СВЧ-приборам удовлетворяют многолучевые клистроны (МЛК). Мощные МЛК широко применяются в различных типах мобильных радиоэлектронных комплексов, так как низкие рабочие напряжения существенно упрощают изготовление источников питания.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является модернизация выходной системы серийно выпускаемого мощного широкополосного МЛК [2] *X*-диапазона.

1(540).indd 57 05.03.2019 8:12:33

Клистрон имеет трехсвязную выходную систему, состоящую из активного и двух пассивных резонаторов (рис. 1). Недостатком существующей конструкции выходной системы является отсутствие доступа к настройке первого пассивного резонатора на готовом изделии, т. к. настройка находится в корпусе резонаторного блока и выведена в коллекторную область. Настройка первого пассивного резонатора возможна только на «холодных» измерениях до заварки коллектора клистрона. Возможность настройки первого пассивного резонатора выходной системы при проведении динамических испытаний клистрона отсутствует, что безусловно не способствует оптимальной настройке клистрона на выходные параметры.

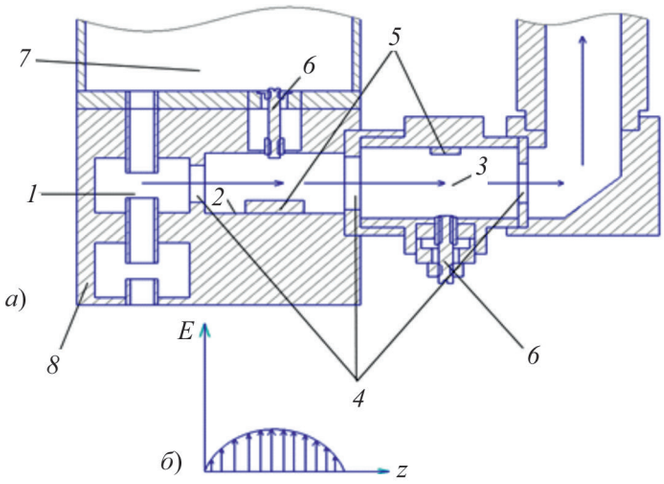


Рис. 1. Конструкция трехсвязной выходной системы (*а*)
и распределение электрического поля в первом пассивном резонаторе (*б*):
1 – выходной активный резонатор; *2* – первый пассивный резонатор; *3* – второй пассивный резонатор; *4* – окна связи; *5* – емкостные элементы настройки пассивных резонаторов; *6* – настроечные винты; *7* – коллекторная область; *8* – резонаторный блок

Для обеспечения доступа к настройке первого пассивного резонатора было предложено выполнить его в виде отрезка волновода, работающего на типе колебания H_{201}, и расположить его емкостную настройку в области второй полуволны электрического поля (рис. 2).

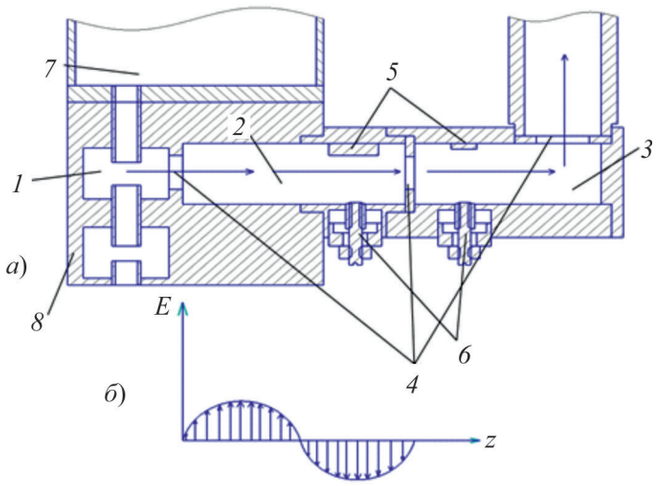


Рис. 2. Предложенная конструкция
трехсвязной выходной системы (*а*)
и распределение электрического поля
в первом пассивном резонаторе (*б*):
1 – выходной активный резонатор; *2* – первый пассивный резонатор; *3* – второй пассивный резонатор; *4* – окна связи; *5* – емкостные элементы настройки пассивных резонаторов; *6* – настроечные винты; *7* – коллекторная область; *8* – резонаторный блок

1(540).indd 58 05.03.2019 8:12:33

3. РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ СИСТЕМЫ

Для данной конструкции клистрона размер выходной системы ограничен внутренним диаметром фокусирующего соленоида. Увеличение размеров первого пассивного резонатора приводит к необходимости изменения конструкции второго пассивного резонатора. Новая конструкция второго пассивного резонатора выполненена в виде отрезка волновода, в котором вывод энергии повернут на 90º относительно оси выходной системы.

Проектирование выходной системы проведено с использованием программы CST Microwave studio [3]. На первом этапе были определены размеры активного и пассивных резонаторов, настроенных на центральную частоту рабочего диапазона. Затем была задана полная модель выходной системы и проведен цикл расчетов по определению размеров окон связи между резонаторами. Окна связи представляли собой индуктивные диафрагмы (рис. 3). Итерационный расчет заключался в подборе ширины окна a' между резонаторами для получения максимальной полосы рабочих частот при неравномерности амплитудно-частотой характеристики (АЧХ) не более ±0,5 дБ.

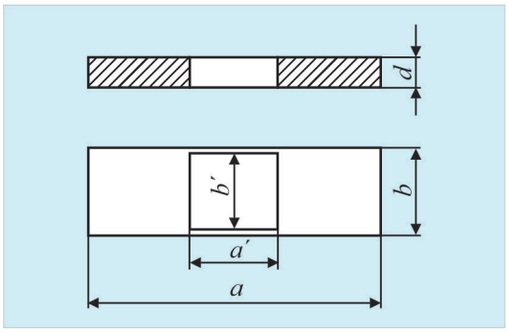


Рис. 3. Окно связи:
a' – ширина окна связи; a – ширина диафрагмы; $b = b'$ – высота окна связи и диафрагмы; d – толщина диафрагмы

Расчет проводился с имитацией метода экспериментального измерения характеристики выходной системы клистрона. АЧХ выходной системы измеряется на проход с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления. При этом сигнал подается через выходной волновод системы на второй пассивный резонатор, а выходной сигнал снимается из активного резонатора с помощью коаксиального зонда, установленного в пролетном канале.

Расчет АЧХ выходной системы также проводился методом на проход.

Расчетная модель выходной системы приведена на рис. 4. Порт приема СВЧ-сигнала *1* устанавливался в пролетную трубу активного резонатора, а на выходной волновод системы был установлен порт излучения СВЧ-сигнала *2*. В ходе проведения расчетов было определено, что неравномерность АЧХ выходной системы существенно зависит от импеданса дискретного порта CST MWS, установленного в канал пролетной трубы.

На рис. 5 представлена АЧХ при различном импедансе порта, установленного в пролетную трубу активного резонатора. Из данного графика видно, что при увеличении импеданса порта изменяется неравномерность АЧХ, поэтому расчет с использованием такого порта недостаточно корректен.

Было предложено добавить в расчетную модель коаксиальный зонд, введенный в пролетную

1(540).indd 59 05.03.2019 8:12:34

трубу активного резонатора, и установить на него порт приема СВЧ-сигнала *1*, а на выходной волновод системы установить порт излучения СВЧ-сигнала *2* (рис. 6).

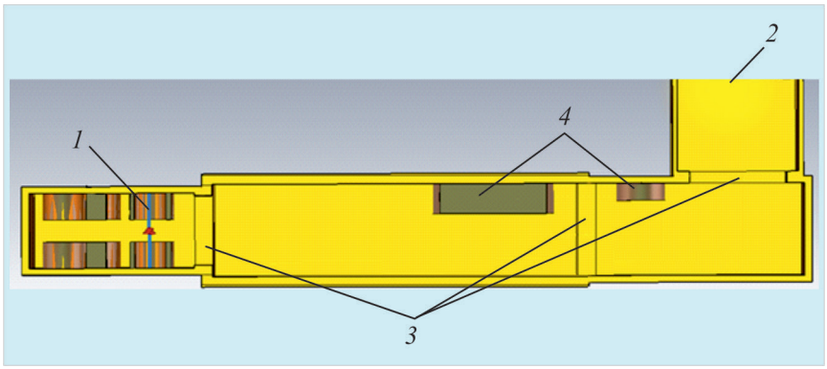


Рис. 4. Расчетная модель выходного устройства из программы CST MWS:
1 – порт приема СВЧ-сигнала, установленный в пролетную трубу; *2* – порт излучения СВЧ-сигнала; *3* – окна связи; *4* – емкостные элементы настройки пассивных резонаторов

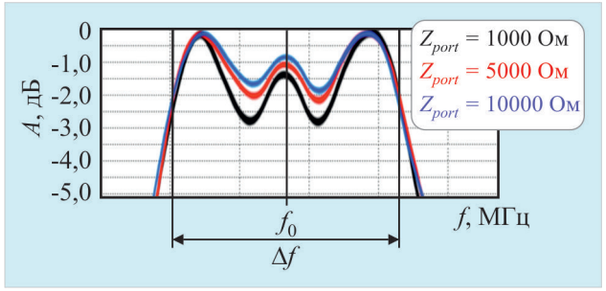


Рис. 5. АЧХ при различном импендансе порта, установленного в пролетную трубу активного резонатора

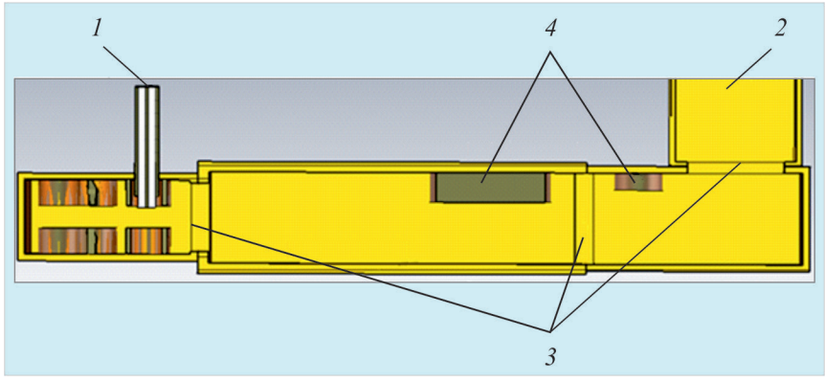


Рис. 6. Расчетная модель выходного устройства с коаксиальным зондом из программы CST MWS:
1 – порт приема СВЧ-сигнала, установленный на коаксиальный зонд; *2* – порт излучения СВЧ-сигнала; *3* – окна связи; *4* – емкостные элементы настройки пассивных резонаторов

Коаксиальный зонд поместили в канал средней трубы входного резонатора, так как в этом случае искажение АЧХ, обусловленное неравномерностью поля в резонаторе, минимально.

1(540).indd 60 05.03.2019 8:12:34

Конструкция и размеры коаксиального зонда при расчете соответствуют конструкции и размерам зонда, применяемого на «холодных» измерениях (рис. 7).

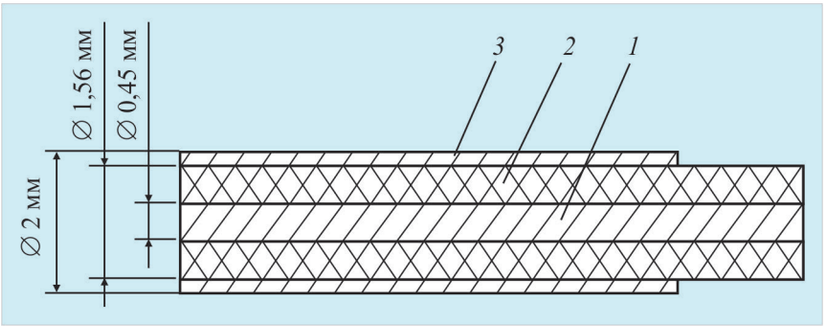


Рис. 7. Конструкция коаксиального зонда с «холодных» измерений:
1 – внутренний проводник; *2* – фторопластовая изоляция; *3* – экран (внешний проводник)

Зонд выполнен из отрезка жесткого коаксиального кабеля и представляет собой внутренний медный проводник с фторопластовой изоляцией и медным экраном. Волновое сопротивление коаксиального зонда согласовано с панорамным измерителем КСВН и составляет 50 Ом.

Важной задачей является определение положения зонда внутри емкостного зазора резонатора. На «холодных» измерениях зонд обычно выдвигают из зазора до момента, когда частота резонатора перестает изменяться. Подобная задача была выполнена и расчетным путем. На рис. 8 представлена расчетная зависимость частоты резонатора от глубины погружения зонда в емкостный зазор резонатора. Из приведенной кривой видно, что часть коаксиального зонда с внутренним проводником и фторопластовой изоляцией без экрана должна располагаться на расстоянии не более 0,15 мм внутри емкостного зазора резонатора (рис. 9). При этом было установлено, что изменение длины фторопластовой части зонда без экрана не влияет на изменение частоты резонатора.

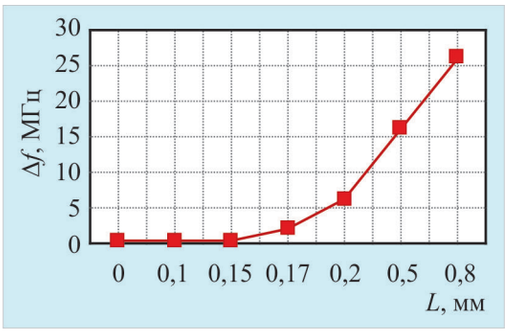


Рис. 8. Зависимость частоты резонатора от глубины погружения зонда

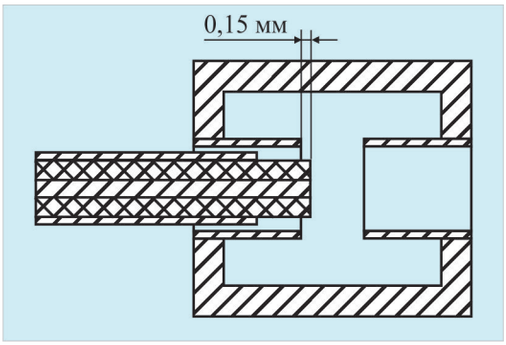


Рис. 9. Расположение коаксиального зонда в пролетном канале активного резонатора

В соответствии с результатами расчетов выполнена сборка резонаторных блоков с модернизированной выходной системой. На рис. 10 приведены расчетные и экспериментальные АЧХ собранной выходной системы.

Экспериментальная проверка модернизированной конструкции выходной системы на «холодных» измерениях показала очень хорошее совпадение с расчетными результатами.

Общий вид модернизированной конструкции выходного устройства приведен на рис. 11.

1(540).indd 61 05.03.2019 8:12:34

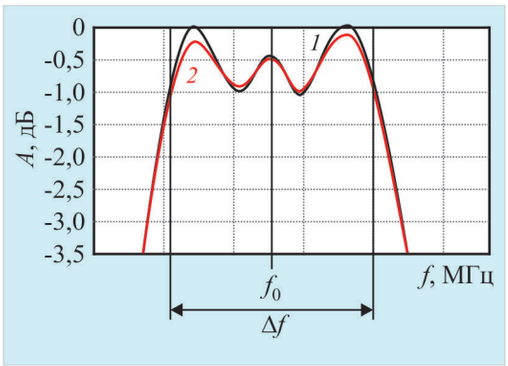


Рис. 10. АЧХ:
1 – расчет; *2* – эксперимент

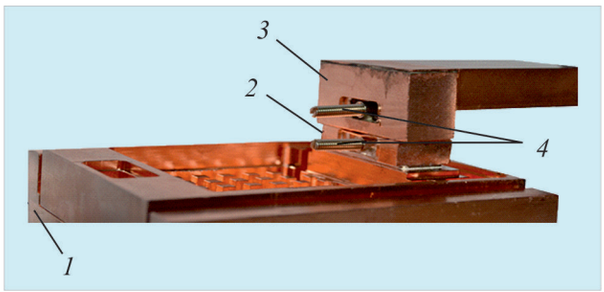


Рис. 11. Модернизированная конструкция выходной системы:
1 – резонаторный блок с выходным активным резонатором; *2* – первый пассивный резонатор; *3* – второй пассивный резонатор; *4* – настроечные винты

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы показано, что предложенная методика расчета выходной системы методом измерения четырёхполюсника на проход, с использованием коаксиального зонда, позволяет с хорошей точностью рассчитать параметры выходной системы, так как является полным аналогом «холодных» измерений. Успешно апробирована возможность настройки выходной системы клистрона после откачки приборов и, при необходимости, на этапе проведения динамических испытаний. Изготовлены и проведены динамические испытания клистронов с модернизированной выходной системой, в результате которых были получены заданные выходные параметры. Применение модернизированной выходной системы позволяет повысить процент выхода годных при изготовлении приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gelvich, Edward A.** The new generation of high-power multiple-beam klystrons / Edward A. Gelvich, Ludvik M. Borisov, Yevgeny V. Zhary, Anatoli D. Zakurdayev, Alexandr S. Pobedonostsev and Victor I. Poognin // IEEE. – January 1993. – Vol. 41, No 1.

2. **Пат. 2507626 РФ.** Многолучевой прибор О-типа / В. И. Пугнин, А. Н. Юнаков. – 2015.

3. **Курушин А.** Проектирование СВЧ-устройства в среде CST Microwave studio. – М.: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.

Статья поступила 17 декабря 2018 г.

1(540).indd 62 05.03.2019 8:12:35

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.391

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ШУМА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Н. А. Максимов[1], **А. И. Панас**[2]

[1]*ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

[2]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Приводятся результаты численных и натурных экспериментов автоколебательной системы, структура которой состоит из шести связанных простейших осцилляторов на основе SiGe-транзисторов. Экспериментальный макет генератора шума устойчиво генерирует сигналы в диапазоне частот от 9 кГц до 5 ГГц. Показано, что режим генерации сверхширокополосных шумовых колебаний сохраняется при изменении напряжения питания генератора в пределах ±20 % от номинального значения. Небольшие габариты генератора, наряду с указанными характеристиками, делают его перспективным для различных приложений в качестве источника сверхширокополосных шумовых сигналов.

КС: сверхширокополосные шумовые колебания, парциальный генератор, спектральные характеристики, связанные осцилляторы, генератор шума

ULTRA-WIDEBAND NOISE GENERATOR BASED ON A SYSTEM OF COUPLED OSCILLATORS

N. A. Maksimov[1], **A. I. Panas**[2]

[1]*FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino*

[2]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

The results of simulation and experiments of self-oscillating system consisting of six coupled simple oscillators based on SiGe transistors are presented. The experimental layout of the noise generator generates signals in the frequency range from 9 kHz to 5 GHz. It is shown that the generation mode of ultra-wideband noise oscillations is maintained when the generator supply voltage changes within ±20 % of the nominal value. The small size of the generator, along with these characteristics, make it promising for various applications as a source of ultra-wideband noise signals.

Keywords: ultra-wideband noise oscillations, partial generator, spectral characteristics, coupled oscillators, noise generator

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди устройств радиоэлектроники генераторы шума, позволяющие получать широкополосные и сверхширокополосные шумовые сигналы, занимают свою устойчивую нишу. Они активно используются в различных областях: от измерительной техники до систем радиоэлектронного противодействия и радиотехнической маскировки, включая средства активной

1(540).indd 63 05.03.2019 8:12:35

защиты информативных компонентов побочных электромагнитных излучений электронно-вычислительной техники [1–3]. В последние годы появляются новые сферы приложения шумовых колебаний, преимущественно в СВЧ-диапазоне, которые связаны с нормативным разрешением применения широкополосных и сверхширокополосных сигналов в современных системах связи [4]. В зависимости от назначения и соответственно от предъявляемых к источникам шума требований, генераторы реализуются как в вакуумном [5], так и в твердотельном исполнении [6–8]. Они могут иметь различные рабочие диапазоны частот и полосы генерируемых сигналов, отличаться друг от друга величиной неравномерности спектральных характеристик и уровнями мощности выходных сигналов. Наряду с этими характеристиками, современные тенденции развития радиоэлектронных средств выдвигают на передний план и ряд других характеристик, важных с точки зрения практического применения генераторов и возможности их массового производства. Среди них: энергоэффективность, небольшие массогабаритные характеристики, возможность использования низковольтного питания, дизайн, надёжность работы при изменении внешних условий. Из последнего свойства вытекает также ещё одно, важное с практической точки зрения следствие – отсутствие необходимости настройки (подстройки) генератора при подаче на него рабочих напряжений питания. Разработка генератора, обеспечивающего надежную работу с указанными характеристиками, является целью данной работы.

2. СТРУКТУРА ГЕНЕРАТОРА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данном разделе рассматриваются структура генератора сверхширокополосных (в диапазоне от НЧ до СВЧ) шумовых колебаний и численное исследование его динамических режимов в пакете программ ADS.

На рис. 1 представлена общая принципиальная схема генератора. Схема содержит шесть транзисторов, каждый из которых является активным элементом простейшего парциального генератора (рис. 2). В данном случае в качестве активного элемента во всех парциальных генераторах используется биполярный SiGe-транзистор BFP620F. Обратная связь парциального генератора обеспечивается за счёт внешней ёмкости *C1* и внутренних реактивных элементов используемого транзистора. Одноименные электроды транзисторов соединены между собой параллельно, при этом все транзисторы работают на одну общую нагрузку, подключаемую к коллекторной цепи. Благодаря параллельному включению транзисторов, связь между парциальными

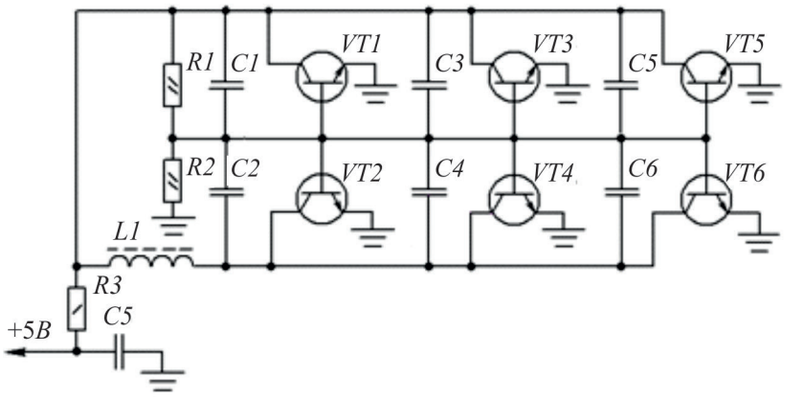


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

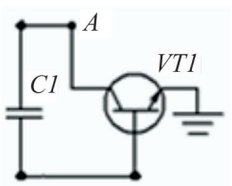


Рис. 2. Простейший парциальный генератор

1(540).indd 64 05.03.2019 8:12:35

генераторами осуществляется по принципу «каждый с каждым», образуя, таким образом, сложную многопетлевую автоколебательную систему. В то же время генератор можно рассматривать состоящим из двух линеек (верхняя и нижняя линейка парциальных генераторов), по три генератора в каждой линейке, дополнительная связь между которыми осуществляется благодаря индуктивности *L1*. Как показали расчеты, связь между линейками может также быть емкостной или резистивной.

Спектр мощности колебаний парциального генератора (в точке *A*, см. рис. 2) представлен на рис. 3. Колебания детерминированные, основная частота генератора соответствует 4,3 ГГц, и в спектре присутствует ряд гармоник основной частоты. Частота генерации в данном случае определяется величиной емкости *C1* = 3,3 пФ.

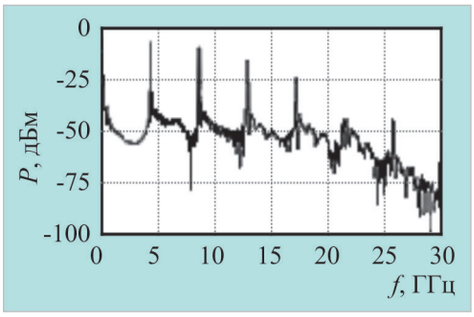


Рис. 3. Типовой спектр мощности выходного сигнала одного из парциальных генераторов

При наличии в составе генератора двух связанных парциальных генераторов динамика системы усложняется, появляются режимы с признаками хаотических колебаний. Такие режимы наблюдаются в узком интервале изменений питающего напряжения, а спектральные характеристики имеют большую неравномерность. Достаточно устойчивые хаотические колебания возникают в системе из трех связанных парциальных генераторов (рис. 4), например при использовании верхней или нижней линейки в схеме на рис. 1.

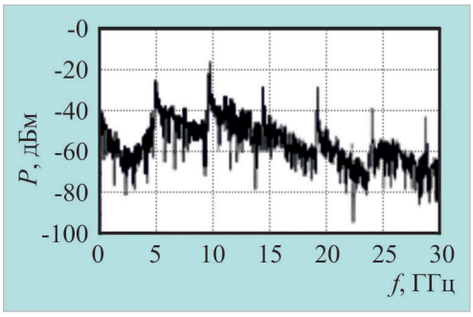
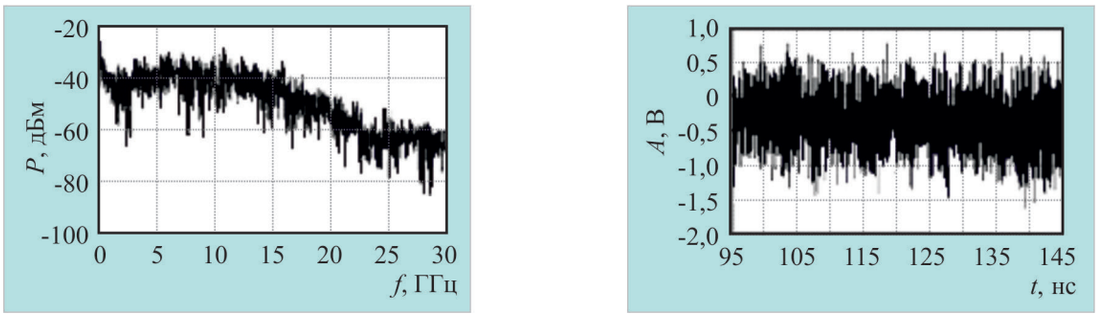


Рис. 4. Спектр мощности выходного сигнала генератора, состоящего из трёх связанных парциальных генераторов

В этом случае спектр мощности колебаний генератора имеет сверхширокополосный шумовой характер, однако неравномерность спектра в полосе генерации превышает 25 дБ, что часто затрудняет возможное практическое применение генератора. Ситуация кардинальным образом меняется при использовании обеих линеек парциальных генераторов. Если указанные линейки связать между собой элементом связи, то происходит многократное увеличение взаимного влияния парциальных генераторов и, при оптимальной величине параметра связи, уменьшение неравномерности спектральной характеристики в широкой полосе частот. Исследование динамики генератора при схемотехническом моделировании в программном пакете ADS показало, что в системе развиваются устойчивые шумоподобные колебания в широком диапазоне частот от единиц килогерц до приблизительно 15 ГГц, по уровню около 10 дБ (рис. 5, *а*). Соответствующая им временная реализация генерируемого сигнала представлена на рис. 5, *б*.

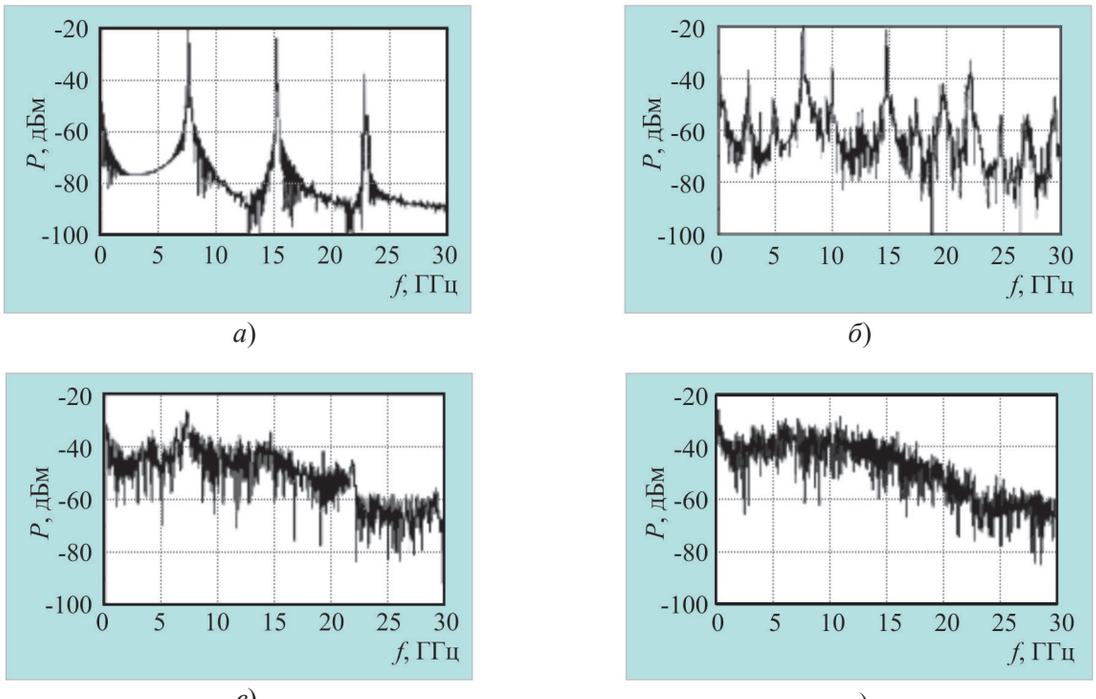
1(540).indd 65 05.03.2019 8:12:35



а) *б*)

Рис. 5. Спектр мощности (*а*) и временная реализация выходного сигнала (*б*) генератора

Генератор имеет единственный источник питания с напряжением 5 В. При этом, поскольку все транзисторы подключены параллельно, на них подается одинаковое напряжение. Рассмотрим, как изменяются динамические режимы генератора в зависимости от величины напряжения источника питания. На рис. 6 приведены спектральные характеристики колебательных режимов для разных питающих напряжений.



а) *б*)

в) *г*)

Рис. 6. Спектры мощности выходного сигнала генератора в зависимости от напряжения питания:
а – 3 В; *б* – 3,5 В; *в* – 4 В; *г* – 5 В

При изменении напряжения питания в пределах $U = 1…3$ В, в системе возникают периодические колебания на основной частоте $f \approx 7{,}5$ ГГц и ее гармониках (рис. 6, *а*). В этом случае все шесть парциальных генераторов синхронизированы и работают как единое целое. При увеличении напряжения питания и, как следствие, усилении нелинейных свойств используе-

1(540).indd 66 05.03.2019 8:12:35

мых транзисторов, происходит насыщение спектра колебаний комбинационными частотами (рис. 6, *б*). В силу отсутствия выраженной избирательной частотной системы в структуре генератора, комбинационные частоты возникают практически во всей области работы активных элементов (транзисторов) от НЧ- до СВЧ-диапазонов. Дальнейшее увеличение питающего напряжения приводит к перекрытию зон генерации, потере устойчивости колебаний и их зашумлению в окрестностях основных частот генератора (рис. 6, *в*). Увеличение напряжения питания до 5 В становится причиной полного перекрытия шумовых зон и образования сплошного спектра частот в наблюдаемом диапазоне (рис. 6, *г*). Такое поведение является результатом активного взаимодействия парциальных генераторов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Принципиальная схема экспериментального макета генератора отличается от схемотехнической модели наличием на выходе генератора буферного усилительного каскада, который ограничивает спектр в области верхних частот по сравнению с моделированием.

Питание коллекторных и базовых цепей всех используемых транзисторов обеспечивается одним источником питания напряжением 5 В через резисторы *R1*, *R2* и *R3* соответственно (см. рис. 1). Ёмкости *C1*…*C6* выполняют функцию элементов положительной обратной связи парциальных генераторов. К выходу генератора *VT5* подключен указанный выше буферный усилительный каскад, предназначенный для согласования генератора с нагрузкой и улучшения энергетических характеристик генератора.

Макет генератора выполнен на плате размерами 40×25 мм из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,0 мм с использованием микрополосковых линий. Как и в численном моделировании, в эксперименте исследовались режимы генератора в зависимости от числа активных элементов и напряжения питания.

На рис. 7 приведены спектрограммы режимов генератора, содержащего 6 транзисторов, в зависимости от напряжения источника питания *U*.

Сравнение рис. 6 и 7 демонстрирует хорошее качественное совпадение результатов моделирования и эксперимента при изменении напряжения питания генератора.

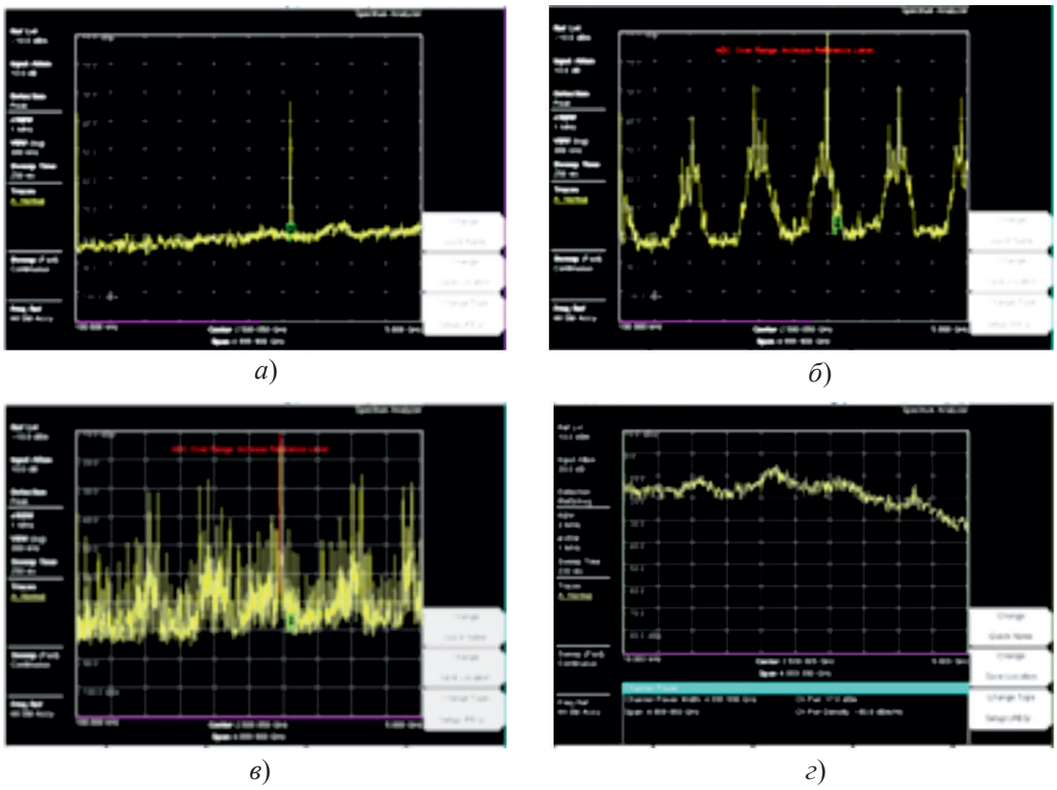
При напряжении питания 5 В на выходе генератора наблюдаются сверхширокополосные шумовые колебания, спектр мощности которых приведён на рис. 7, *г*, а временная реализация представлена на рис. 8.

Как следует из представленного спектра (см. рис. 7, *г*), эффективная полоса генерации занимает диапазон частот от 9 кГц до 5 ГГц, причём в полосе частот 9 кГц…4 ГГц неравномерность спектральной характеристики не превышает 10 дБ. Оценка энтропийного коэффициента качества шумового сигнала на выходе генератора даёт величину не менее 0,988. Измеренный уровень мощности выходного сигнала на нагрузке 50 Ом составляет не менее 40 мВт, что соответствует КПД устройства около 4 %.

Важно отметить, что использование в структуре генератора шести взаимно связанных парциальных осцилляторов позволяет существенно расширить полосу шумового сигнала (до 5 ГГц), а также сделать функционирование генератора более устойчивым в условиях потенциально возможного изменения в процессе эксплуатации величины его напряжения питания. В эксперименте зафиксирован тот факт, что режим генерации сверхширокополосных шумовых колебаний с присущим ему спектром мощности и распределением мгновенных значений сохраняется при изменении номинального напряжения питания (5 В) генератора в пределах ±20 % (4…6 В).

1(540).indd 67 05.03.2019 8:12:36

С другой стороны, описанный выше режим возникает сразу после подачи на генератор напряжения и не требует никакой дополнительной подстройки с помощью входящих в его состав элементов, т. е. реализуется режим «включил и забыл», что крайне важно для возможных практических применений генератора.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 7. Спектры мощности выходного сигнала генератора в зависимости от напряжения питания транзисторов: *а* – 1,5 В; *б* – 2 В; *в* – 3 В; *г* – 4…6 В

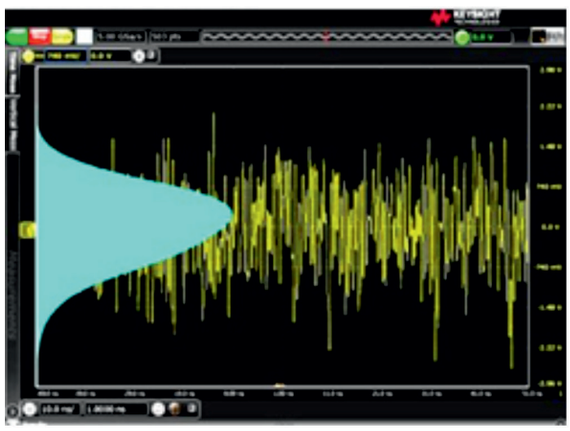


Рис. 8. Пример временной реализации генерируемого шумового сигнала генератора и функция распределения его мгновенных значений

1(540).indd 68 05.03.2019 8:12:36

В качестве одного из таких применений выступает использование генератора для решения коммуникационных задач, связанных, например, с защитой информации в оптических линиях связи. При этом выходные характеристики генератора – его сверхширокополосность и равномерность спектральной характеристики – позволяют использовать любой участок его спектра мощности от единиц килогерц до единиц гигагерц для модуляции лазерного несущего колебания с целью маскировки передаваемой полезной информации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пакете ADS был промоделирован и исследован во временной и частотной областях генератор шума, представляющий собой систему из шести связанных простейших осцилляторов на основе SiGe-транзисторов BFP620F. Предложен и реализован в виде экспериментального макета генератор шума, устойчиво генерирующий шумоподобные сигналы в диапазоне частот от 9 кГц до 5 ГГц. При этом неравномерность спектральной характеристики в указанном диапазоне не превышает 10 дБ, а выходная (интегральная) мощность достигает 40…50 мВт. Работоспособность генератора сохраняется при изменении питающего напряжения в пределах 20 % от номинального значения. Отсутствие резонансных избирательных цепей в структуре генератора позволяет получать шумовые колебания в диапазоне очень низких частот, что значительно расширяет возможную область применения данного генератора. Простая структура генератора, наряду с указанными характеристиками, делает возможным его компактную реализацию и, таким образом, перспективным для различных приложений в качестве источника сверхширокополосных шумовых сигналов.

Авторы выражают признательность сотрудникам СКБ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН В. П. Иванову и Д. В. Соснину за помощь в изготовлении макета генератора, проведении экспериментов и за полезные обсуждения полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Максимов, Н. А.** Твердотельные энергоэффективные генераторы хаотических колебаний СВЧ-диапазона и их применение в системах РЭП / Н. А. Максимов, А. И. Панас // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2(521). – С. 5 – 13.

2. **Иванов, В. П.** Сверхширокополосные генераторы шума и их практическое применение / В. П. Иванов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 13. – С. 37.

3. **Иванов, В. П.** Генератор сверхширокополосных шумовых СВЧ-колебаний / В. П. Иванов, Н. А. Максимов, А. И. Панас // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 26-я Международная Крымская конференция «КрыМиКо 2016». 4 – 10 сентября 2016 г., Севастополь. – Т. 2. – С. 202 – 208.

4. **Дмитриев, А. С.** Мультимедийные сенсорные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, М. Ю. Герасимов, А. И. Панас // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 4. – С. 1 – 9.

5. **Кислов, В. Я.** Новый способ генерирования широкополосных СВЧ-шумов / В. Я. Кислов, Е. А. Мясин // Специальная электроника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1968. – № 6. – С. 28 – 45.

6. **Максимов, Н. А.** Хаотическая и регулярная динамика автономных автоколебательных систем, содержащих *p–n*-переход / Н. А. Максимов, В. Я. Кислов // Радиотехника и электроника. – 1997. – № 12. – С. 1487 – 1492.

7. **Дмитриев, А. С.** Генерация хаоса / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Н. А. Максимов, А. И. Панас. – М.: Техносфера, 2012. – 423 с.

8. **Максимов, Н. А.** Твердотельная хаотическая автоколебательная система микроволнового диапазона упрощенной структуры / Н. А. Максимов, А. И. Панас // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43, вып. 3. – С. 88 – 94.

Статья поступила 21 января 2019 г.

1(540).indd 69 05.03.2019 8:12:36

УДК 621.382.322

ФОРМИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА СЕЛЕКТИВНО-ВЫРАЩЕННЫХ СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЯХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОЩНОГО СВЧ-ТРАНЗИСТОРА НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaN/GaN

И. А. Рогачёв[1], О. И. Мешков[1], А. Ф. Цацульников[2], В. В. Лундин[2], Д. А. Вакина[1], Д. А. Лаврентьев[1], А. С. Курочка[1], А. С. Максимов[1], Р. Г. Белов[1], В. А. Половинкина[1]

[1]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

[2]*НТЦ Микроэлектроники РАН, г. Санкт-Петербург*

Приведены результаты создания омического контакта для мощных СВЧ-транзисторов с использованием технологии селективно-выращенных сильнолегированных омических контактов на гетероструктуре AlGaN/GaN. Для металлизации омических контактов была использована стандартная металлизация Ti/Al/Ni/Au. Также определена зависимость наличия дефектов роста от площади селективного роста полупроводниковых слоёв нитрида галлия.

КС: AlGaN/GaN, селективный рост, несплавные омические контакты

FORMATION OF OHMIC CONTACTS ON SELECTIVELY GROWN HEAVILY DOPED SEMICONDUCTOR LAYERS TO CREATE A POWERFUL MICROWAVE TRANSISTOR ON AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES

I. A. Rogachev[1], O. I. Meshkov[1], A. F. Tsatsulnikov[2], V. V. Lundin[2], D. A. Vakina[1], D. A. Lavrentyev[1], A. S. Kurochka[1], A. S. Maksimov[1], R. G. Belov[1], V. A. Polovinkina[1]

[1]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

[2]*STC of Microelectronics RAS, St.Petersburg*

The results of creating an ohmic contact for high-power microwave transistors using the technology of selectively grown heavily doped ohmic contacts on AlGaN/GaN heterostructure are presented. Standard metallization Ti/Al/Ni/Au was used for metallization of ohmic contacts. The dependence of growth defects on the area of selective growth of gallium nitride semiconductor layers is also determined.

Keywords: AlGaN/GaN, selective growth, nonalloyed ohmic contacts

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение приборов на широкозонных полупроводниках достаточно обширно в области мощных СВЧ-устройств. Благодаря большой ширине запрещённой зоны (> 3 эВ), они имеют большие пробивные напряжения, что и обуславливает получение удельных плотностей мощности более 2 Вт/мм [1]. Это даёт им преимущество перед традиционным материалом мощных СВЧ-приборов – арсенидом галлия (удельная мощность – 0,5…1,5 Вт/мм [2]).

1(540).indd 70 05.03.2019 8:12:36

Наибольшее применение из большого числа широкозонных полупроводниковых структур получили гетероструктуры на основе нитрида галлия, это обусловлено относительной простотой технологии изготовления приборов по сравнению с такими широкозонными материалами, как SiC и C (алмаз).

Несмотря на то, что технология создания нитридгалливых приборов относительно простая, она имеет ряд сложных моментов в осуществлении технологических процессов. Один из таких моментов – создание омических контактов с низким удельным сопротивлением. Так как полупроводник обладает большой шириной запрещённой зоны (~ 3,5 эВ), то нужно существенно снизить потенциальный барьер металл-полупроводник для получения линейной ВАХ. Традиционно для этой цели используется металлизация омического контакта Ti/Al/Ni/Au с последующим быстрым термическим отжигом (около 800…900 ˚C) [3]. При этом удельное сопротивление омического контакта находится на уровне 0,5…1 Ом·мм [4, 5]. Также получают более низкие сопротивления при использовании травления углублений под контакты [6], либо других систем металлизации [7–12], либо легирования поверхности полупроводника в месте создания омического контакта [13]. Но и эти способы имеют свои недостатки, которые тем или иным образом усложняют технологию создания приборов. Основная проблема этих методов состоит в использовании высокотемпературного отжига, который ухудшает геометрию и морфологию контактов. Чтобы обойти этот технологический процесс, необходимо сформировать контакт металла к селективно-выращенному сильнолегированному (n^{++}) слою полупроводника. Для осуществления этого механизма используют селективное выращивание сильнолегированных эпитаксиальных структур в местах формирования омических контактов, в этом случае при нанесении металлизации омический контакт образуется сразу и высокотемпературный отжиг уже не требуется (рис. 1).

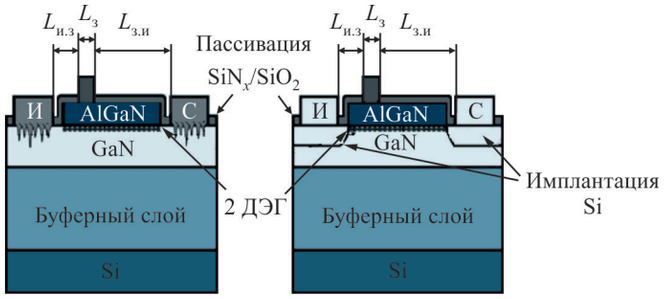


Рис. 1. Транзисторы с использованием вжигаемых (*а*) и невжигаемых (*б*) омических контактов [14] (ДЭГ – двумерный электронный газ)

Благодаря этому методу, получают приборы с низким значением удельного сопротивления (~ 0,1 Ом·мм [15]). При этом морфология и геометрия контакта не страдают, что значительно облегчает последующие технологические операции создания прибора.

В данной работе приведены результаты создания омических контактов на гетероструктурах AlGaN/GaN с применением технологии селективно-выращенных сильнолегированных слоёв полупроводника.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных образцов были использованы гетероструктуры на основе соединений AlGaN/GaN, выращенных на сапфировых подложках методом MOCVD на установке Dragon150.

1(540).indd 71 05.03.2019 8:12:36

В качестве буферного слоя был выращен (Al, Ga)N-слой, далее следовал изолирующий слой GaN, затем барьерный AlN/AlGaN-слой и верхний полупроводниковый слой GaN. Поверхность образца была пассивирована in situ слоем нитрида кремния толщиной 5 и 100 нм.

Для селективного роста сильнолегированных слоёв полупроводника было использовано четыре схемы (рис. 2).

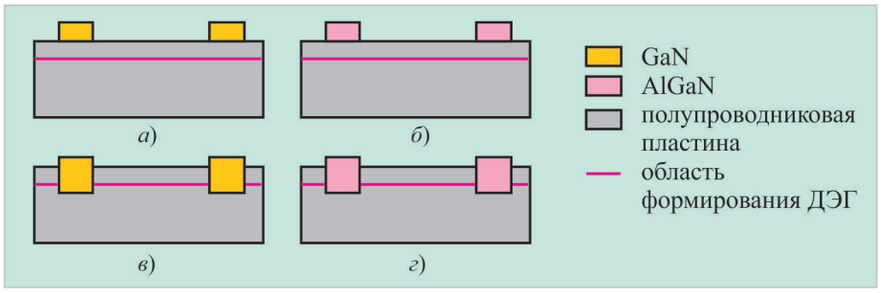


Рис. 2. Схема вариантов селективного роста сильнолегированных эпитаксиальных структур:
а – селективный рост GaN без затрава (Si_3N_4 – 100 нм); *б* – селективный рост AlGaN без затрава (Si_3N_4 – 100 нм); *в* – селективный рост GaN с затравом 100 нм (Si_3N_4 – 5 нм);
г – селективный рост AlGaN с затравом 100 нм (Si_3N_4 – 5 нм)

При формировании структур без затрава (рис. 2, *а*, *б*) использовалась толщина пассивирующего слоя нитрида кремния 100 нм, что обеспечивает заданную геометрию структуры. Для двух других случаев (рис. 2, *в*, *г*) затрав проводился на глубину 100 нм (до буферного слоя) и толщина пассивирующего слоя нитрида кремния составляла 5 нм. Травление полупроводникового слоя осуществлялось методом RIE ICP в смеси газов Cl_2/BCl_3. Во всех 4-х вариантах селективный рост гетероструктур происходил только в местах дальнейшего формирования металлизации омических контактов.

Для формирования омических контактов использовался фотошаблон мощного СВЧ-транзистора с разной периферией, от 50 мкм до 1,25 мм.

На полученных образцах была сформирована мезаизоляция, также методом RIE ICP в смеси газов Cl_2/BCl_3 напылена стандартная металлизация омических контактов Ti/Al/Ni/Au, измерены их удельные сопротивления. На основании измерений выбран вариант селективного роста эпитаксиальных структур с наименьшим сопротивлением омических контактов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе проведения экспериментов было выяснено, что селективный рост эпитаксиальных структур в областях формирования металлизации омических контактов проходит с образованием дефектов роста (рис. 3). Размеры площадок роста варьировались от 25×25 мкм (625 мкм^2) до 25×125 мкм (3125 мкм^2).

Как видно из рис. 4, плотность дефектов выше по краям элементов, в то время как их середина менее дефектна. Также образуются бортики высотой порядка 150 мкм на крайних площадках омических контактов мощного транзистора, в то время как средние элементы имеют размеры бортиков на порядок меньше (см. рис. 4). Подобные дефекты обусловлены процессами эпитаксиального роста.

При увеличении площади роста до размеров 300×80 мкм (24000 мкм^2) дефекты роста отсутствуют (рис. 5.).

1(540).indd 72 05.03.2019 8:12:36

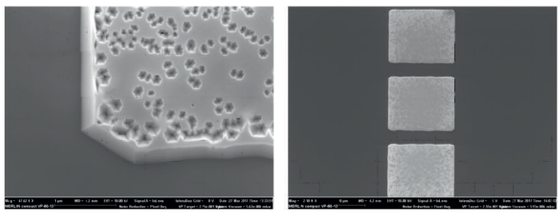


Рис. 3. Дефекты селективного роста эпитаксиальных структур на малых площадях

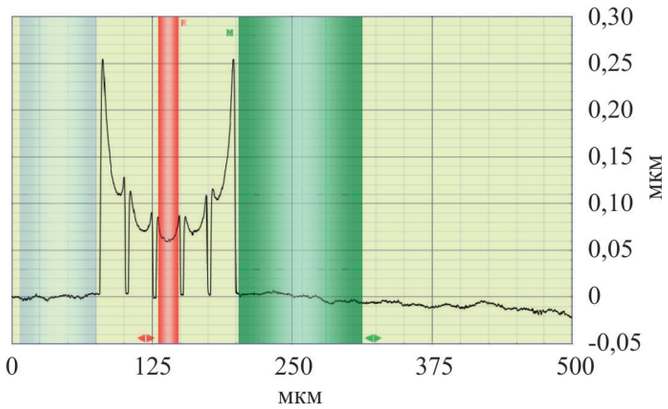


Рис. 4. Профиль поверхности селективно-выращенных слоёв GaN в областях формирования омических контактов

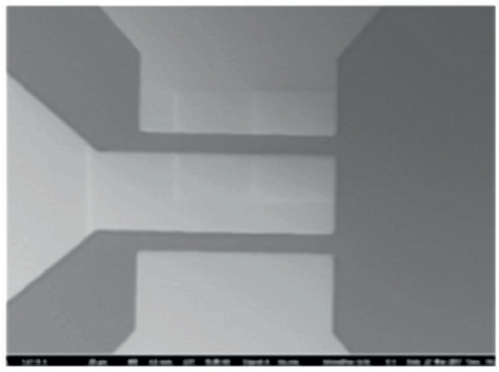


Рис. 5. Селективный рост эпитаксиальных структур на больших площадях

В результате формирования омических контактов были получены ВАХ и измерены их удельные сопротивления (рис. 6.). Так как области формирования омических контактов имеют достаточно малые площади (~ 600 мкм^2), то неизбежно появление дефектов роста эпитаксиальных структур, которые, в свою очередь, ухудшают качество омического контакта. Во время селективного роста на больших участках (~ 0,1 мм^2) подобные дефекты отсутствуют.

Вольт-амперные характеристики линейны в случае селективного роста нитрида галлия (см. рис. 6). Минимальное сопротивление омического контакта составило 0,4 Ом·мм при использовании селективного роста нитрида галлия с предварительным затравом.

1(540).indd 73 05.03.2019 8:12:37

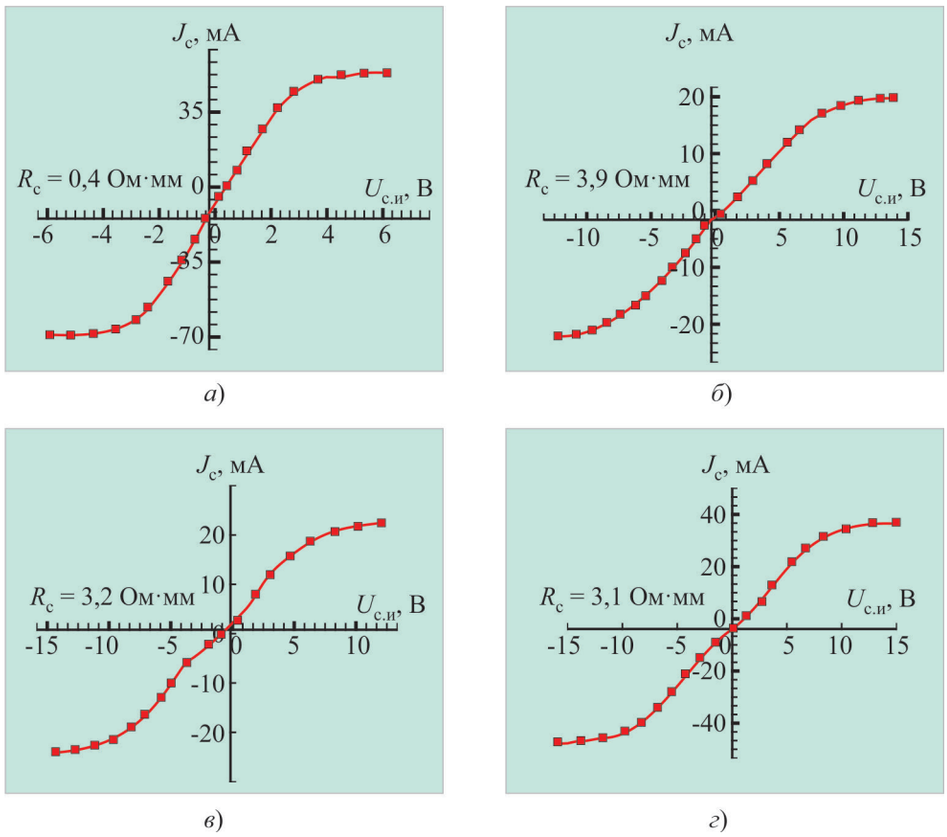


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики омических контактов при использовании разных вариантов селективного роста эпитаксиальных структур: *а* – селективный рост GaN с предварительным затравом; *б* – селективный рост GaN без предварительного затрава; *в* – селективный рост AlGaN без предварительного затрава; *г* – селективный рост AlGaN с предварительным затравом

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение технологии селективного роста сильнолегированных эпитаксиальных структур позволяет получить линейную вольт-амперную характеристику омических контактов. В случае использования селективного роста нитрида галлия с затравом было получено удельное сопротивление омических контактов 0,4 Ом·мм. Это сравнимо с результатами измерения сопротивления на сплавных омических контактах, полученных с использованием стандартной металлизации Ti/Al/Ni/Au и с последующим быстрым термическим отжигом при температуре 830 ˚C [6].

При селективном росте эпитаксиальных гетероструктур на малых площадях наблюдается образование дефектов роста, что объясняет высокое удельное сопротивление для данного вида омических контактов. Избежать образования подобных дефектов возможно при селективном росте эпитаксиальных структур на площадях порядка 0,1 мм^2.

1(540).indd 74 05.03.2019 8:12:37

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин, В.** Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» / В. Данилин, Т. Жукова, Ю. Кузнецов, С. Тараканов, Н. Уваров // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 4. – С. 20 – 29.

2. **Колотун, О.** Усилители СВЧ на основе технологий GaN и GaAs, эволюция технологии Diamond FETs / О. Колотун // Инженерная микроэлектроника. ВЧ- и СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 2 (122). – С. 2 – 6.

3. **Qin, Z. X.** Study of Ti/Au, Ti/Al/Au and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to *n*-GaN / Z. X. Qin, Z. Z. Chen, Y. Z. Tong, X. M. Ding, X. D. Hu, T. J. Yu, G. Y. Zhang // Appl. Phys. – 2004. – Vol. A 78. – P. 729 – 731.

4. **Eastman, Lester F.** Undoped AlGaN/GaN HEMTs for microwave power amplification / Lester F. Eastman, Vinayak Tilak, Smart J., Bruce M. Green, Eduardo m. Chumbes, Roman Dimitrov, Hyungtak Kim, Oliver S. Ambacher, N. Weimann, T. Prunty, Michael Muphy, William J. Scaff, James R. Shealy // IEEE Transactions on electron devices. – 2001. – Vol. 48, No 3. – P. 479 – 485.

5. **Рогачёв, И. А.** Исследование капсулирования с целью сохранения морфологии омических контактов Ti/Al/Ni/Au на гетероструктурах AlGaN/GaN / И. А. Рогачёв, А. С. Курочка, О. И. Мешков, А. В. Князьков, А. В. Никитин, С. Д. Зинкин, А. С. Верещагина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 3 (534) . – С. 50 – 55.

6. **Рогачёв, И. А**. Особенности формирования омических контактов и затвора HEMT на гетероструктурах AlGaN/GaN / И. А. Рогачёв // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: труды XIII Международной конференции. – Курск, 24 – 26 мая, 2016. – С. 18 – 25.

7. **Song, Bo.** Ultralow-leakage AlGaN/GaN high electron mobility transistors on Si with non-alloyed regrown ohmic contacts / Bo Song, Mingda Zhu, Zongyang Hu// IEEE Electron Device Letters. – 2016. – Vol. 37, No 1. – P. 16 – 19.

8. **Marti, D.** 94-GHz large-signal operation of AlInN/GaN high-electron-mobility transistors on silicon with regrown ohmic contacts / D. Marti, S. Tirelli, V. Teppati // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36, No 1. – P. 17 – 19.

9. **Lee, H.-S.** // IEEE Electron Device Lett. – 2011. – Vol. 32. – P. 623.

10. **Li, Y.** Low-contact-resistance non-gold Ta/Si/Ti/Al/Ni/Ta ohmic contacts on undoped AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors grown on silicon / Y. Li, G. Ing-Ng, S. Arulkumaran // Appl. Phys. Express. – 2013. – Vol. 6, No 11. – P. 116501.

11. **Sasakura, A.** Cu/Al/Mo/Au and Ni/Al/Mo/Au ohmic contacts for AlGaN/GaN heterostructures / A. Sasakura, J. T. Asubar, H. Tokuda et al. // IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK). – Japan, 2015. – P. 42 – 43.

12. **Chiu, Yu-Sh.** Ti/Al/Ti/Ni/Au ohmic contacts on AlGaN/GaN high electron mobility transistors with improved surface morphology and low contact resistance / Yu-Sh. Chiu, T.-M. Lin, H.-Q. Nguyen // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2014. – Vol. 32. – P. 011216.

13. **Bao, Xichang.** Ohmic contact to *n*-GaN formed by ion-implanted *p*-GaN / Xichang Bao, Jintong Xu, Wenjing Zhang, Ling Wang, Kaihui Chu, Chao Li, Xiangyang Li // Internation Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Materials and Devices Technology for Sensors, 2009: Proc. of SPIE. – Vol. 7381, 73810V-1 – 73810V-6.

14. **Yu, Haijiang.** Ion implanted AlGaN–GaN HEMTs with nonalloyed ohmic contacts / Haijiang Yu et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2005. – Vol. 26, No 5. – P. 283 – 285.

15. **Скубо, В. В.** Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN / В. В. Скубо, П. Е. Сим, Л. Э. Великовский, Ю. Н. Поливанова, А. Ф. Цацульников // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь: доклады ТУСУРа. – Декабрь 2015. – № 4 (38) . – С. 76 – 78.

Статья поступила 8 февраля 2019 г.

1(540).indd 75 05.03.2019 8:12:37

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 61

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИПИДНЫХ МОНОСЛОЕВ – МОДЕЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАН С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

К. Д. Казаринов, В. С. Малинин, И. Г. Полников

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

В работе продолжено экспериментальное исследование метода изучения поверхностных свойств липидных монослоев. Метод основан на регистрации длины и затухания поверхностных акустических волн и позволяет определять поверхностное натяжение и поверхностную вязкость монослоя. Результаты измерения монослоев L-α-лецитина показали, что метод может быть использован как эффективный инструмент изучения поверхностных свойств липидных монослоев при действии микроволнового излучения.

КС: биологические эффекты микроволнового излучения, генерация поверхностных волн, поверхностно-активные вещества, липидные монослои, модели биологических мембран, поверхностное натяжение

STUDYING THE MICROWAVE RADIATION EFFECT ON THE SURFACE PROPERTIES OF LIPID MONOLAYERS – MODELS OF BIOLOGICAL MEMBRANES USING THE CAPILLARY WAVE METHOD

K. D. Kazarinov, V. S. Malinin, I. G. Polnikov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

An experimental study of the method for studying the surface properties of lipid monolayers is continued. The method is based on recording the length and attenuation of surface acoustic waves and allows determining the surface tension and the surface viscosity of the monolayer. The results of measuring L-α-lecithin monolayers showed that the method can be used as an effective tool for studying the surface properties of lipid monolayers under the action of microwave radiation.

Keywords: biological effects of microwave radiation, surface wave generation, surface active agents, lipid monolayers, biological membrane models, surface tension

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия большое внимание исследователей было привлечено к биологическим эффектам электромагнитного поля (ЭМП) низкой интенсивности в микроволновом диапазоне. Внимание это было стимулировано как необходимостью создания научно обоснованных гигиенических норм, так и сообщениями о терапевтическом действии микроволнового излучения.

1(540).indd 76 05.03.2019 8:12:37

Начало этим работам было положено в НПП «Исток» под руководством академика Н. Д. Девяткова [1]. Однако, несмотря на то, что изучению механизмов наблюдаемых биологических эффектов микроволнового излучения посвящено множество научных работ, объяснения их до сих пор не отличаются достаточной ясностью и однозначностью. Так, например, остается дискуссионным вопрос о нетепловом характере наблюдаемых эффектов [2, 3]. Большое количество публикаций последних лет наглядно свидетельствует о том, что интерес к этому направлению не ослабевает и по сегодняшний день [4]. Проведенный литературный обзор результатов исследований биологического действия ЭМП от низкочастотного, микроволнового, а также видимого диапазона позволяет предположить, что наиболее чувствительными элементами клетки к действию ЭМП являются клеточные мембраны [5].

Важным обоснованием для рассмотрения мембранных систем в качестве основных участников взаимодействия ЭМИ с биосистемами является представление о том, что мембраны могут осуществлять как регуляторные, так и исполнительные функции. Биомембраны определяют морфологию любой клетки, ее специфическую организацию, адекватную соответствующей биологической функции в организме. Благодаря своей организации, они могут осуществлять такие фундаментальные процессы, как метаболизм, транспорт веществ, ионную проницаемость, возбудимость, механохимическую активность, запасание и преобразование энергии. Регуляция жизнедеятельности клетки происходит путем воздействия регуляторных сигналов на плазматическую мембрану, занимающую ведущее положение в иерархии систем управления на клеточном уровне [6]. Эта важная роль плазматической мембраны и ее структурно-функциональные особенности позволили Крепсу Е. М. [7] рассматривать мембранную систему в качестве основного звена адаптации организма, структуры, которая в первую очередь реагирует на изменение окружающей среды приспособительными реакциями.

Таким образом, становится актуальной концепция мембранной активности в широком диапазоне длин волн. Наш опыт изучения мембранотропной активности при КВЧ-излучении позволяет утверждать, что перспективными моделями биологических мембран являются везикулярные или же плоские модели липидных бислоев в водной среде [8]. Кроме того, следует отметить, что изучение липидного компонента биомембран позволяет получать необходимую информацию в медицинской диагностике, т. к. позволяет определить особенности строения мембран при различных патологических состояниях, идентифицировать многие заболевания на ранних стадиях развития [9].

Изучение свойств тонких пленок поверхностно-активных веществ на границе вода-воздух актуально для понимания целого ряда процессов в области физической химии, коллоидной химии, гидродинамики, биологии и т. д. Метод липидных монослоев позволяет определять как энергетические и механические параметры монослоя, так и площадь единичных молекул, выстилающих монослой, что важно для понимания структуры и функции липидных бислоев в биологических объектах. Знание поверхностных свойств легочных сурфактантов необходимо и для фундаментальных исследований, и для диагностики нарушений сурфактантной системы человека. Основные параметры, определяющие поверхностные свойства поверхностно-активных пленок: коэффициент поверхностного натяжения и поверхностная сжимаемость (или вязкость). В настоящее время известны несколько методов измерения этих параметров.

Для измерения поверхностного натяжения широко используются метод капиллярного поднятия, метод взвешивания капли, метод Вильгельми, метод максимального усилия отрыва кольца дю Ноя, метод объема падающих капель, метод максимального давления в пузырьке [10, 11].

1(540).indd 77 05.03.2019 8:12:37

Эти методы дают неплохие результаты при измерении натяжения чистых поверхностей, контактирующих с мениском. Однако в случае наличия на поверхности поверхностно-активных веществ их применение затруднено необходимостью учитывать значение краевого угла смачивания, а также возможностью налипания пленок на измерительные поверхности, что, в свою очередь, неконтролируемо изменяет угол смачивания.

Методы, основанные на регистрации волн на поверхности жидкости, лишены многих недостатков методов менисков и в то же время позволяют измерять не только поверхностное натяжение, но и поверхностную вязкость монослоев. Среди них можно выделить метод спектроскопии поверхностных флуктуаций [12] и метод капиллярных волн [13]. В методе спектроскопии поверхностных флуктуаций анализируют спектр света, рассеянного на тепловых колебаниях поверхности жидкости. Амплитуда таких колебаний очень мала, и для их регистрации необходима высокая звуковая изоляция измерительной установки. Более простой метод капиллярных волн лишен этого недостатка, но требует искусственной генерации капиллярных волн. В качестве генератора в различных работах использовали вибрирующие пластины, иглы, струны и т. д. Во всех этих способах был неизбежен контакт вибрирующего элемента генератора с поверхностью жидкости. Наиболее эффективным методом для бесконтактной генерации капиллярных волн является использование электрического поля. В данной работе развивается метод генерации капиллярных акустических волн переменным электрическим полем с целью изучения поверхностных свойств липидных монослоев (моделей биологических мембран) на поверхности воды.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Описание экспериментальной установки

Для реализации метода опредения свойств липидных монослоев на поверхности воды с помощью электрострикционной генерации капиллярных волн была разработана представленная в работе [14] следующая установка (рис. 1).

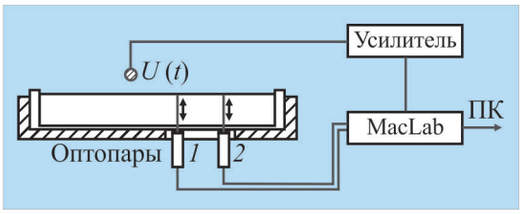


Рис. 1. Схема установки для изучения свойств липидных монослоев на поверхности воды

В качестве генератора волн использован цилиндрический электрод диаметром 2 мм, расположенный параллельно поверхности воды. Зазор между электродом и водой составлял 1 мм. В качестве генератора напряжения, подаваемого на электрод, использовали ЦАП MacLab и усилитель с дополнительной фильтрацией сигнала. Генератор позволял получать переменное напряжение амплитудой до 2 кВ в полосе частот от 1 до 500 Гц. Управление генератором, запись сигналов и математическая обработка данных осуществлялись с помощью программно-интерфейсного комплекса MacLab (ADInstruments). Форма сигнала генератора задавалась в соответствии с уравнением

1(540).indd 78 05.03.2019 8:12:38

$$\varphi(t)=\varphi_0(t)\sqrt{\left(1-\cos\left(2\pi t/T\right)\right)\left(1-\cos\left(\omega t\right)\right)}, \quad (1)$$

где φ_0 – амплитуда максимального размаха; T – длительность кадра (256 мс); ω – круговая частота сигнала ($2\pi\cdot100$ с$^{-1}$). Такая форма сигнала позволяет использовать кратковременную генерацию гармонического сигнала без значительного искажения частотного спектра. Длительность генерации в одном кадре составляет 256 мс, что позволяет исключить регистрацию волн, отраженных от краев сосуда.

Как указывалось ранее в работе [15], плотность сил, действующих на жидкость, пропорциональна квадрату потенциала электрода φ. Тогда

$$\rho_e(x,t)\sim\varphi^2=\rho_0(x)\left(1-\cos\left(2\pi t/T\right)\right)\left(1-\cos\left(\omega t\right)\right). \quad (2)$$

Кроме того, эффективность генерации капиллярных волн существенно зависит от частоты, так что вклад гармоники $2\pi/T$ по сравнению с основной частотой можно считать незначительным. Таким образом, выбранная схема генерации позволяет получать пакеты поверхностных волн, описываемых, в соответствии с [16], уравнениями

$$\zeta(x,t)=\zeta_0\left[1-\cos\left(\frac{2\pi}{T}\left(\frac{kx+\alpha}{\omega}-t\right)\right)\right]\cos\left(kx+\alpha-\omega t\right)e^{-\gamma x} \quad (3)$$

при $kx/\omega < t < kx/\omega + T$ и $\zeta(x) = 0$ при $t < kx/\omega$ и $t > kx/\omega + T$. Здесь α – сдвиг фазы относительно функции изменения потенциала генератора, а задержка $kx/\omega + \alpha$ соответствует времени достижения поверхностных волн частоты ω от генератора до источника.

Распространение капиллярных волн регистрировали с помощью оптических датчиков *1* и *2*, расположенных на расстоянии 20 и 40 мм от генератора соответственно. Искривление поверхности воды над датчиком от горизонтального положения приводит к изменению светового потока, отраженного от поверхности, причем, при условии малости амплитуды волн по сравнению с длиной волны, сигнал с датчика с достаточной точностью является гармонической функцией от фазы капиллярной волны. Тогда для сигнала от i-го датчика имеем:

$$I_i(t)=I_0\left[1-\cos\left(\frac{2\pi}{T}\left(\frac{kx_i+\alpha}{\omega}-t\right)\right)\right]\cos\left(kx_i+\alpha-\omega t\right)e^{-\gamma x_i}. \quad (4)$$

Здесь в фазу сигнала α вносит добавку также система индикации и усиления сигнала. Важно, однако, что величина α одинакова для обоих датчиков и поэтому может быть исключена. В упрощенном виде можно записать:

$$I_1(t)=a_0\left[1-\cos\left(\frac{2\pi}{\omega T}\left(\vartheta-\omega t\right)\right)\right]\cos\left(\vartheta-\omega t\right),$$
$$I_2(t)=a_0\left[1-\cos\left(\frac{2\pi}{\omega T}\left(kL+\vartheta-\omega t\right)\right)\right]\cos\left(kL+\vartheta-\omega t\right)e^{-\gamma L}, \quad (5)$$

где L – расстояние между датчиками; $\vartheta = kx_1 + a$; $a_0 = I_0 e^{-\gamma x_1}$.

Пример сигнала от оптических датчиков в случае генерации поверхностных волн на чистой воде при 25 °С представлен на рис. 2. Для уменьшения шумов, вызванных акустическими помехами, сигнал накапливали 16 раз, синхронизируя кадры относительно начала генерации.

1(540).indd 79 05.03.2019 8:12:38

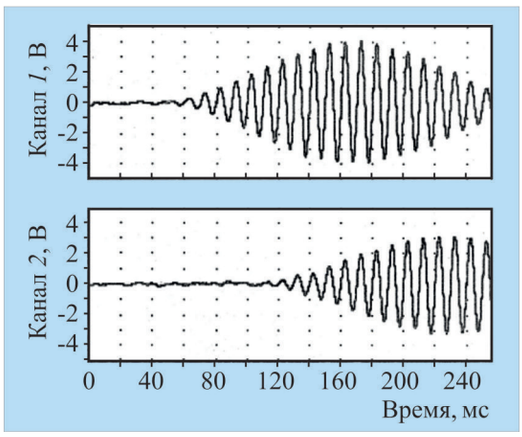


Рис. 2. Типичная запись регистрации поверхностных волн оптическими датчиками. Частота генерации – 100 Гц. Расстояние между датчиками – 20 мм. Представлен результат усреднения 16 кадров

Аппроксимируя эти кривые функциями (5), находим неизвестные параметры α_0, ϑ, k, γ. При этом отношение максимальных амплитуд $I_2/I_1 = \exp(-\gamma x_1)$ определяет коэффициент затухания, а абсолютный сдвиг фаз между двумя сигналами – волновой вектор k. Далее с помощью соотношения из нашей предшествующей работы [16]

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2}\left[1-E\left(1-\sqrt{1-\frac{i}{N}}\right)\right]=\left(1+2iN\right)^2+\left(4N^2+E\right)\sqrt{1-\frac{i}{N}} \qquad (6)$$

вычисляются натяжение σ и сжимаемость монослоя ε.

2.2. Определение поверхностных свойств монослоя

Раствор L-α-фосфатидилхолина (лецитина), 1 мг/мл, в растворе гексан/этанол (9/1) наносили дробными порциями (по 1 мкл) на поверхность раствора NaCl (100 мМ). После каждой порции ожидали 1 мин для испарения растворителя и проводили измерения. Результаты представлены на рис. 3. Видно, что поверхностное натяжение при формировании плотного монослоя снижается приблизительно до 25 мН/м. При этом поверхностная концентрация лецитина достигает значения около 2 молекул/нм^2, что соответствует площади на одну молекулу 0,5 нм^2. Эти результаты хорошо соответствуют опубликованным ранее данным о натяжении монослоя лецитина, измеренном общепринятыми методами [17, 18]. В то же время формирование монослоя с помощью нанесения на поверхность воды раствора липида является нестандартным методом. Обычно поверхностную концентрацию липида меняют, уменьшая общую площадь поверхности, перемещая специальную перегородку. В нашем случае неочевидно, что весь липид, нанесенный на поверхность воды, встраивается в монослой, формируя максимально плотную упаковку.

Декремент затухания поверхностных волн при малой концентрации лецитина ($9{,}6\cdot10^{-3}$) соответствует затуханию на чистой поверхности и определяется объемной вязкостью воды. При увеличении концентрации лецитина наблюдается резкий рост декремента до значения примерно $34\cdot10^{-3}$ в области перегиба кривой поверхностного натяжения. Затем декремент уменьшается и стабилизируется на уровне $20\cdot10^{-3}$ при формировании плотного монослоя, что соответствует затуханию вблизи несжимаемой пленки. Интересно отметить, что максимум затухания поверх-

1(540).indd 80 05.03.2019 8:12:38

ностных волн (на рисунке не показан) совпадает с максимумом производной функции поверхностного натяжения от концентрации липида, определенного как упругая постоянная, характеризующая свойства липидной пленки на поверхности жидкости.

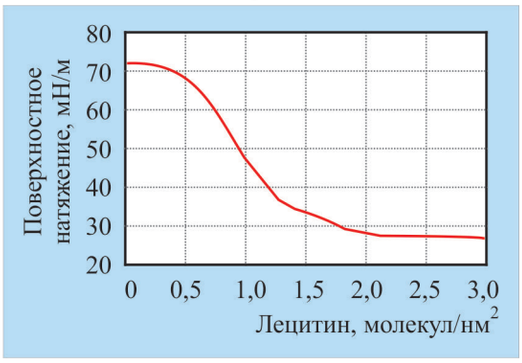


Рис. 3. Диаграмма σ-Г. Поверхностная концентрация лецитина представлена в количестве молекул на площадь (нм^2). Температура раствора – 25 °С. Кривая на рисунке представляет поверхностное натяжение монослоя лецитина

Наши опыты по изучению действия микроволн на поверхность липидных монослоев начинались с наблюдения за поведением монослоя липидов, сформированного внутри периметра, образованного петлей волоса. Убедившись в непрерывности поверхности пленки липида с помощью отраженного света (т. е. монослой находился в конденсированном или текучем состоянии), мы облучали поверхность монослоя, установив рупор микроволнового излучателя над границей монослоя. Через несколько минут облучения при длине волны 8 мм и интенсивности облучения 30 мВт/см^2 мы наблюдали эффект втягивания области липидного монослоя к центру рупора, т. е. в направлении максимальной напряженности электрического поля и более высокой температуры нагрева поверхности воды, интенсивно поглощающей КВЧ-излучение. С учетом результатов наших экспериментов по изучению термогравитационной и термокапиллярной конвекции в воде при КВЧ-облучении поверхности мы сделали вывод о возможности артефактов, связанных с этими явлениями, даже при низких уровнях интенсивности облучения. Мы получаем модель относительного движения контактирующих фаз, детально изученную Б. А. Носковым [19].

Поэтому, представляя наши предварительные результаты по облучению липидных монослоев в экспериментах с регистрацией капиллярных волн, мы учитывали нагревание нашего объекта исследования вследствие интенсивного поглощения водой КВЧ-излучения. Мы зарегистрировали снижение поверхностного натяжения нашего образца в среднем на 5 % во всем диапазоне изменений концентрации липидов. Изменение температуры объекта не превышало 5 °С. Температурный эквивалент эффекта при нагревании объекта в термостате составил 8 °С.

Скорее всего, зависимость от температуры параметров капиллярных волн при КВЧ-облучении не может быть тривиальной, т. к. тепло передается не через поверхность, благодаря теплообмену, а через некоторый объем, определяемый глубиной поглощения излучения. Этим вызван некоторый тепловой эквивалент наблюдаемого эффекта. Похожий эффект был обнаружен при КВЧ-облучении водного раствора NADH [20], который авторы связывают со структурированием приповерхностного слоя воды при поглощении КВЧ-излучения, а также при СВЧ-облучении воды в сантиметровом диапазоне длин волн [21], когда наблюдалось уменьшение величины коэффициента поверхностного натяжения при 30-минутной продолжительности облучения.

1(540).indd 81 05.03.2019 8:12:38

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен электрострикционный способ генерации поверхностных волн для изучения поверхностных свойств липидных монослоев. Метод основан на регистрации длины и затухания поверхностных волн и позволяет определять поверхностное натяжение и поверхностную вязкость монослоя. Для генерации поверхностных волн используется переменное электрическое поле, а для их регистрации – оптические датчики. Метод обеспечивает высокую точность измерений, является бесконтактным и не требует высокой акустической изоляции прибора.

Создан лабораторный макет установки для реализации данного метода. Проведены измерения поверхностного натяжения монослоев L-α-лецитина в зависимости от поверхностной концентрации. Представленные результаты показали, что метод может быть использован как эффективный инструмент изучения поверхностных свойств липидных монослоев – моделей биологических мембран при исследованиях действия микроволнового излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков, Н. Д.** Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н. Д. Девятков // УФН. – 1973. – Т. 110. – С. 453 – 454.

2. **Adair, R. K.** Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation / R. K. Adair // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, No 1. – P. 39 – 48.

3. **Foster, K. R.** Thermal and nonthermal mechanisms of iteraction of radio-frequency energy with biological systems / K. R. Foster // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2000. – Vol. 28, No 1. – P. 15 – 23.

4. **Vlasova, I. I.** Extremely high frequency electromagnetic radiation promotes neutrophil antimicrobial activity / I. I. Vlasova, E. V. Mikhalchik, A. A. Gusev, N. G. Balabushevich, S. A. Gusev and K. D. Kazarinov // Bioelectromagnetics. – February 2018. – Vol. 39, Is. 2. – P. 144 – 155.

5. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2 (537). – С. 62 – 75.

6. **Конев, С. В.** Структурная лабильность биологических мембран и регуляторные процессы / С. В. Конев. – Минск: Наука и техника, 1987. – 240 с.

7. **Крепс, Е. М.** Фосфолипиды клеточных мембран нервной системы в развитии животного мира / Е. М. Крепс. – Л.: Наука, Ленингр. отд. Баховские чтения. АН СССР. Ин-т биохимии им. А.Н. Баха, 1967. – 76 с.

8. **Казаринов, К. Д.** Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности / К. Д. Казаринов // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. – 1990. – Т. 27. – 102 с.

9. **Новгородцева, Т. П.** Липидомика в медико-биологических исследованиях НИИ медицинской климатологии и восстановительного лечения / Т. П. Новгородцева // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2009. – № 4 – 5 (39 – 40). – С. 133 – 137.

10. **Davies, J. T.** Interfaciel phenomena. Chapter 8 / J. T. Davies, E. K. Rideal . – N.Y. : Academic Press, 1963.

11. **Джейкок, М.** Химия поверхностей раздела фаз / М. Джейкок, Дж. Парфит. – М.: Мир, 1984.

12. **Shih, L. B.** Surface fluctuation spectroscopy. A novel technique for characterizing liquid interfaces / L. B. Shih // Rev. Sci. Instrum. – 1984. – Vol. 55. – P. 716 – 726.

13. **Maloy, K. J.** An experimental technique for measurements of capillary waves / K. J. Maloy, J. Feder, T. Jossang // Rev. Sci. Instrum. – 1989. – Vol. 60. – P. 481 – 486.

14. **Казаринов, К. Д.** Результаты экспериментального изучения поверхностных свойств липидных монослоев – моделей биологических мембран / К. Д. Казаринов, А. С. Титов, В. С. Малинин, С. В. Титов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 2 (февраль). – С. 1 – 11.

15. **Титов, С. В.** Расчет параметров генерации капиллярных волн в водной среде / С. В. Титов, В. С. Малинин, К. Д. Казаринов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 1 (январь). – С. 1 – 12.

1(540).indd 82 05.03.2019 8:12:38

16. **Титов, С. В.** Исследования поверхностных свойств липидных монослоев – моделей биологических мембран / С. В. Титов, В. С. Малинин, А. С. Титов, К. Д. Казаринов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – № 10 (октябрь). – С. 1 – 15.

17. **Gains, G. L.** Insoluble monolayers at liquidgas interfaces / G. L. Gains. – N.Y.: Wiley (Interscience), 1966.

18. **MacDonald, R. C.** Lipid monolayer states and their relationship to bilayers / R. C. MacDonald, S. A. Simon // Proc. Natl. Acad. Sci. – 1987. – Vol. 84. – P. 4089 – 4093.

19. **Носков, Б. А.** Поверхностные волны при относительном движении контактирующих фаз / Б. А. Носков // Коллоидн. журн. – 1987. – Т. 49, № 5. – С. 889 – 897.

20. **Заболотный, М. А.** Конформационные состояния молекул NADH в гидратной оболочке под влиянием слабого электромагнитного поля / М. А. Заболотный, Ю. М. Барабаш, Н. П. Кулиш, О. П. Дмитренко, М. О. Кузьменко // Биофизика. – 2015. – Т. 60, вып. 1. – С. 44 – 52.

21. **Мамедов Н. А.** Изменение поверхностного натяжения воды под действием различных физических факторов / Н. А. Мамедов, Г. И. Гарибов, Ш. Ш. Алекберов, Э. А. Радулов // Прикладная физика. – 2014. – № 6. – С. 20 – 23.

Статья поступила 15 ноября 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

САДОВНИКОВ С. И., ГУСЕВ А. И., РЕМПЕЛЬ А. А. **Полупроводниковые наноструктуры сульфидов свинца, кадмия и серебра.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 432 с.: ил.

В монографии изложено современное состояние фундаментальных исследований полупроводниковых наноструктурированных сульфидов свинца, кадмия и серебра, являющихся одними из наиболее востребованных халькогенидных соединений для современной электроники и биомедицинского применения. Обсуждены методы синтеза различных видов сульфидных наноструктур (стабильные коллоидные растворы, нанопорошки, квантовые точки, наночастицы с защитной оболочкой, гетеронаноструктуры). Особое внимание уделено гидрохимическому осаждению как универсальному методу синтеза всех видов сульфидных наноструктур. Рассмотрены основные методы размерной аттестации наноструктурированных веществ и материалов.

Для научных работников и специалистов в области физики и химии твердого тела, кристаллохимии, физического материаловедения, синтеза, структуры и свойств полупроводниковых сульфидных наноструктур, нестехиометрии твердого тела, нанокристаллического состояния веществ и материалов, а также для аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

1(540).indd 83 05.03.2019 8:12:38

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.372.412

ЭЛЕМЕНТЫ НА СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

И. А. Балыко, Е. В. Терешкин, С. М. Дерябкина, А. К. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Описана модель элементов на полосковых линиях передачи и получены аналитические выражения для комплексного коэффициента передачи ряда элементов, построенных на двух связанных линиях, у которых концы либо нагружены на комплексное сопротивление, либо короткозамкнуты, либо разомкнуты, либо соединены отрезком одиночной полосковой линии передачи.

КС: связанные полосковые линии, коэффициент передачи, сдвиг фаз

ELEMENTS ON COUPLED-TRANSMISSION STRIP LINES

I. A. Balyko, E. V. Tereshkin, S. M. Deryabkina, A. K. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

A model of elements on strip transmission lines is described and analytical expressions are obtained for a complex transmission coefficient for a set of elements built on two coupled lines, the ends of the lines are either loaded on the complex impedance, or short-circuited, or open-circuited, or connected by a segment of a single strip transmission line.

Keywords: coupled strip lines, transmission coefficient, phase shift

Электродинамическая система из двух связанных полосковых линий представляет собой восьмиполюсник (рис. 1), который описывается матрицей сопротивлений [Z], связывающей напряжения U_j и токи I_j на клеммах восьмиполюсника (j = 1, 2, 3, 4) [1]:

$$\boldsymbol{U} = [Z]\,\mathbf{I}.$$

Компоненты матрицы [Z] в предположении пренебрежимо малых потерь и пренебрежимо малого относительного отклонения коэффициентов замедления волны в линиях для четного и нечетного типов волн определяются из выражений:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} = -j\rho\ \mathrm{ctg}\theta, \\ Z_{12} &= Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} = -j\Delta\ \mathrm{ctg}\theta, \\ Z_{13} &= Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} = -j\rho\ \sin^{-1}\theta, \\ Z_{14} &= Z_{41} = Z_{23} = Z_{32} = -j\Delta\ \sin^{-1}\theta, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\rho = (Z_{0e} + Z_{0o})/2$; $\Delta = (Z_{0e} - Z_{0o})/2$; $\theta = 2\pi fnl/c$ – электрическая длина отрезка связанных линий на частоте f; Z_{0e}, Z_{0o} – волновые сопротивления четного и нечетного типов волн в связанных ли-

1(540).indd 84 05.03.2019 8:12:38

ниях; l – длина отрезка связанных линий; n – коэффициент замедления волны в линиях; c – скорость света в вакууме.

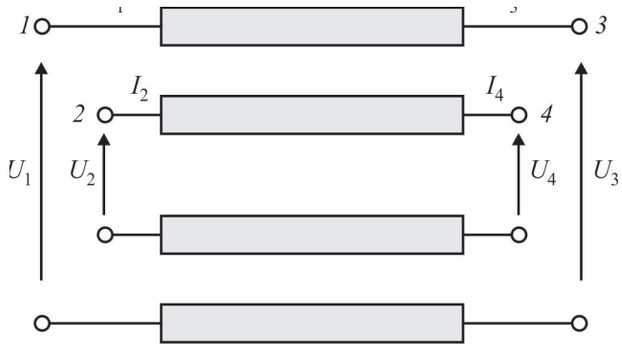


Рис. 1. Отрезок из двух связанных линий

Рассмотрим элемент из двух связанных линий, в котором между клеммами *2* и *4* включено комплексное сопротивление Z (рис. 2). Исследуем, в частности, как Z влияет на фазу сигнала СВЧ, прошедшего со входа *1* на выход *3*.

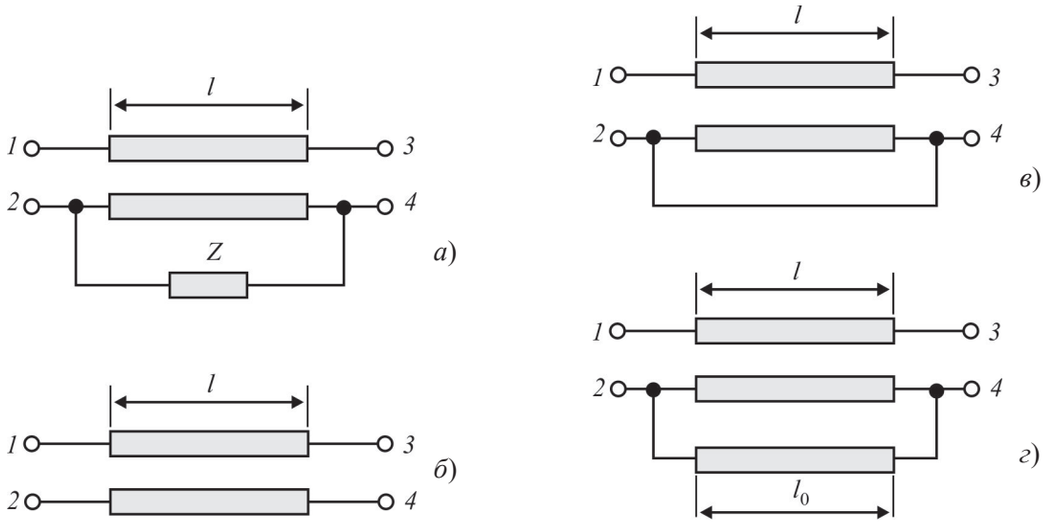


Рис. 2. Одиночные элементы на связанных полосковых линиях

Из соотношений между токами и напряжениями (см. рис. 1):

$$I_2^1 = I_2 + I_5 = 0,\ I_4^1 = I_4 + I_6 = 0,\ I_6 = -I_5,\ U_5 = U_2,\ U_6 = U_4,\ U_2 + I_5 Z - U_4 = 0$$

– и равенств (1) получаем

$$U_2 = Z_{12} I_1 + Z_{14} I_3 + (U_4 - U_2)(Z_{13} - Z_{11})/Z,$$
$$U_4 = Z_{14} I_1 + Z_{14} I_3 + (U_4 - U_2)(Z_{13} - Z_{11})/Z.$$

Коэффициент передачи S_{31} между клеммами *1* и *3* с учетом включенного сопротивления Z имеет вид

1(540).indd 85 05.03.2019 8:12:39

$$S_{31} = \frac{2Z_0(Z_{13} - Z_1)}{(Z_{11} + Z_1 + Z_0)^2 - (Z_{13} - Z_1)^2}, \quad (2)$$

где Z_0 – волновое сопротивление одинаковых подводящих линий передачи;

$$Z_1 = \frac{(Z_{14} - Z_{12})^2}{Z + 2(Z_{13} - Z_{11})}. \quad (3)$$

После подстановки выражений (1) в (2) и (3) получаем окончательную формулу

$$S_{31} = C \cdot \frac{Z + A}{Z + B}, \quad (4)$$

где

$$C = \frac{1}{\cos(\theta) + jm \cdot \sin(\theta)},$$

$$B = -j \cdot 2\rho \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)\left\{1 - j\frac{\Delta^2}{\rho Z_0} \cdot \frac{\sin(\theta) + j\frac{Z_0}{\rho}[1 - \cos(\theta)]}{\cos(\theta) + jm \cdot \sin(\theta)}\right\}, \quad (5)$$

$$A = -j \cdot 2\rho \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 - \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right].$$

Рассмотрим два крайних значения сопротивления Z.

Если клеммы *2* и *4* разомкнуты (см. рис. 2, *б*), то $Z = \infty$ и $Z_{31} = C$, тогда фаза прошедшего сигнала φ определяется из уравнения

$$\mathrm{tg}(\varphi) = -m \cdot \mathrm{tg}(\theta). \quad (6)$$

При $m = 1$ коэффициент передачи $S_{31} = e^{-j\theta}$ и фаза $\varphi = -\theta$, что соответствует формуле (6). Условие $m = 1$ описывает случай, когда расстояние между связанными полосками существенно больше толщины диэлектрика. Так, согласно [3], при $\varepsilon = 9{,}6$; $W/h = 1$ и $S/h > 5$ сопротивление $Z_{0e} = Z_{0o} = \rho = 50$ Ом. Когда расстояние между связанными полосками существенно меньше толщины диэлектрика, то, согласно [3], при $\varepsilon = 9{,}6$; $W/h = 1$ и $S/h = 0{,}05$ сопротивление $Z_{0e} = 65$ Ом; $Z_{0o} = 25$ Ом, $\rho = 45$ Ом. При дальнейшем сближении двух полосок они превращаются в один полосок шириной $W/h = 2$, при этом сопротивление стремится к $\rho = 35$ Ом [4].

Поскольку для $\rho > Z_0$ и $\rho < Z_0$ величина m всегда имеет значения, большие 1, то фаза прошедшего сигнала (6) не равна $-\theta$, а зависит как от θ, так и от m. При $\theta = \pi/4$ тангенс угла θ равен 1, поэтому $\mathrm{tg}(\varphi) = -m$. Как правило, величина m незначительно превышает 1, поэтому можно считать, что в первом приближении $\varphi = -\pi/4 - (m - 1)/2$.

Таким образом, у сигнала СВЧ, прошедшего через связанную полосковую линию, один полосок которой имеет разомкнутые концы, фаза получает дополнительный набег, равный $(m - 1)/2$.

Если клеммы *2* и *4* короткозамкнуты (см. рис. 2, *в*), то и коэффициент передачи (2) принимает вид

1(540).indd 86 05.03.2019 8:12:39

$$S_{31} = C\frac{A}{B} = \frac{1-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2\left[1-\cos(\theta)\right]}{\cos(\theta)\left[1-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2\right]+\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2+j\sin(\theta)\frac{Z_0^2+\rho^2-\Delta^2}{2\rho Z_0}}. \quad (7)$$

Фаза прошедшего сигнала φ определяется из уравнения

$$\mathrm{tg}(\varphi) = -\frac{\sin(\theta)\left[m-\frac{\rho}{2Z_0}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2\right]}{\cos(\theta)\left[1-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2\right]+\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2}. \quad (8)$$

Когда расстояние между связанными полосками существенно больше толщины диэлектрика, то $\Delta = 0$ и уравнение (8) совпадает с (6) при $m = 1$.

Комплексное сопротивление $Z = R + jX$ можно выбрать таким, чтобы модуль его был равен 1, а фаза равна φ_0: $R = \cos\varphi_0$, $X = \sin\varphi_0$. Это эквивалентно подключению ко второй связанной линии фазовращателя. При этом изменение фазы этого фазовращателя будет влиять на фазу сигнала в первой (основной) связанной линии. Коэффициент связи между связанными линиями можно выбрать таким, что изменение фазы φ_0 на величину, кратную традиционному значению дискрета (5, 625 град), приведет к изменению фазы в основной линии на доли градуса. Обычно, например, у шестиразрядного фазовращателя значения разрядов имеют значения 180, 90, 45, 22,5, 11,25 и 5,625 град. Включением различных секций можно обеспечить изменение фазы в пределах от 360 до 0 град с минимальным шагом 5,625 град. Однако для практических задач, например в измерительной аппаратуре или в радиолокационных системах высокого разрешения, могут потребоваться изменения фазы с шагом порядка 0,1 град [4].

Вместо комплексного сопротивления может быть включен отрезок одиночной линии передачи (см. рис. 2, *г*).

Еще более интересными представляются схемы на связанных линиях передачи с перекрестными соединениями двух независимых элементов (рис. 3).

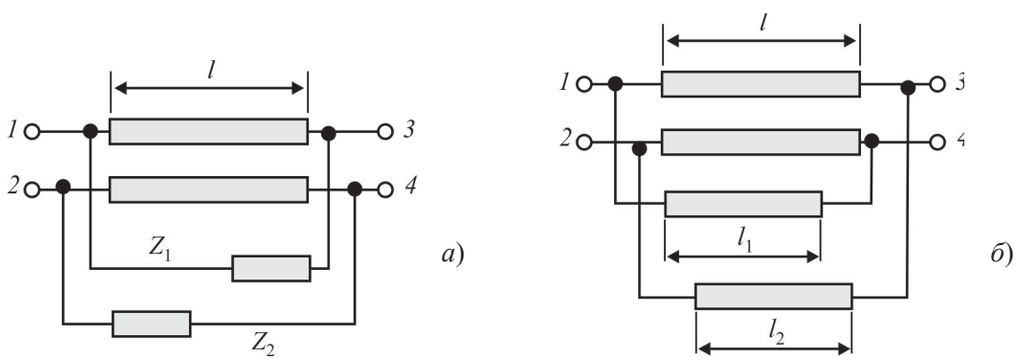


Рис. 3. Перекрестные элементы на связанных линиях передачи

1(540).indd 87 05.03.2019 8:12:39

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маттей, Г.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1/ Г. Маттей, Л. Янг, Е. М. Джонс; пер. с англ.; под ред. А. В. Алексеева и Ф. В. Кушнира. – М.: Связь, 1971. – 365 с.

2. **Альтман, Дж.** // Устройства СВЧ / Дж. Альтман; пер. с англ.; под ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с.

3. **Ганстон, М. А. Р.** Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линии СВЧ / М. А. Р. Ганстон. – М.: Связь, 1976.

4. **Елесин, В. В.** Построение монолитных ИС многоразрядных фазовращателей СВЧ-диапазона с улучшенными точностными характеристиками / В. В. Елесин, Г. Н. Назарова, Н. А. Усачев и др. // Электроника. – 2012. – № 5. – С. 31 – 38.

Статья поступила 25 октября 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

КАНЕЛЬ Г. И. **Ударные волны в физике твердого тела.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 208 с.: ил.

Представлены методы и последние наиболее интересные результаты экспериментальных исследований прочностных свойств, полиморфизма и метастабильных состояний материалов и веществ при чрезвычайно малых длительностях ударно-волнового воздействия. Обнаружено явление аномального возрастания напряжения пластического течения с увеличением температуры при высоких скоростях деформации. Реализовано приближение к предельно возможной (идеальной) объемной и сдвиговой прочности твердых тел. Получены новые данные о механизме и основных закономерностях субмикросекундных полиморфных превращений и фазовых переходов. Представлен анализ особенностей поведения высокотвердых хрупких материалов при ударно-волновом нагружении и возможных способов диагностирования разрушения сжатием. Обнаружены и исследованы волны разрушения в ударно-сжатых стеклах. Обнаружен ряд специфических особенностей динамики упругопластических волн ударного сжатия в релаксирующих средах, которые еще ждут осмысления и теоретического описания. Изложению основных результатов предшествует подробное описание теоретических основ метода и краткое обсуждение основных способов генерации и диагностики ударных волн в твердых телах.

Книга написана по результатам многолетних исследований при поддержке главным образом Российского фонда фундаментальных исследований, а также программ фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук и Российского научного фонда и ориентирована на специалистов в области физики высоких динамических давлений, физики металлов, физики и механики прочности и пластичности.

1(540).indd 88 05.03.2019 8:12:39

ИСТОРИЯ

УДК 001(09)

ВАДИМ ФЕДОРОВИЧ КОВАЛЕНКО

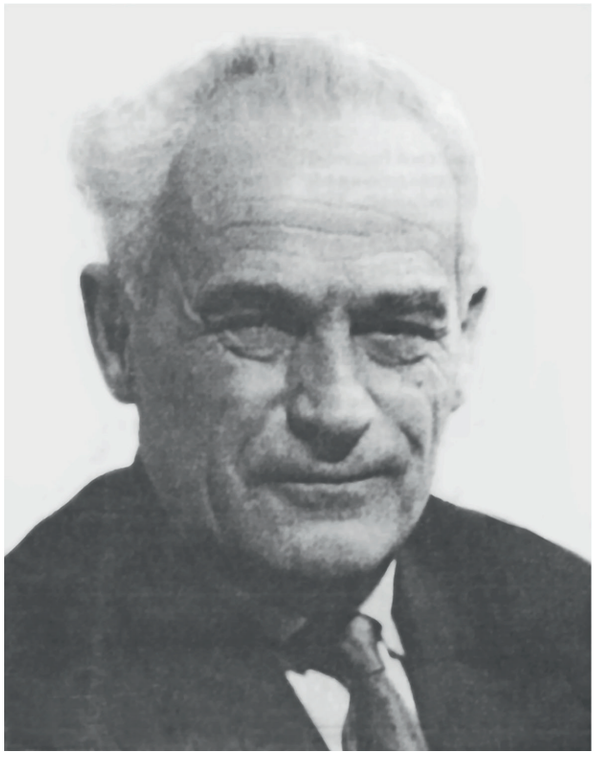
А. К. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

VADIM FYODOROVICH KOVALENKO

A. K. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino



Вадим Федорович Коваленко
(1907 – 1989)

В. Ф. Коваленко относится к той плеяде знаменитой Ленинградской школы, в которой зародились основы отечественной микроволновой электроники [1, 2].

Родился В. Ф. Коваленко 3 марта 1907 года (по старому стилю) в г. Харькове. Его отец, Федор Михайлович, украинец, родился в 1868 г. в селе Котелово Харьковской области. Более 35 лет, практически до конца своей жизни (в 1932 г.), он был учителем в начальных народных училищах. В основном эти училища находились в сельской местности и были со сроком обучения около 3-х лет. Учителем мог быть достаточно грамотный человек, который подбирался учредителем или содержателем училища и утверждался уездным училищным советом. Ф. М. Коваленко начал учительствовать в 25 лет. Не известно, было ли у него специальное педагогическое образование, но тот факт, что он проработал так долго учителем, говорит о том, что его уважали и учителя, и учредители. Предметы, которые преподавались в начальных народных училищах, в соответствии с государственным законом, были следующие: 1) закон божий; 2) чтение по книгам; 3) письмо; 4) первые четыре действия арифметики; 5) церковное пение. Кроме указанных обязательных предметов в училище могли преподаваться ремесла и рукоделие. Почти наверняка, отец обучил сына и многим другим предметам: истории, географии, естествознанию, музыке. Мать Вадима Федоровича – Ольга Матвеевна, уроженка

1(540).indd 89 05.03.2019 8:12:40

города Орла, русская, родилась в 1878 году и умерла в 1920 году, когда Вадиму Федоровичу было 13 лет. Сестре Тамаре в год смерти матери было всего 8 лет.

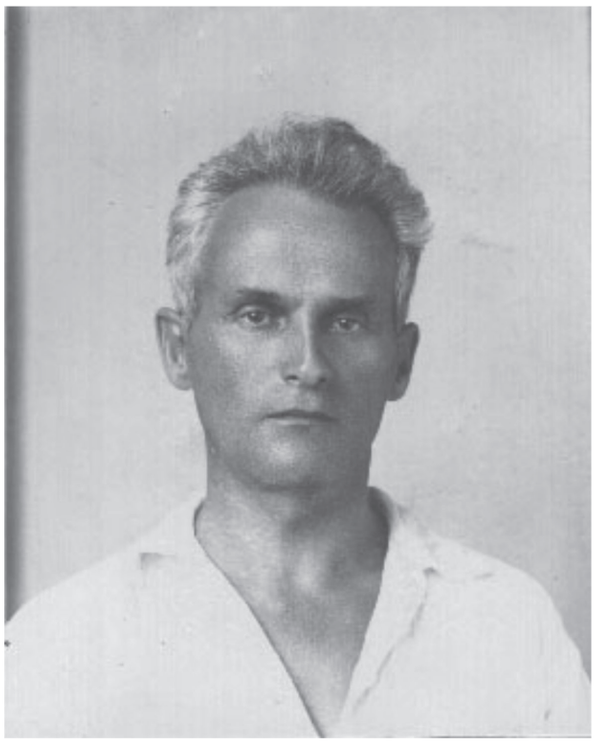
Нужда заставила Вадима устроиться на работу конторщиком проволочного цеха Донецко-Юрьевского металлургического завода в г. Алчевске. Однако вскоре должность конторщика была ликвидирована. Он переезжает в поселок Первомайский рудник и устраивается учителем в семилетнюю школу. Проработав всего год в должности учителя, его, 16-летнего паренька, направляют в поселок Ольго-Верховский рудник заведовать школой. В 1925 г. его, способного молодого учителя, направляют в г. Луганск для обучения в Донецком институте народного образования на физико-математическое отделение. После окончания института он год работает учителем в школе при Краснодонском рудоуправлении, а затем руководство Главного профессионального образования РСФСР в 1928 году, выполняя решение партии и правительства, командирует молодого и талантливого человека на учебу в Ленинградский политехнический институт по только что открывшейся специальности «Радиотехника». В 1935 году Вадим Федорович успешно заканчивает один из лучших вузов страны. Таким образом, уйдя из дома в 1921 году, он в течение 14 лет, в сложнейшие годы существования всей страны, жил один, без родителей, скитался по общежитиям и съемным квартирам, питался в столовых и буфетах, иногда голодая, получил полноценное советское высшее образование. Он не видел и не знал нормальной жизни, но был устремлен к повышению своих знаний – к науке.

С окончанием Ленинградского политехнического института заканчивается первый период жизнедеятельности В. Ф. Коваленко, в течение которого он из отчаянного мальчика-конторщика превращается в физика – инженера-исследователя, окончившего один из лучших институтов страны. В 1932 году он получил направление на работу в Ленинградский электрофизический институт, в лабораторию профессора Дмитрия Аполлинариевича Рожанского (1882 – 1936 гг.). Лаборатория работала над созданием первых коротковолновых передатчиков, изучением распространения коротких волн, созданием первых импульсных радиолокаторов. В микроволновой электронике Д. А. Рожанский широко известен тем, что первый предложил принцип динамического управления электронным потоком. Принцип этот заключается в том, что «когда на электроны действует высокочастотное поле, то скорость электрона соответствующим образом меняется, или, как говорят, модулируется. Электроны, обладая различными скоростями, будут нарушать равномерное распределение заряда вдоль поля и тем самым превращать постоянный ток в переменный». Эта цитата взята из доклада В. Ф. Коваленко, который он сделал на совещании российских академиков по сверхвысоким частотам в мае 1940 г. в г. Ленинграде. В этом же докладе Вадим Федорович отмечает, что в лаборатории, где он работал и руководителем которой являлся член-корреспондент АН СССР Д. А. Рожанский, была сделана «попытка сознательно использовать это явление для генерации колебаний в микроволновом диапазоне. Однако лампу, построенную так, чтобы «быстрые электроны догоняли медленные», самовозбудить не удалось, и результаты этого неудачного эксперимента опубликованы не были». По этой же причине Арсеньева-Хайль и Хайль, которые, будучи в Германии в 1935 году, также попытались использовать принцип модуляции по скорости для создания двухкаскадного усилителя в СВЧ-диапазоне, не смогли добиться успеха. Позднее В. Ф. Коваленко попытался объяснить указанный неудачный эксперимент советских ученых тем, что были использованы колебательные системы на сосредоточенных *LC*-элементах, которые в СВЧ-диапазоне просто не работают. Лишь в 1939 году братья Вариан в США, используя объемные резонаторы в СВЧ-диапазоне, добились замечательного успеха. Их генератор, работающий на принципе Д. А. Рожанского, в котором были использованы хорошо

1(540).indd 90 05.03.2019 8:12:40

изученные к тому времени объемные СВЧ-резонаторы, выдал в дециметровом диапазоне мощность 100 Вт.

С 1935 года В. Ф. Коваленко работал под непосредственным руководством выдающегося ученого, члена-корреспондента АН СССР Михаила Александровича Бонч-Бруевича. Радиотехническое образование Бонч-Бруевич получил в Николаевском военно-инженерном училище и в офицерской электротехнической школе в Петрограде. Широко известны его выдающиеся достижения в Нижегородской радиолаборатории, где он создал впервые генераторную лампу, в то время самую мощную в мире, с выходной мощностью 100 кВт. С другой стороны, в 1916 году в лаборатории г. Тверь он создал «бабушку» всех маломощных приемно-усилительных ламп в России и наладил широкий промышленный их выпуск. Работая совместно с таким талантливым ученым, который постоянно «генерировал» новые идеи и приборы, В. Ф. Коваленко многому у него научился, и дух изобретательства прочно вошел в его рабочую практику. С 1935 – 1940 гг. М. А. Бонч-Бруевич был научным руководителем ленинградского НИИ-9. Известно, что он был замечательным педагогом – учителем, который воспитал знаменитых изобретателей многорезонаторного магнетрона Алексеева и Малярова, а также Коваленко, которого, несомненно, можно отнести к его талантливым ученикам. В. Ф. Коваленко в НИИ-9 работал в основном над созданием маломощных микроволновых генераторов и усилителей. Он глубоко проанализировал отечественные и зарубежные работы предшественников и развил «бурную» изобретательскую деятельность путем подачи нескольких заявок, и получил только в 1940 году шесть авторских свидетельств на изобретения, которые до сих пор актуальны и используются в вакуумной микроволновой электронике. Из анализа работ Хана и Меткалфа (1939 г.), А. В. Гаева (патент США, 1939 г.), В. Я. Савельева и Н. М. Тимофеева (изобретение № 34405, май 1940 г.), неудачных работ Арсеньевой-Хайль и Хайль, а также успешных работ братьев Вариан Коваленко сделал два фундаментальных вывода, которые остаются в силе и в наши дни и которые он доложил в упомянутом уже докладе на специальной сессии АН СССР, посвященной проблеме радиотехники и электроники сверхвысоких частот [3].



В. Ф. Коваленко – сотрудник НИИ-9

Суть первого вывода В.Ф. Коваленко сводилась к тому, что на сверхвысоких частотах нельзя использовать традиционные колебательные контуры из сосредоточенных емкости и индуктивности. В СВЧ-диапазоне способны эффективно работать только объемные резонаторы, впервые изобретенные советским ученым Я. И. Френкелем в 1935 году, которые обладают высокой добротностью и высоким резонансным сопротивлением, на котором электронный поток выделяет свою энергию. Попутно отметим, что Яков Ильич был руководителем дипломной работы вид-

1(540).indd 91 05.03.2019 8:12:40

ного ученого – «истоковца», лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора Александра Семеновича Тагера.

Второй фундаментальный вывод касался строения электронного потока, который должен быть достаточно интенсивным при низком напряжении питания и проходить весь путь от катода до коллектора с минимальными потерями на промежуточных электродах и легко управляемым по динамическому принципу.

Руководствуясь этими принципами, В. Ф. Коваленко в 1940 году подал шесть заявок на изобретения и получил по ним авторские свидетельства. Первую заявку он подал 3 марта 1940 г. (авторское свидетельство № 60973). Вадим Федорович обратил внимание, что на коротких волнах размер полого резонатора соответствует приблизительно величине $\lambda/2$, то есть при длине волны $\lambda \approx 10$ см размер резонатора составляет около 5 см. Малый размер затрудняет увеличение тока, снижает электрическую прочность, увеличивает плотность потерь, затрудняет теплоотвод. С другой стороны, простое увеличение размера резонатора приводит к появлению дополнительных резонансов. В связи с этим Вадим Федорович предложил другой путь – перейти к «трубообразным» резонаторам, в которых длина волны может быть малой и определяться поперечным сечением «трубы», а длина резонатора – достаточно большой. Теоретически при приближении к критической длине волны длина резонатора может быть в десятки раз больше поперечного сечения. Тем самым он предложил новый клистрон, состоящий из двух параллельных «труб», отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Указанные трубы соединяются между собой металлической полой трубой, например прямоугольной, являющейся пространством дрейфа. У нижней «трубы» располагается достаточно длинный катод, а у верхней трубы – коллектор, все это облекается в вакуумную оболочку, и получается клистрон повышенных размеров. Если отрезки волноводов, верхний и нижний, закорочены металлическими перегородками, то эту часть волновода Вадим Федорович предложил называть «отсеком». В общем случае клистрон может быть образован не из двух, а из множества отсеков, которые образуют кольцо, спираль, замкнутый многоугольник и т. д. Он может состоять из одного кольца или нескольких колец, из двух резонаторов вдоль оси движения электронов или нескольких резонаторов. Сейчас в научных работах «секции» называют «стволами». Всю систему резонаторов можно назвать «многорядной» и «многоэтажной». Полую дрейфовую трубу можно сделать многоканальной, и число их может быть различно. Резонаторы на входе должны возбуждаться синхронно и синфазно, а на выходе должно быть суммирующее устройство СВЧ-энергии всех «секций» («стволов»). По объективным причинам авторское свидетельство В. Ф. Коваленко было опубликовано в мировой печати только 01.01.1944 г. С публикацией ознакомился известный крупный французский специалист в области вакуумной микроволновой электроники Р. Варнеке. Как он пишет в своем обзоре, доложенном на конгрессе в Лимане в 1954 г., его вдохновили большие возможности различных конструкций, которые содержались в заявке В. Ф. Коваленко, и он со своим коллегой П. Гунардом выполнили большое число конструкций. Наиболее удачные из них описаны в их книге, полное содержание которой не было известно в СССР, да и в сегодняшней России.

Предложенный В. Ф. Коваленко многосекционный клистрон, по-видимому, можно считать прообразом так называемых многолучевых клистронов на высоких видах колебаний, которые широко разрабатываются и выпускаются в России многими предприятиями.

Следующим крупнейшим достижением В. Ф. Коваленко стало изобретение отражательного клистрона (авторское свидетельство № 59213, приоритет 23.07.1940). Изобретение называлось

1(540).indd 92 05.03.2019 8:12:40

«Электронно-лучевая лампа для микроволн». Нужно сказать, что Вадим Федорович к этому времени прекрасно усвоил принцип динамического управления электронным потоком. И в предлагаемой им однорезонаторной лампе поток, проходя через зазор, формируется в сгусток, который отражается от специального электрода (отражателя) и движется в сторону резонатора; сгруппированный пучок (сгусток) пересекает зазор в тормозящую фазу высокочастотного поля в резонаторе и отдает ему энергию, почерпнутую от постоянного напряжения пушки. Для того чтобы электроны не «болтались» поперек сеточного зазора, он предложил их немного «расфокусировать», с тем чтобы они «осели» на первой сетке, которая ближе к катоду.

Выступая на упомянутой сессии АН СССР 31 мая 1940 г., В. Ф. Коваленко привел в докладе этот изобретенный им отражательный клистрон, рассказал принцип его работы, но заявку на изобретение к тому времени еще не подал. Можно предположить, что с его докладом еще до официального выступления на сессии были ознакомлены многие сотрудники НИИ-9. Это обычная практика в подготовке доклада на столь ответственном совещании. В то же время, за 10 дней до доклада В. Ф. Коваленко, сотрудники НИИ-9 Е. Н. Данильцев, Н. Д. Девятков, Е. И. Пискунов подали заявку, которая называлась обобщенно «Электронной лампой». О ее содержании Вадим Федорович, конечно, знал и охарактеризовал ее в докладе следующим образом. «У нас в НИИ-9 Данильцев, Девятков и Пискунов предложили регенеративную приемную лампу (заявка № 35736 от 21 мая 1940 г.), в которой регенерация происходит за счет многократного пролета электронов сквозь резонатор, а отработавшие электроны исключаются, попадая на специальные металлические кольца, поставленные возле резонатора». Такая же характеристика предложенного прибора содержится и в описании самой заявки Данильцева, Девяткова и Пискунова. В. Ф. Коваленко публично не признавал электронную лампу по этой заявке отражательным клистроном и считал, что отражательный клистрон изобрел именно он.

Справедливости ради, нужно отметить, что претензии Н. Д. Девяткова и его соавторов на изобретение отражательного клистрона также имеют свое основание. У изобретенной ими электронной лампы был один объемный резонатор, как и у отражательного клистрона, и в их лампе, как и у отражательного клистрона, был отражательный электрод. Различия заключались в том, что в лампе Н. Д. Девяткова и соавторов, как это подчеркивалось в заявке, электроны многократно пролетали через высокочастотный зазор, а в лампе В. Ф. Коваленко принимались меры, чтобы пролет был только двукратным.

В. Ф. Коваленко – сотрудник «Истока»

Заметим также, что Н. Д. Девятков в своих воспоминаниях пишет: «При разработке двухконтурных клистронов мне с Е. Н. Данильцевым пришла мысль создать одноконтурный клистрон, в котором за контуром по оси электронного потока поместить отражающий электроны электрод и таким образом осуществить группировку электронов не в дрейфовой трубке, а в пространстве,

1(540).indd 93 05.03.2019 8:12:41

где электроны двигались в обратном направлении, от отражателя в контур. Был проведен расчет такого клистрона и изготовлены первые образцы, которые сразу же показали возможность получать генерацию и частотную модуляцию при изменении потенциала на отражателе. На эту «электронную лампу» было в 1939 году получено авторское свидетельство. Такой одноконтурный клистрон в дальнейшем стал называться отражательным клистроном» [4].

Не вдаваясь в детали спора о приоритете создания отражательного клистрона между двумя выдающимися учеными, решением этого вопроса можно считать Постановление Госкомитета по делам изобретений и открытий СССР от 28.04. 1987 г., в котором комитет постановил выдать Владимиру Федоровичу очень большую (по советским меркам) премию (10 000 руб.), признав его истинным изобретателем отражательного клистрона. Для этого предварительно по просьбе Госкомитета по делам изобретений и открытий СССР на «Истоке» была создана комиссия по установлению авторства изобретения отражательного клистрона, в которую входили В. П. Сазонов (председатель) – начальник теоретического отделения, И. И. Бродуленко – начальник отдела 170 по разработке отражательных клистронов, М. Б. Голант – создатель «магнетрона» и другие ученые. Комиссия, рассмотрев все материалы, единогласно признала изобретателем отражательного клистрона В. Ф. Коваленко, что и было зафиксировано в решении комиссии. Н. Д. Девяткову докладывал результаты работы председатель комиссии. Николай Дмитриевич, внимательно выслушав его сообщение и не задав ни одного вопроса, сообщил свое решение в исключительно корректной и мудрой форме. Он сказал: «За развитие направления по разработке и внедрению в практику генераторных ламп малой мощности, в том числе отражательных клистронов, Правительством СССР* оценен мой вклад в виде присуждения мне Ленинской премии. Кстати, и В. Ф. Коваленко также получил вместе со мной Ленинскую премию. Если же Вадим Федорович хочет получить еще премию от Госкомитета по делам изобретений и открытий, то нет смысла мешать ему в этом. Давайте ваше заключение, я его подпишу». Внимательно прочитав результаты работы комиссии, он тут же подписал их.

Пожалуй, самым крупным научно-техническим достижением Вадима Федоровича можно назвать изобретение им многолучевого клистрона на основном виде колебаний («Электронно-лучевая лампа типа клистрон», авторское свидетельство № 2756 от 31 декабря 1940 г.). Приведем формулировку текста изобретения Вадима Федоровича: «Электронно-лучевая лампа типа клистрон (со всеми его узлами и компонентами, свойственными клистрону) с двумя объемными

*Хочу сделать очень важное, на мой взгляд, наблюдение. В 1980 году на «Исток» приехал начальник Главного управления по кадрам Министерства электронной промышленности СССР. Его приезд воспринимался руководством предприятия важнее, чем визит самого министра, поскольку от этого человека непосредственно зависела судьба и карьера руководителей «Истока». Я, как председатель Совета молодых ученых и специалистов предприятия, был приглашен на встречу с ним в кабинет главного инженера Ю. П. Уточкина. Присутствовало примерно 10 руководителей предприятия и общественных организаций. Каждый из них докладывал по своим направлениям. После вступительного слова главного инженера доклад сделал секретарь парткома «Истока» Д. Г. Арапов. Он, в частности, отметил, что среди руководителей высшего звена предприятия, куда входили члены дирекции, начальники НПК, цехов и отделений – всего около 100 человек, на данный момент не являются членами КПСС только двое – академик Н. Д. Девятков и начальник отделения 10 В. П. Сазонов. Спустя несколько дней после этой встречи я, будучи сотрудником отделения 10, узнал, что Вилиор Павлович (ему в то время было 50 лет) подал заявление в партию. Николай Дмитриевич и после этого визита до конца своей жизни оставался беспартийным. По-видимому, это была его принципиальная позиция. Вот почему в повсеместно требуемом в докладах словосочетании «решение партии и правительства» он слово «партия» никогда не произносил и коммунистическую партию в своих речах старался не упоминать. Удивительно политически честный и смелый был человек! (*А.Б.*)

1(540).indd 94 05.03.2019 8:12:41

колебательными контурами, отличающимися тем, что с целью обеспечения плотности модуляции электронного луча без посредства одного приспособления (дрейфовой трубки), для пропускания электронного луча из одного контура в другой применена система узких отверстий (множество каналов) такой протяженности, чтобы электронный луч, модулированный в первом контуре по скорости в поперечном направлении, при проходе через эти отверстия модулировался по плотности за счет оседания электронов в отверстиях». Сейчас, как известно, в лампах «типа клистрон» применяется довольно сильное продольное магнитное поле, которое удерживает электроны от поперечного движения, но даже при наличии поля электронные пучки, входящие в продольные каналы, в особенности находящиеся на периферии, испытывают поперечную модуляцию, с которой приходится бороться.

В настоящее время теория и конструкция многоканального клистрона проработаны достаточно хорошо и многолучевые клистроны плотно вошли в радиолокационные станции не только в нашей стране, но и во всем мире. Их разрабатывают в США, Англии, Франции, КНР и многих других странах мира. Объясняется это тем, что многолучевые клистроны обладают целым рядом положительных свойств: они имеют более широкую полосу пропускания, чем однолучевые, более низковольтны, чем соответствующие однолучевые клистроны, они компактны и их масса меньше, чем у соответствующих однолучевых, и имеют множество других полезных свойств. После «раскручивания» достижений российских разработчиков и ученых в этом направлении весь мир, осознав преимущества многолучевых клистронов, бросился наверстывать упущенное время.

Кроме кардинального новшества: расположение многих лучей в индивидуальных каналах, Вадим Федорович продумывал конструкции формирования лучей, разделения их с помощью специальных сеток (этот способ широко применяется в современных лампах), способ компрессии луча каждого катода с помощью вогнутой конструкции катода. Также широко используется в настоящее время и ряд других способов конструирования современных многолучевых приборов.

В 1940-м году Вадиму Федоровичу исполнилось 33 года. Возраст Христа оказался для него поистине урожайным на фундаментальные научные изобретения. В самом начале 1941 г. он получил еще два авторских свидетельства, но приближалась война, и времени для реализации своих изобретений ему уже не хватило.

С началом войны В. Ф. Коваленко, как молодой, физически здоровый, несемейный, сразу был мобилизован на фронт. Он сражался в рядах действующей армии, в 122-й Краснознаменной танковой бригаде, начальником связи в звании инженер-капитана на Волховском, Ленинградском и на 3-м Прибалтийском фронтах. Сражался мужественно и честно. Об этом говорят его награды, которыми награждали бойцов за конкретные геройские поступки. В 1942 году он был награжден серебряной медалью «За боевые заслуги», в 1943 году – серебряной медалью «За отвагу», в 1944 году – орденом Красной Звезды, медалями «За оборону Ленинграда», «За победу над Германией». В 1944 году на фронте Вадим Федорович получил тяжелое ранение. Произошло это так. Он стоял в башне танка. Спереди его грудь прикрывала стальная крышка люка. Слева от танка разорвался снаряд, и осколком, как бритвой, ему срезало сразу три пальца левой руки, которой он держался за крышку люка. Потом были фронтовые госпитали, инвалидность второй группы, демобилизация из армии и снятие с воинского учета. Вернуться в Ленинград он не мог, так как, несмотря на прорыв блокады Ленинграда в январе 1944 г., основные электронные предприятия, в том числе и на котором он работал, были эвакуированы. Вадим Федорович поехал в Куйбышев, который в те годы называли «второй столицей», так как там еще находились

1(540).indd 95 05.03.2019 8:12:41

многие эвакуированные государственные учреждения. В Куйбышеве инвалида войны взяли на должность заведующего учебной частью студии оперного театра, где он проработал с декабря 1944 по май 1946 года. Здесь же он впервые официально обзавелся семьей, женившись на В. Г. Русановой – студентке 4 курса. В 1945 году в молодой семье родился сын Валерий. После окончания Верой Григорьевной института Вадим Федорович стал хлопотать об их переезде в Москву, чтобы возвратиться к своей научно-технической деятельности.

В Москве он решил поступить в Центральный научно-исследовательский институт № 108 Министерства промышленности средств связи (МПСС). Институт находился на Басманной улице, недалеко от метро «Красные ворота». Здесь работало много знакомых Вадима Федоровича по Ленинграду. Он был принят на работу в ЦНИИ-108 на должность ведущего инженера. Его поселили в общежитие на Ново-Басманной, 20, где он прожил с мая 1946 до августа 1948 года. Работая в ЦНИИ-108, В. Ф. Коваленко сосредоточил свои усилия на подведении итогов работ, выполненных в предвоенные годы в НИИ-9. На основе этих работ, которые уже тогда получили признание в СССР и во всем мире, Вадим Федорович написал диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Председателем совета по присуждению ученых степеней был широко известный ученый в области радиоэлектроники, член-корреспондент АН СССР (с 1943 года) Аксель Иванович Берг. До войны А. И. Берг работал в Ленинграде начальником НИИ морской связи и в Ленинградской морской академии. Он хорошо знал М. А. Бонч-Бруевича, научного руководителя НИИ-9, бывал в его институте и, возможно, был знаком с научными трудами В. Ф. Коваленко, который работал под непосредственным руководством М. А. Бонч-Бруевича. Кроме того, не исключено, что А. И. Берг слушал доклад В. Ф. Коваленко на сессии АН СССР по проблемам СВЧ-электроники (1940 г.) в Ленинграде. Защита диссертации состоялась 14 мая 1948 года в ЦНИИ-108. Решением совета В. Ф. Коваленко была присуждена ученая степень кандидата технических наук. Подписал диплом кандидата технических наук сам А. И. Берг.

После защиты Вадим Федорович занялся решением своих житейских вопросов. В МПСС ему посоветовали обратиться во Фрязино, в НИИ-160, где испытывалась острая нехватка квалифицированных кадров и где ему, возможно, могли предоставить подходящее жилье. Ознакомившись с ситуацией и обнаружив в НИИ-160 много знакомых ленинградцев, Вадим Федорович дал согласие на перевод из НИИ-108 в НИИ-160, имея на руках следующее направление. «Директору НИИ-160 т. Гольцову В. А. Управление руководящих кадров МПСС СССР направляет в Ваше распоряжение т. Коваленко В. Ф. для использования на работе по специальности в порядке перевода из ЦНИИ-108. Подпись. 13.08.1948 г.» В этот же день Вадим Федорович прибыл во Фрязино и подал руководству НИИ следующее заявление: «Настоящим подтверждаю согласие на постоянную работу в НИИ-160 при условии предоставления жилплощади – двух комнат (двухкомнатная квартира) с центральным отоплением. 13.08.1948 г.». От этого заявления веет трудностями того времени: топить печку дровами осложняло и без того трудную послевоенную жизнь. Удивляет небольшой факт. Направление о переводе на работу подписано 13.08.1948 г. Решение о принятии получено 13.08.1948 г. Решение Н. Д. Девяткова, исполнявшего должность главного инженера НИИ-160 о направлении В. Ф. Коваленко в лабораторию № 60 на должность старшего научного сотрудника также подписано 13.08.1948 г. И в этот же день ему назначили соответствующий оклад (2800 рублей – тогда это были большие деньги). Через несколько дней вышел официальный кадровый приказ директора НИИ-160 В. А. Гольцова, подтвердивший все указанные выше решения. Такова оперативность решения кадрового вопроса

1(540).indd 96 05.03.2019 8:12:41

о приеме на работу уникального советского специалиста, в чем, безусловно, была заслуга и Н. Д. Девяткова.

В начале следующего года выходит приказ № 22 от 19.01.1949 г. директора НИИ-160 В. А. Гольцова о новой структуре НИИ-160, в соответствии с которым образуется новый отдел № 170 и начальником отдела назначается Вадим Федорович Коваленко.

Совмещая административную и производственную деятельность начальника отделения, В. Ф. Коваленко продолжает научную работу, пишет заявки на изобретения, отчеты по темам и работает над книгой «Введение в электронику сверхвысоких частот». Эта книга написана исключительно ясным и понятным языком. Хорошо иллюстрирована. В ней приведено много конкретных расчетов узлов и устройств СВЧ-приборов: отражательных клистронов, магнетронов. Приведено описание многих зарубежных приборов и их параметры. Все эти материалы подкрепляются расчетными и экспериментальными данными. К каждому разделу книги приводится историческая справка, в которой даются фактические данные о приоритете, об изобретателях, об авторах, выполнивших значительные теоретические расчеты. Одним словом, книга В. Ф. Коваленко, который смолоду был хорошим преподавателем в школе, написана профессионально и заслуженно пользовалась и пользуется успехом у студентов, техников, инженеров и научных сотрудников. Ссылки на книгу В. Ф. Коваленко можно найти во многих учебниках, рекомендованных Министерством образования для обучения студентов.

5 февраля 1952 года он письменно просит директора НИИ освободить его от должности начальника отдела 170 и назначить старшим научным сотрудником этого же отдела, поскольку такое перемещение, как он считает, дает возможность ему значительно увеличить время, посвященное руководству научно-исследовательскими работами, за счет разгрузки от административных работ. Освобождение В. Ф. Коваленко от должности начальника отдела 170 по личной просьбе вызывает некоторое удивление, так как еще 1 февраля Вадим Федорович успешно прошел аттестацию, которую подписали директор В. А. Гольцов, и.о. главного инженера Н. Д. Девятков и сам В. Ф. Коваленко. Следующим начальником отдела 170 стал известный разработчик «Истока» В. А. Афанасьев, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, впоследствии руководитель НИИ «Титан».

В 1955 году выходит в свет второе издание книги «Введение в электронику сверхвысоких частот», в которой по сравнению с первым изданием добавлена глава о лампе с бегущей волной. Учитывая интерес Вадима Федоровича к анализу публикаций и определению тенденций развития СВЧ-электроники, его назначают руководителем отдела научно-технической информации. 24 ноября 1955 года выходит приказ по НИИ-160 за подписью директора М. М. Федорова о назначении В. Ф. Коваленко начальником отдела № 100 с повышением в окладе (3000 руб.) и освобождении его от работы в отделе № 170.

Таким образом, Вадим Федорович пробыл в отделе 170 около шести лет. Под его личным руководством, в том числе в роли главного конструктора, в отделе было разработано 3 новых электровакуумных прибора (ЭВП), налажен серийный выпуск уникального ЭВП на опытном заводе, который продолжался до 1967 г., то есть более 20 лет. Объем выпуска этого ЭВП достигал 40 000 шт. ежегодно. За те же годы Вадим Федорович переделал и выпустил второе издание книги «Введение в электронику сверхвысоких частот», подал несколько заявок на изобретения и получил 4 авторских свидетельства, написал ряд технических отчетов и статей.

Став начальником отдела 100, В. Ф. Коваленко основное время уделяет информационно-аналитической деятельности НИИ-160, других отечественных предприятий отрасли и зарубежных

1(540).indd 97 05.03.2019 8:12:41

В. Ф. Коваленко с сотрудниками отд. 100

С сотрудниками отд. 100 на отдыхе

1(540).indd 98 05.03.2019 8:12:43

фирм. Он выпускает несколько обстоятельных обзоров, посвященных состоянию и перспективам развития электроники СВЧ в стране и за рубежом. В 1963 г. он был представлен к награде орденом Почета за большой вклад в развитие электроники СВЧ. Представление подписали директор предприятия С. И. Ребров, секретарь парткома В. Г. Лавриненко и председатель профкома И. М. Панас. Но ходатайство не было поддержано вышестоящими организациями…

В 1965 г. НИИ-160 выдвинул группу разработчиков, конструкторов, технологов, теоретиков, изобретателей маломощных приборов типа клистрон на соискание Ленинской премии. В группу вошли: Н. Д. Девятков – руководитель работы, В. Ф. Коваленко, Л. А. Парышкуро, М. Б. Голант, И. И. Бродуленко, Д. М. Петров и ряд других. У Вадима Федоровича удостоверение лауреата Ленинской премии № 1847, Москва, 15 мая 1965 г.

В середине 60-х годов Вадим Федорович из-за своего горячего темперамента совершил одно не очень достойное действие и жестоко за него расплатился. Его приказом по институту № 132 от 17 марта 1965 г. отстранили от должности начальника отдела 100 и назначили на должность начальника лаборатории анализа и обобщения в том же 100 отделе. Однако в этой должности он пробыл недолго, его тянуло к самостоятельной научной работе, и он 5 мая 1968 г. подает на имя С. И. Реброва заявление: «Прошу перевести меня с должности начальника лаборатории на должность старшего научного сотрудника в связи с моим желанием усилить работу по анализу и обобщению научных основ некоторых вопросов СВЧ-технологии». К этому времени, согласно данным характеристики, у Вадима Федоровича было 55 научных трудов: 20 книг и брошюр, 19 статей, 16 авторских свидетельств. К сожалению, полный список научных работ В. Ф. Коваленко у нас отсутствует.

Отдел 100. Лаборатория анализа и обобщения.
Стоят: вторая слева Л. И. Кириллова, далее З. М. Горбачевская, Л. Ф. Постнова, И. Д. Харитонова, Л. Г. Островерхова, С. Н. Пузанова, М. Е. Бочарина, Ю. Н. Чукина;
сидят: И. К. Викулов, В. Ф. Коваленко, И. А. Величковский

1(540).indd 99 05.03.2019 8:12:43

В 1967 г. Вадиму Федоровичу исполнилось 60 лет. Он часто давал консультации молодым сотрудникам института по разным вопросам. В лабораторию к нему приходили за советом по различным производственным делам. Вадим Федорович, как бессменный член редколлегии, редактировал статьи, которые присылали в журнал «Электронная техника», издаваемый в институте. Активно участвовал в работе аспирантуры и ученого совета, членом которого он был с самого его основания в институте. Работал увлеченно, с большим желанием оказать помощь.

В начале 70-х годов Вадим Федорович задумал написать книгу о физических процессах, протекающих в электровакуумных приборах СВЧ. Он написал три главы, посвященные описанию свойств поверхности материалов ЭВП и технологии их изготовления. Эти главы он дал почитать своему другу – профессору В. С. Лукошкову. Тот их прочел, похвалил и передал начальнику теоретического отдела В. П. Сазонову. Прочитав их, Вилиор Павлович поразился той четкости, образности и доступности, которыми были представлены в книге процессы, происходящие на поверхностях разных материалов, использованных в ЭВП СВЧ. Эти главы в виде брошюр «Технология ЭВП» были изданы во Всесоюзном электротехническом институте под грифом «для служебного пользования» в двух частях. Вскоре В. Ф. Коваленко понял, что гораздо важнее для

Отд. 100. Конец 1970-х годов

1(540).indd 100 05.03.2019 8:12:44

технологии рассмотреть теплофизические процессы в ЭВП. Поняв это, он взялся за написание другой книги, посвященной указанным процессам. В 1975 г. в издательстве «Советское радио» вышла книга В. Ф. Коваленко под названием «Теплофизические процессы и электровакуумные приборы». В аннотации к книге сказано: «Автор исследует теплофизические процессы, происходящие с материалами при использовании их в ЭВП. Эти процессы разнообразны, начиная с фазовых переходов, испарения, разрушения при непрерывном и импульсном тепловом воздействии. Многие процессы детально рассматриваются в книге и публикуются впервые. Книга рассчитана на широкий круг пользователей». Книга вышла тиражом 5000 экземпляров и была быстро раскуплена, так как написана ясным, образным языком, приведена масса фактических данных о свойствах материалов, используемых в вакуумных устройствах, а не только в ЭВП. Книга состоит из 7 глав. При написании ее Вадим Федорович изучил 233 работы, опубликованные в различных отечественных и зарубежных изданиях. В ней 95 рисунков и 15 таблиц. Вадим Федорович изучил массу справочных изданий, сверял их данные, находил ошибки, исправлял, т. е. совершил гигантский труд.

В 1967 году В. Ф. Коваленко второй раз женился на сотруднице теоретического отдела Софье Алексеевне Дубровиной, которая была вдвое младше его. На десятом году совместной жизни они разошлись. Вадим Федорович нашел себе новую подругу жизни, которая раньше работала в НИИ-160, но затем уволилась и переехала на житье в Москву. Некоторое время Вадим Федорович ездил из Москвы во Фрязино.

На 80-м году жизни В. Ф. Коваленко уволился с предприятия. Здоровье его было подорвано, с ним случился инсульт. Академик Н. Д. Девятков, имевший хорошие связи с медицинскими кругами, сумел договориться с Медицинским центром им. Бурденко о прикреплении к В. Ф. Коваленко лечащего врача на дому в звании профессора медицины. Этим профессором оказалась очень миловидная, внимательная, образованная женщина, которой удалось поставить Вадима Федоровича на ноги. Но должного ухода за ним его новая подруга так и не смогла обеспечить…

В. Ф. Коваленко умер в 1989 году. Тело Вадима Федоровича было кремировано, а урна с прахом захоронена на Фрязинском городском кладбище. На месте захоронения Софья Алексеевна Дубровина установила памятник Вадиму Федоровичу с эпитафией: «Sic transit Gloria mundi»*.

Тихо и скромно ушел из жизни выдающийся советский изобретатель и талантливый ученый, незаурядный человек и интереснейший собеседник, крупный филателист и глубокий знаток музыки, надежный друг и товарищ Вадим Федорович Коваленко.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сазонов, В. П**. Нет предела исканий уму (к 100-летию В. Ф. Коваленко) / В. П. Сазонов, А. К. Балыко // Информационный бюллетень. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2007. – № 3, март.

2. **Сазонов, В. П.** Приоритеты России в вакуумной СВЧ-электронике в XX столетии / В. П. Сазонов. – М.: МЕДПРАКТИКА, 2012.

3. Изв. АН СССР. – 1940. – Т. 4, № 3. – С. 489 – 505.

4. **Девятков, Н. Д.** Воспоминания / Н. Д. Девятков. – М.: «МЕДИА», 2000.

Статья поступила 21 января 2019 г.

*«Так проходит земная слава» (*лат.*).

1(540).indd 101 05.03.2019 8:12:44

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в Worde допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

1(540).indd 102 05.03.2019 8:12:44

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2019 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (20 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

З А К А З

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2019 г. и направлять по адресу:

Куда _____

(почтовый индекс, адрес)

_____

Кому _____

(название организации)

_____

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____

на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 11.03.2019 г. | Усл. п. л. 12,5 | Формат 60×88 1/8
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ" | Уч.-изд. л. 13,0 | Тираж 500
г. Москва | Индекс 36292 | 10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

1(540).indd 103 05.03.2019 8:12:44

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2019, вып. 1 (540), с. 102

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

1(540).indd 104 05.03.2019 8:12:45