ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 3 (538)

2018

3(538).indd 1 19.11.2018 14:33:41

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 3(538) **2018** **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», 2018 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 3(538) **2018** **Founded in 1950 r.**

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»

СОДЕРЖАНИЕ

Комплексированные изделия и аппаратура

Семёнов М.Г., *Семёнов А.С., Налогин А.Г., Першина Л.К., Василевский В.А.* – Комплект ферритовых приборов повышенного уровня мощности для применения в модулях АФАР *X*-диапазона частот..... 8

Батаев В.Я., Гринев А.Ю., Измайлов А.А., Евсеев Д.А., Волков А.П. – Принципы построения и практическая реализация антенных систем с частотно-селективными структурами..... 16

Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С. – Разработка и электродинамический анализ СВЧ-плат на основе волновода, интегрированного в подложку..... 25

Демшевский В.В., Цитович А.А. – Низкопрофильная антенна вытекающей волны с широкой диаграммой направленности на основе волновода, интегрированного в подложку..... 31

Гаврилов И.А., Степушкин В.А. – Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование пассивной части широкополосного усилителя СВЧ-сигналов на основе коаксиальных волноводов..... 36

Электровакуумные приборы

Быковский С.В., Будзинский Ю.А., Калина В.Г., Котов В.Е., Саврухин О.А. – Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты... 43

Жабин Г.А., Магамеднебиев З.М., Пашков А.Н. – Молекулярно-напыленный оксидный катод с повышенной до 10 А/см^2 плотностью тока..... 50

Фурсаев М.А. – Зависимость параметров магнетрона в режиме срыва генерации от параметров нагрузки..... 59

Технология и материаловедение

Зубков Н.П., Кочмарев Л.Ю., Шилов И.П. – Применение метода PCVD для осаждения слоев кварцевого стекла, легированного фтором, на кремниевые подложки в резонансном СВЧ-разряде пониженного давления на волне H_{10}..... 64

3(538).indd 4 19.11.2018 14:33:42

Твердотельная электроника

Баранов А.В., Козиков А.Л. – Взаимодополняющие приемы проектирования трехточечных СВЧ-автогенераторов..... 75

Вяхирев В.Б. – Измерение и интерпретация теплового сопротивления кремниевых транзисторных сборок..... 83

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Полников И.Г. – Опыт использования волноводно-диэлектрической камеры для измерения концентрации воды в органических средах и облучения биологических объектов..... 92

Экономика

Чекаданова М.В. – Стартовые условия и цели создания инновационно-территориального радиоэлектронного кластера на базе ОЭЗ «Исток»..... 103

Краткие сообщения

Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И. А. – Колебательное движение электрона в кулоновском поле двух положительных зарядов..... 110

История

Балыко А.К. – Легендарный «истоковец»..... 113

3(538).indd 5 19.11.2018 14:33:42

CONTENTS

Complex products and equipment

Semenov M.G., *Semenov A.S.*, *Nalogin A.G.*, *Pershina L.K.*, *Vasilevsky V.A.* – A set of ferrite devices of increased power level for use in active phased array *X*-band frequency modules..... 8

Batayev V.Ya., *Grinev A.U.*, *Izmaylov A.A.*, *Evseev D.A.*, *Volkov A.P.* – Principles of construction and practical implementation .of antenna systems with frequency-selective structures..... 16

Demshevsky V.V., *Tsitovich A.A.*, *Levashov M.S.* – Development and electrodynamic analysis of microwave boards based on a waveguide integrated into a substrate..... 25

Demshevsky V.V., *Tsitovich A.A.* – Low profile leaky-wave antenna with a wide radiation pattern based on a waveguide integrated into a substrate..... 31

Gavrilov I.A., *Stepushkin V.A.* – Computer simulation and experimental study of the passive part of a broadband microwave amplifier based on coaxial waveguides..... 36

Radioelectronic devices

Bykovsky S.V., *Budzinsky U.A.*, *Kalina V.G.*, *Kotov V.E.*, *Savrukhin O.A.* – Cyclotron protective devices: linearity limit and transition to protection mode..... 43

Zhabin G.A., *Magamednebiev Z.M.*, *Pashkov A.N.* – Molecular sputter-deposited oxide cathode with increased current density up to 10 А/см^2..... 50

Fursaev M.A. – Dependence of the magnetron parameters in the mode of generation breakdown on load parameters..... 59

Technology and material science

Zubkov N.P., *Kochmarev L.U.*, *Shilov I.P.* – Application of PCVD method for depositing quartz glass layers doped with fluorine onto silicon substrates in a low-pressure resonant microwave discharge at H_{10} wave..... 64

3(538).indd 6 19.11.2018 14:33:42

Solid-state electronics

Baranov A.V., Kozikov A.L. – Mutually complementary techniques for designing three-points microwave oscillators..... 75

Vyakhirev V.B. – Measurement and interpretation of the thermal resistance of silicon transistor assemblies..... 83

Medical electronics

Kazarinov K.D., Polnikov I.G. – Experience of using a waveguide-dielectric chamber for measuring water concentration in organic media and irradiating biological objects..... 92

Economics

Chekadanova M.V. – The starting conditions and the objectives of creation the innovative territorial radioelectronic cluster on the basis of SEZ «Istok»..... 103

News in brief

Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A. – The oscillating motion of an electron in the Coulomb field of two positive charges..... 110

History

Balyko A.K. – The legendary «istokovets»..... 113

3(538).indd 7 19.11.2018 14:33:42

КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ И АППАРАТУРА

УДК 621.396.93

КОМПЛЕКТ ФЕРРИТОВЫХ ПРИБОРОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МОДУЛЯХ АФАР *X*–ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

М. Г. Семёнов, А. С. Семёнов, А. Г. Налогин, Л. К. Першина, В. А. Василевский

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

Рассмотрены особенности разработки микрополосковых ферритовых развязывающих приборов на повышенный уровень мощности. Приведены конструктивные решения ферритовых приборов повышенного уровня мощности, удовлетворяющие требованиям миниатюрности и широкополосности. Рассмотрена возможность разработки и изготовления *X*-циркуляторов с микрополосковыми входами, возбуждаемыми от планарных выходов усилителей на монолитных интегральных схемах через планарные входные элементы ферритового прибора. Представлены параметры разработанных ферритовых развязывающих приборов повышенного уровня мощности для АФАР *X*-диапазона частот. На их примерах рассмотрены конструктивно-технологические задачи, возникающие в процессе разработки, и представлены способы их решения.

КС: ферритовые микрополосковые вентили, циркуляторы и X-циркуляторы, повышенный уровень мощности, прямые потери, обратные потери, развязка, коэффициент стоячей волны, ферритовая подложка, «квазикопланарная» линия, прошивка и металлизация отверстий

A SET OF FERRITE DEVICES OF INCREASED POWER LEVEL FOR USE IN ACTIVE PHASED ARRAY *X*-BAND FREQUENCY MODULES

M. G. Semenov, A. S. Semenov, A. G. Nalogin, L. K. Pershina, V. A. Vasilevsky

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

The features of the development of microstrip ferrite decoupling devices for an increased power level have been considered. The constructive solutions of the increased power ferrite devices that meet the requirements of miniaturization and broadband are presented. The possibility of development and manufacturing of *X*-circulators with microstrip inputs excited from planar outputs of amplifiers on monolithic integrated circuits through planar input elements of the ferrite device is considered. A set of parameters of the developed ferrite decoupling devices of increased power level for active phase array *X* frequency band is presented. The constructive and technological problems arising in the development process are considered on their examples, and methods of their solution are given.

Keywords: ferrite microstrip isolators, circulators and X-circulators, increased power level, direct loss, return loss, decoupling, voltage standing wave ratio, ferrite substrate, «quasicoplanar» line, piercing and metallization of holes

3(538).indd 8 19.11.2018 14:33:42

В настоящее время наиболее перспективными антенными устройствами в бортовых радиолокационных средствах контроля воздушного пространства являются активные фазированные антенные решётки (АФАР). Основным элементом АФАР является приёмопередающий модуль (ППМ). В ППМ для обеспечения распределения сигналов и устойчивой работы применяются микрополосковые ферритовые развязывающие приборы (ФРП).

В последние годы наиболее востребованы разработки микрополосковых ФРП *X*-диапазона частот с повышенным уровнем мощности (ПУМ), которые предназначены для использования в качестве развязывающих устройств в модулях АФАР радиолокационных систем (РЛС) [1].

Разработка ФРП повышенного уровня мощности имеет ряд особенностей:

1. При воздействии повышенного уровня входной средней мощности происходит разогрев рабочего объема ФРП за счёт поглощения электромагнитной энергии. Это приводит к уходу электрических параметров, возникновению предельно допустимых напряжений изгиба из-за перепада температуры по толщине, тепловому пробою и разрушению.

2. При воздействии повышенного уровня входной импульсной мощности в ФРП может возникнуть электрический пробой, что приводит к ухудшению согласования прибора и дополнительным потерям.

3. При воздействии повышенного уровня входной импульсной мощности в ФРП прямые потери могут увеличиваться за счет дополнительного резонансного поглощения из-за возбуждения спиновых волн [2].

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» было выполнено несколько работ, посвященных созданию ФРП ПУМ, работающих в *X*-диапазоне частот. В этих работах была поставлена задача проектирования ферритовых микрополосковых *Y*-циркуляторов 3-см диапазона и *X*-циркуляторов 3-см диапазона на основе каскадного соединения двух *Y*-циркуляторов, выполненных на одной ферритовой подложке [3].

В рамках этих работ было необходимо решить следующие задачи:

1. Проектирование топологий приборов и магнитных систем, позволяющих обеспечить миниатюрность и широкополосность ФРП для модулей АФАР.

2. Разработка конструкции и технологии изготовления ФРП с входами типа «квазикопланарная линия».

3. Разработка ферритовых материалов, обеспечивающих прямые потери в циркуляторе не более 0,35…0,5 дБ на повышенном уровне мощности.

4. Создание стенда и проведение испытаний ФРП *X*-диапазона на ПУМ.

При проектировании топологии *X*-циркулятора необходимо провести расчёт элементов, входящих в его состав, основным из которых является *Y*-циркулятор. Проектирование *Y*-циркулятора осуществляется путём расчета топологии, выбора марки ферритов и размеров подложек, размеров подводящих отрезков МПЛ, определения индукции внешнего магнитного поля. Как правило, при разработке ФРП выбирают дорезонансный режим работы по величине индукции внешнего магнитного поля, что обеспечивает минимальные размеры магнитной системы [3].

К ФРП ПУМ, применяемым в СВЧ-модулях АФАР *X*-диапазона частот, предъявляется ряд требований:

• Малость прямых потерь на ПУМ, что достигается за счёт введения в кристаллическую решетку ферритового материала быстрорелаксирующих ионов (Sm, Co).

3(538).indd 9 19.11.2018 14:33:42

• Миниатюрность – достигается за счёт уменьшения размеров приборов, близких к размерам рабочего тела *Y*-циркулятора – топологического диска.

• Широкополосность в рабочем интервале температур от -60 до +85 °С – достигается, во-первых, за счёт разработки ферритового материала с малым температурным коэффициентом намагниченности насыщения, во вторых, за счёт разработки нестандартных приёмов согласования для каждой конкретной топологии приборов.

Требования миниатюрности и широкополосности противоречивы, так как миниатюрность исключает использование при согласовании четвертьволновых трансформаторов. Поэтому в ходе проведенных работ были разработаны топологии приборов, которые позволили одновременно удовлетворить требованиям миниатюрности и широкополосности (рис. 1).

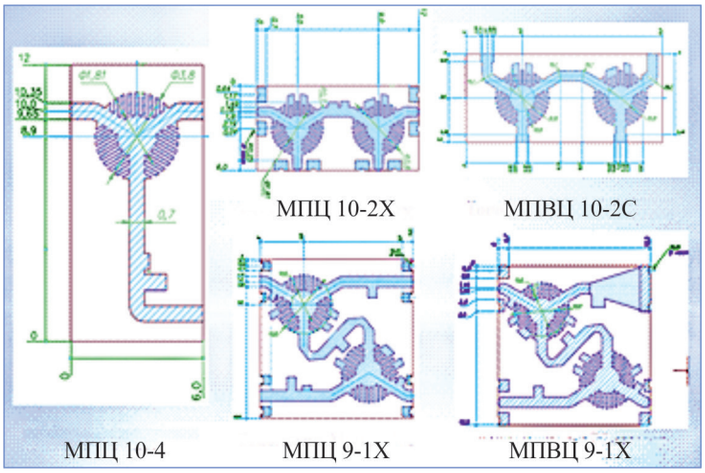


Рис. 1. Разработанные топологии ферритовых приборов для СВЧ-модулей АФАР *Х*-диапазона частот

Схема передачи СВЧ-мощности от усилителя к *Х*-циркулятору по варианту микрополосковой линии становится неприемлемой по КПД из-за длины связи по экранной плоскости и планарности выхода усилителя (рис. 2). В связи с этим для увеличения КПД и уменьшения длины

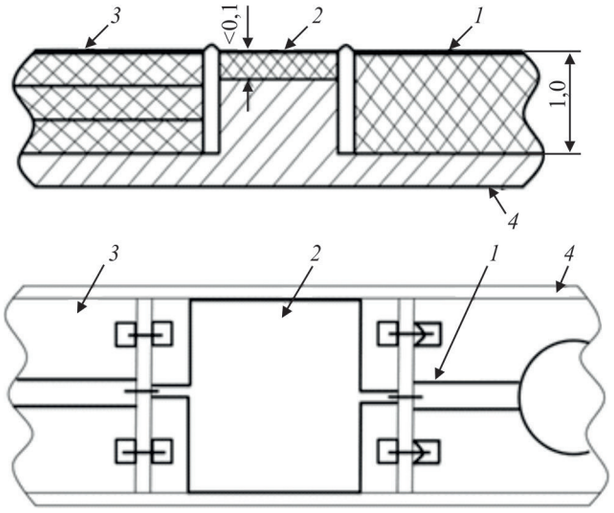


Рис. 2. Схема монтажа *Х*-циркулятора в субмодуль АФАР:
1 – вход *Х*-циркулятора; *2* – усилитель СВЧ-мощности; *3* – схема на LTCC; *4* – основание

3(538).indd 10 19.11.2018 14:33:42

связи по экранной плоскости была разработана конструкция *X*-циркулятора с входами типа «квазикопланарная линия» (рис. 3). Наиболее существенными и наименее стабильными операциями при изготовлении *X*-циркуляторов с входами типа «квазикопланарная линия» являются прошивка и металлизация отверстий в подложке из ферритового материала толщиной 1 мм. Прошивка отверстий производилась на лазерной установке МЛП1-2106. Металлизация отверстий в ферритовой подложке осуществлялась методом химического никелирования. В ходе проведенных работ эти процессы были полностью отработаны.

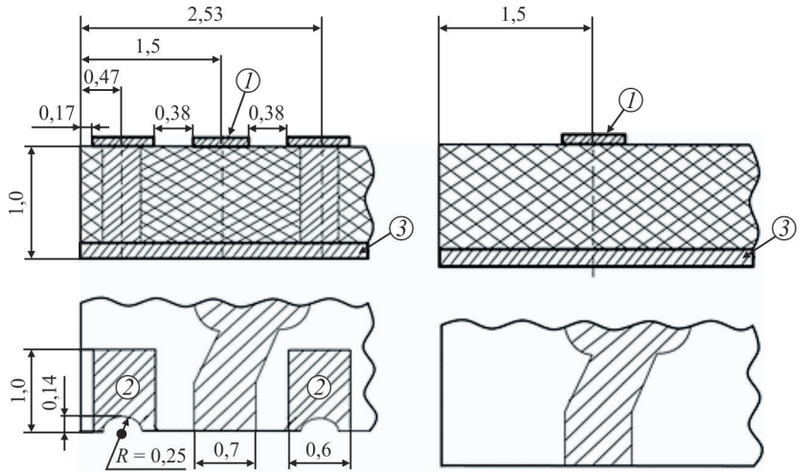


Рис. 3. Вход платы *X*-циркуляторов с отрезками «квазикопланарной» (слева) и микрополосковой (справа) линии:
1 – проводник МПЛ (вход *X*-циркулятора); *2* – отрезки линий, соединённые с экраном; *3* – экран

Для создания циркуляторов ПУМ, предназначенных для работы в составе ППМ АФАР, были разработаны специальные составы феррогранатов и феррошпинелей (т. к. известные марки ферритов не могли в полной мере удовлетворить требованиям по мощности и потерям), разработаны технологические процессы и организовано производство. Характеристики разработанных ферритов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Марка феррита	Намагниченность насыщения M_s, кА/м	Диэлектрическая проницаемость ε	Магнитная проницаемость μ	Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon$	Тангенс угла магнитных потерь $tg\delta_\mu$	Ширина кривой резонансного поглощения ΔH_k, Э
НТ-200	200±14	13,6 – 14,6	0,75	$1{,}2\cdot10^{-3}$	$\leq 5\cdot10^{-3}$	18
ФГМ-140	140 (± 5 %)	14,5 – 15,5	0,85	$\leq 5\cdot10^{-4}$	$\leq 3\cdot10^{-3}$	30
ФГМ-140(1)	140 (± 5 %)	14,5 – 15,5	0,89	$\leq 8\cdot10^{-5}$	$\leq 1{,}3\cdot10^{-3}$	> 10

3(538).indd 11 19.11.2018 14:33:43

Ферритовый материал определяет значения основных параметров циркулятора, их стабильность в интервале температур и зависимость от величины СВЧ-мощности на входе циркулятора [4]. Ферритовый материал должен иметь минимальные значения тангенсов диэлектрических и магнитных потерь и максимальное значение ширины линии резонансного поглощения спиновых волн ΔH_k для стабильной работы ФРП ПУМ. Данные требования к ферритовому материалу взаимосвязаны и противоречивы, т. к. увеличение ΔH_k приводит к увеличению ширины линии ферромагнитного резонанса ΔH и соответственно к увеличению магнитных потерь.

На подложках из разработанных ферритовых материалов были изготовлены циркуляторы и проведен анализ зависимости прямых потерь от уровня входной мощности. Как видно из графика (рис. 4), потери в циркуляторах на подложках из материалов ФГМ-140, НТ-200 и ФГМ-140(1) незначительно изменяются с ростом уровня входной мощности, в отличие от потерь в циркуляторе, выполненном на феррит-гранате ФГ-140.

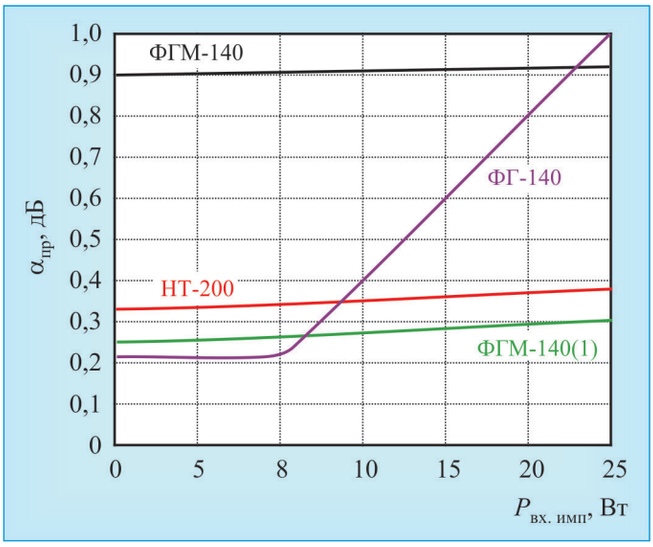


Рис. 4. Зависимости потерь в циркуляторах, изготовленных из различных марок ферритов, от уровня входной импульсной мощности

Исключения дополнительных потерь на ПУМ, обусловленных нелинейным поглощением, удалось достичь за счет добавления быстрорелаксирующих ионов самария в состав материалов ФГМ-140 и ФГМ-140(1).

В рамках проводимых работ был изготовлен стенд и разработана методика для проведения испытаний ФРП *X*-диапазона частот на ПУМ. Структурная схема стенда представлена на рис. 5.

Ослабление определяется путём сравнения отношений прошедшей и падающей мощности в результате двух циклов измерений:

– в первом цикле измеряется падающая $P_{пад1}$ и прошедшая через ПУ мощность $P_{пр1}$, когда в ПУ включена контрольная МПЛ с потерями $\alpha_л$;

– во втором цикле измеряется падающая $P_{пад2}$ и прошедшая через ПУ мощность $P_{пр2}$, когда в ПУ включен микрополосковый ферритовый прибор.

Потери при многократных отсчётах определяются по формуле (1):

$$\alpha_в = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} 10\lg\frac{P_{пр1i}\cdot P_{пр2i}}{P_{пр2i}\cdot P_{пр1i}} + \alpha_л. \qquad (1)$$

3(538).indd 12 19.11.2018 14:33:43

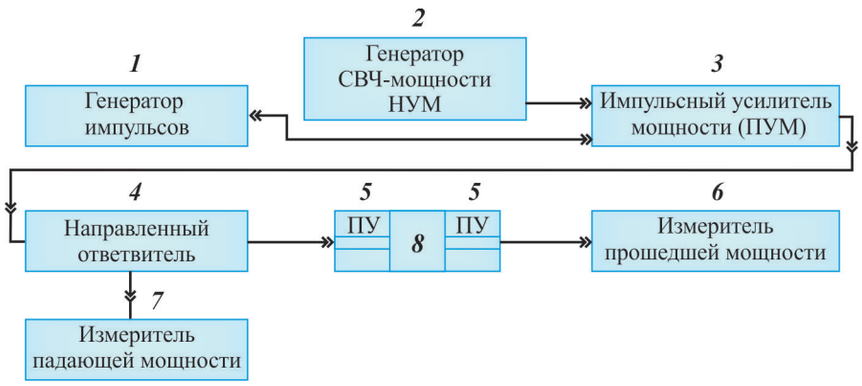


Рис. 5. Структурная схема стенда для измерения ослабления на ПУМ:
5 – подключающее устройство (ПУ); *8* – ферритовый прибор или МПЛ

Погрешность определения прямых потерь составляет ±0,2 дБ при условии, что направленность ответвителя равна не менее 30 дБ и КСВН ПУ с контрольной МПЛ – не более 1,2.

В ходе проведенных работ в АО «НПП «Исток» им. Шокина» были созданы 2 стенда для измерения электрических параметров ферритовых приборов *X*-диапазона частот на повышенном (рис. 6) и низком (НУМ) уровне мощности (рис. 7).

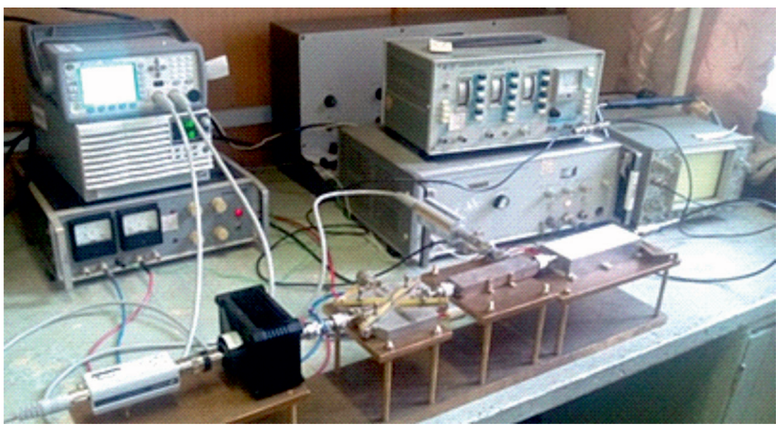


Рис. 6. Стенд для измерения ослабления на ПУМ

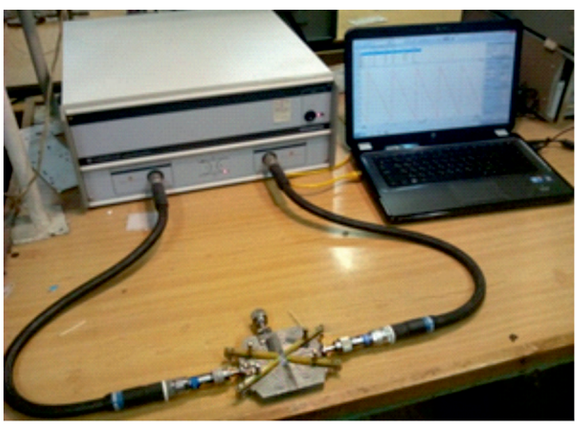


Рис. 7. Стенд для измерения электрических параметров на НУМ на основе векторного анализатора цепей Р4М-18

3(538).indd 13 19.11.2018 14:33:43

Стенд ПУМ позволяет проводить испытания ФРП в *X*-диапазоне частот. Уровень выходной импульсной мощности при этом можно устанавливать до 25 Вт. В стенде для измерения ослабления на ПУМ оригинальными являются импульсный усилитель мощности и измерительные модули, которые изготавливаются в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В ходе проведенных работ были разработаны 5 типов микрополосковых ФРП ПУМ для модулей АФАР *X*-диапазона частот (рис. 8).

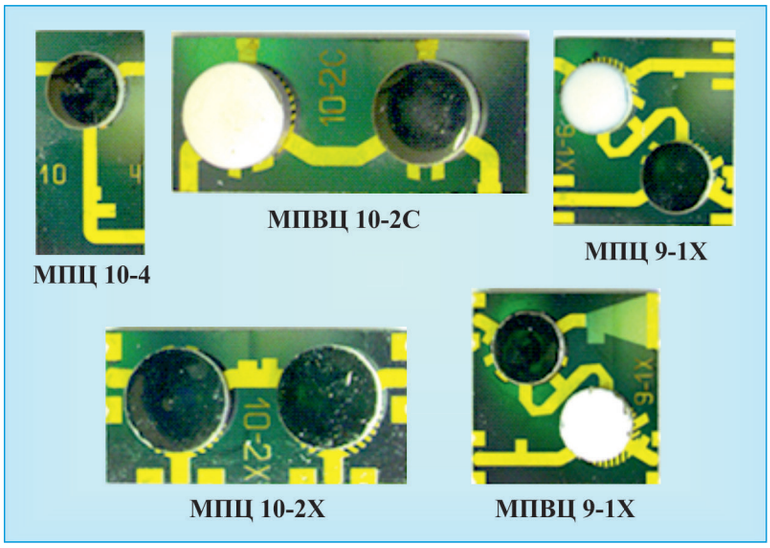


Рис. 8. Разработанные в АО «НПП «Исток» им. Шокина» ФРП *X*-диапазона частот на ПУМ

Все разработанные приборы соответствуют заданным техническим требованиям, опытные образцы переданы заказчикам, проведена стыковка с аппаратурой. Положительные результаты были достигнуты на основе применения ферритов с требуемыми параметрами, оптимального выбора конструктивных решений и технологического обеспечения процессов сборки и настройки. Электрические параметры разработанных приборов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прибор	Материал подложки	Параметр, единица измерения						
		$\Delta f_р$, ГГц	$\alpha_{пр1\text{-}2}$, дБ, не более	$\alpha_{пр2\text{-}3}$, дБ, не более	$\alpha_{раз2\text{-}1}$, дБ, не менее	$\alpha_{раз3\text{-}2}$, дБ, не менее	$K_{ст U_{вх}}$, не более	Входная импульсная мощность, Вт, не более
Y-циркулятор МПЦ 10-4	НТ-200	*X*-диапазон	0,5	–	20	–	1,4	15
Вентиль-циркулятор МПВЦ 10-2С	НТ-200		0,35	–	20	–	1,4	15
X-циркулятор МПЦ 9-1Х	ФГМ-140		0,5	1,0	20	28	1,4	12

3(538).indd 14 19.11.2018 14:33:44

Окончание табл. 2

Прибор	Материал подложки	Параметр, единица измерения						
		$\Delta f_р$, ГГц	$\alpha_{пр1\text{-}2}$, дБ, не более	$\alpha_{пр2\text{-}3}$, дБ, не более	$\alpha_{раз2\text{-}1}$, дБ, не менее	$\alpha_{раз3\text{-}2}$, дБ, не менее	$K_{стU/вх}$, не более	Входная импульсная мощность, Вт, не более
X-циркулятор МПЦ 10-2Х	ФГМ-140(1)	*X*-диапазон	0,5	1,0	20	27	1,4	10
Вентиль-циркулятор МПВЦ 9-1Х	ФГМ-140(1)		0,5	1,1	20	27	1,4	22

Таким образом, в ходе проведенных опытно-конструкторских работ было выполнено следующее:

1. Выработан подход к разработке ФРП *X*-диапазона частот на ПУМ.

2. Разработаны новые ферритовые материалы с низкими потерями на ПУМ.

3. Разработан комплект миниатюрных широкополосных ФРП ПУМ, отвечающих современным требованиям заказчика.

3. Разработана технология изготовления микрополосковых ФРП с входами типа «квазикопланарная линия», что позволило улучшить согласование микрополосковых ФРП с планарными выходами усилителей мощности.

4. Создан стенд и проведены испытания ФРП *X*-диапазона частот на ПУМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Семёнов, М. Г.** Перспективы разработки микрополосковых циркуляторов и вентилей высокого уровня мощности / М. Г. Семёнов, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – № 2 (482). – С. 79 – 82.

2. **Лакс, Б.** Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики / Б. Лакс, К. Баттон. – М.: Мир, 1965.

3. **Вамберский, М. В.** Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М. В. Вамберский, В. П. Абрамов, В. И. Казанцев. – М.: Радио и связь, 1982.

4. **Налогин, А. Г.** Термостабильные ферриты для микрополосковых ферритовых приборов высокого уровня мощности / А. Г. Налогин, М. Г. Семенов, Н. Д. Урсуляк // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 65 – 71.

Статья поступила 14 июня 2018 г.

3(538).indd 15 19.11.2018 14:33:44

УДК 621.396

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫМИ СТРУКТУРАМИ

В. Я. Батаев[1], А. Ю. Гринев[1, 2], А. А. Измайлов[2], Д. А. Евсеев[2], А. П. Волков[3]

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

[2]*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва*

[3]*АО «Концерн «ВЕГА», г. Москва*

Рассмотрены принципы построения и возможность практической реализации частотно-селективных структур со свойствами искусственного магнитного проводника, запрещённой электромагнитной зоны и пространственно-частотной селективности в антенных системах (АС) для сокращения высоты профиля, увеличения полосы рабочих частот и развязки, снижения эффективной поверхности рассеяния АС, создания микрополосковых ФАР с низким уровнем кроссполяризационного излучения, разработки антенн вытекающей волны с высоким усилением и разреженных двухполяризационных ФАР с низким уровнем дифракционных лепестков, реализации совмещенных АС.

КС: периодическая структура, низкопрофильная антенна, искусственный магнитный проводник, диаграмма обратного рассеяния, частотно-селективная структура, поляризационная характеристика, поляризатор

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF ANTENNA SYSTEMS WITH FREQUENCY-SELECTIVE STRUCTURES

V. Ya. Batayev[1], A. U. Grinev[1, 2], A. A. Izmaylov[2], D. A Evseev[2], A. P. Volkov[3]

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

[2]*Moscow Aviation Institute (National research University), Moscow*

[3]*JSC «Radio Engineering Corporation «Vega», Moscow*

The principles of construction and possibility of practical implementation of frequency-selective structures with properties of artificial magnetic conductor, forbidden electromagnetic zone and spatial frequency selectivity in antenna systems (AS) were considered for reducing the profile height, increasing the band of operating frequencies and isolation, reducing the effective scattering surface of AS, creating microstrip phased arrays with a low level of cross-polarization radiation, development of high gain leaky wave antennas and sparse bipolar phase array antennas with a low level of diffraction lobes, realization of combined AS.

Keywords: array, low profile antenna, artificial magnetic conductor, backscattering diagram, frequency-selective structure, polarization characteristic, polarizer

1. ВВЕДЕНИЕ

Неизменной тенденцией развития теории и техники антенных систем (АС) бортовых многофункциональных радиоэлектронных комплексов, выполняющих функции РЛС, землеобзора, радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы, госопознавания, радионавигации и радиосвязи, является поиск и внедрение научно обоснованных технических решений, направленных на использование единой системы излучения в интересах нескольких радиотехнических

3(538).indd 16 19.11.2018 14:33:44

систем, расширение полосы рабочих частот, сектора сканирования и многофункциональности АС, снижение эффективной поверхности рассеяния и минимизацию габаритов АС [1, 2]. Решение подобных задач, как правило, усложняется ограниченным объёмом и эксплуатационными требованиями к АС. Одним из путей решения некоторых указанных проблем является использование частотно-селективных структур (ЧСС). Последние представляют собой периодические, в общем случае многослойные структуры, свойства которых обусловлены типом элемента, периодом и их композицией и которые обладают некоторыми нетрадиционными свойствами [3, 4].

Цель работы – рассмотреть принципы построения и возможность практической реализации ЧСС со свойствами искусственного магнитного проводника, запрещённой электромагнитной зоны и пространственно-частотной селективности в АС для сокращения высоты профиля, увеличения полосы рабочих частот и развязки, подавления поверхностных волн в подложках излучающего полотна, снижения эффективной поверхности рассеяния АС, создания микрополосковых фазированных антенных решеток (ФАР) с низким уровнем кроссполяризационного излучения, разработки антенн вытекающей волны с высоким усилением и разреженных двухполяризационных ФАР с низким уровнем дифракционных лепестков, реализации совмещенных АС, в частности, ОВЧ-, УВЧ-, *X*- и *Ka*-диапазонов и т. п.

2. СНИЖЕНИЕ ВЫСОТЫ ПРОФИЛЯ И РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЧСС СО СВОЙСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА

ЧСС со свойствами искусственного магнитного проводника (АМС) применяются для создания низкопрофильных антенн, позволяют контролировать диаграмму направленности (ДН), входной импеданс и эффективность излучения [5–7]. Их часто определяют как искусственные магнитные проводники, поскольку касательная компонента магнитного поля равна нулю, а коэффициент отражения от такой структуры равен +1.

АМС использовались для разработки низкопрофильной конформной двухполяризационной АС ОВЧ-диапазона, размещаемой на фюзеляже летательного аппарата (ЛА) (рис. 1). Для контроля ДН в *H*-плоскости излучатели горизонтальной (ВГ) и вертикальной (ВВ) поляризации состоят каждый из двух вибраторов, разнесенных на расстояние $D_v = D_h = 3{,}5 \cdot d$ (1120 мм) друг от друга. Высота АС составила h = 165 мм ($0{,}07\lambda_0$).

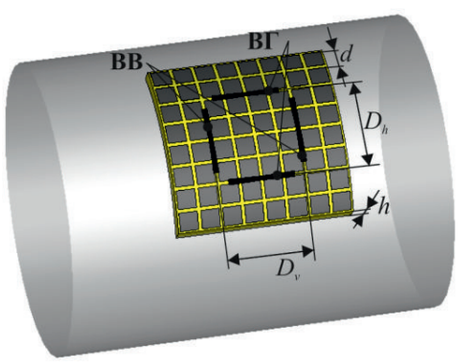
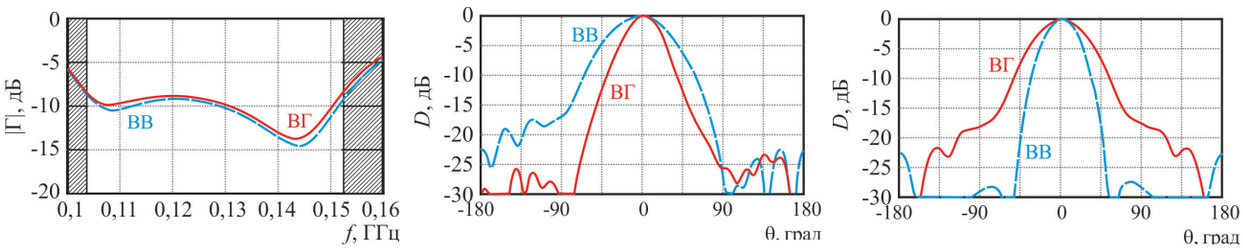


Рис. 1. Общий вид низкопрофильной конформной двухполяризационной АС ОВЧ-диапазона

3(538).indd 17 19.11.2018 14:33:44

На рис. 2 приведены частотные зависимости модуля коэффициента отражения | Г | от входа излучателей, а также ДН АС в *E*- и *H*-плоскостях. В рабочей полосе частот (40 %) КСВН составляет менее 2,1 и уровень заднего излучения не превышает -10 дБ.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Результаты моделирования АС:
а – частотные зависимости модуля коэффициента отражения от входа излучателя;
б – ДН АС в *E*-плоскости; *в* – ДН АС в *H*-плоскости

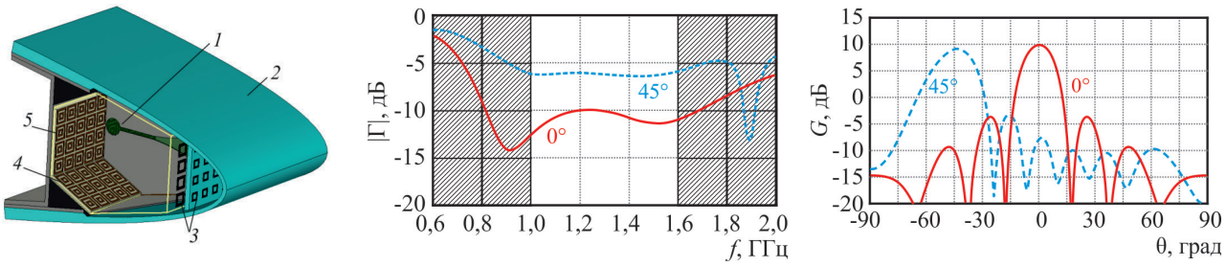
3. СНИЖЕНИЕ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ФАР ВНЕ ПОЛОСЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЧСС СО СВОЙСТВАМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА

ЧСС являются резонансными структурами, состоящими из металлических элементов, диэлектрических слоёв, а также слоёв с поглощением [8]. ЧСС обладают пространственно-избирательными и поляризационными свойствами и используются как пространственные фильтры. ЧСС имеют в числе своих достоинств частотную избирательность, характеризуются собственной рабочей полосой радиочастот (в общем случае отличающейся от рабочей полосы частот АР), имеют частотную характеристику типа ФНЧ, ФВЧ, полосно-пропускающего, полосно-заграждающего фильтра и др.

ЧСС со свойствами пространственно-частотного режекторного фильтра использовались для снижения диаграммы обратного раасеяния (ДОР) восьмиэлементной ФАР *L*-диапазона [1, 9, 10]. Разработана АС, включающая ФАР *L*-диапазона (с периодом $D_{АР}$) на основе металлодиэлектрического неоднородного излучателя (МНИ), размещаемую в отклоняемом носке передней консоли крыла ЛА, двухслойную ЧСС с полосно-заграждающей пространственно-частотной характеристикой, размещаемую на плоской диафрагме перед апертурой ФАР, и поглотитель на основе резистивных печатных элементов, размещаемый на П-образном металлическом профиле (рис. 3, *а*). При введении в конструкцию ФАР ЧСС наблюдалось ухудшение качества согласования и параметры излучателя были подстроены для компенсации влияния ЧСС. Получены характеристики согласования (КСВН менее 2 при синфазном возбуждении и КСВН менее 3 при фазировании лучом в направлении 45 град) и направленности ФАР (рис. 3, *б*, *в*).

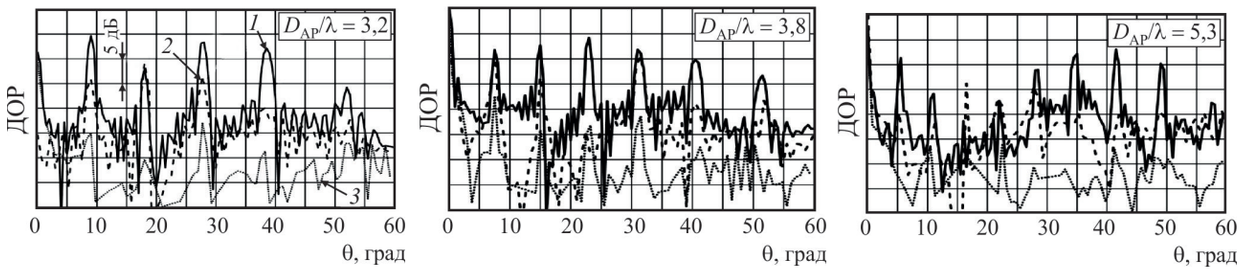
Комплексное использование двухслойной ЧСС и поглощающего материала позволило снизить амплитуду лепестков Брэгга ДОР ФАР *L*-диапазона в диапазоне углов 10…60 град на 5…25 дБ в полосе частот 8…18 ГГц зондирующего сигнала (рис. 4). При этом коэффициент усиления разработанной АС по сравнению с исходной ФАР не более чем на 0,3 дБ меньше в полосе частот 1..1,6 ГГц и секторе сканирования ±45 град.

3(538).indd 18 19.11.2018 14:33:44



а) *б*) *в*)

Рис. 3. ФАР на основе элемента типа МНИ с двухслойной ЧСС и поглотителем:
а – общий вид; *б* – частотные зависимости модуля коэффициента отражения от входа центрального излучателя; *в* – коэффициент усиления в *H*-плоскости; *1* – МНИ; *2* – обтекатель ЛА; *3* – ЧСС; *4*, *5* – поглощающий материал



а) *б*) *в*)

Рис. 4. ДОР линейной восьмиэлементной ФАР:
1 – исходная ФАР; *2* – ФАР с двухлойной ЧСС; *3* – ФАР с ЧСС и поглощающим материалом

4. РАЗРАБОТКА МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФАР С НИЗКИМ УРОВНЕМ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ЧСС СО СВОЙСТВАМИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ

Достоинства и недостатки ФАР на основе микрополосковых излучателей неоднократно обсуждались. К достоинствам можно отнести технологичность, разнообразие конструкций, повторяемость результатов, низкую стоимость; недостатками являются относительно узкая полоса рабочих частот и высокий уровень кроссполяризационного излучения в диагональных плоскостях, что затрудняет их применение, в частности, в моноимпульсных системах.

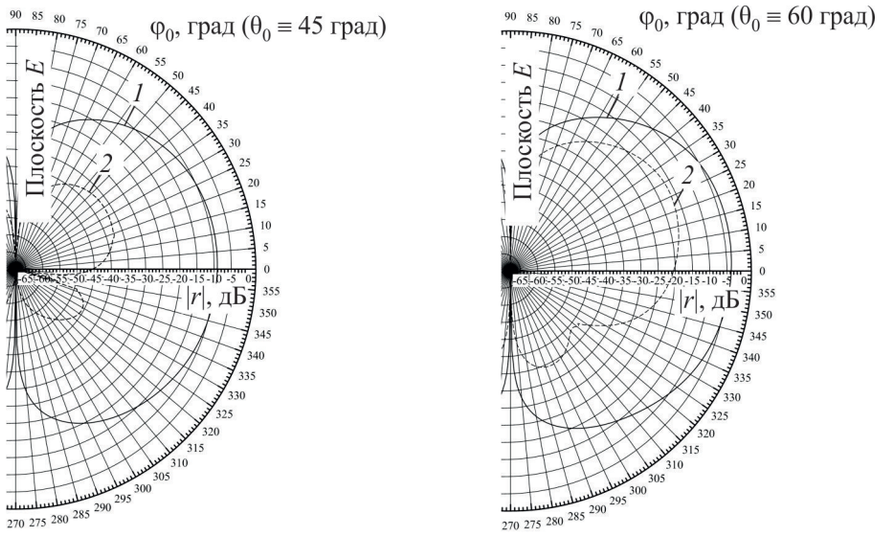
В статье оцениваются поляризационные свойства ФАР из микрополосковых элементов с линейной поляризацией. В качестве объекта исследования выбраны ФАР на основе микрополосковых излучателей (МПИ): базовый МПИ, двухслойный МПИ и МПИ с *Y*-щелью для расширения полосы рабочих частот. В рассматриваемых ФАР излучатели составляют гексагональную сетку с периодами $0,6\lambda_0$ по оси *X* и $0,47\lambda_0$ по оси *Y*, угол гексагональности при этом равен 57,9 град. Излучатели выполнены на диэлектрической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,5$; возбуждение зондовое. Поляризационная характеристика, определяемая эллипсом поляризации, характеризуется коэффициентом эллиптичности *r* и углом наклона

3(538).indd 19 19.11.2018 14:33:45

главной оси эллипса β. Значению $r = 0$ ($r < -70$ дБ) соответствует линейная поляризация, $0 < r < 1$ – эллиптическая поляризация, $r = 1$ ($r = 0$ дБ) – круговая. Численное моделирование показало, что микрополосковые ФАР обладают высоким уровнем кроссполяризационного излучения (коэффициент эллиптичности составляет до 4 дБ при отклонении луча от нормали на угол $\theta_0 = 60$ град и до -9 дБ при отклонении на угол $\theta_0 = 45$ град).

Для выявления механизма кроссполяризационного излучения МПИ антенн предложен подход, основанный на восстановлении структуры электромагнитного поля в ближней зоне антенны путем использования численного моделирования возбуждения антенны и регистрации касательных компонент электрического поля на близко расположенной виртуальной поверхности, с последующим переходом к эквивалентным магнитным токам и вычислением полей в дальней зоне. Анализ подсказывает способы снижения кроссполяризационного излучения: симметричное противофазное возбуждение элемента в ФАР, зеркальное расположение соседних излучающих элементов, внедрение дефектов в проводящий экран подложки и внешнего поляризатора – селектора в антенную систему.

На рис. 5 представлены поляризационные диаграммы АС, состоящей из МПИ и внешнего поляризатора в виде одномерной периодической структуры проводящих полос, размещенных над ФАР (период $P = 0{,}04\lambda_0$, ширина $w = 0{,}003\lambda_0$ [11]). Кроссполяризационное излучение при сканировании по углу φ от 0 до 360 град ослаблено на 28 дБ для $\theta = 45$ град и на 11 дБ для $\theta = 60$ град. Заметим, что в структуре ФАР-поляризатор на определенных частотах и угле сканирования возможно возникновение резонансных явлений, приводящих, во-первых, к ослеплению ФАР (резкому возрастанию коэффициента отражения от входов элементов излучающего полотна ФАР на основной поляризации) и, во-вторых, к резкому росту кроссполяризационного излучения. Для устранения резонансов рекомендуется, чтобы расстояние h между поляризатором и металлической базой АС не превышало $\lambda/2$ в полосе рабочих частот.



а) *б*)

Рис. 5. Диаграмма коэффициента эллиптичности r в луче:
1 – ФАР из МПИ; *2* – ФАР из МПИ с поляризатором

3(538).indd 20 19.11.2018 14:33:46

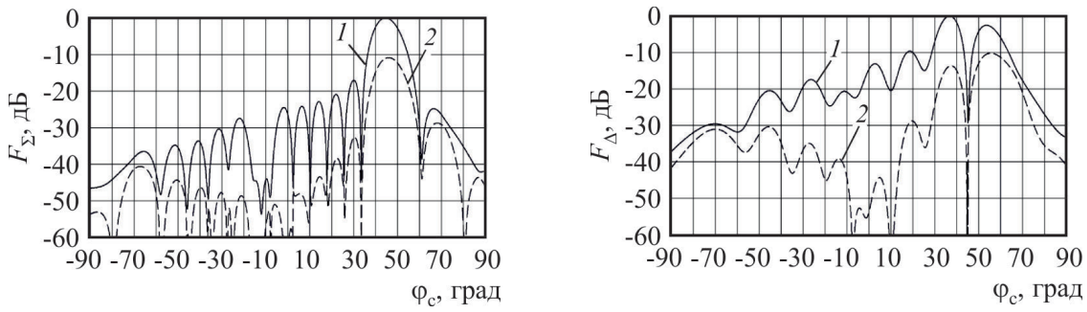
Для оценки влияния кроссполяризации микрополосковой ФАР на точностные характеристики АС при моноимпульсном режиме пеленгации выбрана модель микрополосковой ФАР, состоящей из 200 излучателей, расположенных на круглой апертуре в узлах гексагональной сетки с периодами вдоль осей OX, OY, равными соответственно: $dx = 0{,}6\lambda_0$, $dy = 0{,}47\lambda_0$ [11]. Рассмотрение проведём в «самолетной» системе координат (луч ФАР отклонён на угол $\theta_{c0} = 23{,}95$ град, $\varphi_{c0} = 45{,}20$ град, что соответствует $\theta_0 = 50$ град, $\varphi_0 = 32$ град в традиционной сферической системе координат).

Пеленгационная характеристика определяется выражением (1) и соответствует фазовому методу пеленгации [11]. Под пеленгационной характеристикой понимается зависимость нормированного управляющего напряжения от угла прихода сигнала (θ_c, φ_c) при фиксированном направлении фазирования $(\theta_{c0}, \varphi_{c0})$:

$$\xi(\theta, \varphi) = \mathrm{Im}\left(\frac{F_\Delta(\theta_c, \varphi_c)}{F_\Sigma(\theta_c, \varphi_c)} \right), \tag{1}$$

где $F_\Delta = F_{\Delta c0} + F_{\Delta cross}$ – разностная диаграмма направленности ФАР по полю; $F_\Sigma = F_{\Sigma c0} + F_{\Sigma cross}$ – суммарная диаграмма направленности ФАР по полю; $F_{\Sigma c0}, F_{\Delta c0}$ – диаграмма направленности для основной поляризации; $F_{\Sigma cross}, F_{\Delta cross}$ – диаграмма направленности для кроссовой поляризации.

На рис. 6 приведена суммарная $F_\Sigma(\theta_c = \theta_{c0}, \varphi_c)$ и разностная азимутальная $F_\Delta(\theta_c = \theta_{c0}, \varphi_c)$ диаграммы направленности для основной поляризации и кроссполяризации при фиксированном угле $\theta_c = \theta_{c0} = 23{,}95$ град.



а) *б*)

Рис. 6. Диаграмма направленности канала Σ и Δ_{A3} в сечении:
1 – ДН ФАР на основной поляризации; *2* – ДН ФАР на кроссполяризации

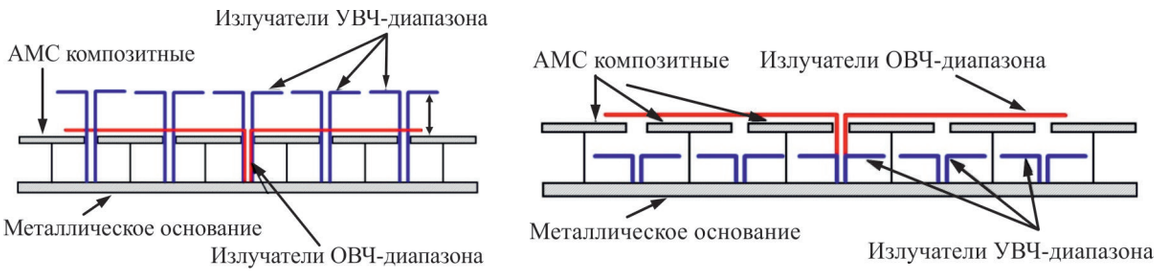
Наблюдается смещение «нуля» разностной кроссполяризационной ДН относительно равносигнального направления $(\theta_{c0}, \varphi_{c0})$, составляющее 12 мин. Данная особенность неизбежно сказывается на пеленгационной характеристике (1). Максимальная ошибка в определении направления в данном случае составляет 7,26 мин. В случае применения внешнего поляризатора в рассматриваемой ФАР угловая ошибка составила менее 1 мин.

3(538).indd 21 19.11.2018 14:33:46

5. СОВМЕЩЕНИЕ ДВУХ ДИАПАЗОНОВ В ЕДИНОЙ АПЕРТУРЕ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЧСС СО СВОЙСТВАМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ

Анализ способов эффективного решения основных классов задач радиолокационного землеобзора показал, что в случае необходимости ограничиться созданием одночастотной аппаратуры наблюдения оптимальным будет выбор наиболее коротковолнового (*X*) диапазона с длиной волны $\lambda \approx 3{,}1$ см из возможных в космических приложениях. Тем не менее, обширный сегмент актуальных задач наблюдения требует реализации радиолокационной диагностики в более длинноволновых (дециметровых) диапазонах: *L* ($\lambda \approx 23$ см) и *P* ($\lambda \approx 67$ см) – или комплексного анализа информации, синхронно полученной в двух или трёх существенно разнесенных (*X*, *L* и *P*) диапазонах. В перспективе – по мере совершенствования методов обработки первичных радиолокационных данных номенклатура эффективно решаемых задач может быть дополнительно расширена за счет освоения метрового (ОВЧ, $\lambda \approx 210\ldots220$ см) диапазона зондирующего излучения. Проникающая способность радиолокационного сигнала, возрастая по мере увеличения длины волны, позволяет в этих диапазонах выявлять и дешифрировать объекты различного назначения под маскирующими их покровами и в подповерхностном слое Земли. Высокая целевая отдача от применения радиолокационных данных, полученных в нескольких, существенно разнесённых диапазонах зондирующего излучения (3-, 23-, 67- и 250-см), убедительно подтверждена к настоящему времени в процессе опытной эксплуатации авиационных радиолокаторов, как зарубежных, так и отечественных, а также результатами штатной эксплуатации КА JERS-1, ALOS-1, 2 (Япония), оснащенных радиолокатором *L*-диапазона [2,12,13].

На рис. 7 схематично представлены две схемы комплексирования АС ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. Характерной особенностью такого принципа является использование ЧСС, обладающих свойствами поверхности с высоким импедансом, часто определяемых как исискусственные магнитные проводники, реализующие коэффициент отражения +1 для ОВЧ-диапазона [14]. В свою очередь, для УВЧ-диапазона АМС должны выполнять роль металлического экрана (рис. 7, *а*), при этом излучатели УВЧ располагаются на высоте $\lambda_{УВЧ}/4$ над ним, либо быть прозрачными (рис. 7, *б*).



а) *б*)

Рис. 7. Структура совмещенной АС:
а – УВЧ над ОВЧ; *б* – УВЧ под ОВЧ

На рис. 8 приведен общий вид совмещенной АС для авиационного мониторинга земной поверхности. Антенная система УВЧ-диапазона состоит из 8 печатных излучателей. Излучатели ОВЧ-диапазона *B2* расположены в плоскости АМС *4*, а для возбуждения излучателей на нижнем слое проводящего экрана *1* расположена полосковая система распределения. Высота

3(538).indd 22 19.11.2018 14:33:46

рассчитанной АС составляет около 70 мм. Высота h АС ОВЧ-диапазона равна $\lambda_{ОВЧ}/8$. Период излучателей T_p в УВЧ-диапазоне составил 40 мм ($\lambda_{УВЧ}/4$).

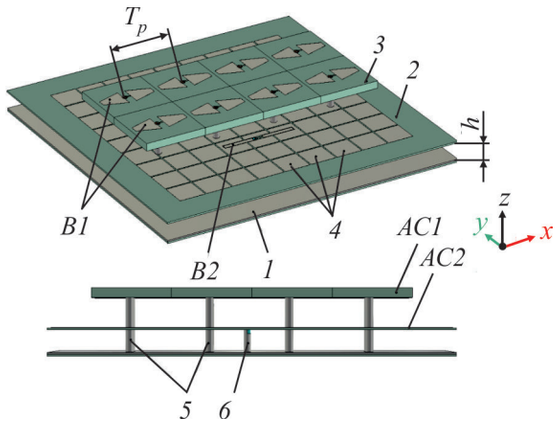


Рис. 8. Совмещенная АС для авиационного мониторинга земной поверхности:
1 – проводящий экран; *2* – диэлектрический слой с ε_1; *3* – диэлектрический слой с ε_2; *4* – металлические пластины; *AC1* – антенная система 1; *AC2* – антенная система 2; *B1* – вибратор 1; *B2* – вибратор 2; *5*, *6* – питающая коаксиальная линия

На рис. 9 приведена зависимость КСВН от частоты для совмещенной АС. Рабочая полоса структуры по уровню КСВН менее 2 составляет 35 % для ОВЧ-диапазона и 14 % для УВЧ-диапазона.

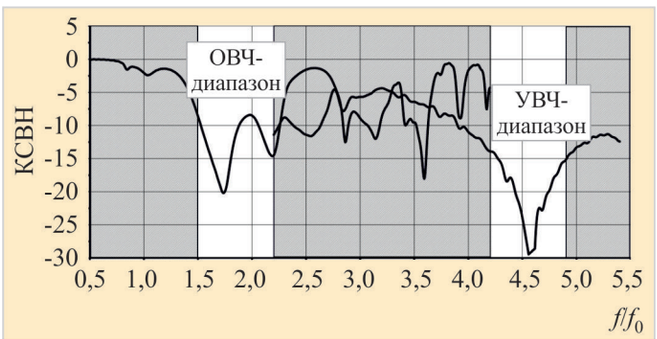
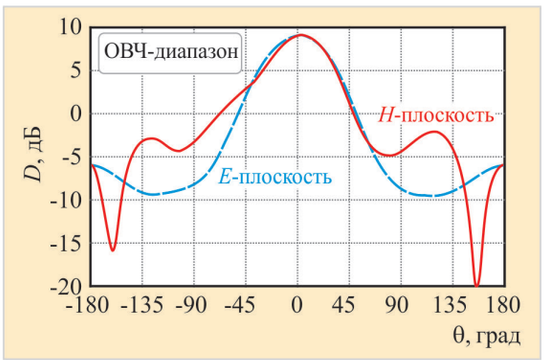
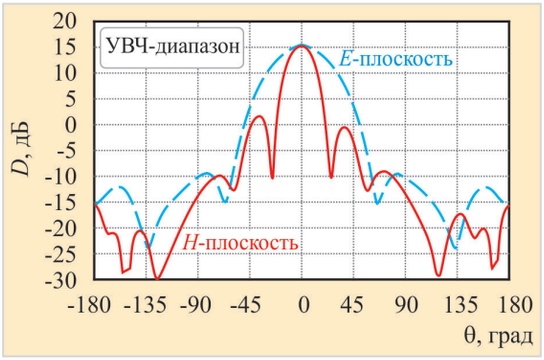


Рис. 9. Зависимость КСВН от частоты

На рис. 10 приведены ДН АС в *E*- и *H*-плоскостях на центральных рабочих частотах.



а)



б)

Рис. 10. Диаграммы направленности совмещенной АС:
а – ОВЧ-диапазон ($1{,}7f/f_0$); *б* – УВЧ-диапазон ($4{,}6f/f_0$)

3(538).indd 23 19.11.2018 14:33:47

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные частотно-селективные структуры являются полезным инструментом, внедрение которого в АС может улучшить их характеристики: сократить высоту профиля, увеличить полосу рабочих частот и развязку, снизить эффективную поверхность рассеяния, уровень кроссполяризационного излучения микрополосковых антенн, реализовать совмещение двух диапазонов в единой апертуре и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения / Под ред. Ю. И. Белого. – М.: Радиотехника, 2016.

2. Антенно-фидерные и оптоэлектронные устройства / Под ред. В. С. Вербы и А. П. Курочкина. – М.: Радиотехника, 2014. – 352 с.

3. Theory and phenomena of metamaterials / Ed. F. Capolino // CRC Press. – 2009. – P. 974.

4. Applications of metamaterials / Ed. F. Capolino // CRC Press. – 2009. – P. 762.

5. **Sievenpiper, D. F.** High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band / D. F. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, E. Yablonovitch // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 57, No 11. – P. 2059 – 2074.

6. **Гринев, А. Ю.** Расчет параметров поверхности с высоким импедансом для низкопрофильных вибраторных антенн / А. Ю. Гринев, Е. В. Ильин, А. П. Волков // Антенны. – 2012. – № 10. – С. 57 – 62.

7. **Volkov, A. P.** Enhanced directivity of low-profile wideband antenna based on artificial magnetic conductor / A. P. Volkov, K. V. Kozlov, A. Yu. Grinev, A. P. Kurochkin // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) 2017, International Conference. – P. 353 – 356.

8. **Munk, B. A.** Frequency-selective surfaces: theory and design / B. A. Munk. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2000. – P. 440.

9. **Гринев, А. Ю.** Полосно-заграждающие частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной АФАР *L*-диапазона / А. Ю. Гринев, А. П. Волков, А. И. Синани, Г. Ф. Мосейчук // Антенны. – 2016. – № 10. – С. 96 – 101.

10. **Grinev, A. Yu.** Stop-band frequency-selective structures for controlling back-scattering pattern of *L*-band linear antenna arrays / A. Yu. Grinev; A. P. Volkov; I. I. Krasnolobov; K. M. Baskov; V. V. Kakshin // Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS) 2017, International Conference. – P. 2179 – 2184.

11. **Гринев, А. Ю.** Улучшение поляризационных характеристик микрополосковых фазированных антенных решеток с линейной поляризацией / А. Ю. Гринев, Е. В. Ильин, Д. А. Евсеев // Антенны. – 2017. – № 10. – С. 3 – 10.

12. Space antenna handbook / Ed. by W. A. Imbriale, S. Gao, L. Boccia. – John Wiley & Sons., 2012. – P. 744.

13. **Foged, L. J.** Miniaturized array antenna using artificial magnetic materials for satellite-based AIS system / L. J. Foged, A. Giacomini, F. Saccardi et al. // IEEE Trans. on Antennas Propag. – 2015. – Vol. 63, No 4. – P. 1276 – 1287.

14. **Измайлов, А. А.** Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе магнитного проводника конечного размера / А. А. Измайлов, А. П. Волков // Труды МАИ. – 2017. – № 94.

Статья поступила 2 июля 2018 г.

3(538).indd 24 19.11.2018 14:33:47

УДК 621.372.88

РАЗРАБОТКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВЧ-ПЛАТ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА, ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ

В. В. Демшевский, А. А. Цитович, М. С. Левашов

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

Проведены разработка и теоретическое исследование 4-канального делителя мощности, выполненного на основе интегрированного в подложку волновода. Определены параметры тройника и поворота, входящих в состав делителя/сумматора мощности, в полосе рабочих частот. На их базе построен 4-канальный делитель мощности *X*-диапазона в полосе 8…11 ГГц с разбросом менее чем 0,4 град по фазе и 0,5 дБ по амплитуде. Представлены теоретические результаты, которые сравниваются с параметрами ранее разработанных делителей мощности на основе других СВЧ-линий передач. Разработанный делитель мощности с низким профилем подходит для интеграции в цепи распределения СВЧ-мощности.

КС: интегрированный в подложку волновод, коэффициент передачи, СВЧ-линия передачи, делитель мощности

DEVELOPMENT AND ELECTRODYNAMIC ANALYSIS OF MICROWAVE BOARDS BASED ON A WAVEGUIDE INTEGRATED INTO A SUBSTRATE

V. V. Demshevsky, A. A. Tsitovich, M. S. Levashov

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

The development and theoretical investigation of a 4-channel power divider based on a waveguide integrated into a substrate were carried out. The parameters of the tee and turn that form part of the power divider/combiner are determined in the operating frequency band. On their basis, a 4-channel *X*-band power divider was built in the band 8…11 GHz with a spread of less than 0.4 deg in phase and 0.5 dB in amplitude. Theoretical results are presented which are compared with the parameters of previously developed power dividers based on other microwave transmission lines. The developed power divider with a low profile is suitable for integration in microwave power distribution circuits.

Keywords: waveguide integrated into a subject, transmission coefficient, microwave transmission line, power divider

В многоканальных передающих системах широкое применение находят делители/сумматоры мощности. Требования, предъявляемые к делителям/сумматорам мощности, обычно определяются их областью применения. В составе фазированных антенных решеток делители/сумматоры мощности должны обеспечивать в выходных плечах требуемое амплитудно-фазовое распределение для формирования диаграммы направленности решетки. Существенную роль играют массогабаритные характеристики устройств, стоимость и технологичность изготовления.

В связи с тем, что в электронной промышленности существует тенденция к уменьшению массогабаритных показателей и расширению функциональных возможностей устройств, исследуются новые методы и подходы, позволяющие добиться расширения рабочей полосы частот, управ-

3(538).indd 25 19.11.2018 14:33:47

ляемости/реконфигурируемости параметров, характеристик и уменьшения габаритных размеров по сравнению с традиционными аналогами.

Так, развитие современной микросистемной техники привело к появлению новых трехмерных структур в составе многослойных интегральных микросхем – SIW (substrate integrated waveguide – интегрированный в подложку волновод), которые представляют собой волноводоподобные элементы, созданные двумя рядами металлических цилиндров в диэлектрической подложке и соединяющие два параллельных слоя металлизации (рис.1). В результате классический прямоугольный волновод может быть изготовлен в планарной форме с применением существующих технологий производства, например, керамики с низкой температурой обжига (LTCC), сохраняя при этом свои основные свойства (большая передаваемая мощность, малые потери, полностью экранированная структура, дисперсионные характеристики). Интегрированные волноводы могут конкурировать с печатными линиями СВЧ, так как имеют малые размеры и массу, а также низкую стоимость производства [1, 2].

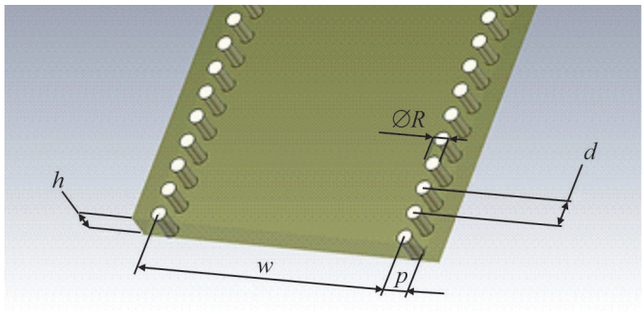


Рис. 1. Линия передачи, сделанная по технологии SIW

В ходе выполнения представленной работы были проведены расчет и исследование параметров интегрированного волновода и получены требуемые характеристики (рис. 2).

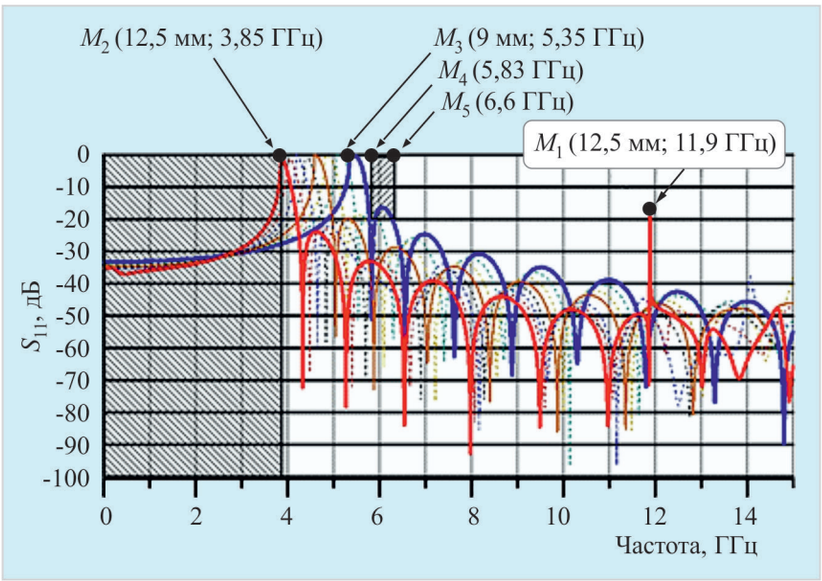
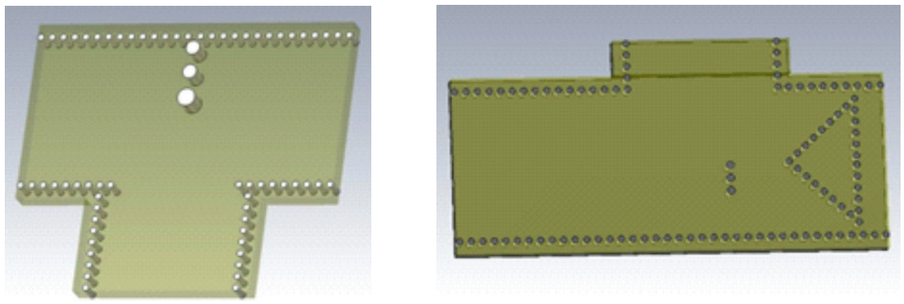


Рис. 2. Зависимости S_{11} от частоты интегрированного волновода

3(538).indd 26 19.11.2018 14:33:47

Размеры интегрированного волновода были получены численным методом с применением алгоритма оптимизации доверительными областями. Далее для построения распределительной системы были применены общие соображения для прямоугольного волновода.

Основными элементами 4-канального делителя/сумматора мощности на основе интегрированного волновода являются Т-образный тройник и поворот «Клин» (рис. 3). Тройник сделан по принципу, реализуемому в прямоугольных волноводах, в качестве перегородки используются металлизированные отверстия переменного радиуса R.

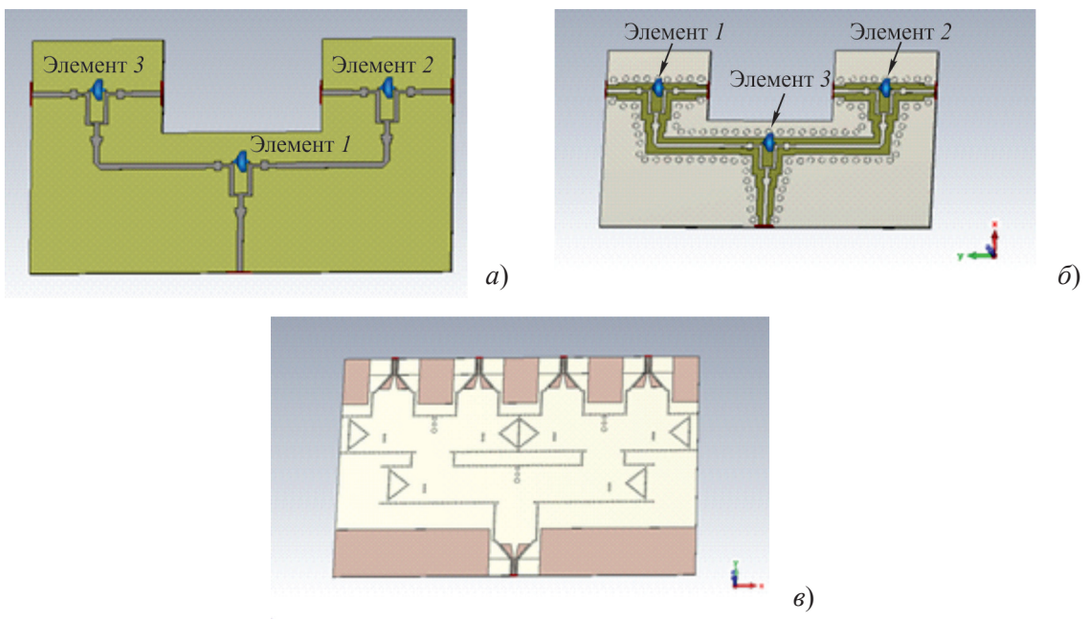


а) *б*)

Рис. 3. Т-тройник (*а*), поворот «Клин» (*б*)

Конструкция поворота выполнена на основе клина треугольной формы с согласующими металлизированными отверстиями перед клином. Так как повороты нарушают регулярность тракта и являются источником паразитных отражений, то отработка конструкции поворота проводилась по условию минимального значения коэффициента стоячей волны.

Разработанный 4-канальный делитель мощности на основе интегрированного волновода показан на рис. 4, *в*. Достоинства данной реализации – технологичность, габариты и широкополосность.



а) *б*)

в)

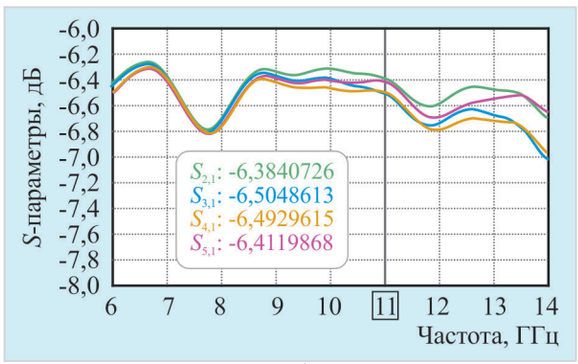
Рис. 4. Делители/сумматоры мощности

3(538).indd 27 19.11.2018 14:33:48

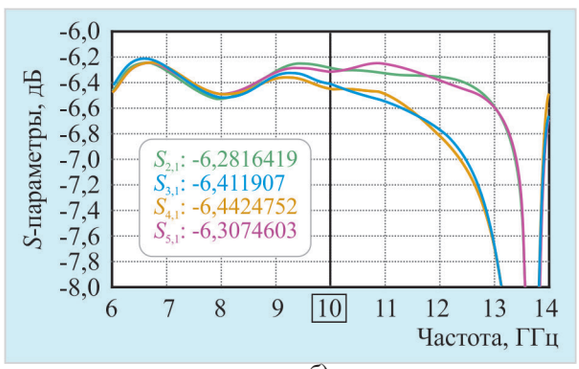
Проведем сравнение характеристик полученного 4-канального делителя/сумматора мощности и других делителей/сумматоров, реализованных на основе иных типов СВЧ-линий передачи (рис. 4, *а*, *б*). Для расчетов в качестве подложки во всех случаях использовался материал Ro4003. Исследования проводились в диапазоне частот $f = 6…14$ ГГц. В ходе исследования в диапазоне частот анализировались такие параметры, как коэффициент передачи, фаза на выходах и КСВН (рис. 5, 6) [3, 4].

Как видно из полученных графиков, наибольшую рабочую полосу обеспечивает несимметричная микрополосковая линия, однако наибольшую равномерность характеристики можно увидеть для заземленной копланарной линии. Делитель/сумматор, выполненный на основе интегрированного волновода, показывает некоторые средние характеристики в сравнении с представленными линиями. На его характеристике четко видны отсечка в нижней части диапазона, обусловленная $\lambda_{кр}$, как и для обычного прямоугольного волновода, и отсечка в верхней части диапазона, вызванная наличием участка перехода к заземленной копланарной линии, поэтому делитель на основе SIW потенциально может работать в более широкой полосе частот (см. рис. 2), если модифицировать переход к другой линии передач.

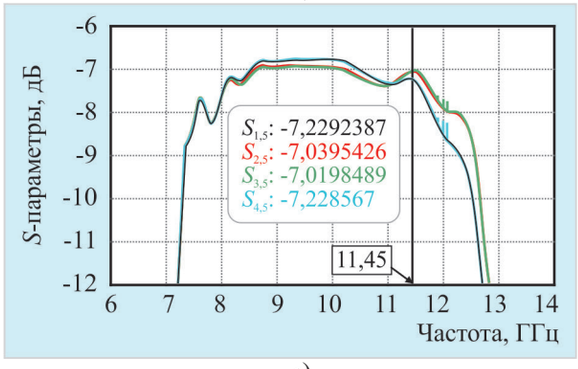
Отличие фазы сигнала между выходами во всех рассмотренных случаях в их рабочем диапазоне составляет менее чем 0,4 град. Однако несимметричная микрополосковая линия является открытой структурой, и нахождение вблизи полосков металлических элементов (части корпуса, СВЧ-соединителя, винта и т. д.) может существенно влиять на всю ее амплитудно-фазовую характеристику. Этот вывод отчасти касается и делителя/сумматора на основе заземленной копланарной линии, так как он является полуоткрытой структурой и также может быть подвержен воздействию паразитных эффектов извне. Наиболее защищенным с этой точки зрения является делитель на основе интегрированного волновода, так как фактически является полностью закрытой структурой.



а)



б)



в)

Рис. 5. Коэффициенты передачи делителя мощности

3(538).indd 28 19.11.2018 14:33:48

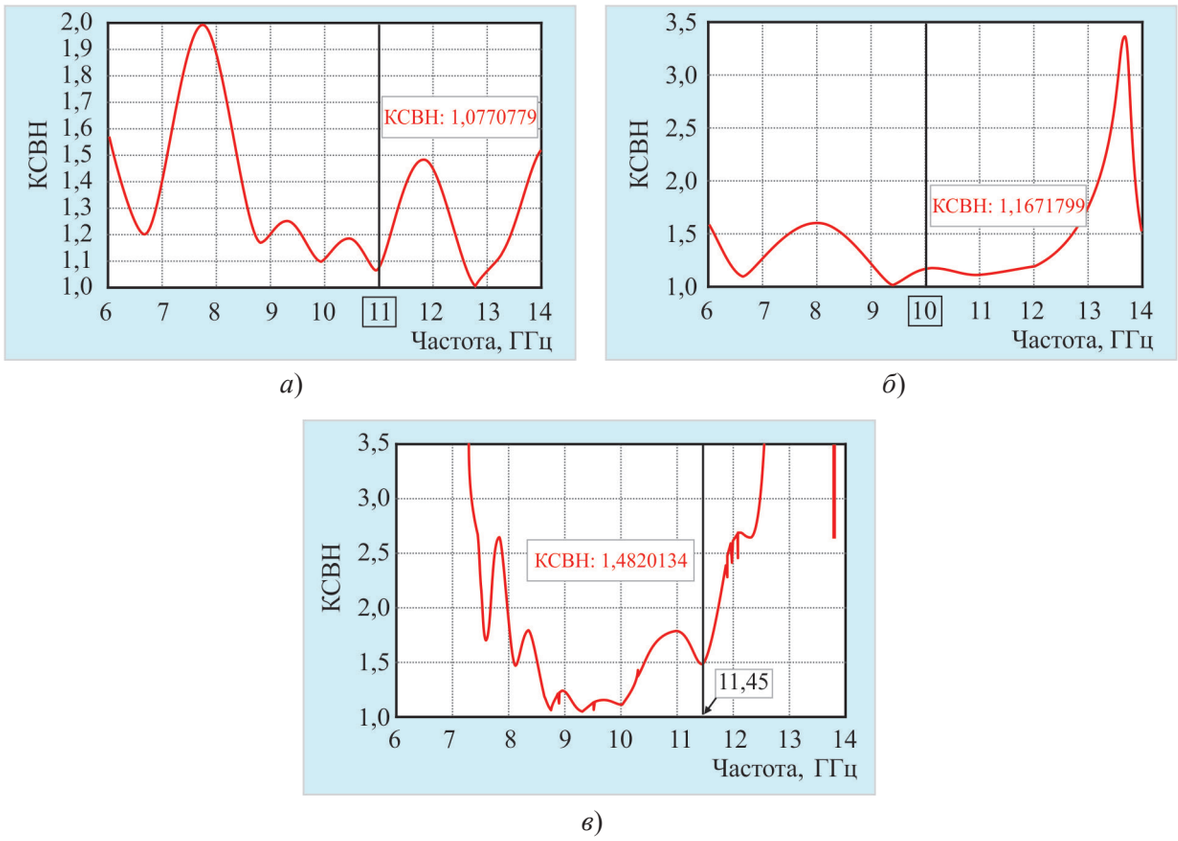


Рис. 6. КСВН на входах делителей/сумматоров в полосе частот

С точки зрения согласования в полосе частот наилучшим образом проявляет себя делитель на основе несимметричной микрополосковой линии и немногим хуже делитель на основе заземленной копланарной линии. Делитель на основе интегрированного волновода имеет узкую полосу за счет сложного поворота, который позволил уменьшить габаритные параметры всего делителя/сумматора. Процесс его согласования в полосе частот – довольно трудоемкая задача и требует применения иных подходов при проектировании.

Интегрированные в подложку волноводы являются перспективным направлением исследований для решения инженерных задач по уменьшению габаритов, стоимости вследствие повышения технологичности. Они позволяют создавать многослойные структуры для решения задач подводимой мощности к элементу.

Полученная схема 4-канального делителя мощности является одним из возможных решений. Данный 4-канальный делитель показывает хорошие результаты, расхождения по амплитуде составляют 0,5 дБ, по фазе – 0,04 град, полученная структура подходит для реализации синфазного и равноамплитудного распределения. Делитель мощности на основе интегрированного волновода фактически является полностью закрытой структурой и не подвержен внешним паразитным влияниям, а также сам не является их источником. Однако стоит учесть, что в сравнении с другими типами линий передач делитель на основе интегрированного волновода имеет узкую полосу и процесс его согласования в полосе частот довольно трудоемкая задача.

3(538).indd 29 19.11.2018 14:33:48

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kazemi, R.** Design of a wide band eight-way compact SIW power comdiner FED by a low loss GCPW-to-SIW transition / R. Kazemi, R. A. Sadeghzadeh and A. E. Fathy // Progress In Electromagnetics Research. C. – 2012. – Vol. 26.

2. **Hao, Z.** Multiway broadband substrate integrated waveguide (SIW) power divider / Z. Hao, Li W. Hong, H. Zhang and K. Wu. // IEEE Ant. and Propag. Soc. Int. Symp. – 2005. – Vol. 1A. – P. 639 – 642.

3. **Демшевский, В. В.** Теоретическое исследование работы микрополосковой структуры в закрытом объеме / В. В. Демшевский, М. С. Левашов, А. А. Цитович // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Россия, Санк-Петербург, 2017.

4. **Demshevsky, V. V.** Theoretical and experimental study of the microstrip structure in closed space, Russia, Divnomorskoe / V. V. Demshevsky, A. A. Tsitovich, M. S. Levashov / RSEMW, 2017.

Статья поступила 2 июля 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

МЕРКУЛОВ В. И., ВЕРБА В. С., ИЛЬЧУК А. Р. **Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса. Т. 1.** Монография в 3-х томах / Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2018. – 360 с.: ил.

Рассмотрены теоретические основы синтеза и анализа радиоэлектронных систем на основе классических и новых методов оптимизации управления и оценивания. Показана роль и определено место бортовой РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса. Исследованы проблемы их разработки и режимы функционирования. Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

МЕРКУЛОВ В. И., ВЕРБА В. С., ИЛЬЧУК А. Р., КОЛТЫШЕВ Е. Е. **Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Сопровождение одиночных целей. Т. 2.** Монография в 3-х томах / Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2018. – 486 с.: ил.

Рассмотрены алгоритмы сопровождения одиночных воздушных и наземных целей по дальности, ее производным и угловым координатам как в однопозиционной, так и в двухпозиционной РЛС при автономной и совместной работе с оптико-электронными системами и с системами радиотехнической разведки, в том числе и в условиях помех. Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

3(538).indd 30 19.11.2018 14:33:49

УДК 621.396.676

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ АНТЕННА ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ С ШИРОКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА, ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ

В. В. Демшевский, А. А. Цитович

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

Представлены результаты по расчету диаграммы направленности антенны вытекающей волны на основе интегрированного в подложку волновода, установленной в металлический корпус. Основным требованием было обеспечение широкой диаграммы направленности (≥80 град по уровню -7 дБ) в исследуемой полосе частот. Проведенная разработка, синтез и электродинамический анализ показали возможность выполнения поставленной цели на практике и большие перспективы расширения функциональных возможностей разработанной антенны.

КС: антенна вытекающей волны, интегрированный в подложку волновод, диаграмма направленности, синтез

LOW PROFILE LEAKY-WAVE ANTENNA WITH A WIDE RADIATION PATTERN BASED ON A WAVEGUIDE INTEGRATED INTO A SUBSTRATE

V. V. Demshevsky, A. A. Tsitovich

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

The results on calculating the radiation pattern of a leaky wave antenna on the basis of a waveguide integrated into a subject and mounted in a metal housing are presented. The main requirement was to provide a wide radiation pattern (≥80° at -7 dB level) in the frequency band under study. The carried out development, synthesis and electrodynamic analysis have shown the possibility of accomplishing the set goal in practice and great prospects of expanding the functionality of the developed antenna.

Keywords: leaky-wave antenna, waveguide integrated into a substrate, radiation pattern, synthesis

Практическое использование бортовых антенных систем показало, что они могут в существенной степени влиять на радиолокационные и аэродинамические характеристики несущих объектов. Основными задачами при разработке антенн являются их микроминиатюризация, повышение надежности, интеграция с другими устройствами и расширение функциональных возможностей.

Статья посвящена разработке антенны вытекающей волны на основе волноводов, интегрированных в подложку (substrate integrated waveguide), которые представляют собой отдельный вид печатных СВЧ-линий передач [1]. Интегрированные в подложку волноводы изготавливаются в планарной форме при помощи технологии создания печатных плат и позволяют передавать полезный сигнал с малыми искажениями и потерями. Частотный диапазон таких структур в основном определяется так же, как и для классического прямоугольного волновода, но при этом

3(538).indd 31 19.11.2018 14:33:49

поперечные размеры значительно меньше за счет электрофизических параметров подложки. Толщина определяется толщиной листа диэлектрической подложки.

$$\lambda_{кр} = 2a, \tag{1}$$

$$\lambda_{кр} = 2a_{equ}, \tag{2}$$

$$a_{equ} = a/\sqrt{\varepsilon_r}, \tag{3}$$

$$W_{SIW} = a_{equ} + 2d. \tag{4}$$

Антенны вытекающей волны представляют собой единый массив нерезонансных поперечных щелей, которые расположены близко друг к другу, имеют малое сопротивление основной волне и, как следствие, малый уровень излучаемой мощности на отдельном элементе. Принцип работы антенн вытекающей волны базируется на излучении быстрых (вытекающих) волн, фазовая скорость которых выше скорости света. Отличительной особенностью таких антенн является то, что направление главного лепестка отклонено от нормали и зависит от постоянной распространения, частоты и длины излучающей структуры, поэтому возможно осуществление частотного сканирования луча в определенном секторе пространства [2]. Главные преимущества антенн вытекающей волны – это отсутствие дифракционных максимумов, малый уровень боковых лепестков, возможное обеспечение широкой полосы и относительная простота достижения высоких показателей коэффициента усиления. Они применимы в системах с наклонным излучением, предъявляющих требования к аэродинамике и конформности антенн, например: радиолокационных системах безопасности транспорта, системах навигации [3].

Поэтому, обладая относительно небольшими размерами и малой массой, антенны на основе интегрированных волноводов могут быть с успехом применены для решения радиолокационных задач. Используя все перечисленные преимущества, такие антенны можно с легкостью встраивать в корпуса летательных аппаратов, ракет, автомобилей и других объектов, фактически не влияя на их массогабаритные, аэродинамические, радиолокационные и другие характеристики [4].

Для получения диаграммы направленности с большой шириной по уровню -7 дБ (≥80 град) в полосе частот 7…10 ГГц представим антенну в виде эквивалентной антенной решетки, состоящей из точечных излучателей (рис. 1).

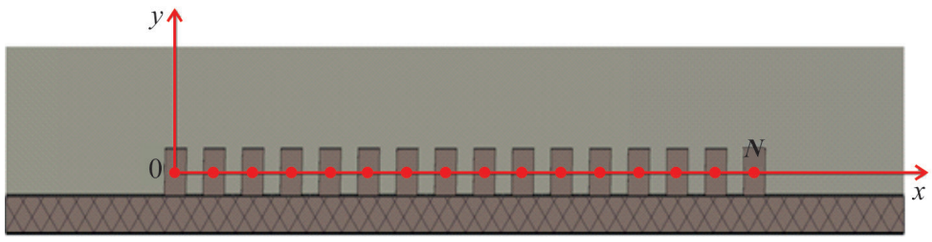


Рис. 1. Расположение нерезонансных щелей
и эквивалентных точечных излучателей

Центр щели будем считать местом расположения точечного излучателя. У такой эквивалентной антенной решетки диаграмма направленности, согласно [5], будет определяться уравнением:

$$F(\theta, \varphi) = F_N(\theta, \varphi) \cdot f(\theta, \varphi), \tag{5}$$

3(538).indd 32 19.11.2018 14:33:49

где $F_N(\theta, \varphi)$ – множитель антенной решетки; $f(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности одиночного излучателя.

$$F_N(\theta,\varphi) = \sum_{n=1}^{N} A_n \cdot e^{-i(\Phi+\Phi_0)}. \quad (6)$$

Результатом предварительного электродинамического моделирования антенны (рис. 2, 3) стало амплитудно-фазовое распределение, подаваемое на излучатели.

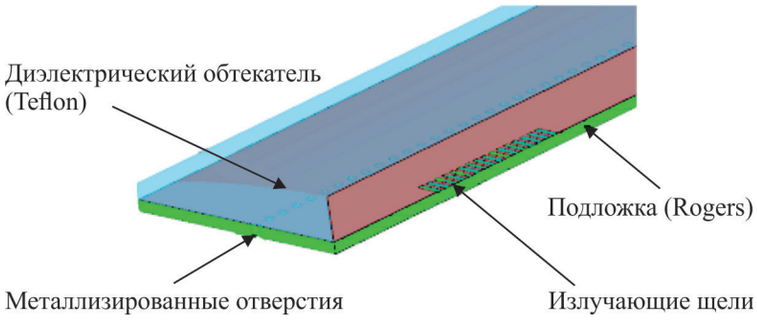


Рис. 2. Конструкция антенны вытекающей волны с диэлектрическим обтекателем

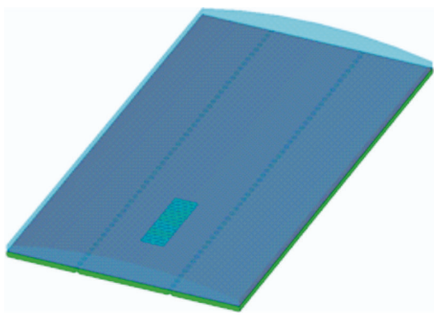


Рис. 3. Общий вид антенны вытекающей волны

Аппроксимируя экспериментальные данные полиномами вида (7) и (8) (рис. 4), зададим их в алгоритм проведения синтеза диаграммы направленности.

$$A = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7, \quad (7)$$

$$\Phi = c_1x + c_2. \quad (8)$$

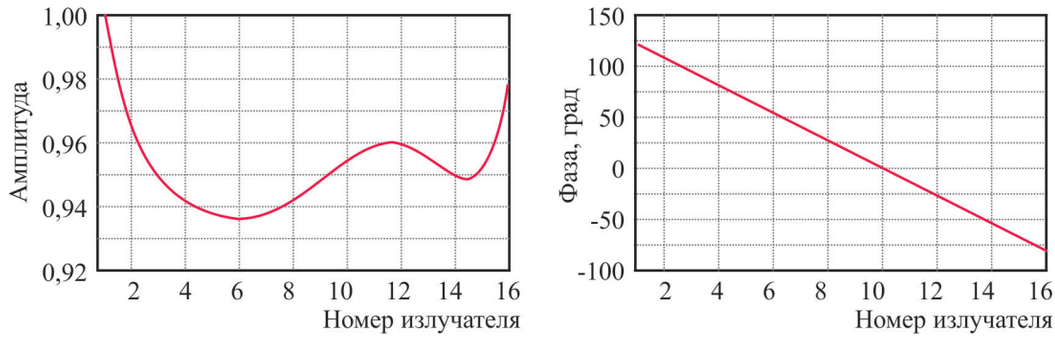


Рис. 4. Функции распределения амплитуды и фазы электромагнитного поля в антенне вытекающей волны

В качестве переменных возьмем количество излучающих элементов N и расстояние между ними d_x. После проведения расчетов для нашей задачи были получены следующие значения: $N = 16$, $d_x = 0{,}9$ мм.

Результаты электродинамического моделирования показали, что при рассчитанном отношении N/d_x получается наиболее широкая ДН в полосе частот.

3(538).indd 33 19.11.2018 14:33:49

Далее (рис. 5 и 6) представлены графики математического расчета и электродинамического эксперимента.

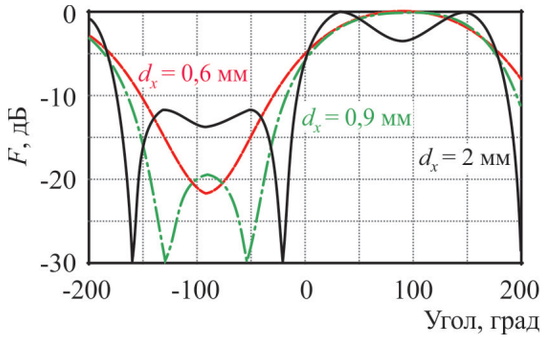


Рис. 5. Результаты синтеза диаграммы направленности
для антенны вытекающей волны

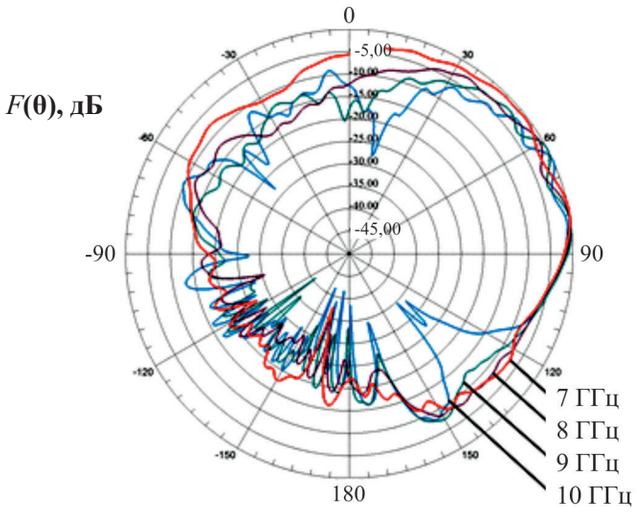


Рис. 6. Изменение ширины диаграммы направленности
антенны вытекающей волны в исследуемой полосе частот в плоскости *E*

Влияние защитного диэлектрического слоя, расположенного на поверхности антенны, на полевые и частотные характеристики не столь велико по сравнению с влиянием внутреннего заполнения, однако позволяет осуществлять более точную настройку антенны для работы в заданной полосе частот.

Проведенные разработка, синтез и электродинамический анализ показали возможность выполнения поставленной цели на практике и большие перспективы расширения функциональных возможностей разработанной антенны. Антенна вытекающей волны имеет широкую частотную полосу, компактные размеры, малую массу, относится к классу низкопрофильных встраиваемых антенн, более технологична в производстве, не требует настройки и имеет возможность работы на круговой поляризации.

3(538).indd 34 19.11.2018 14:33:50

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yan, L.** Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines / L. Yan, W. Hong, K. Wu, T. Cui // J. Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave antennas propagation. – 2005. – P. 35 – 42.

2. **Rumsey, V. H.** Traveling wave slot antennas / V. H. Rumsey // J. Appl. Phys. – 1953. – Vol. 24. – P. 1358 – 1365.

3. **Дементьев, А. Н.** Антенна вытекающей волны на основе интегрированного волновода на подложке с поперечными щелями / А. Н. Дементьев, И. Б. Козловский, С. М. Колесников, С. В. Абышев, А. А. Романов // Материалы международной научно-технической конференции. – Москва, 2015. – С. 250 – 255.

4. **Lemberg, K. V.** High gain *Ku*-band substrate integrated waveguide slot antenna array / K. V. Lemberg, O. A. Nazarov, V. S. Panko, Yu. P. Salomatov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – P. 319 – 323.

5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2012.

Статья поступила 2 июля 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

КУРУШИН А. А. **Проектирование СВЧ-устройств в CST STUDIO SUITE.** – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 428 с.: ил.

CST STUDIO SUITE – мощная программа трехмерного моделирования процессов распространения электромагнитных полей, разработанная компанией Computer Simulation Technolody. Программа использует различные методы расчета (расчет переходных процессов во временной области, анализ в частотной области, расчет с использованием собственных частот, методы физической и геометрической оптики и др.) для моделирования сложных СВЧ-структур: фильтров, антенн, циркуляторов, аттенюаторов и т. д. Основной метод – расчет переходных процессов – решает задачи возбуждения СВЧ-структуры радиоимпульсами, что отличает ее от большинства других программных продуктов. Кроме того, комплекс позволяет рассчитать физические характеристики объектов: температуру и мощность поглощения в диэлектрических средах с потерями, а также траектории и статистику распространения частиц в СВЧ-устройствах: магнетронах, лампах, разрядных устройствах, ЛБВ, ЛОВ.

Учебное пособие поможет освоению комплекса **CST STUDIO SUITE**.

Предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению 210400 «Радиотехника», и инженерно-технических работников.

3(538).indd 35 19.11.2018 14:33:50

УДК 621.375.4:681.3.06

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОЙ ЧАСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

И. А. Гаврилов, В. А. Степушкин

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

Предложена конструкция широкополосного СВЧ-усилителя со сложением мощности нескольких твердотельных усилителей на коаксиальных волноводах. Разработана конструкция и изготовлены макеты пассивной части усилителя на основе результатов компьютерного моделирования. Проведены измерения электрических характеристик.

КС: компьютерное моделирование, усилитель СВЧ-сигналов, сложение СВЧ-мощности, коаксиальный делитель/сумматор

COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE PASSIVE PART OF A BROADBAND MICROWAVE AMPLIFIER BASED ON COAXIAL WAVEGUIDES

I. A. Gavrilov, V. A. Stepushkin

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

The design of a broadband microwave amplifier with power addition of several solid-state amplifiers on coaxial waveguides is proposed. The design and layouts of the passive part of the amplifier are developed on the basis of the results of computer simulation. Measurements of electrical characteristics are carried out.

Keywords: computer simulation, microwave amplifier, microwave power addition, coaxial divider/adder

В последние годы возрос интерес к возможности пространственного сложения мощности источников СВЧ-сигнала в коаксиальных волноводных структурах. Они позволяют суммировать мощность большого числа твердотельных усилителей в диапазоне нескольких октав [1–3]. Однако описанные устройства имеют довольно сложные преобразователи коаксиальных *TEM*-мод в микрополосковые, что приводит к значительному увеличению продольных размеров прибора и к расположению корпусов СВЧ-усилителей в радиальных плоскостях, что существенно затрудняет их охлаждение.

В предложенной нами конструкции широкополосного усилителя также складываются мощности СВЧ-сигналов от N одинаковых твердотельных усилителей. Усилители представляют собой гибридные или монолитные интегральные схемы со стандартными 50-омными полосковыми выводами. В данной конструкции, в отличие от аналогов [1–3], все усилители для эффективного теплоотвода располагаются на внутренней поверхности полого цилиндра параллельно его оси. К торцам цилиндра плотно прижаты одинаковые внешние конусы делителя и сумматора СВЧ-сигнала. Внутренние конусы делителя и сумматора вместе с внешними образуют коаксиальные линии, которые иногда называют «сверхразмерными» [4].

Разработка широкополосного усилителя включает несколько этапов:

3(538).indd 36 19.11.2018 14:33:50

– компьютерное моделирование пассивной части и проектирование эскизной конструкторской документации;

– изготовление макета пассивной части и натурное моделирование;

– выбор активных элементов и их монтаж в усилитель;

– измерение электрических параметров и оптимизация конструкции.

В данной работе рассматриваются только первые два этапа разработки широкополосного усилителя.

До проведения моделирования необходимо сделать инженерную оценку геометрических размеров коаксиальных сумматоров и усилителя в целом для *C*-, *X*- и *Ku*-диапазона частот при выбранной средней выходной мощности около 10 Вт. Общий продольный размер прибора выбран произвольно (около 100 мм). Поскольку входы *N* усилителей подключаются параллельно к внутреннему конусу делителя, то по условию согласования выходной импеданс делителя должен составлять 50/*N* Ом. Это означает, что входная коаксиальная линия должна трансформировать свой импеданс с 50 Ом до 50/*N* Ом. То же относится и к выходной линии.

Оценку профиля трансформирующей линии можно провести на основе известного соотношения для импеданса однородной коаксиальной линии.

Импеданс коаксиальной линии без диэлектрического заполнения определяется по формуле

$$z = 138 \lg(D/d), \tag{1}$$

где d – диаметр внутреннего цилиндрического проводника; D – диаметр внешней проводящей полости. Поскольку любую коаксиальную линию на основе конусов можно приблизить ступенчатой цилиндрической коаксиальной линией с любой степенью точности, то формулу (1) можно использовать не только для граничных импедансов 50 Ом и 50/*N* Ом, но и для всех промежуточных. Чтобы рассчитать остальные отношения D_i/d_i удобно разбить высоту конуса H на $2^k + 1$ равных частей, где k – натуральное число. При таком разбиении любой цилиндр, кроме двух граничных, будет иметь два соседних. Известное условие согласования трех соседних линий передачи с импедансами z_{i-1}, z_i, z_{i+1} имеет вид [5]

$$z_i^2 = z_{i-1} \cdot z_{i+1}. \tag{2}$$

Соотношение (2) можно применить и для равноудаленных линий, что позволяет вычислить все отношения D_i/d_i. Найденный профиль импеданса вдоль оси ступенчатого конуса будет иметь экспоненциальный характер. Подобная методика расчета согласования для планарных структур приведена в работе [6].

От шага разбиения высоты конуса зависит полоса частот области прозрачности, которую можно условно выбрать как полосу, где потери не превышают 1 дБ. Центр основной полосы прозрачности f_0 можно найти из равенства

$$2l = \lambda/2, \tag{3}$$

где $2l$ – разность хода отраженных волн от двух соседних уступов; $\lambda = c/f_0$. В общем случае условие компенсации отраженных волн $2l = (\lambda/2) + n\lambda$ приводит для центров всех возможных полос прозрачности к выражению $f_n = (c/4l)(1 + 2n)$, где n – целое число. Если та же разность хода $2l$ будет равна целому числу волн на частотах F_n, то они станут центрами полос поглощения: $F_n = c \cdot n/2l$, где n – целое число. Приведенные оценки позволяют представить коэффициент передачи делителя и сумматора во всей области частот.

В качестве примера для компьютерного моделирования была выбрана модель с $N = 8$ и $k = 3$,

3(538).indd 37 19.11.2018 14:33:50

то есть с 9-ступенчатой коаксиальной линией, которая трансформировала импеданс в 8 раз. Поскольку моделирование проводилось только для пассивной части усилителя, то центральная часть устройства между делителем и сумматором рассматривалась либо в виде отрезка коаксиальной линии с длиной L и импедансом 6,25 Ом, либо в виде пустотелого цилиндра с той же высотой L. На внутренней поверхности цилиндра располагались 8 отрезков микрополосковых линий с импедансами 50 Ом.

В эскизном проекте выбраны следующие основные размеры внутренних конусов: высота $H = 33{,}1$ мм, диаметры оснований $d_1 = 2{,}0$ мм и $d_9 = 23{,}5$ мм, остальные диаметры определяются из соотношений (1) и (2). Внутренние полости наружных конусов имели диаметры оснований $D_1 = 4{,}6$ мм и $D_9 = 26{,}1$ мм; остальные D_i имели размеры согласно (1) и (2); высота конической части – 33,1 мм.

Размеры цилиндрической части: высота L = 16 мм, диаметр полости – 26,1 мм. Материал деталей – Д16Т, покрытие – Ср3.

При выбранных размерах деталей проведены компьютерные расчеты электрических параметров пассивной части усилителя в диапазоне частот 1…75 ГГц.

Моделирование проводилось в системе Ansoft Corporation Serenade. На рис.1 приведен график потерь *S21* пассивной части усилителя для первого варианта модели, с коаксиальной линией между конусами. Видно, что период *S21* составляет $\Delta f \approx 36{,}5$ ГГц, ширина полосы поглощения по уровню 3 дБ – порядка 5 ГГц, полоса прозрачности – около 31,5 ГГц, что согласуется с приведенными ниже оценками.

$$f_0 = c/4l = 3\cdot10^{10}/4\cdot0{,}414 = 18{,}1\ (\text{ГГц}), \qquad f_1 = (c/4l)3 = 54{,}3\ (\text{ГГц}),$$

$$\Delta f = f_1 - f_0 = 36{,}2\ (\text{ГГц}).$$

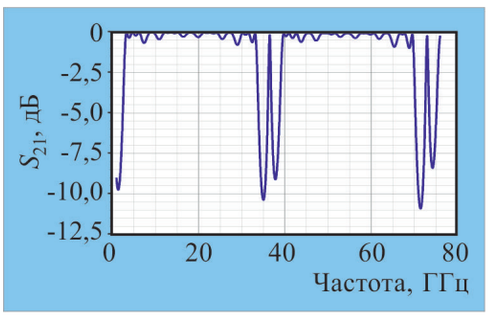


Рис. 1. Расчетные потери *S21* для первого варианта модели на частотах от 1 до 76 ГГц

Потери в полосах прозрачности не превосходят 1 дБ и связаны с неполной фазовой компенсацией отраженных от уступов волн. Учет омических потерь из-за проводимости металла не дал заметного вклада и составил менее 0,1 дБ на частотах до 70 ГГц.

Следует отметить, что в схему моделирования не были включены СВЧ-переходы, которые могут давать заметный вклад в потери при гораздо меньших частотах [7]. Частотная развертка до 75 ГГц не связана с практическими задачами, а приведена только для иллюстрации периодичности полос пропускания.

Во втором варианте моделирования, более близком к реальному усилителю, вместо коаксиальной линии в центральную цилиндрическую часть модели были включены 8 микрополосковых 50-омных линий длиной по 15 мм. Линии устанавливались на внутренней поверхности полого цилиндра со стороны экрана, а микрополоски соединялись с внутренними конусами воздушными перемычками. В схему моделирования по-прежнему не включались СВЧ-переходы.

На рис. 2 приведен график потерь для второго варианта модели. Рассмотрен только первый период *S21*, который незначительно сократился по сравнению с первым вариантом, а полоса поглощения уменьшилась до 4 ГГц. Однако полоса прозрачности Δf по уровню 1 дБ заметно сократилась и составила 29 ГГц (от 3,7 до 32,7 ГГц). На графике видны дополнительные боковые лепестки глубиной 2,9 дБ на частоте 3 ГГц и 2 дБ на частоте 33,2 ГГц. Увеличились и омические

3(538).indd 38 19.11.2018 14:33:50

потери до 0,2 дБ на 30 ГГц. Появление боковых лепестков на графике *S21* связано с нарушением регулярности полей при переходе от объемных мод к микрополосковым и в принципе может быть устранено с помощью дополнительных согласующих элементов. На рис. 3…5 приведены для этого же варианта графики КСВН входа, *S11* и *S21* в диапазоне 1…35 ГГц. Видно, что в полосе прозрачности КСВН не превышает 2,5, *S11* не превышает -7,5 дБ и отклонение от линейности фазы заметно только вне зоны прозрачности (рис. 6). Оценка группового времени запаздывания дает $\tau \approx 2{,}4$ нс. Как показывают модельные расчеты, если сумматор и делитель приблизить к ступенчатой коаксиальной линии с равной высотой ступеней, то интерференционные потери возрастут на 2 дБ, что практически неприемлемо.

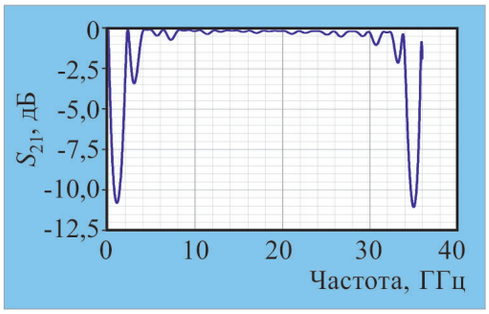


Рис. 2. Расчетные потери *S21* для второго варианта модели на частотах от 0,01 до 36 ГГц

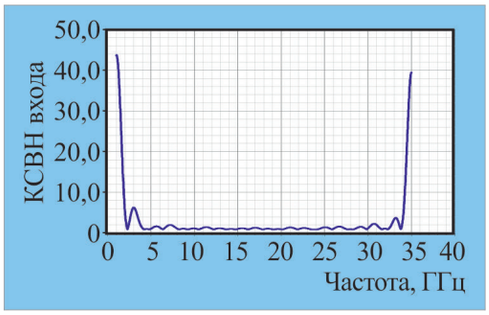


Рис. 3. Расчетный КСВН для второго варианта модели в диапазоне частот 1…35 ГГц

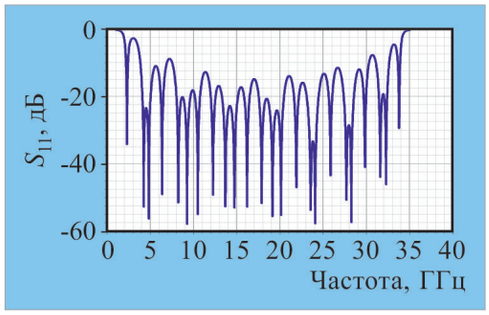


Рис. 4. Расчетные значения *S11* для второго варианта модели в диапазоне частот 1…35 ГГц

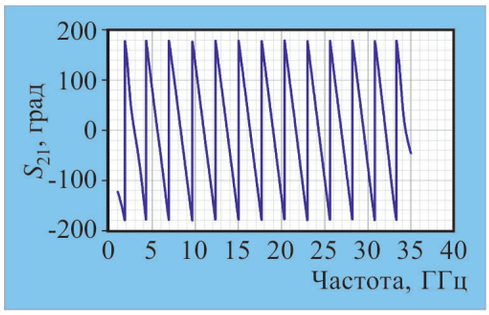


Рис. 5. Фаза *S21*для второго варианта модели в диапазоне частот 1…35 ГГц

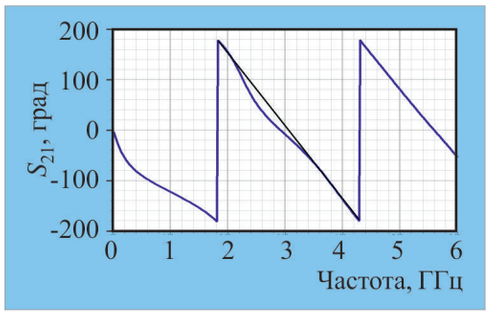


Рис. 6. Отклонение от линейности *S21* для второго варианта модели

Для проведения испытаний были изготовлены два макета пассивной части усилителя в соответствии с предыдущим описанием (рис. 7). Чтобы упростить изготовление, выборка внешнего конуса была выполнена без ступеней с сохранением радиусов оснований, а для внутреннего конуса вместо ступенчатой образующей была выбрана ломаная линия, причем во всех точках излома отношение диаметров D_i/d_i, вычисленное ранее, сохранялось. На рис. 8 приведены экс-

3(538).indd 39 19.11.2018 14:33:51

периментальные зависимости КСВН и *S21* для первого варианта макета в диапазоне частот 2…30 ГГц. Видно, что потери не превосходят 1 дБ в диапазоне 2,7…23 ГГц, а КСВН составляет не более 1,6. В диапазоне 23…30 ГГц потери волнообразно нарастают до -3,5 дБ и КСВН – до 2,4 на частоте 29 ГГц. Резкий провал *S21* на 29 ГГц нельзя объяснить потерями на отражение, которые составляют на этой частоте всего 0,8 дБ. Экспериментально наблюдаются также дополнительные потери, линейно нарастающие с частотой до уровня приблизительно 1 дБ на частоте 23 ГГц, связанные, скорее всего, с омическими потерями и потерями в соединителях.

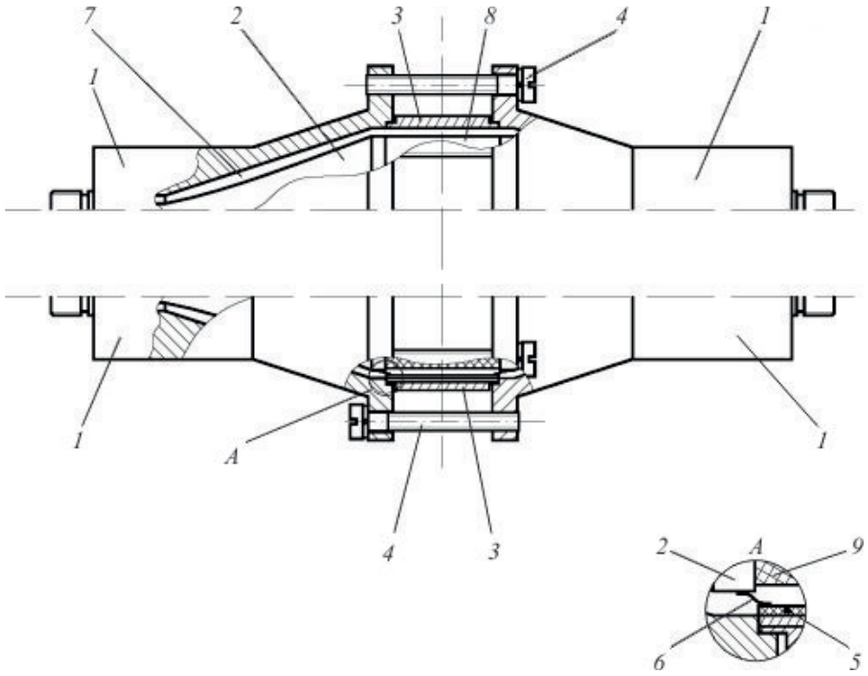


Рис. 7. Схемы макетов первого и второго вариантов:
1 – конус внешний; *2* – конус внутренний; *3* – цилиндр; *4* – стяжка; *5* – микросборка;
6 – фольга-перемычка; *7* – канал волновода; *8* – проводящее кольцо; *9* – СВЧ-поглотитель

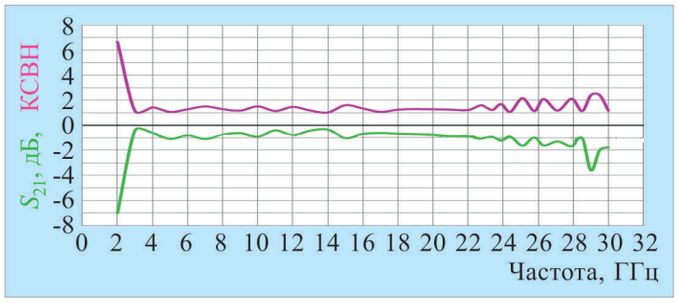
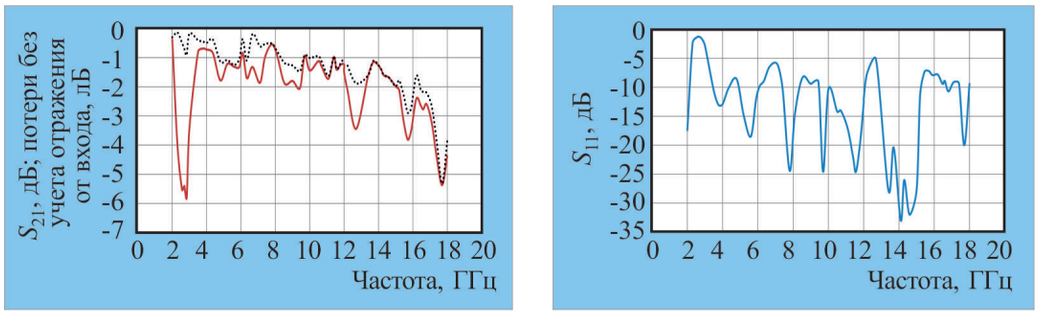


Рис. 8. Экспериментальные зависимости КСВН и *S21*
для первого варианта макета

На рис. 9 показаны экспериментальные зависимости *S21* и *S11* для макета второго варианта в диапазоне частот 2…18 ГГц. Первая полоса поглощения в области 2…3,5 ГГц связана с сильной отраженной волной, в то время как собственные потери не превосходят 1,0 дБ. Полоса прозр-

3(538).indd 40 19.11.2018 14:33:51

рачности от 3,5 до 12 ГГц имеет потери не более 2 дБ. В остальном диапазоне частот (12…18 ГГц) имеются полосы избыточных потерь на частотах 12,7, 15,7 и 17,7 ГГц, причем первые две полосы могут быть частично связаны с заметным отражением от входа, которое обнаруживает график *S11*.



а) *б*)

Рис. 9. Экспериментальные зависимости *S21* (*а*) и *S11* (*б*) для второго варианта макета

Пунктирной линией на рис. 9, *а* отмечены потери без учета отражения от входа. Для сравнения с другими источниками можно отметить результат измерения пассивных потерь усилителя с коаксиальным сумматором компании CAP Wireless (Qorvo), которые составили не более 2 дБ в диапазоне 8…12 ГГц [8].

По результатам работы можно сделать вывод, что предложенная на основе компьютерного моделирования конструкция пассивной части широкополосного усилителя с коаксиальным волноводом имеет экспериментально измеренные потери не более 2 дБ в диапазоне 3,5…12,0 ГГц и может быть испытана в этом диапазоне с применением твердотельных усилителей взамен пассивных микрополосковых линий.

На рис. 10 приведена фотография макета усилителя.

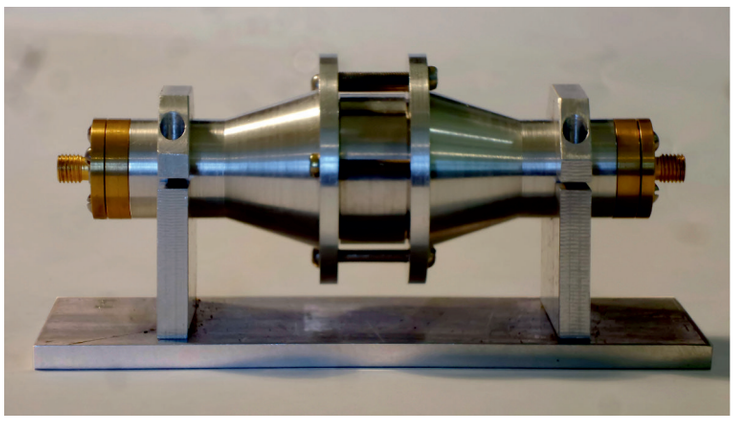


Рис. 10. Макет усилителя

Авторы благодарят А. Г. Далингера за обсуждение материала статьи и А. Б. Пашковского и В. И. Пугнина за ценные замечания и поддержку.

3(538).indd 41 19.11.2018 14:33:51

ЛИТЕРАТУРА

1. Spatial combining technology: revolutioninzing the microwave power amplifier // CAP Wireless. – September, 2008.

2. **Behan, Scott.** Finally – the spatial frontier! / Scott Behan // CAP Wireless. – September, 2008.

3. **Dickstein, Leonard.** RF/microwave instrumentation amplifiers benefit from spatial power combined parallelmmic amplifier technology / Leonard Dickstein. – www.gigatronics.com

4. **Кищинский, А.** Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ-диапазона – смена поколений / А. Кищинский. – ak@mwsystem.ru

5. **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / С. И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1980. – 53 с.

6. **Сечи, Ф.** Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти // Мир радиоэлектроники. – М.: Техносфера, 2016. – С. 230 – 234.

7. **Джуринский, К. Б.** Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / К. Б. Джуринский. – СПб.: ЗАО “Медиа Группа Файнстрит”, 2014.

8. Пространственное сложение мощности // Новости СВЧ-техники /АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2015. – № 9. – С. 27 – 35.

Статья поступила 17 мая 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

БАНКОВ С. Е., КУРУШИН А. А. **Моделирование антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS.** – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 280 с.: ил.

Данная книга представляет собой сборник задач, в котором проводится анализ ряда СВЧ-структур, имеющих большую практическую важность. Впервые дается описание программы **HFSS ANSYS**.

Программа **HFSS ANSYS** предназначена для проектирования трехмерных СВЧ-устройств и использует несколько методов расчета, включая асимптотические. При решении важных практических задач повышенное внимание уделяется особенностям методов расчета и установке опций программы **HFSS** в ходе построения трехмерных моделей волноводных, микрополосковых и антенных структур. Рассмотрен ряд оригинальных неоднородных структур, фильтров и современных антенн, с линейной и круговой поляризацией, анализируемых с помощью **HFSS**. Рассматривается решение физических задач, связанных с оптикой, радиолокацией, радиофизикой.

Для инженерно-технических работников, студентов и аспирантов, изучающих проектирование СВЧ-приборов и методы расчета электромагнитных полей в неоднородных структурах.

3(538).indd 42 19.11.2018 14:33:51

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА: ГРАНИЦА ЛИНЕЙНОСТИ И ПЕРЕХОД В РЕЖИМ ЗАЩИТЫ

С. В. Быковский, Ю. А. Будзинский, В. Г. Калина, В. Е. Котов, О. А. Саврухин

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

Рассмотрены физические особенности циклотронного защитного устройства, определяющие его работу в линейном режиме и переход в режим защиты. Проанализирован линейный режим работы в зависимости от диапазона рабочих частот, конструктивных особенностей и параметров настройки изделия. Приведены амплитудные характеристики разных типов циклотронных защитных устройств в диапазонах частот от *S* до *X*.

КС: защитное устройство СВЧ, циклотронное защитное устройство, амплитудная характеристика устройства, граница линейности амплитудной характеристики

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICES: LINEARITY LIMIT AND TRANSITION TO PROTECTION MODE

S. V. Bykovsky, U. A. Budzinsky, V. G. Kalina, V. E. Kotov, O. A. Savrukhin

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

The physical features of the cyclotron protective device which define its operation in the linear mode and transition to protection mode are considered. The linear mode of operation is analyzed depending on the range of operating frequencies, design features and product settings. The amplitude characteristics of different types of cyclotron protective devices in the frequency bands from *S* to *X* are given.

Keywords: microwave protective device, cyclotron protective device, amplitude characteristic of device, linearity limit of amplitude characteristic

1. ВВЕДЕНИЕ

В приемниках многих современных радиолокационных систем используются циклотронно-защищенные комплексированные усилители (ЦЗКУ), основным элементом которых является циклотронное защитное устройство (ЦЗУ). Одним из привлекательных качеств ЦЗУ, наряду с высоким быстродействием, является широкий динамический диапазон с верхней границей линейности в районе 0,5…5 мВт.

Принципы работы и устройство ЦЗУ и ЦЗКУ описаны в ряде работ [1 –3]. Применительно к данной статье следует напомнить, что в состав ЦЗУ входят два (входной и выходной) резонатора связи с электронным лучом, собственные частоты резонаторов близки к частоте циклотронного

3(538).indd 43 19.11.2018 14:33:51

резонанса. Электронный луч в зазоре входного резонатора воспринимает энергию входного сигнала ЦЗУ, переносит ее в виде быстрой циклотронной волны и отдает в выходной тракт устройства в зазоре выходного резонатора. Конструкция входного и выходного резонаторов аналогична, приведена на рис. 1. На рис. 2 качественно показано поперечное сечение ленточного электронного луча в зазоре между ламелями резонатора ЦЗУ (результаты моделирования [4]).

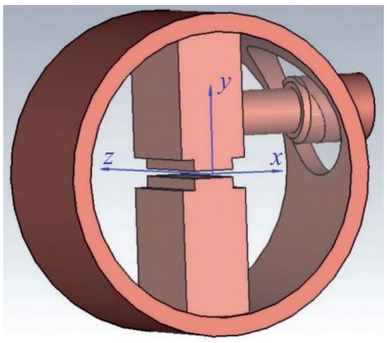


Рис. 1. Входной/выходной резонатор ЦЗУ

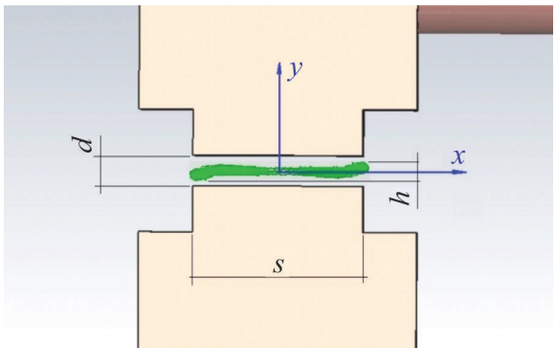


Рис. 2. Поперечное сечение ленточного электронного луча (показан зеленым цветом; h – толщина луча) в зазоре d между ламелями резонатора (s – ширина рабочей части зазора)

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ЛИНЕЙНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА ЦЗУ В РЕЖИМ ЗАЩИТЫ

Электрическое поле $E_{\perp}$, создаваемое сигналом в зазоре входного резонатора, направлено параллельно оси y (см. рис. 1), электронный луч движется вдоль оси z соосно с однородным магнитным полем. Рассмотрим взаимодействие электрического поля $E_{\perp}$ с электронным лучом с точки зрения передачи энергии. Релятивистские эффекты в данном случае пренебрежимо малы.

Поперечное электрическое СВЧ-поле $E_{\perp}$ в зазоре резонатора совершает работу по возбуждению циклотронного вращения электронов луча. Определим работу A поля по увеличению циклотронного радиуса вращения для одного электрона за один циклотронный оборот. При этом электрон приобретет кинетическую энергию поперечного движения K_1:

$$K_1 = A = \int_S F dS = \int_0^{T_c} F \cdot V_c dt = \int m \frac{dV_c}{dt} V_c dt = m \int V_c dV_c = m\omega_c^2 \int_0^R r dr = \frac{1}{2} m\omega_c^2 R^2, \quad (1)$$

где F – сила, прикладываемая к электрону со стороны поля на длине окружности S с увеличивающимся радиусом r (от 0 до R) за время одного циклотронного периода T_c; $V_c = \omega_c r$ – скорость поперечного циклотронного движения электрона; m – масса электрона; ω_c – круговая циклотронная частота.

Для нескольких циклотронных оборотов одного электрона суммарная кинетическая энергия K_1 будет иметь тот же вид, при этом под R следует понимать конечный радиус вращения.

Перейдем от кинетической энергии к мощности P_1, полученной одним электроном за время взаимодействия с полем $E_{\perp}$, которое равномерно распределено вдоль ламели. Поскольку в течение всего времени пребывания в зазоре резонатора электрон продолжает получать энергию

3(538).indd 44 19.11.2018 14:33:52

от электрического поля, то соответственно при определении мощности P_1 следует использовать время пролета электроном зазора резонатора τ:

$$P_1 = K_1/\tau. \quad (2)$$

Далее определим полную мощность, полученную от поля всеми электронами N луча, находящимися в зазоре:

$$P = P_1 \cdot N = \frac{1}{2} m\omega_c^2 R^2 \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{I_0 \tau}{e} = \frac{I_0}{2(e/m)} \omega_c^2 R^2, \quad (3)$$

где $I_0\tau$ – суммарный заряд всех электронов в зазоре; I_0 – ток луча; e – заряд электрона.

Такое же выражение для мощности быстрой циклотронной волны электронного луча получено в [5] при решении уравнения движения луча в форме поперечных волн при энергообмене на циклотронной частоте ω_c.

Отклонение амплитудной характеристики ЦЗУ от линейного характера наступает в тот момент, когда СВЧ-мощность на входе ЦЗУ достигает уровня, при котором начинается оседание электронов луча на стенках зазора в ламелях входного или выходного резонатора. Определим граничный уровень мощности $P_{гр1}$, при котором радиус циклотронного вращения краевых электронов луча сравняется с величиной промежутка между стенками зазора d и толщиной невозбужденного луча h (см. рис. 2). Для этого в (3) следует подставить $R = 1/2\ (d - h)$.

При типичных характеристиках стандартного ЦЗУ диапазона частот $f_c = 9$ ГГц: $I_0 = 200$ мкА, $\omega_c = 2\pi \cdot f_c$, $d = 130$ мкм, $h = 100$ мкм, $e/m = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг – получаем $P_{гр1} = 0{,}4$ мВт = -4 дБ·мВт. При такой мощности начинается оседание электронов луча. Здесь необходимо учитывать, что приведенные числовые значения являются приблизительными, так как предполагается, что луч полностью находится в зазоре резонатора по ширине s (в направлении оси x, см. рис. 2) и симметрично расположен по отношению к одной и другой стенкам зазора d (в направлении оси y). В реальных устройствах луч может быть несколько смещен от оси симметрии как в направлении оси x, так и в направлении оси y, что приведет к снижению $P_{гр1}$.

На рис. 3 показана амплитудная характеристика ЦЗУ и соответствующее изменение тока коллектора с увеличением входной мощности (ток коллектора равен току луча при малых уровнях входной мощности и снижается вследствие увеличения оседания электронов луча на стенках зазора).

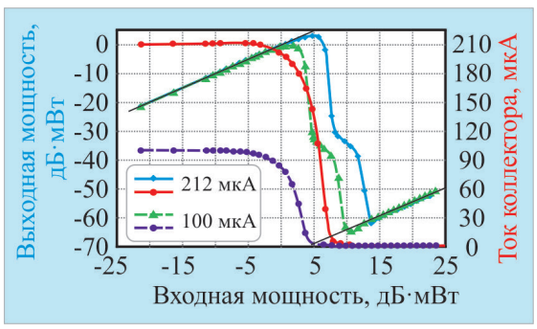


Рис. 3. Типичная амплитудная характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц и соответствующая зависимость тока коллектора от входной мощности при исходном токе луча 212 мкА (сплошные линии) и 100 мкА (пунктирные линии). Приведены кривые для одного образца ЦЗУ

3(538).indd 45 19.11.2018 14:33:52

Незначительное оседание тока луча на стенках зазора (до 3…5 %) не приводит к заметной нелинейности амплитудной характеристики ЦЗУ. При общепринятой характеристике верхней границы линейности – компрессии коэффициента передачи на 1 дБ необходимо, чтобы соответственно снизился и ток луча за счет оседания в зазоре (ток коллектора на рис. 3) на 1 дБ, или в 1,26 раза. Таким образом, верхняя граница линейности ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц при стандартном исходном токе луча приблизительно 200 мкА составляет 3…5 дБ·мВт.

Снижение рабочего тока луча ЦЗУ приводит к снижению верхней границы линейности приблизительно пропорционально уменьшению тока луча (пунктирные кривые на рис. 3): уменьшение исходного тока луча в 2,1 раза (от 212 до 100 мкА) соответствует снижению границы линейности на 3,2 дБ.

Представленные на рис. 3 амплитудные характеристики ЦЗУ на участке перехода из режима пропускания сигнала (входная мощность – менее 0 дБ·мВт) в режим защиты (входная мощность – более 15 дБ·мВт) имеют своеобразный изгиб в области выходных мощностей -40… -30 дБ·мВт. Выше и ниже данного изгиба спад амплитудных характеристик имеет приблизительно линейный характер, при этом нижний участок смещен в область несколько больших входных мощностей. Ток коллектора на данном участке составляет приблизительно 1…2 % от первоначального тока луча.

Данный эффект объясняется тем, что электронный луч в зазоре входного резонатора расположен не вполне симметрично – луч несколько смещен в направлении оси x и выступает за пределы размера s (см. рис. 2). Таким образом, край луча выходит из области эффективного взаимодействия с электрическим полем в зазоре резонатора d, по этой причине соответствующие электроны оседают на ламелях резонатора при большем уровне входной мощности.

Учитывая выражение (3), можно также оценить граничный уровень входной мощности $P_{гр2}$, при котором ЦЗУ с расположением луча в пределах зазора s в полной мере переходит в режим защиты с максимально возможным ослаблением входной мощности до 74 дБ (см. рис. 3). Полагая, что в выражении (3) $R = 0{,}5 \cdot d$, определим уровень входной мощности, при котором электроны луча, находившиеся до взаимодействия с СВЧ электрическим полем на оси симметрии зазора, начинают вращаться по окружности с диаметром, равным величине зазора d: $P_{гр2} = 7{,}7$ мВт ≈ ≈ 9 дБ·мВт. Экстраполируем верхний отрезок спадающего участка амплитудной характеристики (исходный ток – 212 мкА) вниз без учета изгиба в средней части спадающего участка, при этом получим приблизительно расчетный уровень входной мощности, соответствующий переходу ЦЗУ в режим защиты ($P_{гр2} \approx 9…10$ дБ·мВт). Если же луч в конкретном образце ЦЗУ одним краем выходит за пределы зазора s, то полное разрушение луча наступит при несколько большей входной мощности.

3. ПАРАМЕТРЫ ЦЗУ ДРУГИХ ТИПОВ

Выше, на примере типичной конструкции ЦЗУ с рабочей частотой 9 ГГц, рассмотрены условия границы линейности и перехода в режим защиты.

Параметры более низкочастотных ЦЗУ (например, в диапазоне частот 3 ГГц) отличаются от рассмотренных ЦЗУ X-диапазона прежде всего тем, что ширина зазора s в ламелях (в направлении, параллельном оси x на рис. 2) для обеспечения необходимой емкости резонатора существенно превышает соответствующий размер электронного луча. Уровень магнитного поля в пространстве взаимодействия кратно ниже, это ухудшает степень магнитной фокусировки электронного луча и требует увеличения поперечного размера электронного зазора d как

3(538).indd 46 19.11.2018 14:33:52

в связи с увеличенным поперечным размером луча h, так и в связи с увеличенным радиусом циклотронного вращения электронов.

Амплитудная характеристика соответствующего ЦЗУ и изменение тока коллектора в зависимости от входной мощности приведены на рис. 4.

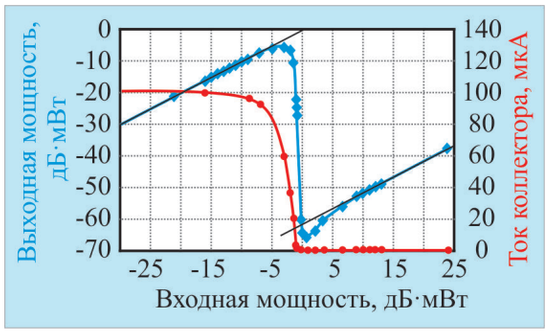


Рис. 4. Амплитудная характеристика ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц и соответствующая зависимость тока коллектора от входной мощности

Оценки характерных уровней входной мощности с использованием выражения (3) позволяют получить следующие значения: граничная мощность, при которой начинается оседание электронов луча в зазоре, $P_{гр1} \approx$ -12 дБ·мВт; граничная мощность, при которой диаметр циклотронного вращения электронов достигает размера зазора d и луч полностью разрушается (ЦЗУ переходит в режим защиты), $P_{гр2} \approx 0$ дБ·мВт (при вычислениях полагалось $d = 200$ мкм, $h = 150$ мкм, $I_0 = 100$ мкА). Полученные оценки соответствуют экспериментальным кривым на рис. 4. Граница линейности ЦЗУ данного типа в диапазоне частот 3 ГГц при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет -4…-6 дБ.

Амплитудная характеристика образца ЦЗУ, представленная на рис. 4, демонстрирует ослабление входной СВЧ-мощности в режиме защиты на уровне 62 дБ (смещение экстраполирующих линий по входной мощности на участке режима пропускания сигнала и на участке режима защиты относительно друг друга). При этом в начале участка режима защиты (входная мощность – от 0 до 7 дБ·мВт) кривая амплитудной характеристики проходит ниже экстраполирующей линии с максимальным отклонением до 4…5 дБ. Данный эффект объясняется тем, что при соответствующей входной мощности в зазоре входного резонатора присутствует некоторое количество остаточных рассеянных электронов, которые поглощают поступающую со входа СВЧ-мощность и препятствуют ее проникновению в выходной резонатор. При дальнейшем увеличении входной мощности электронный луч на входе во входной резонатор полностью разрушается, рассеянные электроны луча оседают на ламелях резонатора и не препятствуют излучению СВЧ-энергии из входного резонатора в выходной через отверстие для прохождения электронного луча. Устанавливается ослабление входной мощности, типичное для режима защиты.

Еще один вид амплитудной характеристики ЦЗУ приведен на рис. 5. Это характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц, но, в отличие от примера на рис. 3, с увеличенной полосой рабочих частот. Для ЦЗУ подобного типа ширина зазора s между ламелями во входном и выходном резонаторах меньше ширины ленточного луча (см. рис. 2). Это позволяет вывести края луча, деформированные из-за воздействия нескомпенсированного пространственного заряда, за пределы зазора и таким образом уменьшить величину зазора d, приблизив стенки зазора к лучу. Подобная конструкция резонатора позволяет увеличить его электронную нагрузку и способствовать расширению полосы рабочих частот.

3(538).indd 47 19.11.2018 14:33:52

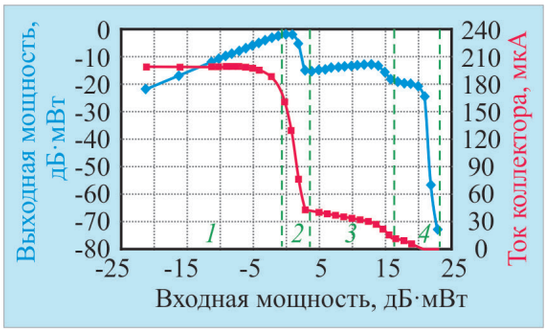


Рис. 5. Амплитудная характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц с увеличенной полосой рабочих частот и соответствующая зависимость тока коллектора от входной мощности

На рис. 5 разделены пунктирными линиями четыре характерные области, соответствующие различным режимам работы ЦЗУ. Область «*1*» соответствует линейному режиму работы ЦЗУ – режиму пропускания сигнала.

Область «*2*» – начало перехода из режима пропускания сигнала в режим защиты. При входных мощностях, соответствующих окончанию области «*2*», в значительной мере разрушается та часть электронного луча, которая находится в пределах зазора *s* и наиболее эффективно взаимодействует с электрическим полем резонатора.

Области «*3*» и «*4*» связаны с передачей входной мощности на выход ЦЗУ краевыми участками электронного луча, которые находятся за пределами зазора *s* в ламелях резонатора и разрушаются при более высоком уровне входной мощности. В данном образце ЦЗУ электронный луч расположен не вполне симметрично относительно зазора *s*, поэтому сначала разрушается ближняя к зазору краевая часть луча (область «*3*»), а затем – более удаленная от зазора часть на другой стороне луча (область «*4*»), что приводит к увеличению входной мощности, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением сигнала.

В других образцах ЦЗУ данного типа области «*3*» и «*4*» могут быть объединены в единую область – в этом случае электронный луч в направлении оси *x* (см. рис. 2) симметричен относительно зазора *s*.

Уровень тока коллектора в области «*3*» составляет приблизительно 15…20 % от уровня исходного тока (начало области «*1*»). Из этого следует, что в данном случае за пределами зазора *s* находится указанная доля электронов луча, которая взаимодействует с электрическим полем резонатора с пониженной эффективностью.

Оценим величину характерных мощностей с использованием выражения (3) в предположении, что часть электронного луча, находящаяся в пределах зазора *s* с эффективным взаимодействием, обеспечивает 85 % тока всего луча (т. е. в выражение (3) подставляются I_0 = = 200·0,85 мкА, а также d = 90 мкм, h = 60 мкм). В этом случае получаем уровень мощности, при котором начинается оседание луча на стенках зазора, $P_{гр1} \approx$ -5 дБ·мВт; граничную мощность, при которой диаметр циклотронного вращения электронов луча в области зазора *s* достигает размера зазора *d* и соответствующая часть луча полностью разрушается, $P_{гр2} \approx 6$ дБ·мВт. Полученные количественные оценки вполне согласуются с экспериментальными характеристиками на рис. 5.

Представленная на рис. 5 амплитудная характеристика имеет достаточно протяженный по входной мощности участок перехода из режима пропускания в режим полной защиты: от -1 до 24 дБ·мВт. Однако это не ухудшает защитных свойств ЦЗУ подобного типа – широкополосных ЦЗУ с лучом, края которого по ширине выпущены за пределы зазора взаимодействия. Макси-

3(538).indd 48 19.11.2018 14:33:52

мальная мощность на выходе ЦЗУ определяется той частью луча, которая находится в пределах зазора взаимодействия, составляет уровень приблизительно -2…0 дБ·мВт – уровень вполне приемлемый для малошумящего транзисторного усилителя, который обычно подсоединяется к выходу ЦЗУ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше экспериментальные и расчетные зависимости могут быть использованы для оценки поперечных размеров электронного луча конкретного ЦЗУ. Граничные уровни мощности $P_{гр1}$ и $P_{гр2}$ можно достаточно точно измерить, в то же время данные параметры могут быть вычислены с использованием выражения (3) на основе измерений тока луча I_0 и размера зазора резонатора d. Это позволит оценить качество фокусировки луча применительно к отдельному образцу ЦЗУ. Проанализировав аналогичные характеристики ряда однотипных ЦЗУ, можно определить с достаточно высокой долей вероятности среднестатистическую толщину луча h.

Подведем итог по верхней границе линейности ЦЗУ. Если в выражении (3) условно зафиксировать радиус циклотронного вращения электронов, то мощность, переносимая лучом, будет пропорциональна току луча и квадрату рабочей частоты устройства. Таким образом, принимая во внимание конструктивные особенности резонаторов и другие электрические параметры ЦЗУ различных диапазонов частот, можно сделать заключение, что в диапазонах частот L и S верхняя граница линейности ЦЗУ составит десятые доли милливатт, в диапазоне X – 0,5…3 мВт, в диапазоне Ka – до 10 мВт. Максимальные уровни мощности на выходе ЦЗУ будут иметь приблизительно такие же значения или выше на 1…2 дБ.

Верхняя граница линейности является одним из важнейших параметров любого устройства, которое предназначено для работы во входных каскадах приемников РЛС. ЦЗУ в дополнение к высокой верхней границе линейности имеют низкий коэффициент шума, обеспечивают отсутствие пиков просачивающейся на выход мощности, обладают большим ослаблением входной мощности в режиме защиты, малым временем восстановления. Комплекс указанных параметров ЦЗУ обуславливает применение устройств во многих современных системах радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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. – С. 136 – 142.

2. **Будзинский, Ю. А.** Защитные устройства СВЧ-диапазона на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, Т. Ш. Сиюхов, А. И. Тёхан // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 69 – 73.

3. **Быковский, С. В.** Теоретическое исследование процессов энергообмена поперечных волн электронного потока, и на этой основе исследование и разработка электронных защитных устройств на быстрой циклотронной волне с малым (порядка 101 нс) временем восстановления: дис. канд. техн. наук / Быковский Сергей Васильевич. – Фрязино, 1996. – 134 с.

4. **Голеницкий, И. И.** Моделирование трехмерной электронно-оптической системы циклотронного защитного устройства / И. И. Голеницкий, Н. Г. Духина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Материалы 11-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2001). – Севастополь, Крым, Украина, 2001. – С. 216 – 217.

5. **Быковский, С. В.** О кинетической мощности поперечных волн электронного потока / С. В. Быковский, В. А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37. – Вып. 10. – С. 1854 – 1858.

Статья поступила 28 июня 2018 г.

3(538).indd 49 19.11.2018 14:33:52

УДК 621.385.73(088.8)

МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫЙ ОКСИДНЫЙ КАТОД С ПОВЫШЕННОЙ ДО 10 А/см² ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА

Г. А. Жабин, З. М. Магамеднебиев, А. Н. Пашков

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

Представлены особенности технологии и результаты исследования токоотбора повышенной плотности с молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК) малошумящих СВЧ-приборов. Приведены недокальные эмиссионные характеристики МНОК при различной конструкции кернов, толщине и площади эмиссионного покрытия. Методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии исследована поверхностная структура эмиссионного покрытия катодов.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), недокальная характеристика, оксидный катод (ОК), оксидный слой (ОС), молекулярно-напыленное эмиссионное покрытие (МНОП), ионно-плазменное напыление, активировка, плотность тока эмиссии, отбор тока с катода, растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая электронная микроскопия (АСМ)

MOLECULAR SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODE WITH INCREASED CURRENT DENSITY UP TO 10 A/cm²

G. A. Zhabin, Z. M. Magamednebiev, A. N. Pashkov

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

The peculiarities of manufacturing technology of molecular sputter-deposited oxide cathodes are presented. The possibility of operation at increased emission current density is demonstrated. The emission characteristics of molecular sputter-deposited oxide cathodes are given for different core design, thickness and area of emission coating. The surface structure of the cathode emission coating was studied by SEM and AFM methods.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, emission characteristics, oxide cathode, oxide layer, molecular sputter-deposited emission coating, ion-plasma sputtering, activation, emission current density, scanning electron microscopy (SEM), atomic force electron microscopy (AFM)

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных РЛС широко применяются малошумящие вакуумные СВЧ-приборы, работающие на циклотронном резонансе. В качестве эмиттера в них используются молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК) [1] с толщиной оксидного слоя (ОС) около 0,8…1 мкм. Эмиссионное покрытие МНОК имеет по сравнению со стандартным оксидным катодом (ОК) более высокую плотность (3,5…3,9 г/см³) и гладкость поверхности, высокую эмиссионную однородность [1, 2]. Эти свойства поверхности МНОК позволяют отбирать токи с большей плотностью, чем у стандартного ОК, так как при использовании плотных и тонких покрытий величина разогрева джоулевым теплом уменьшается. Еще одним фактором, положительно влияющим на высокие эмиссионные свойства и долговечность МНОК, является замкнутость молекулярно-напыленного оксидного покрытия (МНОП), обеспечивающая стабильность состава эмитиру-

3(538).indd 50 19.11.2018 14:33:52

ющей поверхности керна. Важной составляющей срока службы МНОК является его низкая рабочая температура. В малошумящих СВЧ-приборах с МНОК при мощности накала катодов 0,1 Вт формируется ленточный электронный поток с плотностью тока до 2…3 А/см^2 в непрерывном режиме при температуре 580…620 ºС и долговечности 3…5 тыс. ч [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование особенностей технологии изготовления МНОК с повышенным токоотбором (до 10 А/см^2) при долговечности не менее 1000 ч.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТОДОВ И НАНЕСЕНИЯ ЭМИССИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Полупрямонакальный МНОК состоит из металлического керна в виде отрезка проволоки из сплава ВР-20, привариваемого к П-образному подогревателю из материала ВР-27ВП лазерной сваркой. В данной работе из круглой проволоки ВР-20 диаметром 50 мкм путем ее плющения в специальной оправке или оплавления лазерным лучом изготавливались керны с разной формой и площадью эмиссионной поверхности: сферической с диаметром 0,13 мм и плоской размером 0,02×0,7 мм. После химической обработки поверхности керны подвергались отжигу в водороде и магнетронному напылению пленки иридия толщиной 0,25…0,3 мкм, а затем проводился повторный отжиг в водороде [5, 6]. На отожженную иридиевую пленку ионно-плазменным методом наносилось покрытие тройного карбоната [7]. Вакуумная откачка приборов и тренировка катодов проводились по стандартной методике, описанной в [3, 4]. Технология вакуумного ионно-плазменного напыления оксидных покрытий была разработана в 70-х годах прошлого столетия в НПП «Исток» [1]. Сконструированная установка ионно-плазменного напыления позволяет наносить на катоды эмиссионное покрытие с двух сторон за два цикла напыления. Впоследствии на нашем предприятии была создана установка ионно-плазменного напыления с возможностью вращения катодов в процессе напыления (рис. 1). Это позволило проводить напыление эмиссионного покрытия за один цикл. Технология предусматривает распыление с мишени тройного окисла (BaSrCa)O на керны катодов. Предварительно на мишень наносится тройной карбонат КТА-1 (BaSrCa)CO_3 с молекулярным процентным соотношением Ba, Sr, Ca соответственно 50:40:10. В установке ионно-плазменного напыления происходит термическое разложением мишени до окислов. Средний размер частиц карбонатов мишени должен составлять 1…2 мкм [2]. В нашем случае при исследовании состава тройного карбоната на лазерном анализаторе гранулометрии Fritsch Analysette 22 NanoTec было установлено, что средний размер частиц порошка составляет около 1 мкм, при этом до 10 % частиц в общем объеме порошка имеют диаметр не более 0,2 мкм, до 50 % частиц – не более 1,1 мкм и до 90 % частиц – не более 2,4 мкм (рис. 2, табл.1). Методика анализа гранулометрии в приборе Analysette 22 NanoTec основана на лазерном облучении частиц в измерительной ячейке и определении их диаметров по изображению рассеянного луча на детекторе. При этом углы рассеивания луча зависят от размера частицы, и каждому размеру должно соответствовать правильно подобранное расстояние между измерительной ячейкой и лазерным источником. Мелкодисперсная структура порошка обеспечивает получение устойчивых суспензий, пригодных для нанесения плотных и гладких покрытий с шероховатостью в несколько микрон на мишень, и хорошую адгезию покрытия мишени. Скорость и качество напыляемого на катоды ионно-плазменным методом ОС контролируются по току разряда плазмы, ускоряющему напряжению на мишени, напряжению на отражателе и току накала мишени. Ионный ток при напылении зависит от температуры мишени, давления газа, структуры материала и чистоты поверхности отражателя [7].

3(538).indd 51 19.11.2018 14:33:52

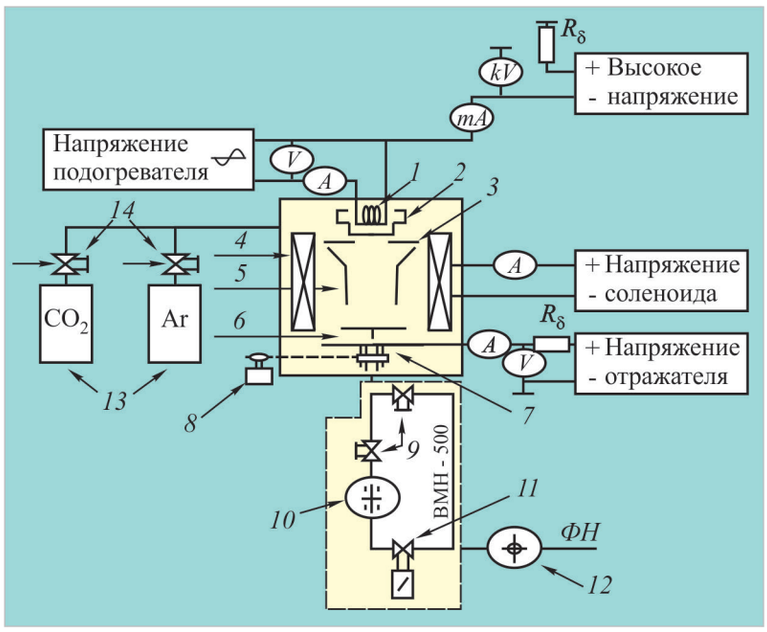


Рис 1. Схема процесса нанесения эмиссионного покрытия:
1 – подогреватель; *2* – мишень; *3* – защитный экран; *4* – соленоид; *5* – подложка с катодами; *6* – отражатель; *7* – планетарный редуктор; *8* – двигатель; *9* – краны; *10* – турбомолекулярный насос; *11* – электромагнитный кран; *12* – форвакуумный насос; *13* – баллоны с газом; *14* – натекатели

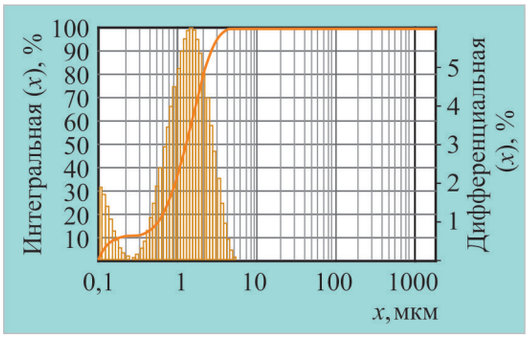


Рис. 2. Интегральные и дифференциальные кривые распределения частиц карбоната по размерам, полученные при исследовании на анализаторе Fritsch Analysette 22 NanoTec

Таблица 1. **Процентное распределением частиц тройного карбоната по размерам**

$Q_3(x)$, %	X, мкм	VarCoeff	M371	M372	M373
10	0,2	42,7	0,2	0,2	0,4
50	1,1	3,3	1,2	1,1	1,1
90	2,4	3,4	2,5	2,3	2,4

Благодаря нанесению покрытия в одном цикле, эмиссионные свойства катодов повысились из-за исключения окисления поверхности изготовляемых МНОК, что имело место при двустороннем напылении. В процессе распыления оксидной мишени могут происходить дуговые пробои из-за попадания на мишень посторонних частиц, плохого качества мишени, ее недостаточного термического разложения, неоднородного фазового состава, наличия посторонних примесей и участков с большим сопротивлением. В нашей конструкции мишень располагается сверху. Это позволило уменьшить попадание на мишень посторонних частиц и сократить количество

3(538).indd 52 19.11.2018 14:33:53

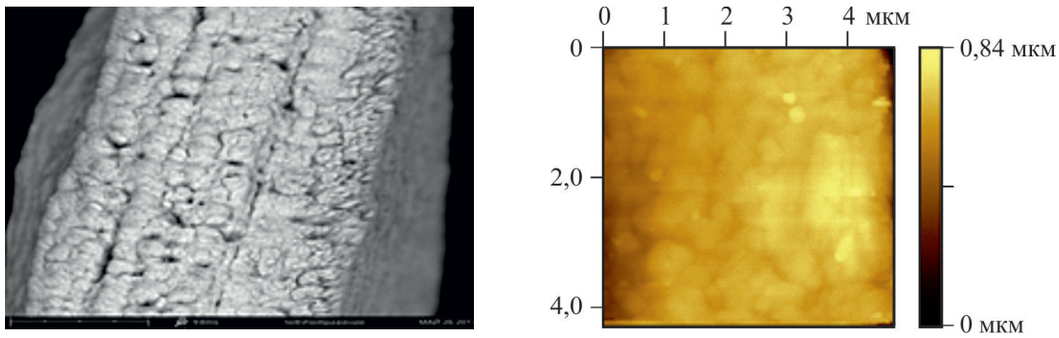
дуговых пробоев. Распыление мишени происходит при бомбардировке ее положительно заряженными ионами аргона и CO_2. При уменьшении концентрации аргона в смеси, скорость напыления падает. Наличие в смеси газа CO_2 при напылении позволяет преобразовывать окислы щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) в карбонаты на поверхности катодов и подавляет излишнюю термоэлектронную эмиссию оксидной мишени, предотвращая пробои. В результате напыляемые катоды имеют на поверхности смесь окислов и карбонатов ЩЗМ, что увеличивает продолжительность хранения изготовленных МНОК на воздухе без ухудшения эмиссионных свойств. Нанесение эмиссионного покрытия в атмосфере CO_2 предотвращает окисление и гидратацию поверхности напыленных катодов при дальнейших операциях заварки прибора аргонно-дуговой сваркой, когда возможно воздействие на катод повышенной температуры. При нанесении эмиссионных покрытий на катоды, вероятно, происходит захват пленкой атомов аргона, однако большая часть его удаляется во время термического разложения карбонатов катода в приборе при откачке.

С целью дальнейшего улучшения эмиссионных и эксплуатационных свойств МНОК были проведены следующие мероприятия: улучшены вакуумные условия в установке при напылении катодов, предельный вакуум перед напуском смеси газов составил $4{,}2\cdot10^{-4}$ Па; увеличен контроль за технологией производства, толщиной, плотностью покрытия и чистотой химического состава карбонатных мишеней; увеличены время ступенчатого термического разложения мишени в вакууме с 60 до 90 мин и скорость эвакуации газов. Это позволило достичь большей однородности фазового состава мишени, уменьшить содержание связующего вещества в ней после термического разложения, увеличить чистоту последующего процесса напыления покрытия на поверхность кернов катодов.

В [8] показано, что с повышением температуры подложки при магнетронном напылении эмиссионных покрытий (BaSr)O происходит улучшение морфологии и эмиссионных свойств покрытий.

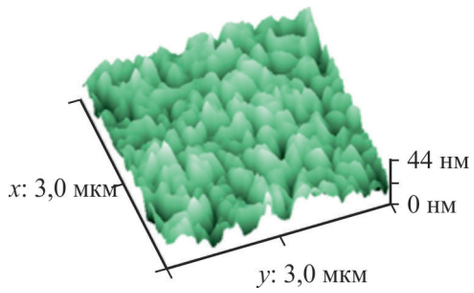
В нашем процессе улучшение технологического режима ионно-плазменного напыления и изменение температурного режима позволили увеличить температуру подложки с катодами перед началом процесса напыления на 50 °С. Таким образом, температура подложки во время напыления повышается до 230…240 °С. Перед процессом напыления поверхность кернов обрабатывается ионной бомбардировкой в плазме. Это способствует получению эмиссионных покрытий с более однородной кристаллической структурой и повышенными эмиссионными характеристиками (рис. 3…5). Исследование элементного состава покрытия было проведено рентгенофлуоресцентным методом на установке РЕАН. Принцип действия анализатора основан на возбуждении и последующей регистрации рентгеновского спектра исследуемого образца. Энергия характеристических линий спектра соответствует химическим элементам, содержащимся в образце с покрытием $(BaSrCa)CO_3$, а их интенсивность пропорциональна концентрации элементов. Излучение от рентгеновской трубки попадает в измерительную камеру установки и затем на образец через коллиматор. Вторичное излучение регистрируется детектором с электронной обработкой сигнала. В результате формируется гистограмма, в которой отдельные пики соответствуют характеристическим линиям элементов, амплитуда пиков пропорциональна интенсивности излучения. С помощью математической обработки по зарегистрированным спектрам определялся качественный и количественный состав покрытия. Процентное соотношение элементов Ba, Sr, Ca в покрытии составило 77,88; 15,81 и 6,31 соответственно (рис. 6, табл. 2).

3(538).indd 53 19.11.2018 14:33:53

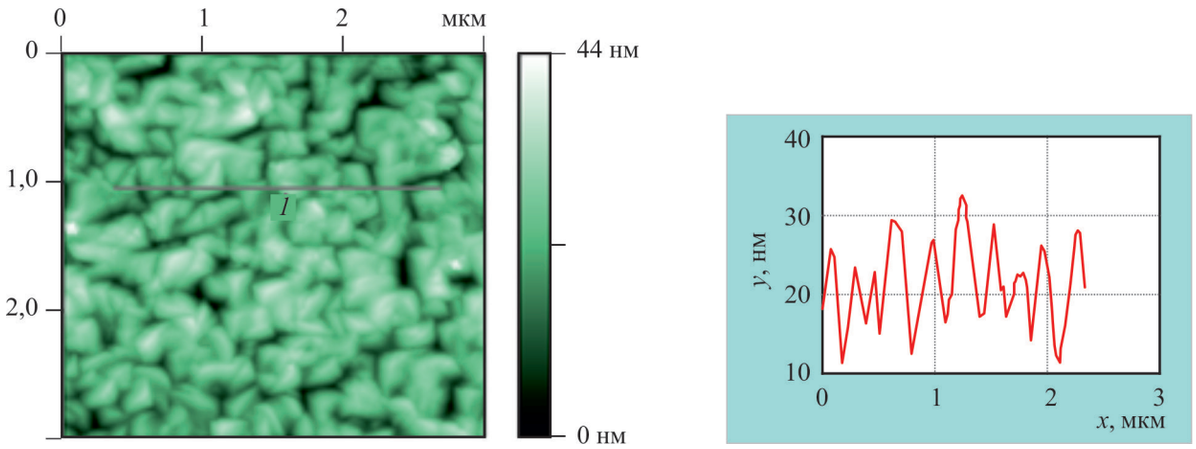


а) *б*)

Рис. 3. Фото поверхности МНОК, полученные при исследовании методами РЭМ (*а*) и АСМ (*б*)



а)

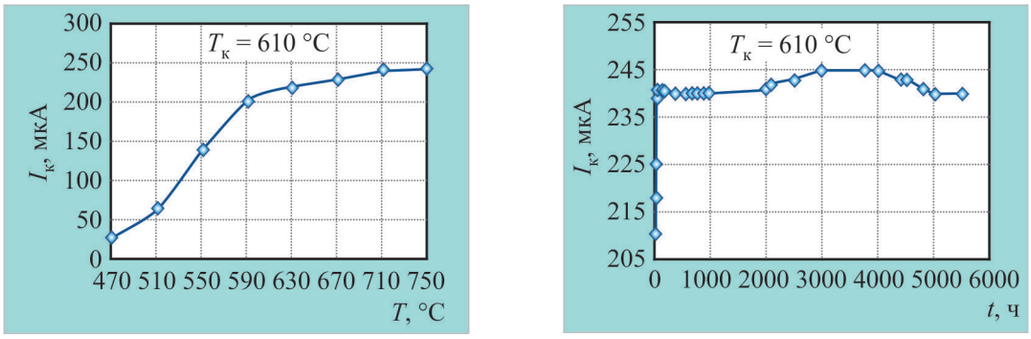


б) *в*)

Рис. 4. Фото трехмерного изображения поверхности покрытия МНОК на подложке из сапфира, полученное методом АСМ (*а*), и профиль сечения поверхности (*б*), (*в*)

Напряжение мишени и ток разряда мишени при напылении поддерживались достаточно высокими, 800 В и 220 мА соответственно, не допуская увеличения тока выше величины 240 мА, так как в этом случае возникает вероятность пробоя мишени. Оптимизация соотношения газов аргона и CO_2 в смеси позволила достичь максимальной карбонизации покрытия катодов в процессе напыления.

3(538).indd 54 19.11.2018 14:33:53



а) *б*)

Рис. 5. Недокальная характеристика МНОК в приборе (*а*) и зависимость тока МНОК от времени работы (*б*)

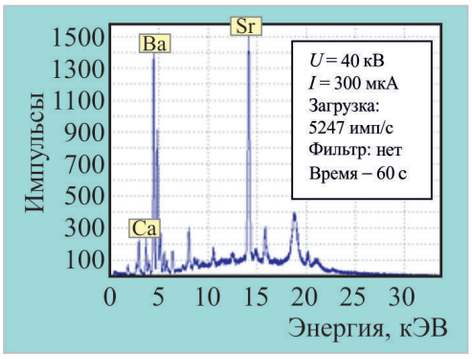


Рис. 6. Исследование элементного состава напыленного покрытия рентгенофлуоресцентным методом на установке РЕАН

Таблица 2. **Состав напыленного покрытия, %**

Элемент	Концентрация, %	Погрешность, %
Ca	6,31	3,67
Ba	77,88	3,07
Sr	15,81	0,66

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОК В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАКЕТАХ

Испытания МНОК проводились в макетах приборов с медной оболочкой в режиме непрерывного токоотбора. Питание осуществлялось в режиме стабилизации тока накала с точностью поддержания температуры в течение срока службы около 5…7 °С. Ток накала и анодное напряжение выбирались для каждого катода индивидуально. Контроль тока накала, анодного напряжения и катодного тока во время срока службы осуществлялся при помощи приборов В7-27. Температура катодов определялась по шкале при пирометрировании с помощью прибора ВИМП-015 в инфракрасном диапазоне.

Исследование срока службы МНОК проведено на отожженных в водороде иридиевых кернах [5, 6, 9]. В процессе испытания регистрировалось изменение уровня тока катода. Периодически на выбранных диодах снимались недокальные характеристики при нескольких значениях температуры катода.

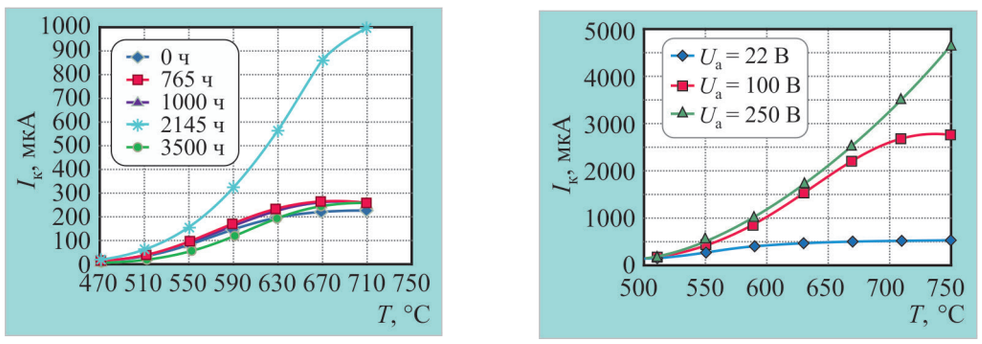
Исследования недокальных характеристик проведены в диапазоне температур 630…750 °С для толщин МНОП 0,35; 0,8 и 2,7 мкм.

3(538).indd 55 19.11.2018 14:33:54

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Фазовый состав оксидного покрытия мишени в значительной мере определяется фазовым составом карбонатов. Правильное проведение процесса разложения мишени в вакууме с превращением состава в гомогенный твердый раствор окислов и последующее ионно-плазменное распыление способствуют получению МНОП с увеличенной концентрацией бария и высокой эмиссией.

На рис. 7, *а* изображены недокальные характеристики катода с толщиной эмиссионного покрытия 0,35 мкм. Площадь эмиссионной поверхности – $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ см^2. После 765 ч работы катода при температуре 650 °С был осуществлен на несколько часов отбор тока 700 мкА при напряжении на управляющем электроде 34,5 В, на аноде 50 В. Ток катода в режиме 5/22 В ($U_{упр}/U_a$) не изменился. После 2145 ч работы катода в режиме 5/22 был отобран ток 1000 мкА, плотность тока составила 7 А/см^2. После 3500 ч работы катода в режиме 5/22 ток катода упал на 20 % в низкотемпературной области характеристики по отношению к первоначальному. На рис. 7, *б* изображены снятые при разных напряжениях на аноде недокальные характеристики катода со сферической эмиссионной поверхностью и толщиной эмиссионного покрытия 2,7 мкм, размер ближайшей к аноду полусферической эмиссионной поверхности – $2{,}65 \cdot 10^{-4}$ см^2. Катодный блок – без управляющего анода. При температуре катода 670 °С и анодном напряжении 250 В эмиссионный ток катода составил 2500 мкА, плотность тока – 9,4 А/см^2. При температуре катода 750 °С и токе катода 4500 мкА плотность тока эмиссии составила 17 А/см^2.



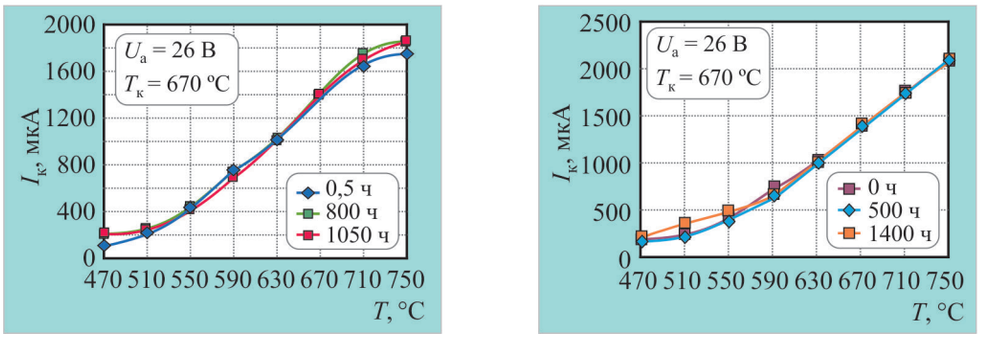
а) *б*)

Рис. 7. Недокальные характеристики МНОК с плоской эмиссионной поверхностью и толщиной покрытия 0,35 мкм (*а*), а также со сферической эмиссионной поверхностью диаметром 130 мкм при толщине покрытия 2,7 мкм (*б*)

На рис. 8, *а* изображена недокальная характеристика катода с толщиной покрытия 0,8 мкм и эмиссионной площадью $1{,}4 \cdot 10^{-4}$см^2. С токоотбором 1400 мкА катод работал на термотренировочном стенде при накале 250 мА, соответствующем температуре 670 °С, и анодном напряжении U_a = 26 В в течение 1050 ч без падения тока эмиссии. Плотность тока с катода при данной температуре составила 10 А/см^2. При температуре 750 °С плотность тока составила 13 А/см^2. На рис. 8, *б* изображена недокальная характеристика другого МНОК в СВЧ-приборе с толщиной МНОП 0,8 мкм и эмиссионной площадью $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ см^2. На вход резонатора после 50 ч работы при температуре катода 610 °С подавалась СВЧ-мощность 0,25 Вт. При подаче СВЧ-мощности на вход резонатора произошло падение тока эмиссии, а через несколько минут ток катода вырос до первоначального уровня. Это явление уже описывалось в [3, 4] и объясняется

3(538).indd 56 19.11.2018 14:33:54

обратимым отравлением окислами тонкого поверхностного слоя катода в результате электронной бомбардировки внутренних поверхностей прибора и электродов, окружающих катод. После 400 ч работы катода при температуре 610 °С температура катода была повышена до значения 670 °С для отбора тока повышенной плотности при напряжении анода $U_а = 26$ В. Плотность эмиссии тока с катода составила около 10 А/см². При температуре 750 °С плотность тока равнялась 14,3 А/см². На данный момент долговечность этого МНОК составила более 1000 ч при плотности тока 10 А/см², без существенного падения эмиссии.



а) *б*)

Рис. 8. Недокальные характеристики МНОК с толщиной покрытия 0,8 мкм в макете (*а*) и в приборе после СВЧ-обработки входного резонатора (*б*)

Рост тока в низкотемпературной области кривых на рис. 8 связан, вероятно, с дополнительным разогревом эмиссионного покрытия в ходе отбора тока большой плотности.

Согласно гипотезе Лошеса-Винка, в ОК проводимость через ОС осуществляется при высоких температурах посредством электронного газа в порах, а при низких – по поверхности кристаллов покрытия. В беспористом покрытии МНОК преобладает проводимость по поверхности кристаллов, благодаря увеличению контактирующей площади между ними, и она на 2 порядка выше, чем у ОК [2]. Это является важным фактором при работе катода с большой плотностью тока.

Факторами, ограничивающими величину отбираемого тока с МНОК, являются: увеличение сопротивления контактов покрытия с изменением температуры, испарение компонентов покрытия, анодное отравление МНОК, малый запас активного вещества.

Повышенный отбор тока эмиссии с МНОК, увеличивая падение напряжения на ОС, влияет на свойства катода и его работу, ускоряя активирование ОС, испарение покрытия, разогрев слоя джоулевым теплом. При повышении рабочей температуры катода более 750…800 °С происходит быстрое обеднение поверхности покрытия окисью бария и работа выхода катода будет возрастать.

Стабильность эксплуатационных свойств МНОК в малошумящих СВЧ-приборах зависит как от технологии изготовления катодов, так и от последующих операций сборки, вакуумной откачки, активировки и термотренировки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанной установке ионно-плазменного напыления медленное разложение мишени с быстрой скоростью эвакуации газов, повышение температуры подложки, напыление с вращением

3(538).indd 57 19.11.2018 14:33:54

катодов, предварительно обработанных в плазменном разряде, позволяют создавать МНОК с улучшенными эмиссионными свойствами и повышенным токоотбором. Хорошая адгезия покрытия с керном и высокие электрофизические свойства МНОП, такие, как электропроводность и теплопроводность, позволяют осуществлять отбор с МНОК тока повышенной плотности и обеспечивают стабильность эмиссионных характеристик. Показано, что уровень токоотбора 10 А/см^2 в непрерывном режиме при долговечности 1000 ч может быть реализован при эксплуатации МНОК с толщиной наносимого эмиссионного покрытия 0,8…2,7 мкм при температуре катода не выше 750 °С.

Авторы выражают признательность Ю. А. Будзинскому и А. В. Галдецкому за внимание к работе и ряд полезных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дружинин, А. В.** Новый эффективный термокатод /А. В. Дружинин, Ю. А. Кондрашенков // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, № 7. – С. 15 – 31.

2. **Никонов, Б. П.** Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия, 1979. – С. 185 – 186.

3. **Жабин, Г. А.** Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 49 – 53.

4. **Жабин, Г. А.** Особенности работы молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Сборник статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. СПбГЭТУ, 29 мая – 1 июня 2017. – С. 100 – 103.

5. **Жабин, Г. А.** Молекулярно-напыленные оксидные катоды в СВЧ-приборах на циклотронном резонансе / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо 2017. 10–16 сентября 2017, Севастополь, Россия. – С. 192 – 198.

6. **Жабин, Г. А.** Особенности влияния отжига кернов на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». «INTERMATIC-2017». 20–24 ноября 2017, МИРЭА, Москва. – С. 622 – 625.

7. **Жабин, Г. А.** Применение вакуумного ионно-плазменного напыления для изготовления оксидных катодов циклотронных защитных устройств // Труды 24 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2017». Санкт-Петербург. 2017. – С. 161 –163.

8. **Liu, Yan.** Little and Feng Jin / Yan Liu, Christopher M. Day, Scott A. // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 2006. – Vol. 24. – P. 2187.

9. **Жабин, Г. А.** Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (535). – С. 15 – 21.

Статья поступила 25 мая 2018 г.

3(538).indd 58 19.11.2018 14:33:54

УДК 621.385.6

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОНА В РЕЖИМЕ СРЫВА ГЕНЕРАЦИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ

М. А. Фурсаев

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Определена зависимость тока срыва генерации в магнетроне от параметров рассогласованной нагрузки. Показано, что минимальное значение тока срыва соответствует области фаз коэффициента отражения, где уменьшается амплитуда высокочастотного электрического поля резонаторной системы. В этой области при большом коэффициенте отражения происходит срыв генерации и разрыв в зависимости генерируемой частоты от фазы.

КС: магнетрон, срыв генерации, сопротивление, резонаторная система, нагрузка, модуль и фаза коэффициента отражения

DEPENDENCE OF THE MAGNETRON PARAMETERS IN THE MODE OF GENERATION BREAKDOWN ON LOAD PARAMETERS

M. A. Fursaev

SSTU named after Gagarin U.A., Saratov

The dependence of the generation breakdown current in the magnetron on the parameters of the mismatched load is determined. It is shown that the minimum value of the breakdown current corresponds to the phase area of the reflection coefficient, where the amplitude of the RF electric field of the resonator system decreases. In this area at large reflection coefficient the generation failure and breakdown occur in the dependence of generated frequency on the phase.

Keywords: magnetron, generation breakdown, resistance, resonator system, load, module and phase of the reflection coefficient

Работа магнетрона при больших значениях тока и на нагрузку с большой величиной коэффициента отражения часто ограничена в интервале фаз этого коэффициента. В этом интервале фаз, где происходит срыв генерации, активная проводимость нагрузки достигает наибольших значений, также наблюдается разрыв в зависимости генерируемой частоты от фазы коэффициента отражения. Фаза, в которой активная проводимость нагрузки максимальна, получила наименование фазы нагрузки [1]. В работе [2] при исследовании работы магнетрона на нагрузку с большой величиной коэффициента отражения показано, что срыв генерации связан с нарушением условия самовозбуждения генератора. Однако причины, приводящие к нарушению этого условия, не рассмотрены.

Срыв генерации в магнетроне наблюдается даже при работе на согласованную нагрузку в приборах с малой величиной нагруженной добротности, что было выявлено Л. Г. Некрасовым в работах по миниатюризации магнетронов. При проведении этих работ было экспериментально установлено, что срыв генерации при больших токах практически не зависит от термоэмиссии катода [3, 4]. Аналогичное явление, получившее наименование срыв усиления, свойственно

3(538).indd 59 19.11.2018 14:33:54

амплитрону [5]. В [5] показано, что малая величина ВЧ электрического поля замедляющей системы амплитрона является причиной срыва усиления, из-за которого ограничивается рабочая область анодных токов при их больших величинах. Поэтому можно сделать вывод, что причиной срыва генерации в магнетроне, как и срыва усиления в амплитроне, является малая величина ВЧ электрического поля резонаторной системы, при которой поле не в состоянии управлять электронным облаком, формируемым в пространстве взаимодействия.

В [6] проведен анализ работы магнетрона на согласованную нагрузку, в основу которого положена аналитическая модель амплитрона, предложенная в [5], выявивший зависимость величины тока срыва генерации от условий, способствующих потере управления ВЧ-поля резонаторной системы электронным облаком. Ниже при использовании соотношений, полученных в [5], проводится исследование зависимости тока срыва генерации в магнетроне от параметров нагрузки. По его результатам можно будет судить о физических процессах, приводящих к ограничению работы магнетрона на нагрузку с большой величиной коэффициента отражения.

Амплитуда ВЧ электрического поля резонаторной системы магнетрона, формирующего электронное облако, определяется произведением значений волнового сопротивления этой системы и ее нагруженной добротности, что использовалось в [6]. При проводимом ниже анализе работы магнетрона на рассогласованную нагрузку вместо величины волнового сопротивления резонаторной системы используется величина активной компоненты ее сопротивления, зависимой от параметров нагрузки, а величина нагруженной добротности полагается неизменной и равной добротности при согласованной нагрузке.

Соотношение, определяющее связь сопротивления резонаторной системы магнетрона с параметрами нагрузки, получается на основе широко используемой эквивалентной схемы, в которой пассивная часть состоит их двух параллельно соединенных двухполюсников. Первый из них соответствует резонаторной системе собственно прибора и характеризуется комплексной проводимостью, равной

$$Y_{к} = g_{к} + jb_{к}.$$

Второй двухполюсник, соответствующий нагрузке, характеризуется комплексной проводимостью, величина которой, пересчитанная к резонаторной системе собственно магнетрона через выходное устройство, равна

$$Y_{н}' = \alpha_{т}^2 Y_{л} \frac{1-\Gamma_{н}^2+2j\Gamma_{н}\sin\varphi}{1+\Gamma_{н}^2+2\Gamma_{н}\cos\varphi} = \alpha_{т}^2 Y_{л}(K_{а}+jK_{р}),$$

где $\alpha_{т}^2$ – коэффициент трансформации выходного устройства; $Y_{л}$ – волновое сопротивление передающей линии; $\Gamma_{н}$ и φ – модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки на входе линии. Из этого соотношения следует, что при фазе φ, равной 180 град, величина активной компоненты проводимости нагрузки максимальна, т. е. фаза φ = 180 град соответствует фазе нагрузки.

Суммарное активное сопротивление двух двухполюсников пассивной части эквивалентной схемы, которое является величиной активного сопротивления колебательной системы магнетрона, учитывающей влияние нагрузки, может быть определено как

$$\frac{\rho_{\Sigma}}{\rho_{\Sigma_0}} = \frac{q+K_{а}}{(q+K_{а})^2+\left(q\frac{b_{к}}{g_{к}}+K_{р}\right)^2},$$

где ρ_{Σ_0} – это сопротивление при согласованной нагрузке ($\Gamma_{н}=0$); $q = g_{к}/(\alpha_{т}^2 Y_{л})$.

3(538).indd 60 19.11.2018 14:33:55

На рис. 1, *а* приведены результаты расчета зависимости величины активной компоненты сопротивления колебательной системы магнетрона с учетом влияния нагрузки, отнесенной к этой величине при согласованной нагрузке, от фазы коэффициента ее отражения для ряда значений модуля этого коэффициента при фиксированной величине параметра q. На рис. 1, *б* приведены аналогичные зависимости для ряда величин этого параметра при фиксированном значении модуля коэффициента отражения нагрузки. При этом в обоих случаях полагалось равенство нулю реактивной компоненты проводимости резонаторной системы собственно магнетрона, т. е. при предположении генерирования на резонансной частоте резонаторной системы. Как видно, минимум величины активной компоненты сопротивления ρ_{Σ_0} соответствует фазе нагрузки коэффициента отражения.

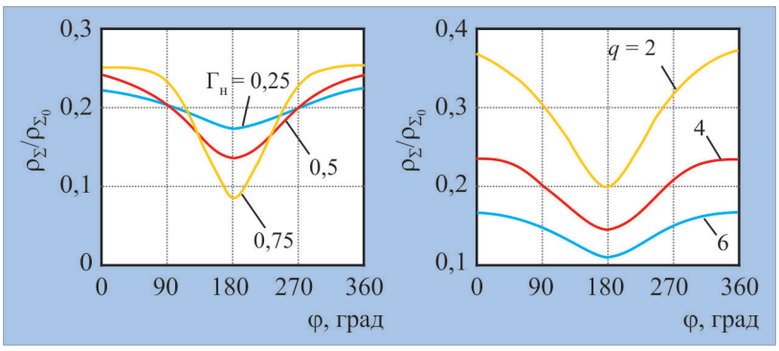


Рис. 1. Результаты расчета зависимости величины активной компоненты сопротивления колебательной системы магнетрона с учетом влияния нагрузки, отнесенной к этой величине при согласованной нагрузке, от фазы коэффициента ее отражения:
а – для ряда значений модуля коэффициента отражения ($q = 4$, $b_к = 0$); *б* – для ряда значений параметра q ($\Gamma_н = 0{,}5$; $b_к = 0$)

На рис. 2 приведены данные расчета на базе аналитической модели [6] зависимости тока срыва генерации в магнетроне от параметров нагрузки. Расчет проведен для магнетрона 8-миллиметрового диапазона, анодный блок которого содержит 16 резонаторов. Он работает на минус первой гармонике ($\gamma = 13$). Согласно расчету, увеличение модуля коэффициента отражения сопровождается уменьшением тока срыва в области фаз этого коэффициента с центром $\varphi = 180$ град, т. е. фазы нагрузки.

На рис. 2 горизонтальной пунктирной линией отражен уровень номинального тока, при котором гарантируется уровень выходной мощности в магнетроне при его работе на согласованную нагрузку. Видно, при увеличении модуля коэффициента отражения нагрузки в области фаз этого коэффициента с центром $\varphi = 180$ град величина тока срыва становится меньше номинального тока $I_{ном}$. В этой области фаз, показанной на рис. 2, электронное облако перестает управляться ВЧ-полем резонаторной системы и, как следствие, происходит срыв генерации, появляется разрыв в непрерывном изменении генерируемой частоты при изменении фазы модуля коэффициента отражения. При уменьшении тока относительно $I_{ном}$ сначала происходит сокращение области фаз, где происходит срыв генерации, а затем обеспечивается работа магнетрона в произвольной фазе коэффициента отражения рассогласованной нагрузки.

Исходя из данных рис. 2, нетрудно заключить, что увеличение модуля коэффициента отражения приводит к увеличению интервала фаз этого коэффициента, в котором происходит срыв усиления, и соответственно к увеличению ширины разрыва в непрерывном изменении гене-

3(538).indd 61 19.11.2018 14:33:55

рируемой частоты при изменении фазы модуля коэффициента отражения. При уменьшении величины номинального тока и неизменной величине модуля коэффициента отражения этот интервал фаз уменьшается, что подтверждают экспериментальные данные на рис. 3 для магнетрона миллиметрового диапазона [7]. На этом рисунке приведены зависимости генерируемой частоты от фазы коэффициента отражения нагрузки для двух значений номинального тока. Видно, что при токе 1 А разрыв в непрерывном изменении генерируемой частоты при изменении фазы коэффициента отражения меньше, чем при токе 1,25 А.

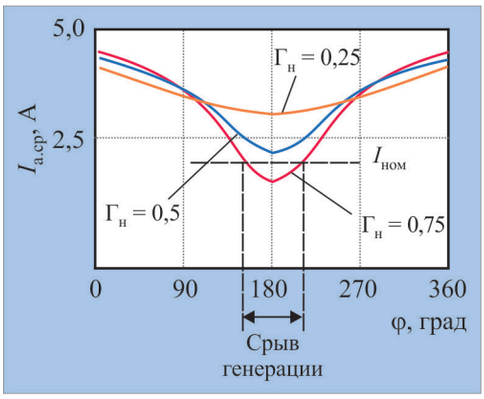


Рис. 2. Результаты расчета зависимости тока срыва генерации магнетрона от фазы коэффициента отражения нагрузки для ряда значений его модуля

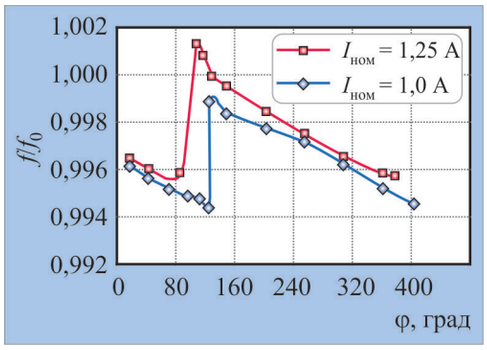


Рис. 3. Экспериментальные зависимости генерируемой частоты от фазы коэффициента отражения нагрузки для двух значений номинального тока

Проведенный анализ показал, что срыв генерации в магнетроне при его работе на нагрузку с высоким значением коэффициента отражения может быть обусловлен малой величиной ВЧ электрического поля резонаторной системы, при которой оно не в состоянии управлять электронным облаком в пространстве взаимодействия. Использованная в настоящей работе аналитическая модель магнетрона может быть применена лишь для оценки зависимости его параметров в режиме срыва генерации, связанного с этой причиной, от параметров нагрузки. Количественные зависимости могут быть получены при использовании численных моделей, в основе которых – метод крупных частиц.

3(538).indd 62 19.11.2018 14:33:55

ЛИТЕРАТУРА

1. **Березин, В. М.** Электронные приборы СВЧ / В. М. Березин, В. С. Буряк, Э. М. Гутцайт, В. П. Марин / М.: Высшая школа, 1985. – 296 с.

2. **Гутцайт, Э. М.** Анализ стационарных режимов генерации и усиления в магнетронах и рекомендации по усовершенствованию функциональных узлов приборов М-типа: дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук / Э. М. Гутцайт. – М., 1999.

3. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И. В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 325 с.

4. **Каргин, А. Н.** Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи / А. Н. Каргин // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 62 – 66.

5. **Цейтлин, М. Б.** Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями / М. Б. Цейтлин, М. А. Фурсаев, О. В. Бецкий. – М.: Сов. радио, 1978. – 279 с.

6. **Фурсаев, М. А.** К анализу величины тока срыва генерации в магнетроне / М. А. Фурсаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (81). – С. 57 – 62.

7. **Бахтеев, И. Ш.** Увеличение рабочей полосы частот усилителя миллиметрового диапазона на магнетроне в режиме синхронизации: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / И. Ш. Бахтеев. – Саратов, 2013.

Статья поступила 18 мая 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ДАНСМОР ДЖОЭЛЬ П. **Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей.** – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 736 с.: ил.

За последние четверть века в радиоэлектронной промышленности произошли революционные изменения, и немаловажную роль в этих переменах сыграла техника сверхвысоких частот. Развитие стандартов беспроводной связи требует задействовать все более высокие частоты, для сетей 5G, например, это уже десятки ГГц. Успех разработки устройств СВЧ-диапазона непосредственно связан с качеством и широтой возможностей по анализу их параметров. Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне – от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Написанная им книга – это совокупность основ и передового опыта, теории и практики, в центре внимания которой – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, в том числе конфигурации современных векторных анализаторов цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов измерений, неопределенностей и составляющих систематической погрешности. Значительная часть книги посвящена описанию наглядных практических примеров измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители, усилители и смесители, балансные устройства и пр.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ-/СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру, систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

3(538).indd 63 19.11.2018 14:33:55

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 681.7.068:530.182 + 681.7.068.539.9

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА PCVD ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ, НА КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ В РЕЗОНАНСНОМ СВЧ-РАЗРЯДЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВОЛНЕ H_{10}

Н. П. Зубков

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

Л. Ю. Кочмарев, И. П. Шилов

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

Представлены СВЧ плазмохимическая технология (PCVD-метод), перспективная для применения в кремниевой микроэлектронике, и экспериментальная СВЧ плазмохимическая установка, позволяющая производить процесс осаждения слоев кварцевого стекла, в том числе легированного фтором, на кремниевые пластины с большой производительностью (более 1 мкм/мин). Легирование фтором понижает показатель преломления кварцевого стекла, применяемого в качестве оболочек различных оптических линий. Полученные пленки фторированного кварцевого стекла на кремниевых подложках обладают хорошей стехиометрией и прочностью.

КС: СВЧ плазмохимическая технология, плазмотрон на волне H_{10}, осаждение фторсиликатных нанослоев, кремниевая пластина, стехиометрия, планарный оптический волновод, кремниевая микроэлектроника, радиофотоника

APPLICATION OF PCVD METHOD FOR DEPOSITING QUARTZ GLASS LAYERS DOPED WITH FLUORIN ON TO SILICON SUBSTRATES IN LOW-PRESSURE RESONANT MICROWAVE DISCHARGE AT H_{10} WAVE

N. P. Zubkov

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

L. U. Kochmarev, I. P. Shilov

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino

Microwave plasma chemical technology (PCVD- method), perspective for use in silicon microelectronics, and an experimental microwave plasma chemical device, allowing the deposition of silicon glass layers, including those doped with fluorine, onto silicon wafers with a high productivity (more than 1 μm/min) are presented. Doping with fluorine decreases the refractive index of quartz glass used as shells of different optical lines. The obtained films of fluorinated quartz glass on silicon substrates have good stoichiometry and strength.

Keywords: microwave plasma chemical technology, plasmatron on H_{10} wave, deposition of fluorine-silicate nanolayers, silicon wafer, stoichiometry, planar optical waveguide, silicon microelectronics, radiophotonics

3(538).indd 64 19.11.2018 14:33:55

1. ВВЕДЕНИЕ

Растущий интерес к плазменным источникам, обеспечивающим плазмохимическую обработку диэлектрических подложек (Si, SiO_2 и т. д.) протяженной длины, вызван необходимостью разработки нового поколения приборов микро- и наноэлектроники, радиофотоники, интегральной оптики, систем передачи и обработки информации и т. д.

В настоящее время планарные оптические волноводы (ПОВ) на кремниевых и кварцевых подложках широко применяются в MOEMS-технологиях, интегрально-оптических датчиках, в системах передачи и обработки информации, в компонентах оптической связи, в частности в пассивных и активных оптических разветвителях [1, 2], мультиплексорах-демультиплексорах [3, 4], переключаемых оптических линиях задержки [5, 6], которые используют в радиофотонных технологиях и в других оптических информационных системах.

При этом важными требованиями к такого рода современным разработкам являются устойчивость ПОВ к воздействию радиации, их механическая прочность, устойчивость к вибрациям.

В настоящее время наиболее радиационно стойкими являются оптические структуры на основе плотного синтетического кварцевого стекла с чисто кварцевой сердцевиной и наружной фторированной оболочкой [7–12], полученные методом PCVD, SPCVD и MCVD, а также оптические структуры с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом, и оболочкой из чистого кварцевого стекла. Кроме того, они имеют несравненно более низкие оптические потери, чем полупроводниковые волноводы из Si, InP (за исключением потерь на изгибах).

Интегрально-оптические волноводы (ИОВ) и волноводные структуры базируются преимущественно на SiO_2-слоях отражающей оболочки и слоях сердцевины из нитрида кремния Si_3N_4 или оксинитрида кремния SiO_xN_y.

По сравнению с полимерной, SiO_2, или Si_3N_4-платформами, кремниевая платформа для создания монолитных интегральных схем имеет более существенные преимущества, связанные с высокой компактностью и совместимостью с другими технологиями, что позволяет более эффективным образом совмещать в одном чипе оптические и электронные элементы. Совместно с оптическими элементами могут быть интегрированы и *p–i–n*-диоды, что дает возможность создавать наносекундные переключатели, существенно превосходящие по своим свойствам термооптические [5].

Мультиплексоры и демультиплексоры являются ключевыми компонентами WDM. Для реализации этих функций предложено много различных методов. Более практическими являются те, которые основаны на интегрально-оптических технологиях. Основное внимание в данном направлении было сосредоточено на методах, связанных с фазированными наборами (PHASAR) [3], последние также называются фазированными волноводными решётками. Они действуют по одному принципу – изображая входное поле на выходном наборе волноводов дисперсионным образом. Устройства, основанные на фазированных наборах, изготавливаются по обычной планарной технологии, с множеством отдельных планарных волноводов, длины которых подобраны специальным образом. В результате возникает дисперсионный эффект.

Технология планарных волноводов проста и не содержит никаких дополнительных шагов, кроме горизонтального травления. Демультиплексоры типа PHASAR были предложены в 1988 г. Приборы подразделяются на две большие группы: устройства на основе SiO_2 и приборы на основе InP. Большинство приборов первой группы имеют низкоконтрастные волноводные структуры и демонстрируют низкие потери на распространение и высокую эффективность соединения с во-

3(538).indd 65 19.11.2018 14:33:55

локонными световодами, имеющими ту же материальную основу. Определённые усилия в этом направлении проводились и в России [4] – слои оксинитридного стекла для волноводной структуры осаждались стандартным методом PECVD (высокочастотное плазменное химическое парофазное осаждение) в ВЧ-плазме пониженного давления на подложку из чистого кварцевого стекла.

Необходимость интеграции получаемых приборов в кремниевую материальную структуру с целью их объединения с другими, функционально связанными с ними электронными и электронно-оптическими узлами, компонентами и приборами требует, прежде всего, разработки методики осаждения слоёв оптически чистого кварцевого стекла непосредственно на кремний (с тонким буферным слоем окисла).

Возможность получения таких слоёв методом PCVD в СВЧ-разряде пониженного давления путем окисления паров галогенидов (при высокотемпературном процессе) на кремниевых подложках без растрескивания образовавшегося слоя стекла заранее не очевидна и требует изучения.

В большинстве случаев для формирования ИОВ используется метод PECVD. Однако при формировании волноводных слоев этим методом производительность и эффективность процесса осаждения не слишком высоки, а потери достаточно велики.

Целью данной работы была задача продемонстрировать возможность применимости метода PCVD для создания ПОВ на кремниевых пластинах с осаждением плотного кварцевого стекла, легированного фтором. Данный процесс может представлять интерес для задач кремниевой микроэлектроники, для создания компонентной базы радиофотоники и для других направлений практического применения.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛОКАЛЬНОГО СВЧ-РАЗРЯДА ВОЛНОВОДНОГО ТИПА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения качественных ИОВ, формируемых с высокой скоростью и эффективностью осаждения, требуется высокоплотная плазма с концентрацией электронов и ионов более 10^{11} см$^{-3}$, работающая при пониженных давлениях. Этому условию может удовлетворять метод PCVD, использующий неизотермическую плазму резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления (РЛ-СВЧРПД) [7–10, 13].

Метод PCVD (plasma chemical vapour deposition) и его разновидности: POVD (plasma outside vapour deposition), SPCVD (surface plasma chemical vapour deposition), PICVD (plasma impulse chemical vapour deposition) – отличаются друг от друга способом возбуждения неравновесной СВЧ-плазмы.

Осаждение слоев чистого и легированного фтором кварцевого стекла на кремниевые подложки производилось на экспериментальной лабораторной СВЧ плазмохимической установке, разработанной на ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [14].

Данная экспериментальная установка была создана ранее для отработки методики получения заготовок высокоапертурных волоконных световодов. В дальнейшем на ней была отработана технология осаждения планарных оптических волноводов на кварцевые подложки, а затем – на кремниевые подложки.

Схема СВЧ плазмохимической установки и практическая реализация метода PCVD приме-

3(538).indd 66 19.11.2018 14:33:55

нительно к осаждению слоев фторированного кварцевого стекла цилиндрической и планарной геометрии описаны в работах [13–18]. Структура СВЧ-плазмотрона представлена на рис.1.

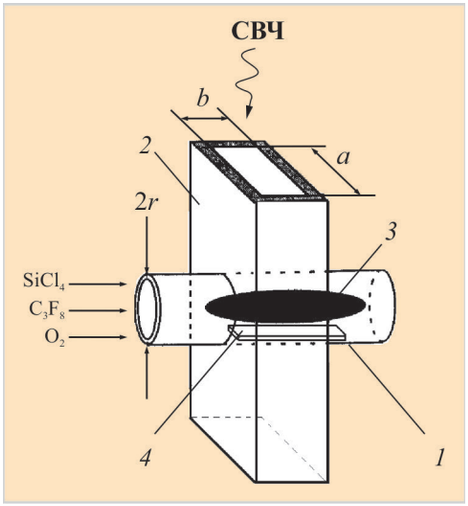


Рис.1. Структура СВЧ-плазмотрона:
1 – опорная кварцевая труба (ОКТ); *2* – СВЧ-волновод; *3* – СВЧ-разряд;
4 – кремниевая подложка с осаждаемым слоем

Структура электрического поля $\vec{E}$ вдоль широкой стенки волновода a такова, что на оси ОКТ наблюдается максимум поля, а при выполнении соотношения $a/2r > 5$ (где $2r$ – внутренний диаметр ОКТ) образуется квазиоднородная в поперечном сечении ОКТ СВЧ-плазма, длина области существования которой определяется подводимой СВЧ-мощностью, давлением газа, размером ОКТ и т. д. Значение напряженности электрического поля возрастает с уменьшением узкой стенки волновода b и, как было показано в работе [13], выражается уравнением (1):

$$E_m = 2\frac{\sqrt{\frac{P}{ab}}\sqrt[4]{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{\sqrt{\varepsilon\mu - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \qquad (1)$$

где P – СВЧ-мощность; ε – диэлектрическая проницаемость; λ – длина волны; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной СВЧ плазмохимической установки.

Принцип работы установки основан на последовательном осаждении большого числа тонких (менее 1 мкм) прозрачных слоев кварцевого стекла, в том числе легированного фтором. Для обеспечения однородности осаждения стекла по длине и азимуту ОКТ совершает вдоль оси СВЧ-разряда возвратно-поступательное перемещение, и на каждом проходе осаждается тонкая прозрачная пленка стекла толщиной 0,1…0,5 мкм.

ПХР помещался в электрическую печь сопротивления с температурой 1000…1200 °С. Печь необходима для дегазации осажденных слоев стекла от хлора, выделяющегося в процессе плазмохимических реакций. Соосно с трубкой в центре печи располагалось устройство возбуждения СВЧ-разряда волноводного типа, соединенное волноводным трактом с СВЧ-ге-

3(538).indd 67 19.11.2018 14:33:55

нератором (максимальная мощность – 2,5 кВт, частота – 2,45 ГГц). Локальное плазменное образование возбуждалось в трубке при воздействии СВЧ-энергии. Перемещение ОКТ относительно СВЧ-разряда осуществлялось с помощью механизма перемещения. Осаждение слоя стекла происходило в результате гетерогенной плазмохимической реакции в СВЧ-разряде при взаимодействии плазмы с потоком парогазовой смеси, поступающей через соответствующие регуляторы расхода газа от химблока (с галогенидами). Продукты реакции откачивались химически стойким вакуумным насосом, с помощью которого обеспечивалось также поддержание заданного пониженного давления в ОКТ. Нейтрализация продуктов плазмохимических реакций обеспечивалась скруббером. Контроль за температурой стенки ОКТ в процессе осаждения производился ИК-пирометром.

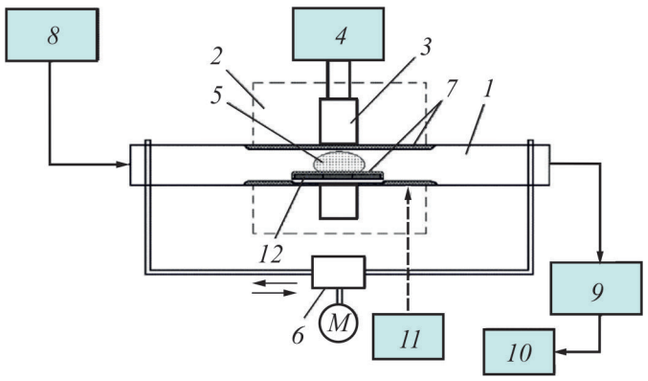


Рис. 2. Схема установки:
1 – плазмохимический реактор (ПХР); *2* – электрическая печь сопротивления; *3* – СВЧ-плазмотрон; *4* – СВЧ-генератор; *5* – СВЧ-плазма; *6* – механизм перемещения; *7* – осаждаемый слой стекла; *8* – химблок с галогенидами; *9* – вакуумный насос; *10* – скруббер; *11* – ИК-пирометр; *12* – кварцевые/кремниевые подложки

На рис. 3 и 4 представлены профили осаждаемых слоев в статическом режиме (без перемещения ОКТ). Максимум осаждаемого слоя находится в самом начале плазменного сгустка, что характеризует высокую скорость диссоциации $SiCl_4$.

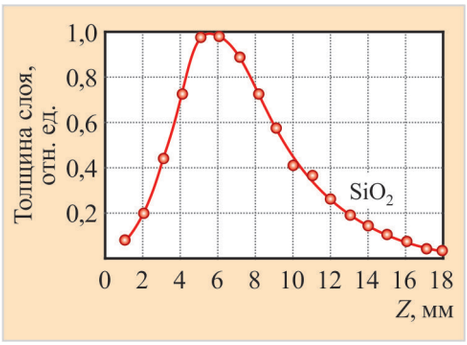


Рис. 3. Профиль толщины осаждаемого слоя в направлении оси ПХР в статическом режиме

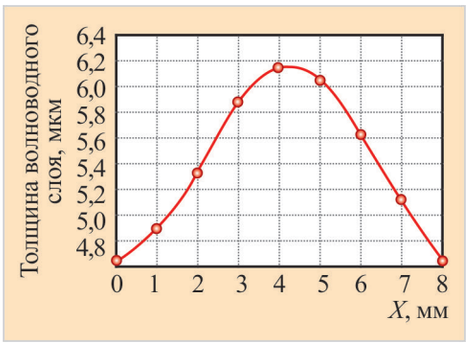


Рис. 4. Профиль толщины волноводного слоя в направлении, поперечном к оси ПХР, в статическом режиме

3(538).indd 68 19.11.2018 14:33:56

При перемещении ОКТ относительно плазмотрона (СВЧ-мощность – 600…800 Вт) и поддержании температуры стенки в диапазоне 1050…1200 °С осуществлялся процесс гетерогенного осаждения оптически прозрачных слоев кварцевого стекла с достаточно равномерным профилем осаждения на длине ОКТ 300 мм.

Плазмохимический синтез и формирование тонких слоев кварцевого стекла в опорной кварцевой трубе на кварцевые и кремниевые подложки производились реакцией окисления $SiCl_4$ при избытке кислорода: $SiCl_4 + O_2 = SiO_2 + 2C1_2$.

Инициирование данной реакции в плазме СВЧ-разряда пониженного давления осуществляется при взаимодействии с электронной компонентой и заключается в поэтапном отщеплении атомов Cl от радикалов $SiCl_n$ ($n = 1…4$) электронным ударом. Анализ функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) показал, что в данном типе разряда средняя энергия электронов превышает 1 эВ, а энергия "горячих" электронов в высокоэнергетическом «хвосте» ФРЭЭ составляет 4…6 эВ. При этом, как указывают измерения ФРЭЭ, концентрация электронов с энергией $\varepsilon > 1$ эВ больше в СВЧ-разряде на смеси тетрахлорида кремния с кислородом, чем в чистом кислороде.

Наиболее долгоживущими в плазме СВЧ-разряда являются такие компоненты, как SiO, Si, Cl ($\tau > 1$ мс). Время реакции для тетрахлорида кремния составляет около 10^{-4} с, т. е. этот компонент, попав в начало зоны СВЧ-разряда, практически моментально разваливается.

Преобразование $SiCl_4$ в SiO и адсорбция последнего стенками ОКТ в основном завершаются на длине 3…4 см СВЧ-разряда. Это подтверждается измерениями распределения интенсивности эмиссионной полосы SiO на длине волны 425 нм вдоль оси разряда.

Для легирования кварцевого стекла фтором при формировании фторсиликатной оболочки необходимо добавление к исходной газовой смеси небольшого количества фторагента. Ранее было показано, что небольшие добавки к кислороду многоатомных газов (менее 10 %), которые моделировались наборами сечений для CH_4, SF_6, практически не изменяют ФРЭЭ в кислороде (при фиксированных параметрах подобия E/N, ω/N). Как было установлено, основной травящей частицей оказывается атом фтора, а скорость травления пропорциональна его концентрации, поэтому большая часть работ была направлена на исследование путей образования фтора и измерение концентраций атомов и других компонентов разряда. Основным каналом образования фтора в газовой фазе является диссоциация однократным электронным ударом через электронно-возбужденные уровни молекул SF_6, CF_4, а не диссоциативное прилипание. Все электронно-возбужденные уровни соответствующих многоатомных молекул являются диссоциативными, причем более 95 % распадов приводят к образованию комбинаций типа $SF_5 + F$. Степень диссоциации и скорость диссоциации в разрядах с SF_6, CF_4 и т. д. очень малы, т. к. пороги электронного возбуждения очень высоки (10 эВ для SF_6, 12 эВ для CF_4). Диссоциативное прилипание возможно при нулевых энергиях электронов с образованием, например, $SF_5 + F^-$. При увеличении средних энергий электронов константа скорости диссоциативного прилипания резко уменьшается. Скорость образования фтора и скорость травления быстро возрастают при добавлении кислорода. Что касается конденсированной фазы, то здесь, по всей видимости, будут образовываться молекулы типа $SiO_{1,5}F$ (за счет диффузии фтора в осаждаемые слои кварцевого стекла), в которых тетраэдрически расположенный атом кремния связан с одним атомом фтора и тремя атомами кислорода.

Для оптимизации процесса осаждения фторсиликатного стекла были апробированы различные фторреагенты (C_2Cl_3F, SF_6 и т. д.).

3(538).indd 69 19.11.2018 14:33:56

На рис. 5 показана зависимость концентрации фтора в стекле (выраженная через числовую апертуру структуры SiO_2/SiO_2–F) от расхода фреона в газовой фазе для плазмотронов волноводного (H_{10}) типа с шириной узкой стенки 34 и 20 мм.

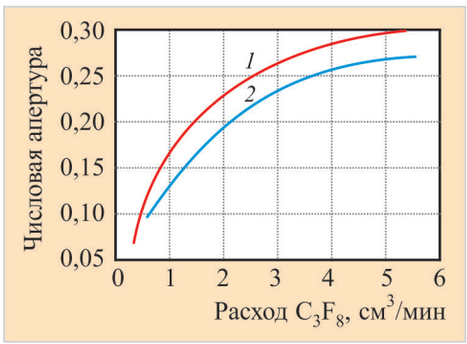


Рис. 5. Зависимость числовой апертуры формируемых заготовок световодов от расхода фреона в газовой фазе для СВЧ-плазмотронов волноводного типа с сечением 72×20 мм^2 (*1*) и 72×34 мм^2 (*2*)

Самым эффективным фторагентом оказался фреон-218 (C_3F_8). Поэтому в этом цикле экспериментов с кремниевыми пластинами также был использован фреон-218.

Увеличение же расхода свыше 8 см^3/мин приводит к тому, что процесс травления начинает превалировать над процессом осаждения легированного кварцевого стекла. На наш взгляд, для получения высокого уровня легирования кварцевого стекла фтором необходимо добиваться совпадения концентрационного максимума фтора в газовой фазе с максимумом профиля осаждения кварцевого стекла, который локализован в самом начале разряда.

Поскольку константа скорости диссоциации фторсодержащих реагентов ниже, чем у тетрахлорида кремния, необходимо уменьшать время диссоциации фторагентов τ, увеличивая удельный энерговклад в СВЧ-разряде и тем самым повышая концентрацию электронов N_e ($\tau \approx 1/k_{\text{дис}} N_e$).

Эту задачу в значительной степени и помогает решить использование СВЧ-плазмотрона волноводного типа на волне H_{10} с уменьшенным размером узкой стенки до 20 мм.

При расходе 6 см^3/мин фреона-218 обеспечивается достижение числовой апертуры вплоть до 0,32 (содержание фтора в стекле до 6 % (масс.)), что является результатом мирового уровня. Это подтверждает представленный на рис. 6 радиальный профиль концентрации фтора в заготовке ВС. Измерения были проведены в Институте физической химии РАН на установке, представляющей собой растровый электронный микроскоп JSM.U3, снабженный рентгеновским спектрометром с энергетическим разрешением и цифровым сканированием фирмы GETAC.

В дальнейшем на основе полученных результатов на экспериментальной установке была отработана технология осаждения планарных оптических волноводов на кварцевых подложках, а затем и на кремниевых пластинах.

Были изготовлены планарные волноводные структуры – полосковые световоды с толщиной сердцевины из чистого кварцевого стекла 85 мкм, окружённой плоской отражающей оболочкой из кварцевого стекла, легированного фтором, толщиной 15 мкм. Измеренное значение числовой апертуры составило 0,24 на длине волны 1,3 мкм. Значения коэффициента затухания на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм не превышали 0,01 дБ/см. На основе полученных планарных световодов были

3(538).indd 70 19.11.2018 14:33:56

изготовлены разветвители с матрицей передачи 8×8 и 16×16, предназначенные для объединения и распределения информационных потоков в локальных сетях.

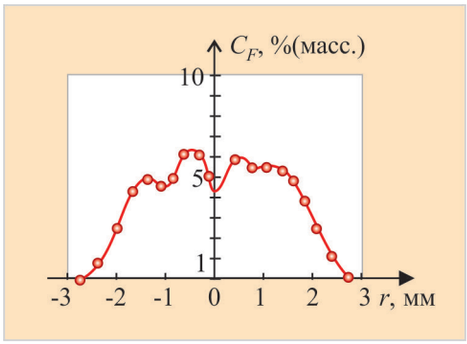


Рис. 6. Радиальное распределение фтора в «схлопнутой» заготовке с Δn = 0,03, измеренное рентгеновским микроанализатором «Камебакс»

3. ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ОСАЖДЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ СЛОЕВ ОТРАЖАЮЩИХ ОБОЛОЧЕК ИОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ SiO_2+F/SiO_2 В ПЛАЗМЕ РЕЗОНАНСНОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЧ-РАЗРЯДА

Осаждение слоев чистого и легированного фтором кварцевого стекла на кремниевые пластины производилось в ОКТ диаметром 16 и 14 мм. Кремниевые пластины (поликристаллический кремний) шириной 12…14 мм, длиной до 50 мм и толщиной 0,5 мм фиксировались внутри ОКТ.

Эксперименты показали, что на кремниевых подложках растет прочная, твердая, устойчивая к механическому воздействию – царапанию острым стальным предметом – прозрачная пленка фторированного кварцевого стекла толщиной 1…60 мкм. Микротвердость осажденных слоев фторированного кварцевого стекла, определенная на микротвердомере марки DURASCAN, находится в диапазоне 1000…1140, что сопоставимо с микротвердостью кристаллического кварца.

Скорость роста пленок в данном цикле экспериментов находилась в пределах от 1 до 3 мкм/мин. Какого-либо влияния на качество осаждаемого слоя фторированного стекла, наличия «термооксидного подслоя» на кремниевых пластинах на данном этапе работ выявлено не было. Толщина пленок определялась на сколе пластины с помощью микроскопа и интерферометрическим методом. Анализ полученных пленок проводился также на электронном Оже-спектрометре Jamp-9510F компании JEOL.

На основании профилирования по глубине было определено, что концентрация атомов фтора плавно увеличивается и выходит на плато с величиной около 2,5 % (ат.). Стехиометрия пленки в среднем близка к составу SiO_2 (Si – 32,5 % (ат.); O – 65 % (ат.); F – 2,5 % (ат.)). Каких-либо других атомов, кроме атомов кремния, кислорода и фтора, обнаружено не было (отметим, что точность определения регистрируемых концентраций внедряемых атомов применяемым методом составляет 0,1…0,3 % (ат.)).

Стоит отметить, что ни на поверхности, ни в глубине пленки не обнаружены атомы хлора. Атомы углерода обнаружены только на поверхности образца и являются естественным загрязнением в виде углеводородов.

3(538).indd 71 19.11.2018 14:33:56

Ниже представлен снимок СЭМ (рис. 7) скола пластины. Наблюдаемые на снимке чередующиеся темные и светлые полосы, параллельные плоскости кремниевой подложки, обусловлены особенностями действия установки, а именно: наличием возвратно-поступательного перемещения ОКТ и несколько отличающимися скоростями прямого и обратного её хода, а также периодическим изменением при этом газодинамических условий в ОКТ и соответственно изменением условий развития СВЧ-разряда, приводящими к периодическому изменению температуры стенок ОКТ и самой кварцевой подложки. В результате чего меняется эффективность внедрения фтора в растущую пленку. При этом, видимо, меняется в небольших пределах и соотношение концентраций внедряемых атомов кремния и кислорода в структуру осаждаемых слоев кварцевого стекла, легированного фтором.

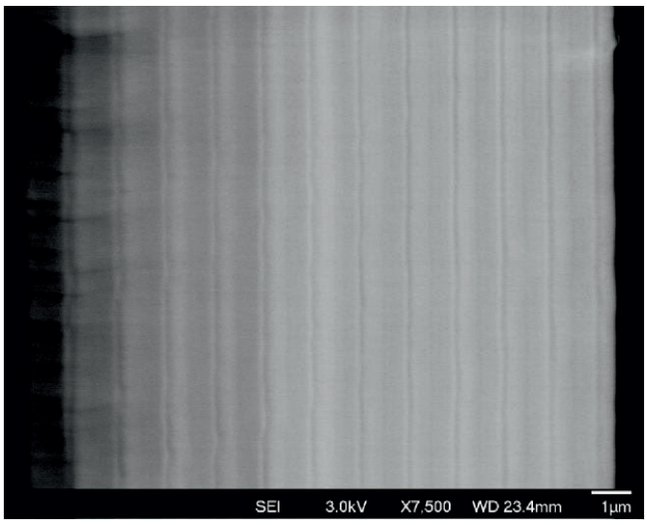


Рис. 7. Снимок СЭМ скола пластины

Следует отметить, что осаждение толстых пленок (около 50 мкм) чистого SiO_2 (без фтора) на кремниевую подложку даже при достаточно высоких температурах подложки (1150…1200 °С) сопровождается наличием большого количества трещин в пленке. Это, по всей видимости, связано с большим различием в коэффициентах линейного термического расширения (КЛТР) чистого кварцевого стекла и кремния. У SiO_2 очень низкий КЛТР ($0{,}3\cdot10^{-6}$ К) в широком интервале температур (0…1700 °С). Этим объясняется высокая стойкость кварцевого стекла к термическим ударам. Чистый кремний имеет существенно более высокий КЛТР ($4{,}25\cdot10^{-6}$ К).

Что же касается осаждения чистого кварцевого стекла на кварцевую пластину, то для снятия возникающих напряжений его целесообразно осаждать через предварительно осажденный фторированный слой кварцевого стекла (в процессе осаждения ПОВ на кварцевую пластину нижний, фторированный, слой будет играть роль буферного).

При этом особо стоит подчеркнуть, что ПОВ, создаваемые на кварцевой подложке на основе фторированных кварцевых слоев в качестве внешних плоских оболочек и с плоской центральной жилой из кварцевого стекла, будут обладать малыми оптическими потерями и высокой механической прочностью, как было показано в предыдущих работах.

3(538).indd 72 19.11.2018 14:33:56

4. ВЫВОДЫ

1. По результатам наших экспериментов можно охарактеризовать локальную плазму, создаваемую СВЧ-плазмотроном на волне H_{10} в резонансном режиме, как высокоплотную ($n_e > N_{кр}$), а сам СВЧ-разряд и применяемый метод как высокоэффективный технологический инструмент для проведения плазмохимического синтеза слоев кварцевого стекла, легированного фтором, на поверхностях кварцевого стекла цилиндрической и планарной геометрии, а также на кремниевых пластинах.

2. Применение данной технологии PCVD позволяет достичь лучшей стехиометрии при образовании пленок SiO_2, чем другими известными методами.

3. Получены высокие скорости осаждения кварцевого стекла, в том числе легированного фтором, на кремниевые подложки (более 1 мкм/мин), что может резко повысить производительность труда.

4. В формируемых структурах SiO_2+F на кремниевых пластинах не наблюдается наличие трещин. При этом плавное контролируемое снижение показателя преломления до значений 1,40…1,43 по сравнению с показателем преломления SiO_2 (1,456) позволит в более широких пределах изменять свойства разрабатываемых ИОВ (толщины сердцевины и оболочки, концентрационный профиль и т. д.).

5. Для создания ИОВ перспективной может быть структура SiO_2+F/Si_3N_4/SiO_2+F, в которой верхней и нижней отражающей оболочкой является двуокись кремния, легированная фтором в широком диапазоне концентраций (1…6 % (масс.)), а сердцевина состоит из нитрида кремния (n = 1,99).

6. Для формирования ИОВ на больших площадях («вафли» диаметром 100 мм и более), с применением данной технологии PCVD, необходима разработка новой конструкции СВЧ-плазмотрона и плазмохимического реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Житковский, В. Д.** Многополюсные разветвители на основе слоевых структур из стекла для волоконно-оптических информационных систем / В. Д. Житковский, Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2002. – № 12. – С. 68 − 73.

2. **Ключник, Н. Т.** Формирование оптической волноводной структуры, включающей область из нанокомпозитного материала / Н. Т. Ключник, А. В. Гурьянов, В. Ф. Белянин и др. // Нанотехнологии и фотонные кристаллы. Материалы I Межрегионального семинара. Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2003. – С. 50 – 59.

3. **Smit, Meint K.** Phasar-based WDM-devices: principles, design and applications / Meint K. Smit, Cor van Dam // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 2, No 2. – P. 236 – 250.

4. **Гончаров, А. А.** Интегрально-оптический демультиплексор на основе волноводной структуры SiO_2–SiON / А. А. Гончаров, С. В. Кузмин, В. В. Светиков, К. К. Свидзинский, В. А. Сычугов, Н. В. Трусов // Квантовая электроника. – 2005. – 12 (35). – С. 1163 – 1166.

5. **Xie, J.** Seven bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration / J. Xie, L. Zhou, R. Li, J. Wang, J. Chen // Opt. Express. – 2014. – 22. – P. 22707 – 22715.

6. **Xie, J.** Continiously tunable ultra-thin silicon waveguide optical delay line / J. Xie, L. Zhou, R. Li, J. Wang, L. Lu, K. Wu, J. Chen // Optica. – 2017. – May. – Vol. 4, No 5. – P. 507 – 515.

7. **Артюшенко, В. Г.** Кварцевые волоконные световоды для передачи мощного лазерного излучения / В. Г. Артюшенко, Л. М. Блинов, Ю. В. Гуляев, Е. М. Дианов, А. М. Прохоров, И. П. Шилов // Ж. Известия АН СССР. – 1990. – Т. 54, № 8. – С. 1570 – 1573.

3(538).indd 73 19.11.2018 14:33:56

8. **Блинов, Л. М.** Резонансные неравновесные СВЧ плазмохимические системы в технологии синтеза специальных кварцевых волоконных световодов / Л. М. Блинов, Ю. В. Гуляев, В. А. Черепенин, А. П. Герасименко // Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал. – 2014. – № 12. – URL: http://jre.cplire/ru/jre/dec14/4/text.pdf.

9. **А. с. № 876039 СССР.** Установка для сверхвысокочастотной плазменной обработки / Л. М. Блинов, А. Т. Заморенов, А. В. Кирсанов, Г. В. Лысов, Е. А. Петров. – Приоритет 29.02.80.

10. **Бабенко, В. А.** Кварцевые волоконные световоды для передачи лазерного излучения повышенной мощности / В. В Григорьянц, И. П. Шилов и др. // 10-я Международная научно-техническая конференция «Лазеры в науке, технике и медицине»: тезисы докл. – 1999. – С. 71 – 73.

11. **Томашук, А. Л.** Разработка волоконных световодов для применения при повышенном уровне радиации / К. М. Голант, О. М. Забежайлов // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. – 2001. – № 4. – С. 52.

12. **Долгов, И. И.** Радиационно стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной / И. И. Долгов, Г. А. Иванов, Ю. К. Чаморовский, М. Я. Яковлев // ФОТОН-ЭКСПЕРТ. – 2005. – № 6 (46) . – С. 4 – 10.

13. **Бабенко, В. А.** Сверхвысокочасточный разряд волноводного плазмотрона для осаждения высокоапертурных структур на основе кварцевого стекла / В. А. Бабенко, Л. Ю. Кочмарев, И. П. Шилов // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 1. – С. 100 – 107.

14. **Пат. 7428. РФ.** Устройство для изготовления оптических волноводов / В. А. Бабенко, Л. Ю. Кочмарев, И. П. Шилов. – Приоритет 10.07.2008.

15. **Блинов, Л. М.** Высокоапертурные оптические структуры волноводов на основе кварцевого стекла, легированного фтором, формируемые в неизотермической плазме резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления / Л. М. Блинов, А. П. Герасименко, Ю. В. Гуляев, А. П. Долгов, Л. Ю. Кочмарев, И. П. Шилов // Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал. – 2016. – № 1. - URL: http//jre.cplire/ru/jre/jan16/18/text.pdf.

16. **Берикашвили, В. Ш.** СВЧ плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла / В. Ш. Берикашвили, В. В. Григорьянц, И. П. Шилов и др. // Микросистемная техника. – 2004. – № 8. – С. 28 – 33.

17. **Шилов, И. П.** Планарные и полосковые многомодовые волноводы из кварцевого стекла, полученные в микроволновой плазме пониженного давления / И. П. Шилов, В. В. Григорьянц, Л. Ю. Кочмарев, В. Ш. Берикашвили, Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев // Труды XII Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники). Москва, ОАО ЦНИТИ Техномаш. 2006. 7–9 сентября. – С. 363 – 369.

18. **Шилов, И. П.** Многоканальные оптические разветвители на основе планарных многомодовых волноводов из кварцевого стекла / И. П. Шилов, В. Ш. Берикашвили, В. В. Григорьянц, Л. Ю. Кочмарев, Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – № 8. – С. 1017 – 1022.

19. **Шилов, И. П.** Планарные волноводы градиентного типа на основе наноразмерных слоев кварцевого стекла, полученные в микроволновой плазме пониженного давления / И. П. Шилов, Л. Ю. Кочмарев, Н. Т. Ключник, М. Я. Яковлев // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2012. – № 4. – С. 59 – 64.

Статья поступила 11 июля 2018 г.

3(538).indd 74 19.11.2018 14:33:57

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.5

ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИЕ ПРИЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХТОЧЕЧНЫХ СВЧ-АВТОГЕНЕРАТОРОВ

А. В. Баранов, А. Л. Козиков

АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород

Продемонстрированы машинно-ориентированные приемы проектирования трехточечных генераторных СВЧ-устройств с различным представлением их цепей обратной связи. Показано, что эти приемы являются взаимно дополняющими и равнозначными для рассмотренного примера автогенератора, если его обратную связь представить в виде или параллельной, или последовательной, или внешней цепи.

КС: СВЧ-автогенератор, эквивалентная трехточечная схема, обратная связь

MUTUALLY COMPLEMENTARY TECHNIQUES FOR DESIGNING THREE-POINTS MICROWAVE OSCILLATORS

A. V. Baranov, A. L. Kozikov

JSC SPE «SALUT», Nizhny Novgorod

The computer-oriented techniques for designing three-point microwave oscillators with different representation of their feedback circuits are demonstrated. It is shown that these techniques are mutually complementary and equivalent for the considered example of the microwave oscillator with various presentations of series, parallel and external feedback circuits.

Keywords: microwave oscillator, equivalent three-point circuit, feedback circuit

Общие вопросы проектирования трехточечных СВЧ-автогенераторов с разным представлением их обратных (параллельной, последовательной, внешней, внутренней) связей исследованы, например, в работах [1–5]. Вместе с тем для каждого типа обратной связи приемы проектирования таких устройств рассматриваются, как правило, отдельно и обычно не считаются равнозначными и взаимодополняющими.

Задача данной статьи – для выбранной схемы СВЧ-автогенератора продемонстрировать машинно-ориентированные, равнозначные и взаимно дополняющие приемы проектирования генераторных устройств с различным представлением цепи обратной связи.

Для этой цели используем управляемый напряжением СВЧ-генератор, аналогичный устройствам, описанным в публикациях [6–8], который реализован в соответствии с принципиальной схемой на рис. 1. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), выполнен по трехточечной схеме на биполярном транзисторе *VT1*, который включен по схеме с общим эмиттером. Режим работы транзистора по постоянному току устанавливается при помощи резисторов *R1*…*R3*.

3(538).indd 75 19.11.2018 14:33:57

Для развязки СВЧ-цепей по питанию используются индуктивность *L1* и конденсаторы *C1*, *C2*. Оставшиеся элементы схемы являются частотозадающими. В большей степени эту функцию выполняют отрезки микрополосковых линий (МПЛ) *Z1*…*Z4*, варикап *VD1* и конденсаторы *C3*…*C8*. В меньшей степени – элементы: отрезок МПЛ *Z5* и конденсатор *C9*, которые служат для подавления высших гармоник основной частоты.

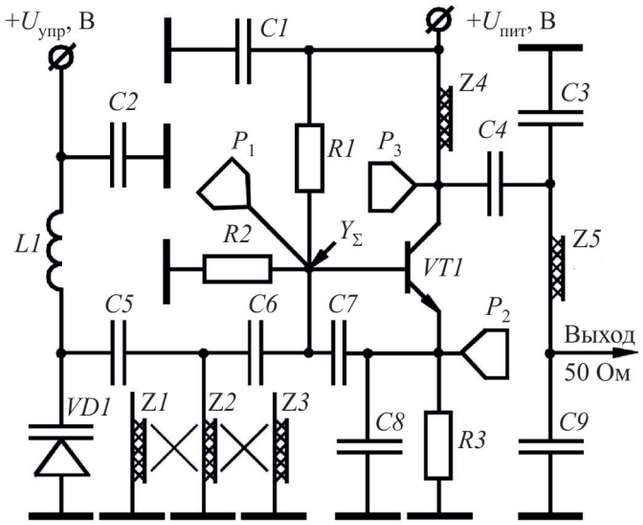


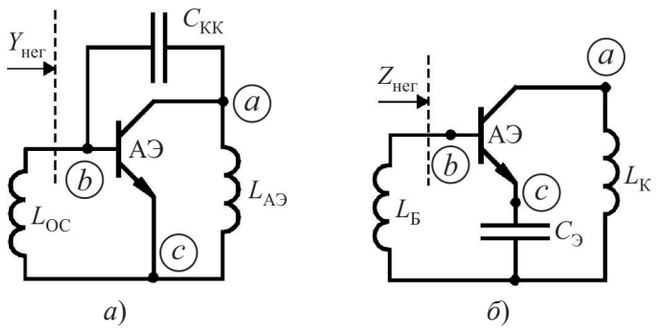
Рис. 1. Принципиальная схема генератора, управляемого напряжением

Поскольку необходимым условием работы любого генераторного устройства является вполне определенный способ подключения к электродам транзистора трех реактивных элементов, на начальном этапе проектирования СВЧ-автогенератора установим тип трехточечной схемы, которая используется в его работе. Определение типа трехточки часто представляет собой непростую задачу, особенно в СВЧ-диапазоне, где приходится учитывать паразитные параметры транзистора или замещать его системой [*Y*]-, [*Z*]- или [*S*]-параметров.

Чтобы найти величины реактивных элементов, рассмотрим возможные обобщенные эквивалентные трехточечные схемы на рис. 2 или 3, в которых все элементы предполагаются чисто реактивными, то есть применяются лишь емкости $C_Б$, $C_Э$, $C_К$, $C_{ОС}$, $C_{КК}$, $C_{АЭ}$ и индуктивности $L_Б$, $L_Э$, $L_К$, $L_{ОС}$, $L_{КК}$, $L_{АЭ}$ (или эквивалентные емкости или индуктивности соответствующих идеальных контуров, подключенных к электродам транзистора) [5]. Для обозначения словосочетаний: активный элемент, обратная связь и колебательный контур – использованы индексы «АЭ», «ОС» и «КК». Для замены слов база, эмиттер и коллектор транзистора на рисунках применены буквы «Б», «Э» и «К». Кроме того, в обобщенных эквивалентных схемах индексу «нег» соответствует слово «негатрон», которым обозначают элементы цепей с импедансом $\dot{Z}_{нег}$ и проводимостью $\dot{Y}_{нег}$, имеющими отрицательные действительные части их комплексных величин. В представленных генераторных трехточечных схемах соответствующие точки обозначены буквами *а*, *б* и *с*. Неотмеченные точки в звездообразных трехточечных схемах автогенераторов являются центральными точками звезды.

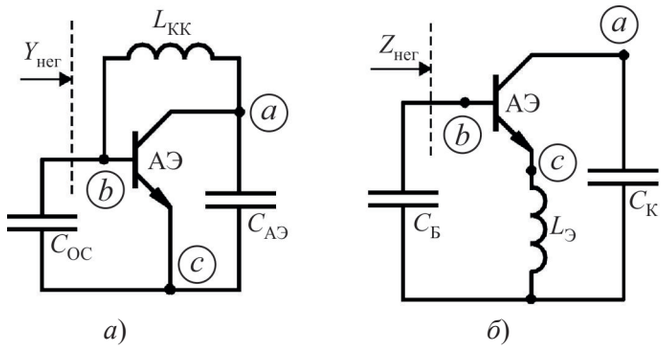
Рассматриваемые схемы генераторов представляют собой треугольную (см. рис. 2, *а* и 3, *а*) и звездообразную (см. рис. 2, *б* и 3, *б*) трехточечные схемы автогенераторов, которые в зарубежной литературе [3, 9] называют генераторами с параллельной и последовательной обратной связью

3(538).indd 76 19.11.2018 14:33:57



а) *б*)

Рис. 2. Индуктивные эквивалентные трехточечные схемы автогенераторов с параллельной (*а*) и последовательной (*б*) обратной связью



а) *б*)

Рис. 3. Емкостные эквивалентные трехточечные схемы автогенераторов с параллельной (*а*) и последовательной (*б*) обратной связью

соответственно. Кроме того, по отношению к схемам на рис. 2, *а* и 3, *а* схемы на рис. 2, *б* и 3, *б* являются эквивалентными при следующих взаимных (с точки зрения эквивалентных преобразований цепей) условиях [5]:

$$|X_К X_Б| > |X_К X_Э + X_Э X_Б|, \tag{1}$$

$$|X_{КК}| > |X_{АЭ} + X_{ОС}|, \tag{2}$$

где $X_Б$, $X_Э$, $X_К$, $X_{ОС}$, $X_{КК}$, $X_{АЭ}$ – сопротивления соответствующих реактивных элементов схем.

Работа типовых генераторных устройств основана либо на реализации условия [1, 10]

$$\dot{S}_1 \dot{K} \dot{Z}_н = S_1 K Z_н \exp\left(j\left(\varphi_S + \varphi_К + \varphi_н\right)\right) = 1, \tag{3}$$

либо на выполнении одного из двух соотношений [2–4]:

$$\dot{Y}_{нег}\left(\dot{U}_{к1}, \omega\right) + \dot{Y}_{конт}\left(\omega\right) = 0, \tag{4}$$

$$\dot{Z}_{нег}\left(\dot{U}_{к1}, \omega\right) + \dot{Z}_{конт}\left(\omega\right) = 0. \tag{5}$$

3(538).indd 77 19.11.2018 14:33:57

В уравнении (3) использованы следующие обозначения: $\dot{S}_1 = Se^{j\varphi_S}$, $\dot{K} = Ke^{j\varphi_K}$, $\dot{Z}_н = Z_н e^{j\varphi_н}$, где S_1 – средняя по первой гармонике крутизна проходной характеристики транзистора; K – коэффициент обратной связи; $Z_Н$ – сопротивление нагрузки; φ_S – фаза средней крутизны; $\varphi_К$ – фаза коэффициента обратной связи; $\varphi_Н$ – фаза нагрузки. В соотношениях (4) и (5) величина $\dot{U}_{к1}$ обозначает комплексную амплитуду первой гармоники коллекторного напряжения, а величины $\dot{Z}_{конт}(\omega)$ и $\dot{Y}_{конт}(\omega)$ – комплексные импеданс и проводимость входных цепей соответственно.

Соотношения (3)…(5) справедливы для любых типов автогенераторов, среди которых – генераторы с внешней и внутренней обратной связью, а также генераторы с параллельной и последовательной обратной связью. Вместе с тем соотношения (4), (5) удобнее применять при проектировании генераторов с внутренней обратной связью, содержащих активный и пассивный двухполюсники [4]. Соотношения (4), (5) выполняются также и для трехточечных генераторных схем, причем для треугольной схемы трехточки справедливо условие (4), а для звездообразной схемы – (5).

Комплексное уравнение (3) разбивается на два вещественных, которые принято называть уравнениями баланса амплитуд ($S_1 K Z_Н = 1$) и баланса фаз ($\varphi_S + \varphi_К + \varphi_Н = 2\pi k$, k – целое число). Каждое из уравнений (4) и (5) также распадается на два, решением которых в обоих случаях является частота генератора f_0 и амплитуда его колебания в стационарном режиме.

Трехточечную схему представленного на рис. 1 автогенератора вполне можно было бы считать звездообразной при отсутствии емкости связи *C7*. Однако именно из-за этой емкости данный автогенератор следует отнести к генераторным устройствам с параллельной обратной связью или к генераторам, выполненным по треугольной трехточечной схеме, где при вычислении частоты генерации f_0 справедливо соотношение (4).

Исходя из этого, рассмотрим **первый прием** проектирования трехточечных генераторов. Используя справочные данные об [*S*]-параметрах выбранного транзистора 2Т 682 А-2 [11], а также рекомендации работы [8], рассчитаем параметры элементов рассматриваемой схемы, при которых на первом порту суммарная входная проводимость $\dot{Y}_\Sigma$ приблизительно равна нулю. Другими словами, на первом порту, сопротивление которого равно общему сопротивлению резисторов *R1* и *R2*, результатом оптимизации параметров элементов схемы является одновременное выполнение приблизительного равенства нулю и действительной и мнимой частей суммарной проводимости. Полученные таким образом зависимости действительной и мнимой величин суммарной проводимости от частоты представлены на рис. 4. Из графиков видно, что действительная и мнимая части суммарной проводимости достигают минимальных величин на частоте около 1,08 ГГц. Минимальные величины суммарной проводимости имеют место при следующих оптимальных параметрах элементов: *C3* = *C7* = 3,9 пФ, *C4* = 2 пФ, *C6* = = *C9* = 1,8 пФ, *C8* = 8,2 пФ, длина связанных отрезков МПЛ *Z1*, *Z2* и *Z3* l_1 = 15,5 мм, длина МПЛ *Z4* l_2 = 5,8 мм, длина МПЛ *Z5* l_3 = 9,5 мм, ширина основного полоска МПЛ *Z2* W_1 = = 0,7 мм, ширины зазоров между отрезками МПЛ *Z1* – *Z3* W_2 = 0,2 мм, ширины остальных отрезков W_3 = 0,3 мм при толщине стеклотекстолитовой подложки FR-4 l = 0,8 мм. Суммарная емкость конденсатора *C5* и варикапа 2В 169 А9 меняется в пределах от 1,45 до 1,95 пФ (при $f_0 \approx 1{,}08$ ГГц величина суммарной емкости равна приблизительно 1,9 пФ).

Оценим величину f_0 другими способами. Используя полученное для звездообразной трехточечной схемы генератора (см. рис. 2, *б*) соотношение $X_К X_Э + X_Э X_Б + X_К X_Б = 0$ [12, 13], где $X_Э = -1/(2\pi f_0 C_Э)$, $X_К = 2\pi f_0 L_К$, $X_Б = 2\pi f_0 L_Б$, найдем частоту $f_0 \approx 1{,}04$ ГГц по формуле

3(538).indd 78 19.11.2018 14:33:57

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_К + L_Б}{C_Э L_К L_Б}}. \qquad (6)$$

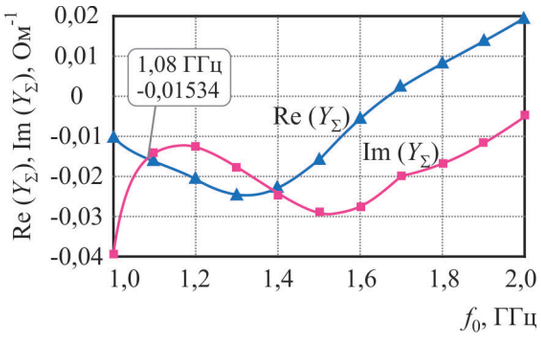


Рис. 4. Частотные зависимости действительной и мнимой частей суммарной входной проводимости

При вычислении с помощью выражения (6) частоты генерации используем реактивные части входных импедансов портов 1 – 3 ($X_К = 23{,}6$ Ом, $X_Э = -12{,}8$ Ом, $X_Б = 33{,}3$ Ом), которые рассчитаны при оптимальных параметрах элементов схемы генератора, работающего на частоте 1,08 ГГц, где выполняется условие (4). Преобразуя указанные сопротивления звезды в треугольник, рассчитаем $X_{АЭ} = 1{,}73$ Ом, $X_{КК} = -4{,}5$ Ом, $X_{ОС} = 2{,}44$ Ом. Это преобразование возможно, так как выполняются оба условия, (1) и (2).

Используя полученные выше реактивные сопротивления треугольника в соотношении $X_{АЭ} + X_{ОС} + X_{КК} = 0$ [1], где $X_{АЭ} = 2\pi f_0 L_{АЭ}$, $X_{ОС} = 2\pi f_0 L_{ОС}$, $X_{КК} = -1/(2\pi f_0 C_{КК})$, вычислим частоту $f_0 \approx 1{,}11$ ГГц по формуле

$$f_0 = 1\Big/\left(2\pi\sqrt{C_{КК}\left(L_{АЭ} + L_{ОС}\right)}\right). \qquad (7)$$

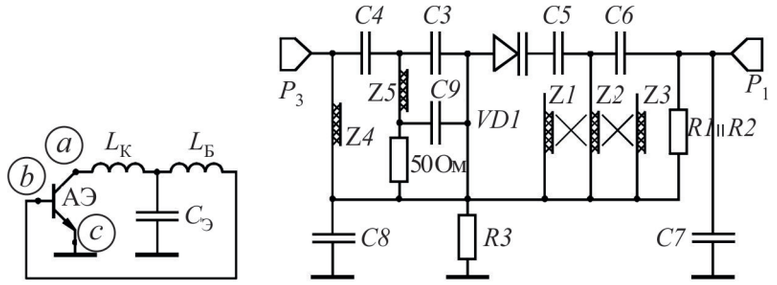
Формулы (6) и (7) получены на основе анализа упрощенной модели транзистора, который описывается только средней крутизной его проходной характеристики [1, 10]. По этой причине рассчитанные с их помощью величины могут рассматриваться лишь в качестве оценочных частот. Вместе с тем проведенные оценки f_0 подтверждают оптимальный выбор частоты 1,08 ГГц, которой соответствуют установленные выше параметры элементов схемы генератора, где выполняется условие (4). Доказательством тому служат величины оценочных частот и оптимальной частоты, которые отличаются не более чем на 4 %.

Таким образом, в основу первого приема проектирования трехточечных генераторов заложено выполнение соотношения (4). Рассмотрим другие (второй и третий) приемы проектирования трехточечных генераторов, которые основаны на реализации условия (3).

Ранее показано, что схему на рис. 1, для которой на первом порту выполняется условие (4), можно представить в виде эквивалентной схемы (см. рис. 2, *б*) или в виде схемы автогенератора с последовательной обратной связью, где в качестве центральной точки звезды используется корпусная шина. С учетом этого замечания в рамках рассмотрения **второго приема** проектирования генераторов преобразуем эквивалентную схему генератора с последовательной обратной связью, показанной на рис. 2, *б*, в эквивалентную схему генератора с внешней обратной связью, переместив корпусную шину устройства с центральной точки звезды на об-

3(538).indd 79 19.11.2018 14:33:58

щий электрод (эмиттер) транзистора. В результате такого эквивалентного преобразования получим схему на рис. 5, *а*. Представив элементы схемы на рис. 1 в новом преобразованном виде, получим принципиальную схему цепи внешней обратной связи генератора с обратной связью последовательного типа (рис. 5, *б*).



а) *б*)

Рис. 5. Эквивалентная схема индуктивной трехточки в виде генератора с общим эмиттером и последовательной обратной связью (*а*); принципиальная схема цепи обратной связи последовательного типа (*б*)

Используя рекомендации работы [8], рассчитаем между 50-омными портами 3 и 1 величины модуля $|S[3,1]|$ и фазы $\angle S[3,1]$ коэффициента передачи цепи внешней обратной связи (см. рис. 5, *б*). При ранее установленных оптимальных параметрах элементов схемы генератора результаты данного расчета представлены на рис. 6.

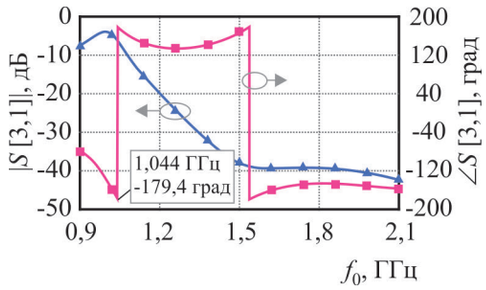
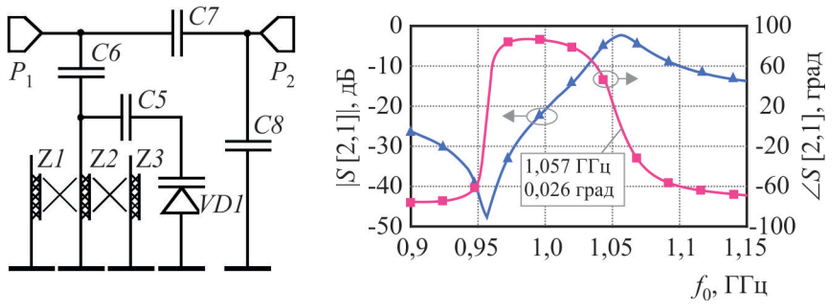


Рис. 6. Частотные зависимости фазы и коэффициента передачи цепи последовательной обратной связи

Приведенные на рис. 6 зависимости подтверждают возможность генерации колебаний с установленной выше частотой в пределах ее погрешности ±4 %. Так, для рассматриваемой цепи фаза $\varphi_К$ коэффициента передачи равна приблизительно -180 град на частоте 1,044 ГГц при суммарных потерях около -6,5 дБ. Если предположить, что коэффициент усиления транзистора по напряжению $S_1 Z_Н > 6{,}5$ дБ, а его фаза равна приблизительно -180 град, то условие кратности 2π в уравнении баланса фаз выполняется в полной мере.

Отметим **третий прием** проектирования автогенераторов, который также основан на выполнении баланса фаз и амплитуд. Для этого предположим, что основным элементом выбранной цепи положительной обратной связи в генераторе (см. рис. 1) является емкость *C7*. Образованная этой емкостью цепь обратной связи представлена на рис. 7, *а*. В качестве сопротивлений портов 2 и 1 выберем соответственно сопротивление резистора *R3* и общее сопротивление резисторов *R1* и *R2*.

3(538).indd 80 19.11.2018 14:33:58



а) *б*)

Рис. 7. Принципиальная схема (*а*), а также частотные зависимости фазы и коэффициента передачи (*б*) цепи параллельной обратной связи

Используя установленные ранее оптимальные параметры элементов схемы генератора, рассчитаем на основе рекомендаций работы [8] величины модуля $|S[2,1]|$ и фазы $\angle S[2,1]$ коэффициента передачи цепи обратной связи с емкостью *C7*. Результаты данного расчета представлены на рис. 7, *б*.

Зависимости на рис. 7, *б* также подтверждают возможность работы генератора на оптимальной частоте с погрешностью ±4 %. Так, для выбранной цепи фаза $\varphi_К$ коэффициента передачи равна приблизительно 0 град на частоте 1,057 ГГц при общих потерях около -2,4 дБ. Если предположить, что коэффициент передачи напряжения с эмиттера на базу транзистора больше 2,4 дБ, а его фаза равна приблизительно 0 град, то условие кратности нулю в уравнении баланса фаз выполняется при $k = 0$. Случай же работы генератора на собственной частоте около 0,96 ГГц резонатора на связанных линиях, который также соответствует фазе $\varphi_К \approx 0$ град, здесь не рассматривается из-за значительных величин суммарных потерь (-40 … -50 дБ) в цепи внешней обратной связи.

Используя предложенные приемы проектирования генераторов, в соответствии со схемой на рис. 1 разработан управляемый напряжением генератор, в котором применены комплектующие элементы только отечественного производства. Его фотография приведена на рис. 8. Габаритные размеры корпуса, расположение контактных площадок выходного сигнала и вводов управляющего и питающего напряжений в разработанном приборе полностью, а его типовые характеристики в основном соответствуют импортному аналогу ROS-1100V [6]. Так, при потребляемом токе 16 мА и напряжении питания +5 В генератор с выходной мощностью 0,7…1,2 мВт перестраивается в диапазоне частот от 1,03 до 1,09 ГГц при изменении управляющего напряжения от 0,5 до 12 В. При этом в указанном частотном диапазоне спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройках 10 и 100 кГц составляет 101 и 123 дБ/Гц. Относительно низкие уровни фазовых шумов обеспечиваются здесь за счет применения резонатора на связанных линиях [9, 14], при помощи которых повышается добротность нагруженного контура в цепи обратной связи.

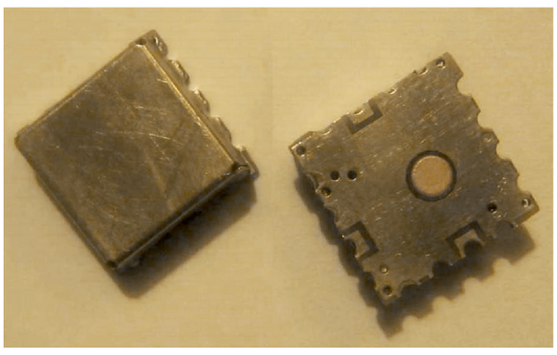


Рис. 8. Разработанный генератор, управляемый напряжением

3(538).indd 81 19.11.2018 14:33:58

Таким образом, рассмотренные приемы проектирования трехточечных СВЧ-генераторов являются равнозначными и взаимодополняющими. На примере выбранной трехточечной схемы автогенератора продемонстрированы три приема его проектирования, каждый из которых приводит к одинаковому результату, по крайней мере, с точки зрения нахождения частоты генерации. Полученные в процессе проектирования тремя разными способами величины частот генерации находятся по отношению к оптимальной частоте в пределах погрешности ±4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиопередающие устройства / Под ред. М. В. Благовещенского, Г. М. Уткина. – М.: Радио и связь, 1982. – 408 с.

2. **Романюк, В. А.** Синтезаторы частот на основе автогенераторов с ФАПЧ: учебное пособие / В. А. Романюк. – М.: МИЭТ, 2005. – 65 с.

3. **Grebennikov, A.** RF and microwave transistor oscillator design / A. Grebennikov. – John Wiley & Sons, 2007. – 441 p.

4. **Фурсаев, М. А.** Проблемы моделирования СВЧ транзисторных генераторов / М. А. Фурсаев // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4 (60). – Вып. 2. – С. 95 – 98.

5. **Баранов, А. В.** Частные и обобщенные эквивалентные трехточечные схемы СВЧ-автогенераторов / А. В. Баранов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1 (532). – С. 18 – 25.

6. Voltage controlled oscillator, ROS-1100V, RF/IF microwave components [Электронный ресурс] // Mini-Circuits, Inc. – 2006. – Режим доступа: http: // www.minicircuits.com.

7. **Горевой, А. В.** Генератор диапазона 1 – 2 ГГц с повышенной крутизной регулировочной характеристики / А. В. Горевой // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 1 (23). – С. 44 – 49.

8. **Разевиг, В. Д.** Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин; под ред. В. Д. Разевига. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

9. **Rohde, U. L.** The design of modern microwave oscillators for wireless applications / U. L. Rohde, A. K. Poddar, G. Böck. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 543 p.

10. **Баранов, А. В.** Транзисторные СВЧ усилители мощности и генераторы гармонических колебаний: учебное пособие / А. В. Баранов, С. Л. Моругин. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. – 115 с.

11. Приборы полупроводниковые бескорпусные. Транзистор 2Т682А-2. Частные технические условия аАО. 339.663 ТУ.

12. **Патент 2644067 РФ, СПК – 2016.01 H 03 B 5/1221; 5/1231; 5/1243; H 03 B 7/06.** Каскодный генератор, управляемый напряжением / А. В. Баранов; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Салют». – № 2017116009/08(027693); заявл. 04.05.2017, опубл. 07.02.2018, Бюл. № 4.

13. **Баранов, А. В.** Управляемая напряжением система двух взаимно синхронизированных СВЧ-автогенераторов / А. В. Баранов // Материалы XIX координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике, п. Хахалы Нижегородской обл., (05 – 07).09.2017. – Нижний Новгород, 2017. – С. 55 – 57.

14. **Аристархов, Г. М.** Стабилизация частоты микрополосковых автогенераторов СВЧ при помощи систем связанных линий с неравными фазовыми скоростями / Г. М. Аристархов, В. И. Пашнин // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. – 1984. – Вып. 2 (44). – С. 5 – 11.

Статья поступила 9 июня 2018 г.

3(538).indd 82 19.11.2018 14:33:58

УДК 621.382

ИЗМЕРЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СБОРОК

В. Б. Вяхирев

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

Описана организация технологического контроля теплового сопротивления транзисторных сборок, предназначенных для источников вторичного электропитания. Показана целесообразность применения современных динамических методов измерения импульсного теплового сопротивления для анализа физических процессов в изделиях. Предложен новый подход в определении границы области безопасной работы используемых транзисторов.

КС: импульсное тепловое сопротивление, тепловая эквивалентная математическая модель, область безопасной работы

MEASUREMENT AND INTERPRETATION OF THE THERMAL RESISTANCE OF SILICON TRANSISTOR ASSEMBLIES

V. B. Vyakhirev

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

The paper describes the organization of technological control of thermal resistance of transistor assemblies intended for secondary power supplies. The expediency of using modern dynamic methods of measuring pulse heat resistance for the analysis of physical processes in products is shown. A new approach is proposed in determining the boundary of the safe operation area of the transistors used.

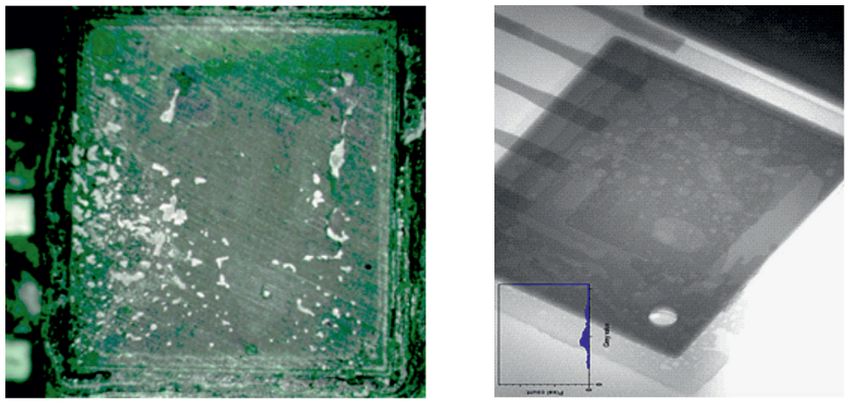
Keywords: pulse thermal resistance, thermal equivalent mathematical model, safe operation area

1. ВВЕДЕНИЕ

Надежная работа транзисторов в значительной степени зависит от возможности отводить тепло во время работы, что, в первую очередь, определяется технологией сборочных операций при их изготовлении. Очень важную роль играют дефекты в слоях пайки (рис. 1). Возможность применения сборок в конкретных режимах описывается их областью безопасной работы (ОБР). Определение всех границ ОБР очень трудоемкая задача, однако, если режимы, в которых будут эксплуатироваться изделия, известны, задачу контроля можно сформулировать следующим образом. Нужно найти критерий и способ его измерения, по которому можно оценивать положение границы ОБР в окрестности предполагаемого режима эксплуатации. Там, где ОБР ограничена тепловым пробоем, необходимо учитывать явление локализации мощности, характерное для многих современных приборов. Рис. 2 демонстрирует наличие локализации мощности в описываемых сборках. Именно явление локализации мощности в основном определяет разброс индивидуальных ОБР по отношению к среднестатистической области для конкретного типа транзисторов. Поэтому для особо важных применений необходим индивидуальный контроль границы ОБР. В идеале надо найти мощность импульса заданной

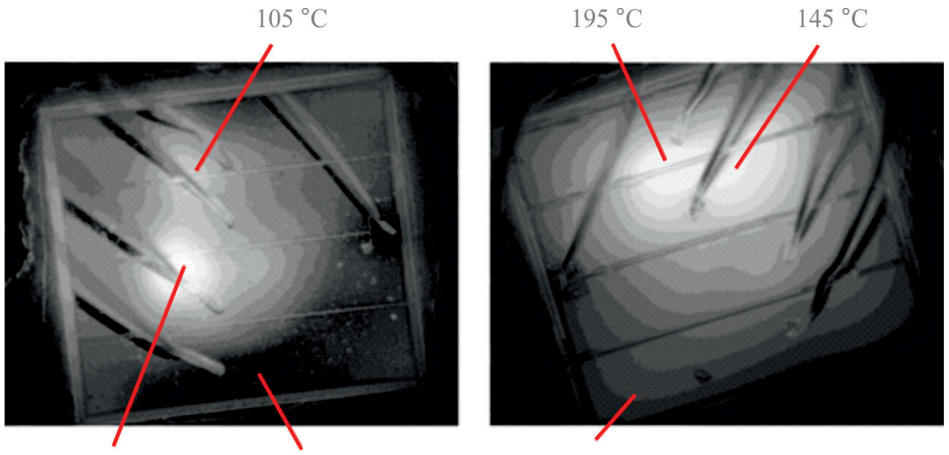
3(538).indd 83 19.11.2018 14:33:58

длительности, который не приводит к нагреву выше предельной температуры в самой горячей точке кристалла.



а) *б*)

Рис. 1. Дефекты в слоях пайки:
а – светлые пятна – участки плохой адгезии после стравливания кристалла;
б – снимок на просвет в рентгеновских лучах



а) *б*)

Рис. 2. Изображения двух разных транзисторов,
полученные с помощью тепловизионного микроскопа

Поиску нужного критерия и способа оценки качества приборов, в которых наблюдается явление локализации мощности, посвящено большое количество работ [1–5]. Все описываемые способы, так или иначе, оценивают температуру кристалла транзистора. Оптические способы, как на рис. 2, в данном случае возможны, но довольно трудоемки [6] и плохо поддаются автоматизации. Кроме того, они не применимы для входного и выходного контроля, так как готовые сборки герметизированы. Поэтому данная работа посвящена способу, где измерение температуры происходит косвенно, по электрическому термочувствительному параметру. В качестве такого параметра могут выступать прямое падение напряжения на *p*–*n*-переходе, обратный ток кол-

3(538).indd 84 19.11.2018 14:33:59

лекторного перехода, сопротивление открытого канала полевого транзистора и другие. В [7] описывается, как из временной зависимости термочувствительного параметра вычисляется температура кристалла $T_{изм}$ в момент отключения мощности. Отношение разности $T_{изм} - T_{н}$, где $T_{н}$ – начальная (до нагрева) температура кристалла, к мощности называется импульсным тепловым сопротивлением (ИТС). Именно такие способы используются и в новых динамических методах определения тепловых характеристик, вошедших в международный стандарт JESD51-14 [8]. Электрическим способам оценки температуры, в том числе входящим в стандарт, присущ существенный недостаток: $T_{изм}$ оказывается усредненной по площади прибора. Для транзисторов с большой площадью (к которым относятся описываемые сборки) разница между максимальной температурой T_{max} и $T_{изм}$ в некоторых случаях может достигать сотни градусов. Очевидно, что возможность теплового пробоя определяется именно T_{max}, поэтому в данной работе предпринята попытка разработать новый метод анализа результатов измерений, позволяющий оценить разницу $\Delta T_{max} = T_{max} - T_{изм}$ и получить более достоверный критерий надежности измеряемых приборов. Было сделано предположение, что степень локализации мощности должна зависеть от параметров импульсов нагрева и как-то отражаться на величине и динамике изменения измеряемых величин на этапе охлаждения.

2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения измерений использовался стенд [11], состоящий из измерителя – автоматизированного анализатора тепловых характеристик Л2-109 и программируемого блока питания XG 150-10. Стенд в основном соответствует требованиям, предъявляемым стандартом JESD51-14 к измерительному оборудованию. В качестве термочувствительного параметра использовалось прямое падение напряжения на *p–n*-переходе при пропускании через него стабилизированного тестирующего тока в диапазоне 5…95 мА. Используя программное обеспечение (ПО) Л2-109, можно задавать любую последовательность импульсов нагрева, с самыми разными параметрами, и анализировать результаты как функциями, входящими в состав ПО Л2-109, так и функциями из программ, написанных пользователем. Задание на измерение оформляется по определенным правилам в отдельном файле (формата Excel). Там же указываются параметры протокола, в который выводятся результаты. Результаты расчета пользовательскими функциями тоже могут быть выведены в протокол. Согласно стандарту JESD51-14, встроенные в ПО функции позволяют по анализу кривых остывания создавать тепловую эквивалентную математическую модель (ТЭММ) измеряемого прибора. В частности, ТЭММ может быть преобразована в структурную функцию (как на рис. 3), которая показывает внутреннюю структуру исследуемого прибора [9, 10].

Для проверки математических моделей и методов анализа в ПО Л2-109 предусмотрен эмулятор, который вместо измеряемого прибора использует его математическую модель. Согласно стандарту, ТЭММ, полученная при воздействии греющего импульса большой длительности и малой мощности, позволит прогнозировать поведение тепловой системы при любых других воздействиях. Однако это справедливо только при отсутствии локализации мощности. Дело в том, что полученная согласно стандарту ТЭММ является одномерной, то есть предполагает перенос тепла только в одном направлении (например, от поверхности кристалла к теплоотводу). В случае локализации мощности потоки тепла идут еще и в латеральных направлениях (например, от дефектного, перегретого участка к периферии). Получается, что в процессе нагрева величины элементов ТЭММ в большей или меньшей степени изменяются. Так,

3(538).indd 85 19.11.2018 14:33:59

по мере развития процесса локализации тепло выделяется в меньшем объёме, что эквивалентно уменьшению локальных теплоемкостей ТЭММ, изменяется (удлиняется и сужается) путь отвода тепла, что эквивалентно увеличению локальных тепловых сопротивлений ТЭММ. Изменения эти зависят от режима нагрева (напряжение, ток, длительность) и на определенных участках ОБР могут быть незначительны, однако в общем случае прогнозировать температуру кристалла по одномерной ТЭММ нельзя [11].

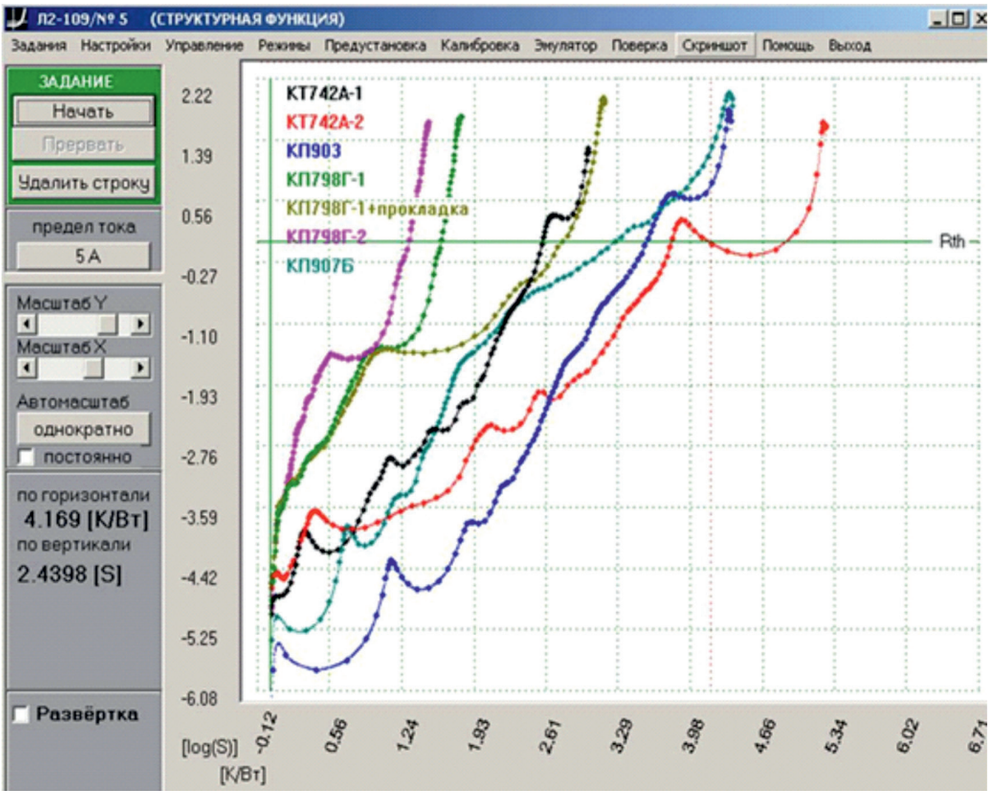


Рис. 3. Структурные функции как способ представления одномерной тепловой математической модели для разных типов транзисторов

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе одномерной ТЭММ была построена трехмерная ТЭММ. К новой, трехмерной модели предъявлялись дополнительные требования:

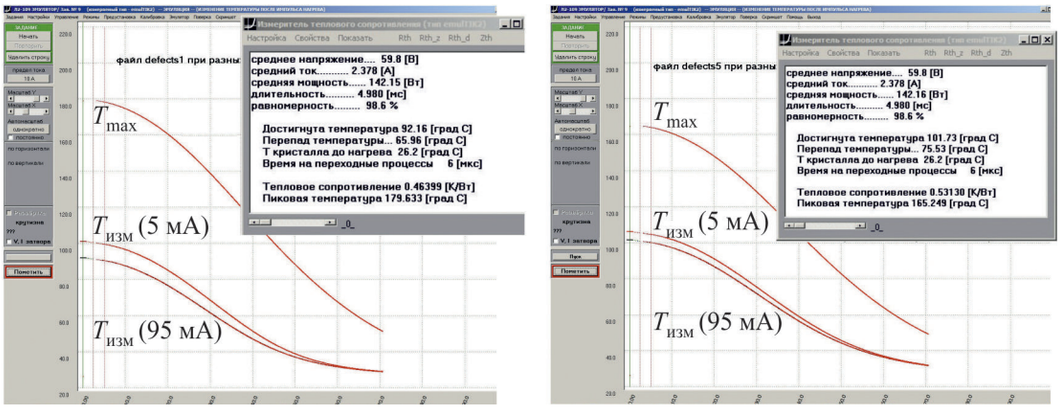
- Учет распределения температуры по площади, то есть разбиение теплового потока из одномерной модели на множество параллельных тепловых потоков.
- Учет взаимодействия этих потоков между собой.
- Учет наличия дефектов.
- Учет температурной зависимости крутизны транзистора.
- Учет температурной зависимости сопротивления канала.
- Учет зависимости результатов измерения от значения тестирующего тока.

При исключении из модели дефектов, она сводится к одномерной, которую на практике можно получить измерением бездефектного прибора в режиме, исключающем возникновение локализации мощности. Возможность получения трехмерной ТЭММ из анализа кривых осты-

3(538).indd 86 19.11.2018 14:33:59

вания, подобно тому, как это делалось для одномерной модели, скорее всего не реализуема, но такая задача и не ставилась. Моделирование, использующее трехмерную ТЭММ, должно было помочь найти закономерности, позволяющие оценивать величину ΔT_{max}.

В частности, обнаружилось, что величины $T_{изм}$, измеренные при разных тестирующих токах, имеют разные значения, чего не наблюдалось при моделировании с одномерной ТЭММ. Объясняется это так. Когда тестирующий ток концентрируется в горячих областях структуры (где меньше высота барьера), происходит локальное увеличение его плотности, что приводит к кажущемуся завышенному значению высоты потенциального барьера (и заниженному значению температуры). Чем больше тестирующий ток, тем заметнее этот эффект, поэтому возникает разница в показаниях, полученных при разной величине тестирующего тока. Эта разница ($\Delta T_{изм}$) должна зависеть от степени неравномерности нагрева и может служить его мерой. Рис. 4 иллюстрирует справедливость такого предположения. Здесь представлены результаты моделирования в виде временных зависимостей усредненных температур $T_{изм}$, измеренных при тестирующих токах 5 и 95 мА соответственно, и максимальной температуры T_{max} на этапе остывания после импульса нагрева. Модели, соответствующие рис. 4, отличаются только количеством дефектом. Для рис. 4, *а* $\Delta T_{max} = 179{,}6 - 92{,}1 = 87{,}5$ (°С), а $\Delta T_{изм} = 9$ °С. Для рис. 4, *б* $\Delta T_{max} = 165{,}2 - 101{,}7 = 63{,}5$ (°С), а $\Delta T_{изм} = 2{,}6$ °С. Интересно отметить, что модель прибора с большим количеством дефектов демонстрирует меньшую T_{max} (и при этом чуть большие $T_{изм}$), то есть моделирует более надежный прибор для данного режима эксплуатации. Объясняется это тем, что наличие большего количества дефектов хотя и препятствует переносу тепла от поверхности, но при этом способствует более равномерному распределению рассеиваемой мощности по площади кристалла.



а) *б*)

Рис. 4. Результаты работы эмулятора Л2-109:
а – трехмерная ТЭММ содержит один дефект; *б* – трехмерная ТЭММ содержит пять таких же дефектов

Взаимосвязь величин ΔT_{max} и $\Delta T_{изм}$ даёт основание надеяться, что по поведению $T_{изм}$ и $\Delta T_{изм}$ можно будет оценивать ΔT_{max}. Создание математического аппарата для этой цели можно разделить на следующие этапы:

- Для каждого типа приборов и каждого возможного режима нагрева необходимо создать базу данных, содержащую результаты моделирования его трехмерной ТЭММ при всех возможных топологиях дефектов, со всеми возможными их размерами и свойствами.

3(538).indd 87 19.11.2018 14:34:00

- Моделируя проведение измерений и получив величины $T_{изм}$ и $\Delta T_{изм}$, надо будет отыскать в базе моделирования комбинацию этих же величин (и их производных), близкую к измеренным, и найти в базе прогнозируемое значение $\Delta T_{пр} = T_{max} - T_{изм}$.
- Моделируя проведение измерений при всех возможных топологиях дефектов, со всеми возможными их размерами и свойствами, требуется сравнить значение ΔT_{max} и $\Delta T_{пр}$ и оценить погрешность предсказания.
- Проводя реальные измерения, нужно оценить погрешность предсказания, используя для получения ΔT_{max} оптические средства измерения.

Такое моделирование, в ограниченном объёме, было проведено для одного типа транзисторных сборок в некотором диапазоне режимов нагрева, который выбирался из следующих соображений. Главная цель технологического контроля – отбраковать приборы, которые не смогут эксплуатироваться в заданном режиме. Сомнение в качестве очень плохих и очень хороших (по величине ИТС) приборов обычно не возникает. Необходимость более точного определения T_{max} актуальна только для приборов, ИТС которых имеет значение, находящееся в неком пограничном диапазоне. Для моделирования была выбрана целевая $T_{изм}$, которая должна была получиться в результате нагрева. Значение её близко к предельной (150 °C), с учетом возможной добавки из-за ΔT_{max}. Из целевой $T_{изм}$ и пограничного диапазона ИТС был получен и диапазон режимов нагрева.

Была определена функция температурной ошибки (F_o) для однородного и одиночного дефекта, связывающая две безразмерные величины ($T_{изм}/\Delta T_{max}$ и $T_{изм}/\Delta T_{изм}$) при различных размерах и свойствах дефекта. Под свойством дефекта здесь понимается степень его влияния на локальное тепловое сопротивление и локальную теплоемкость. Меняя размер дефекта, его свойства подбирались таким образом, чтобы получить при моделировании целевую $T_{изм}$.

Выяснилось, что при фиксированных параметрах нагрева функция температурной ошибки F_o почти линейна (см. рис. 5). Совокупность этих зависимостей при разных значениях мощности образует гладкую поверхность. Такая поверхность могла бы сохраняться в памяти измерителя для получения значения T_{max} как функции от $T_{изм}$ и $\Delta T_{изм}$ при условии, что дефект, вызывающий неоднородный нагрев, является единственным и однородным. К сожалению, надеяться на это никак нельзя, поэтому были рассмотрены более сложные случаи.

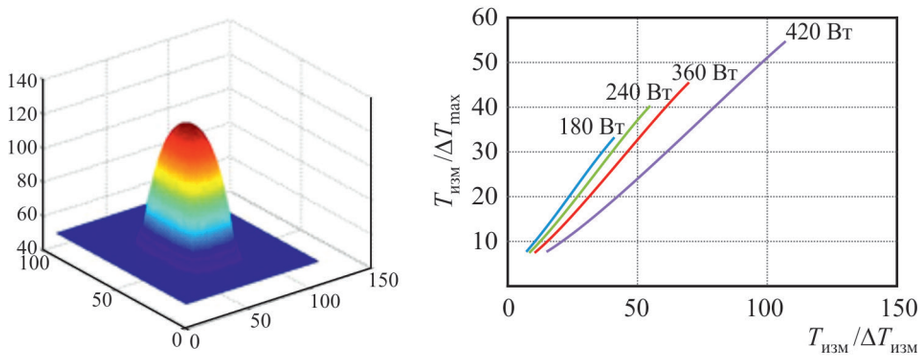


Рис. 5. Графическое представление функции температурной ошибки F_o для однородного и одиночного дефекта при различных мощностях импульса нагрева

Во-первых, были рассмотрены три сорта дефектов:

- Плоский дефект характерен тем, что в этой области преимущественно увеличено тепловое

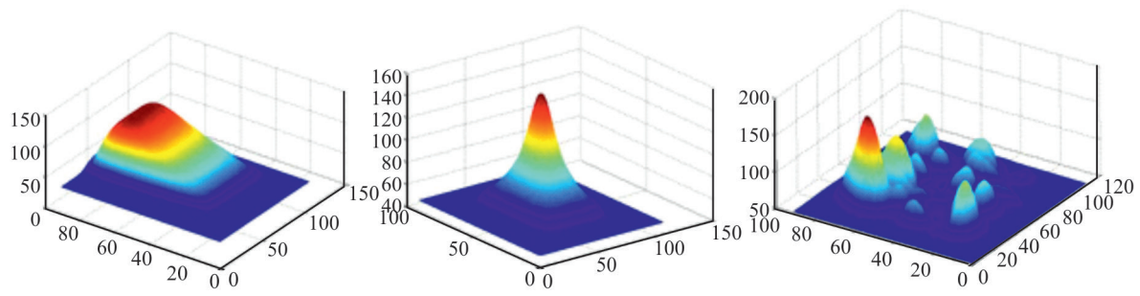
3(538).indd 88 19.11.2018 14:34:00

сопротивление, а теплоёмкость изменилась незначительно. Такая ситуация может возникнуть на границе раздела двух слоёв прибора в результате скопления мелких дефектов на поверхности соприкосновения слоёв.

- Объёмный дефект характерен тем, что в области дефекта значительно уменьшена теплоёмкость за счет объёмного скопления (или слиянии в один) дефектов, например пустот или газовых пузырьков.
- Комбинированный дефект является комбинацией плоского и объёмного.

Выяснилось, что влияние сорта дефекта на F_o невелико.

Во-вторых, были рассмотрены неоднородные дефекты, в которых интенсивность менялась от одного края к другому (рис. 6, *а*) или от центра к краям (рис. 6, *б*). В-третьих, было рассмотрено несколько комбинаций множественных дефектов, расположение и начальный размер которых задавались практически случайным образом, как на рис. 6, *в*. Во время расчета каждый дефект поэтапно увеличивался, при этом он в какой-то момент пересекался с соседним дефектом и соединялся с ним, не изменяя начальных свойств (рис. 7); здесь топология дефектов та же, что и на рис. 6, *в*. В другом случае их свойства перемножались друг на друга в месте пересечения. Таким образом, возникали самые причудливые картины распределения температуры при нагреве. Во всех случаях при изменении размеров дефектов их свойства подбирались таким образом, чтобы получить при моделировании целевую $T_{изм}$. При расчете каждого варианта вычислялась $\Delta T_{пр}$ на основе функции F_o, при этом полученный результат сравнивался со значением ΔT_{max}.



а) *б*) *в*)

Рис. 6. Примеры распределения температуры при моделировании для разных типов дефектов

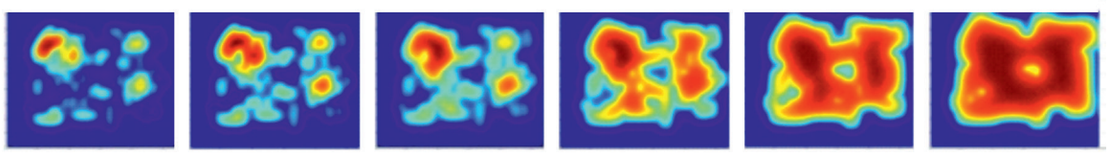


Рис. 7. Пример распределения температуры при моделировании. Постепенное увеличение начальных размеров. Топология дефектов та же, что и на рис. 6, *в*

Выяснилось, что значение $\Delta T_{пр}$, вычисленное при использовании поправочной функции F_o для дефектов, не являющихся одиночными и однородными, почти всегда оказывается меньше ΔT_{max}. Следующим шагом было построение эмпирической функции F_1, которая, используя производные $T_{изм}$ и $\Delta T_{изм}$, вычисляла поправку к $\Delta T_{пр}$ и позволила точнее предсказывать величину ΔT_{max}. На рис. 8 представлены результаты моделирования для некоторых типов сложных дефектов. Здесь

3(538).indd 89 19.11.2018 14:34:00

зеленая линия – ΔT_{max}, красная линия – $\Delta T_{пр}$, вычисленная при использовании поправочной функции F_0, с учетом поправки F_1. В большинстве случаев ошибка в прогнозе не превышала 10 град.

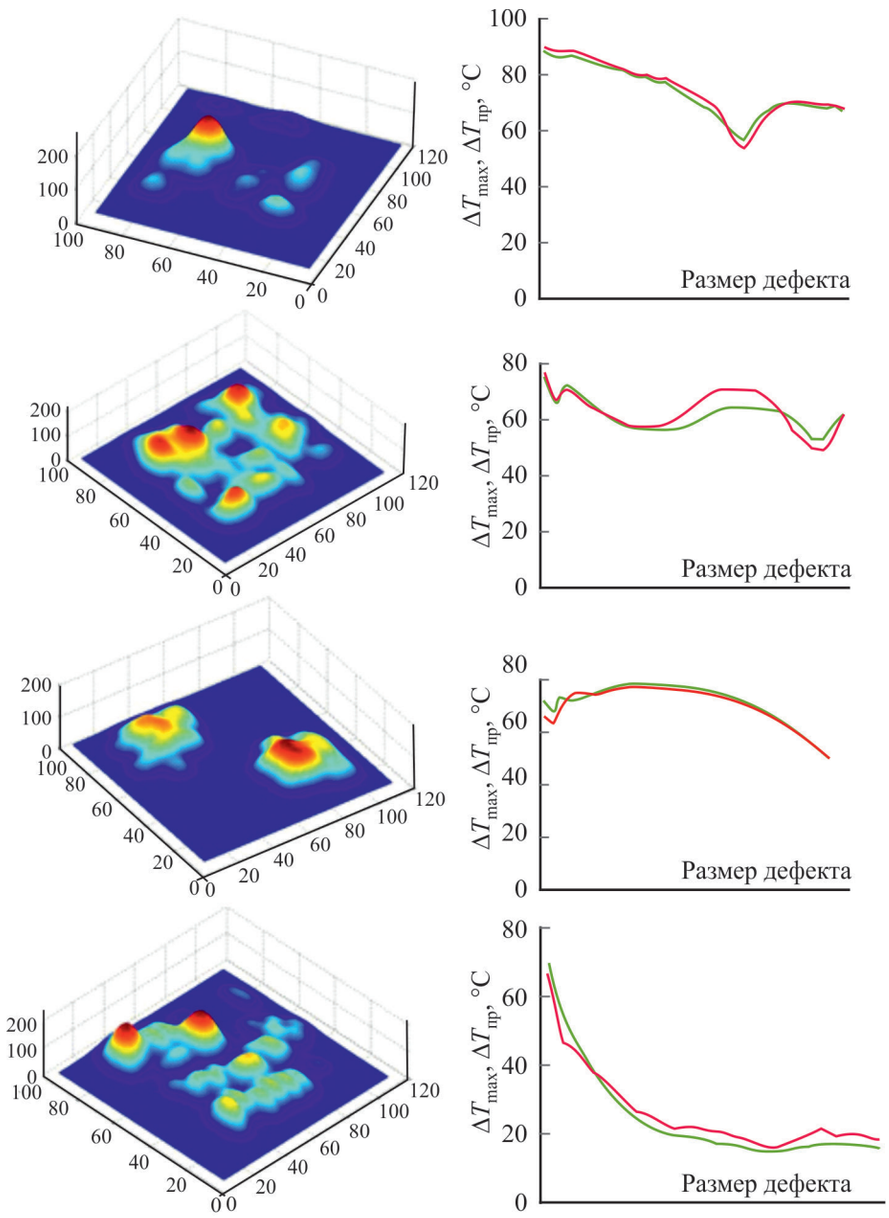


Рис. 8. Примеры использования поправочных функций F_0 и F_1 при моделировании со сложными дефектами:
зеленая линия – ΔT_{max}; красная линия – $\Delta T_{пр}$

Проведены реальные оптические и электрические измерения на нескольких сборках. При сравнении полученных $\Delta T_{пр}$ и измеренных оптическим способом ΔT_{max} также получены обнадеживающие результаты.

3(538).indd 90 19.11.2018 14:34:01

4. ВЫВОДЫ

1. Разница значений импульсных тепловых сопротивлений, полученных при разной величине тестирующего тока, может служить мерой неравномерности нагрева.

2. В режимах, где возможно явление локализации мощности по площади транзистора, использование предлагаемой методики позволяет более достоверно определять границу области безопасной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рабодзей, А. Н.** Исследование динамики локализации тока в мощных транзисторах / А. Н. Рабодзей // Электронная техника. Сер. 2. ПП-приборы. – 1981. – Вып. 2.

2. **Oettinger, F. F.** Thermal characterization of power transistors / F. F. Oettinger, D. L. Blackburn, S. Rubin // IEEE Trans. Electron Devices. – 1976. – Vol. 23. – P. 831 – 838.

3. **Liu, W.** Failure mechanisms in AlGaAs/GaAs power hetero junction bipolar transistors / W. Liu // Electron Devices. – 1996. – Iss. 2. – P. 220 – 227.

4. **Vashchenko, V. A.** Physical limitations of semiconductor devices / V. A. Vashchenko, V. F. Sinkevitch // Springer US. – 2008. – 330 p.

5. **Гусев, В. А.** Стенд неразрушающих испытаний транзисторов / В. А. Гусев, И. Ю. Капранов / / Вестник Сев. ГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь. – 2010. – Вып. 101.

6. www.optotherm.com/el-intro.htm.

7. **Вяхирев, В.** Измерение теплового сопротивления СВЧ-транзисторов / В. Вяхирев, М. Духновский, Ю. Федоров и др. // Современная электроника. – 2012. – № 2.

8. JEDEC JESD51-14 «Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path», November 2010.

9. **Вяхирев, В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов / В. Вяхирев // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3.

10. **Вяхирев, В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов (часть 2) / В. Вяхирев // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 8.

11. **Вяхирев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов (часть 3) / В. Вяхирев // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – № 5.

Статья поступила 5 июня 2018 г.

3(538).indd 91 19.11.2018 14:34:01

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.372.8:61

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДЫ В ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕДАХ И ОБЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

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

Предложена методика определения диэлектрических характеристик водных растворов и суспензий, основанная на температурной зависимости коэффициента поглощения водных растворов, с помощью одной из модификаций волноводно-диэлектрического резонансного метода, которая расширяет возможности данного метода для некоторых его применений. Проведена конструктивная модернизация резонансной измерительной камеры, которая позволяет обеспечить максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и способствует повышению чувствительности измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Приведены примеры использования полученных методических и технических достижений для акваметрии углеводородов.

КС: электромагнитное излучение (ЭМИ), сверхвысокие частоты (СВЧ), сантиметровые и миллиметровые волны, диэлектрическая проницаемость, коэффициент поглощения, водные растворы и смеси, углеводородные смеси, контроль содержания воды, волноводно-диэлектрический резонанс, волноводная камера, суспензия липосом

EXPERIENCE OF USING A WAVEGUIDE-DIELECTRIC CHAMBER FOR MEASURING WATER CONCENTRATION IN ORGANIC MEDIA AND IRRADIATING BIOLOGICAL OBJECTS

K. D. Kazarinov, I. G. Polnikov

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino

A method is proposed for determining the dielectric characteristics of aqueous solutions and suspensions based on the temperature dependence of the absorption coefficient of aqueous solutions using one of the modifications of waveguide-dielectric resonance method that extends the possibilities of this method for some of its applications. A constructive modernization of the resonance measuring chamber has been carried out which allows to provide the maximum *Q* of the resonator for each concentration of the substance in the liquid under investigation and contributes to the increase in the sensitivity of measurements of dielectric parameters of the controlled liquid. Examples of the use of the received methodical and technical achievements for aquametry of hydrocarbons are given.

Keywords: electromagnetic radiation, microwave frequencies, centimeter and millimeter waves, dielectric perittivity, absorption coefficient, aqueous solutions and mixtures, hydrocarbon mixtures, water content monitoring, waveguide-dielectric resonance, waveguide chamber, liposome suspension

3(538).indd 92 19.11.2018 14:34:01

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение характеристик диэлектрических материалов используется в различных отраслях науки и промышленности. Высокая чувствительность микроволновой диэлектрометрии к содержанию воды и отношению количества свободной и связанной воды в биологических жидкостях и растворах стимулировала исследования комплексной диэлектрической проницаемости различных жидких сред организма. Литературные данные свидетельствуют о связи функционального состояния биологических жидкостей с их диэлектрическими характеристиками в микроволновом диапазоне электромагнитных излучений (ЭМИ). Изменения диэлектрической проницаемости в этом диапазоне частот исследователи пытались объяснить перестройкой структуры воды, следствием которой является увеличение времени дипольной релаксации молекул воды [1]. Так, в частности, изменение мнимой части диэлектрической проницаемости клеточной суспензии крови при низкотемпературном гемолизе эритроцитов может быть объяснено структурными свойствами воды в примембранном слое клеток. Образование холестериновых камней в пузырной желчи также сопровождалось изменением диэлектрических характеристик желчи в КВЧ-диапазоне, что, по мнению авторов работы [2], предопределено структурными перестройками воды в дисперсионной среде биоколлоида.

В нефтегазовой промышленности контроль содержания воды в нефтегазоконденсатных продуктах необходим при их транспортировке, на различных стадиях технологического процесса переработки, а также при сертификации готовой продукции. Превышение допустимого содержания воды в этих продуктах приводит к существенному росту транспортных затрат не только за счет увеличения количества перекачиваемой смеси, но и за счет увеличения вязкости. Водный компонент, содержащийся в нефтепродуктах, разрушающе действует на трубопроводы и технологическое оборудование перерабатывающих заводов, способствует снижению товарного качества продукции.

Наряду с изучением и разработкой новых деэмульгаторов, конструкций сепараторов для разделения фаз продукции скважин и других методов, все более важное значение приобретает необходимость достаточно точной и оперативной акваметрии в газонефтяной жидкости. Анализ результатов многочисленных попыток решить эту проблему в течение последних десятилетий показывает, что процесс поиска все еще далек до своего завершения. Таким образом, актуальность задачи точного и оперативного контроля содержания воды в нефтепродуктах и на сегодняшний день очевидна.

В работе представлены разработки новых датчиков определения диэлектрических характеристик биологических сред, а также влажности в нефтяных и газоконденсатных продуктах с целью повышения чувствительности и технологичности измерительных методик. Начало этих работ было положено в АО «НПП «Исток» им. Шокина» под руководством академика Н. Д. Девяткова [3].

В зависимости от частотного диапазона ЭМИ, рассматриваемый объект может иметь несколько диэлектрических механизмов, которые вносят вклад в его комплексную диэлектрическую проницаемость. Ориентация диполей и ионная проводимость материала сильно взаимодействуют с электрическим полем в микроволновом диапазоне. Электрическое поле вызывает поворот молекул воды таким образом, чтобы их дипольные моменты ориентировались по направлению поля. Этому препятствует тепловое движение и взаимодействие соседних молекул. В результате появляется сдвиг фазы поляризации среды относительно поля, что и определяет диэлектрические потери [4]. В мм- и субмм-диапазонах длин волн диэлектрические харак-

3(538).indd 93 19.11.2018 14:34:01

теристики воды (γ-дисперсия) удовлетворительно описываются уравнениями Дебая [5]. Экспериментально установленные значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения для воды в данной области длин волн составляют 20…25 дБ/мм.

Диэлектрические свойства растворов солей физиологических концентраций в мм-диапазоне длин волн тождественны свойствам воды с точностью до небольшой поправки на величину ионной проводимости. Только при концентрации растворенного вещества выше 0,5 М (моль/л) наблюдается изменение коэффициента поглощения раствора по сравнению с чистой водой. На измерении этой разницы основано использование мм-спектроскопии для исследования гидратации различных веществ, а также межмолекулярных взаимодействий [3].

В таких исследованиях обычно используются устройства, основанные на принципе традиционных резонансных методов, которые состоят в сравнении резонансной частоты и добротности резонатора, измеренных сначала без исследуемого образца, а затем с образцом, помещенным в полость резонатора [6]. Основным ограничением, которым приходится руководствоваться при выборе конструкции и размеров резонатора, а также способа введения диэлектрического образца в резонатор, является условие квазистационарности. При нарушении условий квазистационарности размеры системы могут оказаться сравнимыми с длиной волны электромагнитного излучения и учет «полезного» сигнала на фоне «паразитных» параметров может оказаться невозможным.

В таких случаях обычно пользуются методом малых возмущений [7], который дает возможность установить связь между мощностью, поглощаемой внутри полости резонатора, и энергией, поступающей в эту полость в единицу времени.

Следует отметить, что волноводные кюветы в виде диэлектрической трубки, заполненной жидкостью и помещенной в центре прямоугольного волновода перпендикулярно его широким стенкам, довольно часто использовались при химических анализах [8–9], а также в биофизических исследованиях [10–11]. Такая система проста в изготовлении, удобна в эксплуатации и обеспечивает эффективное взаимодействие объекта с СВЧ-излучением, так как трубка с жидкостью располагаются в области максимального электрического поля низшего типа волны H_{01} в волноводе.

Сразу следует оговориться, что исходная измерительная система с пустым капилляром не обладает резонансными свойствами, а резонанс возникает только в присутствии исследуемого образца. Эта особенность рассматриваемого волноводного резонатора и определяет высокую чувствительность параметров регистрируемого резонанса к диэлектрическим свойствам образца.

Предложенная в АО «НПП «Исток» им. Шокина» Е. В. Беляковым конструкция резонансной измерительной камеры [12] отличается возможностью перестройки и подбора оптимальной связи резонатора с волноводным трактом. Широкие стенки волновода раздвигают два цилиндрических поршня, через осевые отверстия которых проходит капиллярная трубка, изготовленная из радиопрозрачного диэлектрика. Положения поршней регулируются по высоте в резонаторной камере с помощью винтового механизма перемещения.

Настройка резонанса на максимальную добротность для измеряемой жидкости осуществляется последовательно верхним и нижним поршнем, которые отличаются по диаметру. Чувствительность настроенного таким образом резонатора к изменению диэлектрических параметров жидкости достаточно высока, что позволяет его использовать в простых микроволновых схемах регистрации прошедшего сигнала.

3(538).indd 94 19.11.2018 14:34:01

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Микроволновое облучение образцов выполнялось на установках на основе панорамных измерителей Р2-66 (ГКЧ) и Р2-65 (ГКЧ) и индикаторного измерителя КСВН и ослабления Я2Р-67. В работе исследовались водные растворы гомологического ряда алифатических спиртов, а именно: метанола и этанола в диапазоне небольших концентраций их соединений с водой, а также водных смесей представителя двухатомных спиртов – диэтиленгликоля.

Для приготовления растворов использовали бидистиллированную воду. Спирты, очищенные многократной перегонкой, высушивали над окисью кальция и далее молекулярными ситами 4А.

Для приготовления смесей с заданным содержанием влаги использовались сосуды из гидрофобного материала (полиэтилен), имеющие форму конуса, во избежание разбрызгивания материала при работе механической мешалки. Мешалка была выполнена на базе двигателя постоянного тока ДПР-32, развивающего скорость вращения до 10 000 об/мин. В наших опытах скорость вращения составляла 6500 об/мин, в соответствии с методическими указаниями [13]. Объемная концентрация влаги рассчитывалась по формуле $W = [V_1/(V_1 + V_2)]\cdot 100$ %, где V_1 – объем воды в смеси; V_2 – объем второй компоненты.

Липосомы в наших экспериментах формировались по методу Бенгхема [14] из синтетического или яичного лецитина, а также из дипальмитоиллецитина (ДПЛ) в различных солевых растворах или в дистиллированной воде. Суспензию нагревали и вводили без пузырьков воздуха в тонкие полиэтиленовые капилляры длиной 2…3 см и внутренним диаметром, не превышающим 0,5 мм. Капилляр с суспензией вводился дополнительно в трубочку из полиэтилена, предварительно вставленную в секцию волноводного тракта через отверстия в широких стенках волновода. Пространство между стенками трубочки и капилляра можно было продувать с помощью компрессора воздухом, нагретым до различных температур.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью волноводного резонансного устройства [12] выполняется следующим образом. В радиопрозрачный капилляр, пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода, наливается исследуемая жидкость. Затем с помощью подвижных поршней добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в бинарной или же многокомпонентной исследуемой жидкости, связанное с изменением величины диэлектрической проницаемости. Более высокая чувствительность измерений наблюдается при измерениях уровня сигнала на склоне резонансной кривой. В этом случае оценивается смещение пика резонансной кривой по шкале частот, что повышает чувствительность измеряемого параметра жидкости, связанное также с изменением величины диэлектрической проницаемости.

Перемещение поршней перпендикулярно плоскости широкой стенки волновода осуществляется с помощью регулировочных винтов. Несмотря на высокие технические характеристики устройства, его работа отличалась крайней нестабильностью, связанной с механической неустойчивостью элементов конструкции, что приводило к нестабильности результатов измерения амплитуды резонансной кривой отраженного СВЧ-сигнала.

3(538).indd 95 19.11.2018 14:34:01

Дальнейшее ознакомление с техническим исполнением устройства [12] показало необходимость его всесторонней доработки для наших конкретных задач.

Модернизация конструкции измерительного устройства была выполнена в соответствии с данными нашего патента на изобретение [15]. Экспериментальная проверка новой конструкции показала стабильную работу устройства, устойчивость работы механического привода поршней и удобство его эксплуатации.

На первом этапе нашей работы мы проводили измерения на водно-спиртовых растворах различных концентраций (рис. 1, 2). При этом мы учитывали данные о разрушающем действии этанола и метанола на кластерную структуру воды, в результате чего образуются водно-спиртовые ассоциаты. Такая модель часто используется для изучения механизма связывания воды [16]. Появление в воде частиц растворенного вещества и образование гидратных комплексов приводит к изменению как колебательно-вращательных уровней молекул ближайшего окружения, так и количества водородных связей. Растворенное вещество индуцирует изменение частот межмолекулярных колебаний (либраций) молекул растворителя, входящих в непосредственное окружение сольватированной частицы, и изменяет плотность водородных связей в растворителе, модифицируя его структуру. Увеличение температуры дает небольшой вклад в колебательную составляющую структурно-термодинамической характеристики гидратации. В случае заряженных частиц сольватация может рассматриваться как наложение, по меньшей мере, двух процессов. В ионном поле происходит возрастание либрационных частот молекул растворителя. Это приводит к увеличению прочности сольватных комплексов. Вместе с тем внедрение ионов в *H*-связанный растворитель сопровождается существенным нарушением его структуры. Таким образом, при сольватации ионов имеет место конкуренция колебательной и конфигурационной составляющих [16].

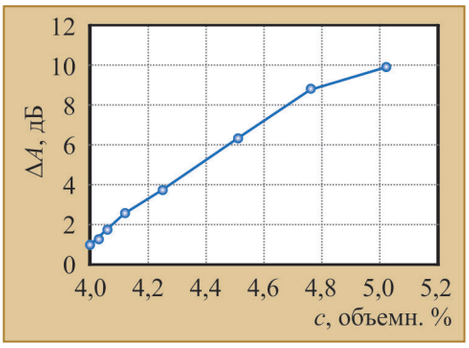


Рис. 1. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 33,7 ГГц от концентрации воды в этаноле

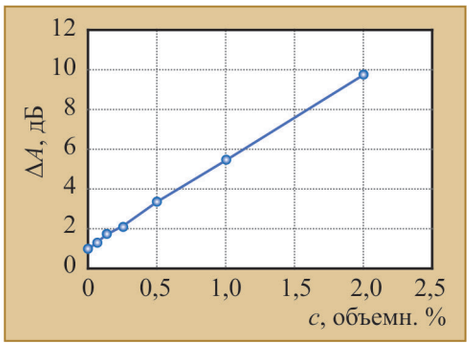


Рис. 2. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,7 ГГц от концентрации воды в метаноле

В работе предлагаются также экспериментальные результаты измерения поглощения микроволнового излучения в водных растворах диэтиленгликоля, водно-нефтяном растворе в нефти и образцах воды в нефти (рис. 3…5).

Неожиданным обстоятельством, с которым нам пришлось столкнуться в процессе экспериментальной работы, было то, что даже при минимальном уровне мощности генератора СВЧ-сигнала 0,1 мВт, обеспечивающего устойчивую работу устройства, мы наблюдали существенное

3(538).indd 96 19.11.2018 14:34:01

изменение амплитуды резонанса в зависимости от продолжительности облучения, свидетельствующее о микроволновом нагреве исследуемого экспериментального образца водного раствора.

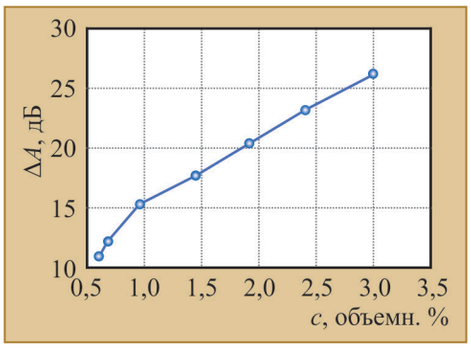


Рис. 3. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,3 ГГц от концентрации воды в диэтиленгликоле

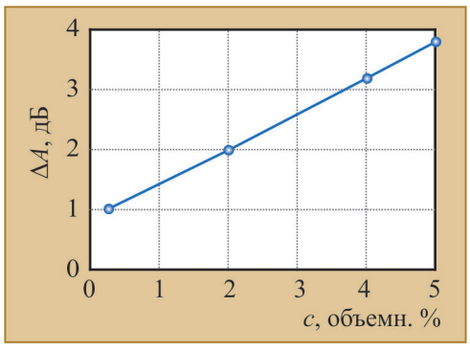


Рис. 4. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 20,4 ГГц от концентрации водно-метанольного 50%-ного раствора в нефти

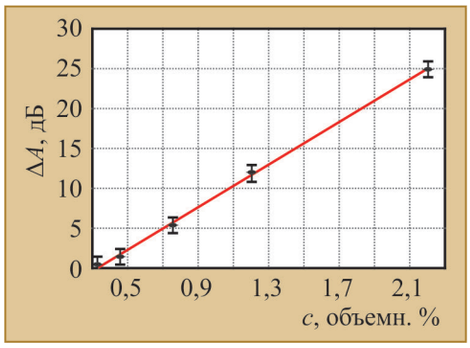


Рис. 5. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 20,4 ГГц от концентрации воды в нефти

Изменение амплитуды резонанса при микроволновом облучении образца в течение нескольких минут достигало в некоторых случаях 9 дБ, что говорит о недопустимой погрешности измерений. Такая ситуация указывает на необходимость надежного термостатирования измерительной резонаторной кюветы в процессе измерений. Обеспечить условия термостатирования в данных условиях довольно сложно из-за того, что облучаемая часть диэлектрической трубки, в которой находится исследуемый раствор, расположена внутри полого волновода. В случае «проточной» измерительной кюветы такого нагрева не наблюдается, так как движущаяся жидкость в диэлектрической трубке не успевает нагреться в зоне СВЧ-облучения.

Однако для дорогостоящих биологических препаратов такой «проточный» режим работы измерительной ячейки неприемлем из-за непомерно высоких материальных затрат на проведение эксперимента.

Удачное решение данной проблемы мы подчерпнули из опыта специалистов нефтяной ком-

3(538).indd 97 19.11.2018 14:34:02

пании «British Petroleum Co LTD», которые предложили определять диэлектрические характеристики углеводородных смесей с водой следующим способом [17].

Учитывая высокий уровень поглощения водой СВЧ-излучения, авторы данной работы предлагают в анализируемой водной многокомпонентной смеси измерять повышение температуры контролируемого объекта при его СВЧ-облучении, которое пропорционально концентрации воды в объекте (например, в сырой нефти).

Температурная зависимость диэлектрических свойств воды и водных смесей хорошо изучена в диапазоне от низких частот до мм-волн [18, 19].

Следует отметить недостаток метода, связанный с необходимостью экранировки термопары при СВЧ-облучении, а также влияние самих термопар на температуру объекта в капиллярной трубке, что не может не сказаться на точности измерений.

Мы же решили заменить в данном способе сложную процедуру измерения температуры анализируемого образца на регистрацию изменения его коэффициента поглощения СВЧ-излучения при нагревании за фиксированный промежуток времени.

Предложенный, таким образом, новый способ измерения диэлектрических характеристик водных растворов [20], хотя и несколько уступает по чувствительности прежнему способу измерений с помощью волноводной резонаторной камеры, но зато свободен от необходимости термостатировать измерительную ячейку, что не всегда представляется возможным. По сравнению же со способом, предложенным «British Petroleum Co LTD», наш подход отличают простота измерительной установки, процедуры измерений и отсутствие влияния датчиков измерителя температуры на контролируемый объект. В связи с тем что расчетные количественные соотношения между параметрами резонанса и диэлектрическими параметрами образца установлены с большим приближением, для определения последних удобно пользоваться методом сравнения, калибруя измерительную систему по эталонным растворам.

Как видно из рис. 6, изменение концентрации воды в смеси на 1 % приводит, по нашим предварительным данным, к изменению поглощения СВЧ-сигнала приблизительно на 2 дБ. Это позволяет даже при довольно невысокой стабильности амплитудных и частотных характеристик используемых нами серийных панорамных измерительных установок измерять концентрацию воды с необходимой точностью. Следует отметить, что данная методика была нами опробована для небольших изменений содержания воды в углеводородных смесях, около 1…7 %, так как

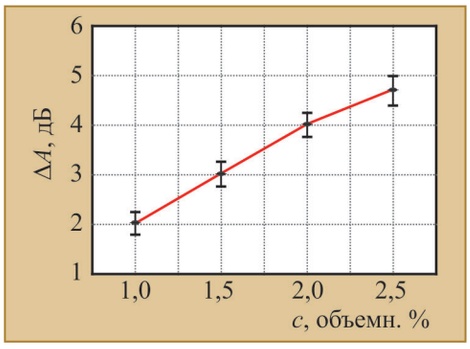


Рис. 6. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,7 ГГц от концентрации воды в диэтиленгликоле при нагревании образца микроволновым излучением в течение двух минут

3(538).indd 98 19.11.2018 14:34:02

в этом случае наблюдается близкая к линейной зависимость изменения амплитуды СВЧ-сигнала от концентрации раствора.

Дальнейшее усовершенствование конструкции волноводно-диэлектрического резонатора осуществлялось с целью уменьшения искажения формы резонансной кривой отраженного СВЧ-сигнала за счет улучшения контакта контролируемой жидкости, помещенной в диэлектрический капилляр, с волноводным измерительным устройством, что должно приводить к повышению точности и чувствительности измерений.

Достигается это тем, что волноводное устройство [21] выполняется разъемным. Прилегающая к фланцу волноводного тракта вставка содержит резьбовое гнездо для емкостного штыря, который представляет собой цилиндрический проводник, установленный по направлению силовых линий напряженности электрического поля E и соединенный одним концом с широкой стенкой волновода. При некоторой длине штыря, близкой к $\lambda_0/4$, проводимость последовательного контура обращается в бесконечность и волновод закорачивается. Между вставкой и фланцем волновода имеется неглубокая канавка, вдоль которой может перемещаться полоска тонкого металла в виде резонансной (индуктивно-емкостной) диафрагмы. Размеры и расположение диафрагмы выбираются таким образом, чтобы в волноводном устройстве получить взаимное уничтожение волн, отраженных от конца волновода и от диафрагмы. Волноводная вставка содержит сквозное отверстие для диэлектрической трубки, в которую заливается измеряемая жидкость. Гладкая пластина закрывает сквозное отверстие волновода и является короткозамыкателем тракта. С помощью перемещения тонкой диафрагмы, а также емкостного штыря добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в исследуемой жидкости, связанное с изменением величины диэлектрической проницаемости. Таким образом, предложены регулировочные элементы, совместное действие которых обеспечивает максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и стабильность результатов измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости [21].

Предлагаемое техническое решение позволяет использовать регулировочные элементы. Кроме того, упрощается конструкция устройства за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, уменьшаются габариты устройства и его масса в несколько раз и, следовательно, должна снижаться себестоимость измерительного узла.

В опытах с модельными биологическими объектами – суспензией липосом в капилляре, размещенном в нашей волноводно-резонаторной камере, было обнаружено, что капилляр с суспензией липосом поглощает микроволновое излучение гораздо сильнее, чем с суспензией эритроцитов. Эффект возрастал с увеличением концентрации липосом в суспензии. В экспериментах с липосомами из дипальмитоиллецитина (ДПЛ) наблюдался отчетливый излом кривой поглощения при мощности 40…50 мВт (рис. 7). Пропускание микроволнового сигнала измерялось в двух точках кинетической кривой: P_0 – исходной, т. е. непосредственно после включения мощности в волноводном тракте, и $P_{ст}$ – стационарной, после завершения переходного процесса и установления стационарного значения проходящего СВЧ-сигнала через диэлектрический капилляр в волноводном тракте. Все эксперименты с суспензией липосом были выполнены на частоте 35, 3 ГГц.

3(538).indd 99 19.11.2018 14:34:02

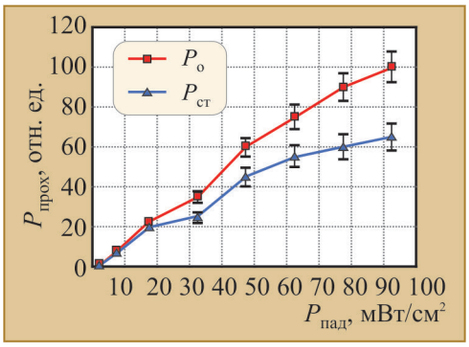


Рис. 7. Зависимость величины прошедшей мощности микроволнового излучения (исходного P_0 и стационарного $P_{ст}$) через капилляр с суспензией липосом из ДПЛ (40 мг/мл) от мощности падающего излучения на частоте 35,3 ГГц

Можно предположить, что после включения микроволновой мощности суспензия липосом нагревается, а излом на зависимости поглощения сигнала от мощности в случае капилляров с ДПЛ связан с термотропным структурным переходом гель – жидкий кристалл, т. е. с плавлением мембран при температуре фазового перехода 42 °С. Контрольные опыты по обдуванию капилляра горячим воздухом (50…60 °С) подтвердили, что поглощение микроволнового сигнала в нашей измерительной ячейке растет при повышении температуры объекта независимо от способа его нагревания.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы по изучению поглощения микроволнового излучения углеводородными смесями и моделями биологических объектов в водных средах созданы новые конструкции измерительных устройств и разработана методика акваметрии углеводородов. Созданная продукция защищена авторами данной работы тремя патентами на изобретения, а результаты исследований доложены на международных конференциях в 2015 и 2017 гг. [22–23].

Методика определения диэлектрических характеристик водных растворов и суспензий, основанная на температурной зависимости коэффициента поглощения водных растворов, с помощью одной из модификаций волноводно-диэлектрического резонансного метода позволила расширить возможности данного метода для некоторых его применений.

Конструктивная модернизация резонансной измерительной камеры, выполненная в процессе экспериментальной работы, дала возможность обеспечить максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и способствовала повышению чувствительности измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Кроме того, удалось (в случае беспоршневого устройства) упростить конструкцию измерительного узла за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, значительно уменьшились габаритные размеры и масса устройства и, следовательно, снизилась его себестоимость.

Полученные экспериментальные результаты с помощью микроволнового облучения моделей мембранных биологических систем в капилляре позволяют судить о фазовых переходах в биологических мембранах при воздействии микроволнового облучения как о возможном механизме восприимчивости биообъектов к данному виду излучения. Кроме того, была обнаружена

3(538).indd 100 19.11.2018 14:34:02

возможность регистрации структурных фазовых переходов в липосомах по изменению величины поглощения микроволнового сигнала в капиллярной диэлектрической трубке, что должно представлять интерес для исследователей механизмов биологического действия микроволнового излучения, а также специалистов по микроволновой спектроскопии. Неинвазивные или неинтрузивные методы онлайн анализа должны найти применение в таких отраслях, как фармакология, биотехнология и производство пищевых продуктов, где стерильность и целостность контролируемого образца имеют приоритетное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абросимов, В. К.** Достижения и проблемы теории сольватации: структурно-термодинамические аспекты / В. К. Абросимов, А. Г. Крестов, Г. А. Альпер и др. – М.: Наука, 1998. – 247 с.

2. **Кузнецов, А. Н.** КВЧ-диэлектрометрия биологических жидкостей в условиях нарушенного водного обмена / А. Н. Кузнецов, И. И. Турковский, И. А. Волкова // Биофизика. – 2001. – Т. 46, вып. 6. – С. 1122 – 1126.

3. **Девятков, Н. Д.** // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, № 9. – С. 1882 – 1890.

4. **Pathig, R.** Dielectric and electronic properties of biological materials / R. Pathig. – Chichester: Jonn Wiley & Sons, 1979. – 279 p.

5. **Аксенов, С. И.** Вода и ее роль в регуляции биологических процессов / С. И. Аксенов. – М.: Наука, 1990. – 117 с.

6. **Брандт, А. А.** Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 403 с.

7. **Гвоздовер, С. Д.** Теория электронных приборов сверхвысоких частот / С. Д. Гвоздовер. – М.: Гостехиздат, 1956. – 527 с.

8. **Храпко, А. М.** Волноводные и квазиоптические устройства для измерения поглощения СВЧ-излучения в органических жидкостях / А. М. Храпко, В. И. Гайдук, Г. Ф. Бакаушина и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1976. – Вып. 10. – С. 69 – 78.

9. **Мухтаров, Р. Г.** Волноводные измерительные ячейки для СВЧ-влагомеров жидких материалов / Р. Г. Мухтаров // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 7 (441). – С. 45 – 48.

10. **А. с. 1101750 СССР, МКИ G 01 P 21/04.** Способ измерения мощности СВЧ-излучения / О. В. Бецкий, К. Д. Казаринов, А. В. Путвинский и др. – Опубл. 1984, Бюл. № 25. – С. 120.

11. **Ольшанский, Д. И.** Тепловые эффекты при измерении поглощения водой КВЧ-излучения / Д. И. Ольшанский, Ю. А. Любимов, Ю. И. Хургин // Миллиметровые волны в медицине и биологии: сб. докладов. – М.: ИРЭ РАН, 1995. – С. 217 – 218.

12. **Беляков, Е. В.** Перестраиваемый СВЧ-резонатор для измерения поглощающих жидкостей / Е. В. Беляков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 10 (424). – С. 59 – 61.

13. Методические указания № 332 по приготовлению и аттестации образцовых искусственных проб (эмульсий) для проверки и градуировки влагомеров для нефти. – М.: Издательство стандартов, 1974.

14. **Bangham, A. D.** The liposome as a membrane model. Permeability and function of biological membranes / A. D. Bangham; ed. by Bolised et al. – Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1970. – P. 195 – 206.

15. **Пат. 2614047 РФ.** Перестраиваемая волноводно-диэлектрическая камера для контроля жидкостей / К. Д. Казаринов, И. Г. Полников. – Опубл. 2017, Бюл. № 9.

16. **Абросимов, В. К.** Достижения и проблемы теории сольватации: структурно-термодинамические аспекты / В. К. Абросимов, А. Г. Крестов, Г. А. Альпер и др. – М.: Наука, 1998. – 247 с.

17. BP (British Petroleum). Measurement of water content of liquids using microwave. – Claim. 24. 03. 1980, GB 7910431. G1N Int Cl (G01N22/04).

18. **Chamberlain, J. E.** Submillimetre absorption and dispersion of liquid water / Chamberlain J. E. et al. // Nature / J. E. Chamberlain. – 1966. – Vol. 210. – No 5038. – P. 1003.

3(538).indd 101 19.11.2018 14:34:02

19. **Сусляев, В. И.** Температурные зависимости спектров диэлектрической проницаемости водных смесей метилового спирта в области диэлектрической релаксации / В. И. Сусляев, Т. Д. Кочеткова // Вестник ТГУ. – 2003. – Т. 278. – С. 73 – 75.

20. **Пат. 2631340 РФ.** Способ измерения концентрации водных растворов / К. Д. Казаринов, И. Г. Полников. – Опубл. 2017, Бюл. № 27.

21. **Пат. 2655028 РФ.** Волноводное устройство для измерения параметров жидкостей / К. Д. Казаринов, Е. А. Тихонова, В. С. Солосин. – Опубл. 2018. Бюл. № 15.

22. **Казаринов, К. Д.** Волноводно-диэлектрический метод для исследований сильно поглощающих жидкостей в микроволновом диапазоне / К. Д. Казаринов, М. В. Городецкая, И. Г. Полников // Научные труды VII Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». Санкт-Петербург, 2015. – С. 53.

23. **Казаринов, К. Д.** Использование ЭМИ микроволнового диапазона для измерения параметров жидкостей / К. Д. Казаринов, Е. А. Тихонова, В. С. Солосин // I Всероссийская конференция с международным участием «Физика и экология электромагнитных излучений». п. Агой, Краснодарский край. 25 – 30 сентября 2017 г.: Научные труды конференции. – Т. 1. – С. 29.

Статья поступила 29 июня 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ЧЕКАДАНОВА М. В. **Исследование путей обеспечения инновационного развития высокотехнологичных производств радиоэлектронной промышленности.** – М.: ИД «МЕДПРАКТИКА-М», 2018. – 308 с.: ил.

Предлагаемая вниманию читателя книга основывается на идее о том, что обеспечить инновационное развитие промышленности невозможно путем того или иного локального решения. Требуется комплекс тщательно продуманных действий, как в привычных, так и новых сферах регулирования инноваций. Главная направленность этих действий состоит в формировании условий для заинтересованности промышленности создавать новую технику, технологии и использовать современные организационные решения, определяемые как экзогенными по отношению к основному звену факторами, так и внутренними мотивами, которыми руководствуется бизнес в своей текущей работе.

Проведенный масштабный анализ состояния инновационной системы позволил автору предложить комплекс взвешенных решений, которые в случае их реализации реально способны поднять инновационную активность российских промышленных предприятий на уровень, достойный имеющегося научно-технического и ресурсного потенциала страны. Особое внимание в работе уделено относительно новой для отечественной экономики категории секторально-территориальных инновационных кластеров, формируемых в рамках законодательства об особых экономических зонах.

Книга будет полезна сотрудникам администрации управляющих компаний инновационных кластеров, студентам, изучающим проблемы региональной экономики и управления инновациями, а также научным работникам, специализирующимся на вопросах инновационного развития.

3(538).indd 102 19.11.2018 14:34:02

ЭКОНОМИКА

УДК 338.242

СТАРТОВЫЕ УСЛОВИЯ И ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КЛАСТЕРА НА БАЗЕ ОЭЗ «ИСТОК»

М. В. Чекаданова

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

Раскрыты кластерные инициативы научно-производственного комплекса г. Фрязино с 2000 г., описан механизм, выделены стартовые условия и цели создания инновационно-территориального кластера на базе ОЭЗ «Исток».

КС: стартовые условия, цели, инновационно-территориальный радиоэлектронный кластер

THE STARTING CONDITIONS AND THE OBJECTIVES OF CREATING THE INNOVATIVE TERRITORIAL RADIOELECTRONIC CLUSTER ON THE BASIS OF SEZ «ISTOK»

M. V. Chekadanova

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

The article reveals cluster initiatives of Fryazino research and production complex since 2000, describes the mechanism, highlights the starting conditions and objectives of the creation of innovation and territorial cluster on the basis of the SEZ «Istok».

Keywords: starting conditions, objectives, innovation and territorial radioelectronic cluster

Проведенное автором исследование [1–3] дало основание полагать, что в российской и зарубежной теории и практике организации и управления инновационным процессом можно вычленить рациональную траекторию поведения, способную в наших условиях обеспечить действительное инновационное развитие приоритетных областей национального хозяйства. Речь идет о комбинации возможностей, предоставляемых отечественным законодательством об особых экономических зонах технико-внедренческого типа (ОЭЗ ТВТ) [4] и мировым опытом построения инновационных кластеров в высокотехнологичных секторах экономики. В частности, для всех резидентов ОЭЗ ТВТ формируются одинаковые исходные рамочные условия, делающие их сложный рискованный наукоемкий бизнес более привлекательным, нежели за ее пределами, но при этом остается открытым вопрос о лидерстве в условиях свободной конкуренции участников данного территориально-отраслевого образования.

Участники научно-производственного комплекса (НПК) наукограда Фрязино неоднократно предпринимали инициативы воспользоваться преимуществами современных способов объединения участников инновационного процесса, предоставляемого теорией и практикой создания

3(538).indd 103 19.11.2018 14:34:02

высокотехнологичных кластеров. Можно отметить блестящие примеры крайне удачных инновационных «спин-оф» в лице ООО НТО «ИРЭ-Полюс», развившегося в транснациональную корпорацию, созданного в свое время без какой-либо бюджетной поддержки и в отсутствие даже признаков инновационной инфраструктуры; ГК «Исток-Аудио»; ООО «Магратеп»; ЗАО «НПП «Исток-Система». Также следует отметить, что предприятия НПК Фрязино производят продукцию по пяти из восьми утвержденных указом Президента РФ [5] приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники в РФ, основывающимся на восьми из двадцати семи базовых критических технологиях [6].

По мере относительной стабилизации экономической и политической ситуации в стране начиная с 2000-х, формирования институтов и элементов национальной инновационной системы, появления инструментов государственной поддержки научно-технического развития, предприятия и организации НПК города, его администрация начали поиск организационных решений для привлечения дополнительных ресурсов в развитие научных исследований и разработок, а также производство инновационной продукции. Причем, в первую очередь, как это до настоящего времени свойственно нашей экономике, – бюджетных ресурсов. В частности, высокая концентрация научно-производственного потенциала в городе послужила основанием для присвоения ему указом Президента РФ от 29 декабря 2003 года № 1531 [7] статуса наукограда на период до 31 декабря 2027 г. Согласно Закону о наукоградах, бюджетам субъектов РФ, на территории которых располагаются наукограды, выделяются межбюджетные трансферты из федерального бюджета для предоставления их в свою очередь местным бюджетам.

Второе решение касалось создания на территории города инновационного кластера. В 2012 г. по итогам конкурсного отбора программ развития инновационных территориальных кластеров (ИТК) поручением Председателя Правительства РФ от 28 августа 2012 г. № ДМ-П8-5060 был утвержден перечень пилотных ИТК. В него вошли 25 кластеров, которые были поделены на первую (14 кластеров) и вторую (11 кластеров) группы. В 2013–2014 гг. субъектам РФ предоставлялись субсидии из средств федерального бюджета на реализацию мероприятий, предусмотренных региональными программами развития кластеров. Отбор заявок на получение этих субсидий осуществляло Минэкономразвития России в рамках программы поддержки пилотных ИТК.

На базе организации взаимодействия двух ведущих предприятий города: АО «НПП «Исток» им. Шокина» и ООО НТО «ИРЭ-Полюс» – предполагалось выстраивание деятельности подобного кластера, в состав которого также были включены средние и малые инновационные предприятия, НИИ и вузы. Анализ материалов и документов по созданию и деятельности ИТК «Фрязино» позволяет заключить, что вопрос создания ИТК «Фрязино» был проработан весьма глубоко со свойственным научным работникам тщанием. Однако по состоянию на начало 2017 г. утвержденный перечень инновационных территориальных кластеров, которые могут претендовать на государственную поддержку, не был расширен и ИТК «Фрязино» в этот список не попал.

2017 году стал победителем конкурса проект Московской области по развитию «Объединенного инновационного кластера Московской области» – участник приоритетного проекта Минэкономразвития России «Развитие инновационных кластеров – лидеров инвестиционной привлекательности мирового уровня» [8], в который входит НПК Фрязино и в программу которого включены инициативы ИТК «Фрязино».

С позитивным результатом пока развиваются две кластерные инициативы Фрязино. Первая

3(538).indd 104 19.11.2018 14:34:02

из них – создание ОЭЗ ТВТ «Исток». Отметим, во-первых, что построение ОЭЗ ТВТ «Исток» происходит без привлечения прямых бюджетных инвестиций, то есть не создается новая структурная оболочка для трансляции средств бюджета в дополнительные доходы ее участников, а решаются практические задачи, связанные именно с предназначением особых экономических зон данного типа, которое состоит в «развитии обрабатывающих отраслей экономики, высокотехнологичных отраслей экономики, … разработке технологий и коммерциализации их результатов, производстве новых видов продукции» [4, ст. 3]. Во-вторых, ОЭЗ создана с участием только одного якорного предприятия наукограда – АО «НПП «Исток» им. Шокина». В ее состав не вошло ООО НТО «ИРЭ-Полюс», несмотря на его авторитет и интегрированность в мировую электронику. В-третьих, стратегия развития ОЭЗ предусматривает создание инновационной инфраструктуры и формирование полноценного СВЧ-кластера [9].

Вторая инициатива, получившая реальное воплощение в наукограде, – создание Промышленного кластера «Фрязино» в соответствии с «Требованиями к промышленным кластерам и специализированным организациям промышленных кластеров в целях применения к ним мер стимулирования деятельности в сфере промышленности» [10]. Согласно утвержденным документам, в состав кластера вошли 14 промышленных и научно-производственных предприятий из НПК города, а также четыре новых малых производственных предприятия: ООО «Прогрессивные технологии», ООО «НПК Фирма «ЭЛТАН», ООО «ТЭКСМА» и ООО «ТехИнвест-Сервис». На начальном этапе их главная задача состоит в реализации трех производственных проектов, ориентированных на импортозамещение.

Отметим проблемы, сдерживающие развитие промышленного кластера. Во-первых, согласно целевой установке постановления Правительства РФ о промышленных кластерах [10], научным организациям НПК наукограда отведена роль участников его инфраструктуры, что противоречит общемировой практике формирования кластеров и снижает инновационный потенциал реализуемого замысла.[1] Возможно, в том числе именно этим обстоятельством объясняется отсутствие в числе резидентов промышленного кластера ООО НТО «ИРЭ-Полюс» – одного из мировых лидеров лазеростроения. Во-вторых, заложенная в указанном постановлении идея государственной финансовой поддержки выстраивания замкнутой производственной цепочки для выпуска конечной продукции в пределах ограниченной территории вряд ли является конструктивной в случае с наукоградом Фрязино. Учитывая, что сегодня практически вся научно-техническая продукция АО «НПП «Исток» им. Шокина» предназначена для нужд ОПК, а также сложившуюся кооперацию в отрасли, усилий малых и средних предприятий (МСП), включенных в кластер, окажется достаточно для освоения лишь долей процента потенциала его якорного предприятия. Соответственно «освоение» бюджетных средств (субсидий Минпромторга по данной программе) будет идти на реализацию проектов, отличных от проектов якорного участника, с приоритетным участием МСП.

В-третьих, при существующем составе промышленного кластера, регламентированном постановлением Правительства РФ [10], достичь цели его развития, которая формулируется как: «… формирование и развитие на территории Московской области глобального конкурентоспо-

[1] Следует также заметить, что в бессрочном пользовании у ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», филиал которого находится во Фрязине и который не включен в число участников промышленного кластера, находится 64 Га свободного земельного участка – главного ресурса, критически необходимого для самого существования и дальнейшего развития кластера.

3(538).indd 105 19.11.2018 14:34:02

собного промышленного центра в области разработки и производства отечественной электронной компонентной базы, а также устройств и систем на их основе» [11], невозможно. Это связано с тем, что решение более половины задач, поставленных в Программе промышленного кластера, невозможно без участия в составе его участников научных организаций города, вузов, а также использования потенциала ОЭЗ ТВТ «Исток», предполагающего ее полноценную роль в кластере, но уже имеющем иной – инновационно-секторальный – статус и функционирующем на основе иной бизнес-модели.

Созданный в городе промышленный кластер, как показало исследование, не обладает всеми достаточными атрибутами, свойственными успешным зарубежным аналогам в радиоэлектронике, и обречен на стагнацию. Особая экономическая зона технико-внедренческого типа «Исток», хотя и создает необходимые предпосылки для решения данной задачи, во многом ограничена рамками специального законодательства об ОЭЗ. Как показал анализ, выходом из создавшегося положения может служить разработка новой бизнес-модели инновационного территориального радиоэлектронного СВЧ-кластера (ИТРК), основанной на теоретических положениях работ [1–3] и объединяющей в себе возможности, которые предоставляет ОЭЗ, с передовыми решениями в области кластерного развития. Рекомендуемый механизм создания кластера в этом случае будет включать в себя:

– конкретизацию выбора целевой установки создания кластера, состоящей в создании организационно-экономических условий для обеспечения инновационной деятельности его участников;

– объединение в рамках кластера на равноправных началах представителей науки, высшей школы и промышленности, сопровождаемое развитием инновационной инфраструктуры;

– приобретение участниками кластера статуса резидентов ОЭЗ ТВТ «Исток» с принятием на себя обязательств реализации соответствующих инвестиционных программ и получением преференций, предусмотренных законодательством;

– использование потенциала созданных структур управления научно-производственным комплексом наукограда при формировании органов управления кластером;

– мобилизацию ресурсов, необходимых для формирования и развития кластера (таблица).

Состояние и перспективы ресурсной обеспеченности ИТРК[2]

Группа и наименование ресурса	Состояние обеспеченности ИТРК
1. Базовые (традиционные) ресурсы	
1.1. Трудовые	В городе существует дефицит квалифицированных специалистов. Между тем кластер реализует возможности для его компенсации за счет целевой подготовки в образовательных учреждениях города. Базовый вуз – Фрязинский филиал Московского технологического университета – входит в состав участников кластера
1.2. Материально-технические	Кластер располагает технопарковой зоной. Якорные участники обеспечены зданиями, сооружениями и оборудованием в соответствии с их текущими потребностями

[2] Составлена автором.

3(538).indd 106 19.11.2018 14:34:02

Продолжение таблицы

Группа и наименование ресурса	Состояние обеспеченности ИТРК
1.3. Ресурсы рекреации	Имеется резерв территории для развития кластера (неиспользуемый участок ИРЭ РАН – 64 Га)
1.4. Информационные	Обеспеченность в пределах нормы
1.5. Транспортно-логистические	Г. Фрязино расположен в 15 км от ЦКАД и 25 км от МКАД. Через город проходит Фряновское шоссе (Р110: Щелково – Фряново), а также автомагистраль – Щелковское шоссе (Р103). Железнодорожное сообщение обеспечивается по ветке Мытищи – Болшево – Фрязино. Имеются две станции – Фрязино-Товарная и Фрязино-Пассажирская. В 60 км от города находится аэропорт Шереметьево, в 80 км – Домодедово. В 60 км расположены Южный, Северный и Западный портовые комплексы г. Москвы
1.6. Финансовые	Участники кластера финансово устойчивы, располагают собственными средствами, принимают участие в реализации государственных, региональных и муниципальных программ
1.7. Энергетические	Обеспеченность в пределах нормы
1.8. Таможенного сопровождения	Создана зона таможенного контроля
2. Ресурсы, специфические для ИТРК	
2.1. Стимулирования инновационной деятельности	Обеспечены принадлежностью ключевых участников кластера к числу резидентов ОЭЗ «Исток»
2.2. «Выращивания» малого инновационного бизнеса	*В стадии формирования*
2.3. Венчурного финансирования	*В стадии формирования*
2.4. Упрощенного доступа к опытно-экспериментальной и испытательной базе	Создан центр коллективного пользования оборудованием на базе якорного резидента и предприятий города
2.5. Сокращения длительности цикла внедрения результатов НИОКР	*В стадии формирования*
2.6. Многоаспектного консалтинга	Частично обеспечиваются управляющей компанией. *Требуют дальнейшего развития*
2.7. Промышленного инжиниринга	*В стадии формирования*
2.8. Централизации снабженческо-сбытовой и презентационной работы	*В стадии формирования*
2.9. Упрощенного доступа к научному и специализированному производственному оборудованию	Создан центр коллективного пользования оборудованием на базе якорного резидента и предприятий города
2.10. Субконтрактации	*В стадии формирования*
2.11. Подтверждения соответствия (сертификации)	Развиты по отдельным позициям номенклатуры ТН ВЭД

3(538).indd 107 19.11.2018 14:34:03

Окончание таблицы

Группа и наименование ресурса	Состояние обеспеченности ИТРК
2.12. Удешевления приобретения машин, механизмов и оборудования (лизинг)	*В стадии формирования*
2.13. Образовательные	Обеспечиваются наличием в составе участников кластера Фрязинского филиала Московского технологического университета, а также размещением на предприятиях кластера базовых кафедр МИФИ и МФТИ
2.14. Административные	Обеспечиваются деятельностью управляющей компании кластера, контролируемой Минэкономразвития России и Минпромторга России, а также вхождением в наблюдательный совет кластера представителей администрации города
2.15. Организационные	Обеспечиваются использованием участниками кластера методической базы, разработанной в рамках исследований автора

Цель создания ИТРК состоит в формировании определенной комбинации разноплановых условий в целях развития инновационного бизнеса посредством создания организационно-технологических и ресурсных предпосылок для активизации разработки его резидентами наукоемкой технологии, продукции и услуг, востребованных рынком.

Система целей участников кластера имеет два уровня: первый – содержит цели, предполагающие достижение его участниками ориентиров, задаваемых императивами научно-технического развития и международной конкуренции. Цели этого уровня персонифицированы с участниками кластера, взаимодействующими с внешним рынком научно-технической продукции. Второй – цели создания условий, способствующих достижению участниками кластера указанных ориентиров. Достижение целей второго уровня обеспечивается инфраструктурой кластера. Учитывая, что кластерная политика реализуется с масштабным привлечением бюджетного финансирования, к деятельности кластеров со стороны органов государственного и регионального хозяйственного управления предъявляются требования, продиктованные интересами эффективного использования выделяемых ресурсов, а также программами развития потенциала территорий. Резиденты, управляющая компания, реализующая потенциал инфраструктуры кластера, а также иные его участники при наличии различных целей объединяют свои усилия для получения синергического эффекта в сфере специализации ИТРК.

Подводя итоги, дополнительно следует отметить ограниченность территории, занимаемой кластером, – сравнительно небольшой участок в пределах городской черты; отсутствие бюджетного финансирования создаваемой кластерной инфраструктуры и наличие мощных якорных предприятий. Подобная комбинация особенностей, с одной стороны, предъявила жесткие требования к процедуре создания ИТРК на базе ОЭЗ «Исток» в ходе развития НПК наукограда Фрязино, а с другой – обеспечила его построение в строгом соответствии с международной практикой и целевыми установками.

3(538).indd 108 19.11.2018 14:34:03

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чекаданова, М. В.** Бизнес-модель инновационно-территориального радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне / М. В. Чекаданова // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 72 – 78.

2. **Чекаданова, М. В.** Единые условия разработки и внедрения новых техники и технологий, привлекательные для участников инновационного процесса / М. В. Чекаданова // Научное обозрение. Сер. 1. Экономика и право. – 2017. – № 6. – С. 86 – 98.

3. **Чекаданова, М. В.** Анализ причин низкой инновационной активности в промышленности / М. В. Чекаданова, А. Д. Бобрышев // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. – 2018. – № 1. – С. 43 – 57.

4. **Российская Федерация. Законы.** Об особых экономических зонах в Российской Федерации: федер. закон РФ от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ (ред. на 03.07.2016).

5. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

6. Стратегия социально-экономического развития наукограда Фрязино до 2025 года. – Фрязино: Администрация городского округа Фрязино; Институт экономических стратегий РАН, 2016. – С. 5 – 6

7. О присвоении статуса наукограда Российской Федерации г. Фрязино Московской области: указ Президента РФ от 29 декабря 2003 г. № 1531.

8. О приоритетном проекте Минэкономразвития России «Развитие инновационных кластеров – лидеров инвестиционной привлекательности мирового уровня»: приказ Минэкономразвития России от 27 июня 2016 г. № 400.

9. Стратегия развития особой экономической зоны технико-внедренческого типа «Исток» (ОЭЗ ТВТ «Исток») на территории городского округа Фрязино Московской области. – Фрязино: УК ОЭЗ ТВТ «Исток», 2017. – С. 37 – 47.

10. О промышленных кластерах и специализированных организациях промышленных кластеров: постановление Правительства РФ от 31 июля 2015 г. № 779.

11. Программа развития Промышленного кластера «Фрязино»: утв. ген. дир. ООО «Управляющая компания инновационно-промышленного кластера «Фрязино» 16.02.2016. – С. 32.

Статья поступила 16 июля 2018 г

НОВЫЕ КНИГИ

БУРАК И. Ф., ГУСИНСКИЙ А. В., ШАРОВ Г. А., ВОРОШЕНЬ А. В., ЛУФЕРОВ А. Н. **Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн**. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2018. – 328 с.: ил.

Рассмотрены методы и приборы для измерения мощности в волноводных трактах сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. Основное внимание уделено калориметрическому, термоэлектрическому и болометрическому методам измерения СВЧ-мощности и соответствующим принципам и особенностям построения конструкции приемных преобразователей, используемых для реализации этих методов.

Затронуты вопросы автоматического регулирования в калориметрических ваттметрах. Рассмотрены источники погрешностей измерения СВЧ-мощности при различных методах измерения. Уделено внимание вопросам метрологического обеспечения и создания образцовых средств измерения мощности и эталонов в рассматриваемых диапазонах волн.

Для специалистов в области измерительной техники СВЧ. Будет полезна студентам вузов, обучающимся по радиотехническим, радиофизическим и инфокоммуникационным специальностям, аспирантам и преподавателям.

3(538).indd 109 19.11.2018 14:34:03

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.124

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В КУЛОНОВСКОМ ПОЛЕ ДВУХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко

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

Получены уравнения колебательного движения электрона в кулоновском поле двух положительных зарядов. Показано, что такая модель может послужить основой для создания электронного прибора.

КС: кулоновское поле, колебательное движение электрона, частота колебаний, электронный прибор

THE OSCILLATING MOTION OF AN ELECTRON IN THE COULOMB FIELD OF TWO POSITIVE CHARGES

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, I. A. Balyko

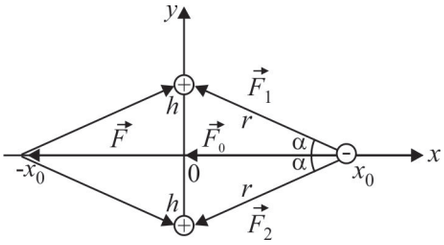
JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

Equations of the oscillating motion of an electron in the Coulomb field of two positive charges are obtained. It is shown that such a model can serve as a basis for creating an electronic device.

Keywords: Coulomb field, oscillating motion of an electron, oscillation frequency, electronic device

В работе [1] получены уравнения колебательного движения электрона вдоль силовых линий кулоновского поля одного положительного заряда и была предложена идеализированная физическая модель такого движения в атоме водорода. В настоящей работе исследуется колебательное движение электрона между двумя покоящимися частицами с положительными зарядами, например протонами. Такая модель, на наш взгляд, может послужить основой для создания электронного прибора.

Рассмотрим физическую картину протекающего процесса. Если две положительно заряженные частицы (протоны) покоятся, а отрицательно заряженная частица (электрон) вносится в их электрическое поле с нулевой скоростью на некотором расстоянии x_0 от линии, соединяющей две положительно заряженные частицы (рисунок), то, согласно закону Кулона, на электрон будет действовать результирующая сила в направлении, перпендикулярном этой соединяющей линии. При этом электрон начнет двигаться прямолинейно и ускоренно вдоль этого направления. Как и при любом ускоренном движении, скорость его будет нарастать и достигнет максимальной величины на линии, соединяющей



Отрицательный заряд в кулоновском поле двух частиц

3(538).indd 110 19.11.2018 14:34:03

положительные заряды. После пролета электрона между зарядами результирующая сила электрического взаимодействия становится уже тормозящей и электрон начинает замедлять движение вплоть до нулевой скорости в точке, симметрично противоположной начальной точке. Далее процесс движения повторяется уже в обратном направлении.

Рассмотрим математическую модель описанного процесса, при этом, поскольку скорость электрона может быть сравнимой со скоростью света, будем учитывать релятивистские эффекты. Уравнение движения электрона (второй закон Ньютона) имеет вид

$$m \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{u}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \right)_0 = -\frac{2r_0 c^2 x}{(x^2+h^2)^{\frac{3}{2}}}, \qquad (1)$$

где x – расстояние от электрона до соединяющей положительные заряды линии; $u = \frac{dx}{dt}$ – скорость электрона; h – расстояние от положительно заряженной частицы до линии движения электрона; m и e – масса покоя и заряд электрона; c – скорость света в вакууме; $r_0 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 c^2 m}$ – классический радиус электрона; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Поскольку $\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = u \cdot \frac{dQ}{dx}$, то уравнение (1) преобразуется к виду

$$u \cdot \frac{d}{dx}\left(\frac{u}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \right)_0 = -\frac{2r_0 c^2 x}{(x^2+h^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

После интегрирования этого уравнения получаем формулу

$$\frac{1}{\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} = -\frac{2r_0}{\left(x^2+h^2\right)^{\frac{1}{2}}} + C. \qquad (2)$$

Постоянная интегрирования C находится из начальных условий:

$$t = 0,\ u = 0,\ x = x_0. \qquad (3)$$

Подставляя C в уравнение (2), преобразуем его к виду

$$\frac{u^2}{c^2} = \frac{4r_0 H(x)[1+r_0 H(x)]}{1+4r_0 H(x)[1+r_0 H(x)]}, \qquad (4)$$

где $H(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2+h^2}} - \frac{1}{\sqrt{x_0^2+h^2}}$.

Оценим максимальную величину скорости $u(0)$ при прохождении электроном линии, соединяющей положительные заряды ($x = 0$), для случая $x_0 >> h$ и $h = r_0$. Поскольку $H(0) = \frac{1}{h} - \frac{1}{x_0 \cdot \sqrt{1+\left(\frac{h}{x_0}\right)^2}} \approx \frac{1}{h} - \frac{1}{x_0} \approx \frac{1}{r_0}$, то $u = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot c = 0{,}94 \cdot c$.

3(538).indd 111 19.11.2018 14:34:03

Обозначим: $a=\sqrt{x_0^2+h^2}$, $b=\dfrac{2r_0a}{a-2r_0}$, $d=\dfrac{r_0a}{a-r_0}$, $q=\dfrac{\sqrt{r_0(a-r_0)}}{a-2r_0}$, тогда из формулы (4) получим дифференциальное уравнение движения электрона между двумя положительно заряженными частицами (зависимость расстояния от времени $x(t)$):

$$\frac{dx}{dt}\cdot\frac{\sqrt{x^2+h^2}+b}{\sqrt{(a-\sqrt{x^2+h^2})(\sqrt{x^2+h^2}+d)}}=2cq. \tag{5}$$

Оценим время, за которое электрон достигает линии, соединяющей положительные заряды; оно равно четверти периода колебательного движения электрона. Интегрирование уравнения (5) проведем в предположении, что $x_0 >> h$ и $h = r_0$. В этом случае уравнение (5) принимает вид

$$\int\left[\frac{z}{\sqrt{z(1-z)}}+2p\frac{1}{\sqrt{z\cdot(1-z)}}-p^2\frac{1}{(z+2p)\cdot\sqrt{z(1-z)}}\right]dz=\int\frac{2c\cdot\sqrt{p}\cdot dt}{x_0}+C_1, \tag{6}$$

где $p=\dfrac{r_0}{x_0}$, $z=\dfrac{\sqrt{\left(\dfrac{x}{x_0}\right)(\dfrac{x}{x_0})^2+p^2}-p}{\sqrt{1+p^2}-p}$.

В левой части (6) стоит сумма табличных интегралов. Постоянную интегрирования C_1 найдем из начальных условий (2). После интегрирования (6) получаем выражение для переменной $z(t)$ в неявном виде

$$\frac{3\pi}{4}\left(1+\frac{2\pi p^2}{3\cdot\sqrt{2p(1+2p)}}\right)-\sqrt{z(1-z)}-\frac{1+4p}{2}\arcsin(1-2z)+$$

$$+\frac{p^2}{\sqrt{2p(1+2p)}}\arcsin(1+4p-\frac{4p(1+2p)}{z+2p})=\frac{2c\cdot\sqrt{pt}}{x_0}.$$

Поскольку при $t = T/4$ расстояние $x = 0$ и переменная $z = 0$, то имеем

$$\frac{3\pi}{4}\left(1+\frac{2\pi p^2}{3\sqrt{2p(1+2p)}}\right)-\frac{1+4p}{2}\cdot\frac{\pi}{2}-\frac{p^2}{\sqrt{2p(1+2p)}}\cdot\frac{\pi}{2}=\frac{c\cdot\sqrt{p}T}{2x_0}.$$

Отсюда находим выражение для периода и оценочные значения для периода и частоты колебаний электрона:

$$T=\frac{\pi x_0(1+2p)}{c\cdot\sqrt{p}}\approx 10^{-15}\text{с},\ f=10^{15}\text{Гц}.$$

Если рассматривать сгустки из N электронов и N протонов, то период колебаний увеличивается в N раз и частота колебаний будет лежать в диапазоне СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балыко, А. К.** Колебательное движение электрона в кулоновском поле / А. К. Балыко, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2. – С. 71 – 79.

Статья поступила 3 августа 2018 г.

3(538).indd 112 19.11.2018 14:34:04

ИСТОРИЯ

УДК 001(09)

ЛЕГЕНДАРНЫЙ «ИСТОКОВЕЦ»

А. К. Балыко

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

THE LEGENDARY «ISTOKOVETS»

A. K. Balyko

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

24 сентября 2018 года Ивану Михайловичу Панасу исполнилось 90 лет.

В годы, когда Иван Михайлович занимал руководящие посты, «Исток» был удостоен высоких правительственных наград: ордена Ленина и Трудового Красного Знамени.

И. М. Панас – почетный гражданин города Фрязино.

В канун юбилея Иван Михайлович любезно согласился рассказать о своей жизни и трудовой деятельности.

– Дорогой Иван Михайлович, начну с традиционного вопроса. Расскажите о своем детстве, юности.



Иван Михайлович Панас

– Я родился в селе Банюнин Львовской области в крестьянской семье. Родители работали от рассвета до заката, а мы, дети, в меру сил им помогали по хозяйству. Было трудно, но мы учились, причем с большим удовольствием. Вторая половина моего детства совпала с Великой Отечественной войной. Что пришлось нам пережить в эти годы, трудно пересказать, впрочем об этом много написано. Могу только сказать, что даже лихолетье войны не убило в нас стремление к знаниям. Учиться всегда хотелось. И в школе, и в Львовском политехническом институте (ЛПИ), куда я поступил в 1946 году. Сам выбрал факультет «Технология машин, станки и инструменты». В то время практически все юноши стремились к технике – во время войны мы какой только военной техники не повидали: и советской, и немецкой, и американской. Знали все марки не только автомобилей, но и самоходок, танков, самолетов. Это, конечно, повлияло на выбор профессии. С другой стороны, начиная с 1945 года, наряду с военными сводками, в школе и по радио проводилась активная агитация молодежи к получению высшего образования, поскольку война отняла много специалистов, а страна должна была в короткие сроки восстановить разрушенные на огромной территории промышленность и хозяйство.

3(538).indd 113 19.11.2018 14:34:04

О том, что представляло из себя в то время население Львова, говорит тот факт, что в ЛПИ треть преподавателей, да и студентов, были поляки. Спустя 12 лет во Львовском политехническом институте учился будущий генеральный директор «Истока» Александр Николаевич Королев, так, по его рассказам, это был уже типичный советский город с русско-украинским населением, хотя, как выяснилось, некоторые мои преподаватели учили и его.

Институт я окончил с красным дипломом, а поскольку столица и тогда уже забирала к себе лучшие кадры, то мне было предложено поехать работать в Москву, правда, с тем условием, что по истечении трех лет я должен был вернуться во Львов.

– Но судьба распорядилась иначе?

– Да, это действительно так. 19 сентября 1952 года я переступил порог фрязинского НИИ-160 (НПП «Исток») как «временщик», поскольку должен был отработать только три года, но, захваченный стремительным потоком бурно развивающейся электроники, так здесь и остался.

Принимал меня на работу директор НИИ-160 А. А. Захаров. В те годы повсеместно существовала такая практика: с каждым молодым специалистом беседовал сам директор предприятия. Позднее, наверное при С. И. Реброве, появилась должность заместителя директора по кадрам и уже он принимал молодых специалистов.

Здесь хотел бы несколько слов сказать об А. А. Захарове, который во многом определил мою судьбу, за что я ему сердечно признателен. Андрей Андреевич меня принял, внимательно расспросил, где я учился, какая у меня была дипломная работа. Я сказал, что окончил механический факультет Львовского политехнического института, а диплом у меня был с конструкторским уклоном. Андрей Андреевич подумал и сказал: «Я Вас направлю в конструкторское бюро». Уже тогда меня удивило, как внимательно ко мне, молодому специалисту, отнесся руководитель такого высокого ранга.

Конструкторское бюро главного технолога, как оказалось, было в то время наиболее «узким» местом в институте, и его требовалось усилить новыми сотрудниками. Дальнейшая моя работа конструктором выявила большой пробел моих знаний в области электронной техники. После некоторых колебаний я принял решение – параллельно с работой продолжить учебу на вечернем отделении института. Набрался смелости, пришел к А. А. Захарову и говорю: «Наверное, мне надо получить вторую специальность». Андрей Андреевич подумал и отвечает: «Правильно, давай пиши заявление в Московский энергетический институт (МЭИ), а я подпишу ходатайство, чтобы тебя приняли сразу на второй или третий курс с перезачетом общих экзаменов». Я поступил в МЭИ на специальность «Электронные приборы», где преподавал известный уже в то время во Фрязине Игорь Всеволодович Лебедев, и с успехом закончил второй вуз. Сейчас этим уже никого не удивишь, а в то время специалист, имеющий два высших образования, – было большой редкостью.

– Тем не менее, должность инженера Вы променяли на общественную работу?

– В 1962 году директором «Истока» стал 33-летний Сергей Иванович Ребров. Ученые и специалисты предприятия старшего поколения не сразу приняли молодого директора. Вначале даже сложилась к нему некоторая оппозиция. Понятно, что Сергей Иванович искал поддержку, и прежде всего в среде своих сверстников. А мы с ним почти одногодки. В феврале 2019 года исполняется 90 лет со дня его рождения. Я в то время помимо конструкторской деятельности руководил профсоюзным бюро КБ и, по-видимому, чем-то приглянулся С. И. Реброву. А в советские времена, что скрывать, именно директор предприятия определял, кому возглавлять профсоюзный комитет, с кем директору удобнее руководить коллективом. Выбор пал на меня, и

3(538).indd 114 19.11.2018 14:34:04

в 1963 году на профсоюзной конференции я был избран председателем профсоюзного комитета «Истока». Впрочем, мне и самому была по душе работа с людьми, хотелось помочь людям, сделать их жизнь более счастливой.

– В одном из интервью С. И. Ребров говорил о Вас: «Не могу не сказать о роли И. М. Панаса в жизни нашего предприятия и моей жизни. Трижды он менял направление своей деятельности в руководстве, возглавляя профком, затем кадры и, наконец, длительный период руководил нашим заводом, крупнейшим в электронной промышленности. В любой из этих сфер деятельности он проявил себя с самой лучшей стороны, его помощь мне трудно переоценить».

– Мне, конечно, очень лестна такая высокая оценка Сергея Ивановича. Если быть объективным, все-таки надо признать, что моя общественная деятельность совпала с активным расцветом предприятия, в котором, безусловно, наиважнейшую роль играл С. И. Ребров. Однако и вклад профкома «Истока» в общее дело трудно переоценить. Прежде всего, это касалось решения социальных проблем.

Во-первых, практически сразу я был избран в исполком Фрязинского городского совета, то есть вошел в круг руководителей города, что, конечно же, было очень важно для улучшения быта сотрудников «Истока». Вместе с заместителем председателя исполкома Иваном Федоровичем Пакиным я активно занимался строительством жилья для сотрудников предприятия, в том числе так называемых «пакинских домов». Приходилось скрупулезно контролировать не только сроки ввода домов в эксплуатацию, но и их качество и вплотную заниматься распределением жилья. Во-вторых, больших усилий требовала организация жилищного строительства и других социальных объектов так называемым методом народных строек. Одной из таких народных строек стал городской стадион «Олимп», с деревянными трибунами на тысячу мест, заполняемыми жителями Фрязино на футбольных матчах «Олимпа» и на Спартакиадах «Истока», которые проводились по 20 видам спорта. В-третьих, большое место в деятельности профкома занимала организация отдыха трудящихся. Мы с Сергеем Ивановичем выбрали остров на Волге для размещения базы отдыха «Электрон», который и по настоящее время активно функционирует, а с заместителем директора «Истока» К. А. Амосовым объехали все краснодарское побережье Черного моря в поисках достойного «истоковцев» места для пансионата «Самшит». В этой связи не могу не сказать самые теплые слова об одном из близких мне по духу руководителей – К. А. Амосове. На протяжении нескольких десятков лет мы работали с ним также в исполкоме Фрязинского городского Совета.

Он был младше меня на три года и входил в ту же «команду С. И. Реброва». Под его руководством на предприятии была введена образцовая система материально-технического снабжения, развита финансово-экономическая служба. Глубоко понимая характер ответственейших научно-технических проблем, стоящих перед предприятием в развитии обороноспособности, К. А. Амосов сумел создать мощный коллектив хозяйственников и снабженцев, для которого, казалось, не было невыполнимых задач. Он внес решающий вклад в строительство школ и детских садов, стадиона и Дворца спорта, Дворца культуры, оздоровительного (пионерского) лагеря и санатория-профилактория «Приозерный», базы отдыха «Электрон» на Волге и пансионата «Самшит» на Черном море. С 1962 года и до конца жизни К. А. Амосов избирался Верховным Советом СССР народным заседателем Верховного суда СССР.

Константин Алексеевич был прекрасным человеком – простым, скромным, веселым, отличным семьянином. Он был беззаветно предан дорогому для него предприятию. Он скоропостижно скончался в своем рабочем кабинете, немногим не дожив до 60 лет, оставив

3(538).indd 115 19.11.2018 14:34:04

в памяти «истоковцев» самые светлые о нем воспоминания. Отдавая дань уважения, именем К. А. Амосова назван речной пароход, курсирующий на Волге между г. Дубной и базой отдыха «Электрон».

Завершая первый период моей руководящей работы, на которой я проработал семь лет, не без гордости отмечу, что высшую награду советских профсоюзов – знак «За отличную работу в профсоюзах» – вручал мне лично Председатель Президиума ВЦСПС А. Шелепин.

– Второй период Вашей деятельности был связан с кадрами?

В 1970-м году, хотя у меня еще не истек срок полномочий председателя профкома, Сергей Иванович принимает решение назначить меня заместителем генерального директора предприятия по кадрам и режиму. Большой неожиданности в этом не было, поскольку профсоюзы и кадровая политика в советские времена тесно переплетались. Для меня же это стало важным этапом в моей дальнейшей деятельности. Поясню почему. Руководитель профкома в своей работе с коллективом предприятия опирается исключительно на председателей профбюро, которые избираются во всех подразделениях предприятия, и действует путем убеждения и просьбы, не прилагая в основном никаких административных методов. В советские времена председатель профкома действовал «пряником». В стране практически все ходовые товары и услуги были дефицитными, в раздаче многих дефицитов непосредственно принимал участие профком. Это давало возможность при необходимости воздействовать на то или иное подразделение с целью выполнения принятых профкомом обязательств. В должности заместителя директора по кадрам появилась возможность проводить кадровую политику предприятия через заместителей начальников подразделений уже административными методами и требовать от них безукоснительного выполнения решений. С другой стороны, ежегодно по кадровым заявкам на «Исток» приходили по 350…400 молодых специалистов из различных вузов страны, и с каждым из них я лично беседовал, выслушивал их пожелания, рассказывал о перспективах того или иного подразделения, многих убеждал пойти работать на опытный завод для укрепления «свежими» кадрами расширяющееся производство. Даже небольшое такое собеседование позволяло мне оценить молодого специалиста и в какой-то мере предсказать его будущее на предприятии. Это мне очень помогло в дальнейшей моей, можно сказать, ключевой деятельности на предприятии.

– Вы имеете в виду руководство заводом?

Конечно. В 1972 году по предложению Сергея Ивановича меня назначают директором опытного завода, позднее он вошел в состав НПО «Исток» как отдельное производственное предприятие и стал называться заводом «Рений».

Я начал с того, что прежде всего завод существенно расширил ассортимент своей продукции. Помимо традиционных электровакуумных приборов, весящих порой до тонны, в ряде цехов стали выпускать изделия твердотельной электроники массой в несколько грамм. Были организованы новые цеха по производству товаров народного потребления, таких, как ленточный магнитофон, и укреплены и расширены цеха по производству термосов. Чтобы совершить такую коренную реорганизацию потребовались огромные усилия трудового коллектива завода. Чтобы все это создать необходимо было работать, не жалея сил, как мне, так и начальникам цехов, и сотрудникам завода. И не только потому, что хозяйственное и партийное руководство требовало выполнения планов. Скорее, нам всем просто было интересно работать, и еще мы понимали, что изделия завода обеспечивают обороноспособность страны и ее мощь.

С годами завод существенно расширился, окреп и стал мощной финансовой опорой для всего предприятия. Если поднять сейчас финансовые документы, то можно увидеть, что завод приносил НПО «Исток» 80 % прибыли, тогда как на НИИ приходилось 20 %. Освоенные на

3(538).indd 116 19.11.2018 14:34:04

опытном заводе изделия, как правило, без серьезных проблем передавались на другие заводы страны.

Не без гордости могу сказать, что показателем высокой эффективности работы завода является и то, что моя трудовая деятельность была отмечена орденом Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени и орденом «Знак Почета», «Орденом Почета», многочисленными медалями, званиями «Почетный радист СССР», «Почетный радист РФ», «Почетный работник электронной промышленности», медалями имени С. И. Реброва и А. И. Шокина, а также дорогой для меня медалью «За отвагу на пожаре».

И вновь не могу не вспомнить добрым словом своего наставника А. А. Захарова. Когда я стал директором опытного завода, мы с ним часто встречались. Андрей Андреевич прошел хорошую школу производственника: В Ленинграде был директором завода имени Козицкого и «Светланы», знал всю структуру организации производства, инструментальное хозяйство, механическую обработку, подготовку производства. Андрей Андреевич часто приезжал на наше предприятие. Его было очень трудно обмануть. Меня всегда поражало, что он знал, где искать недостатки, знал, куда пойти по территории, чтобы увидеть самые злачные места и обратить на это внимание. Андрей Андреевич мог вовремя подсказать и потребовать устранить недостатки…

Наш завод, когда я был директором, ежегодно занимал какие-то классные места, всего около 50 раз, почти каждый квартал. Андрей Андреевич наравне с нами радовался этим успехам и обязательно поздравлял. Если не мог или не успевал поздравить, например, на коллегии, то обязательно потом поздравлял по телефону. Это придавало мне, как директору, дополнительные силы...

Он знал и помнил очень много людей и всегда интересовался по телефону или при встрече, как здоровье и как идут дела у того или другого человека. Меня поражала его феноменальная память. Он мог рассказывать часами, начиная с периода работы на ленинградском заводе имени Козицкого, и при этом помнил даты и фамилии людей.

– Будучи директором завода, Вам приходилось встречаться и с А. И. Шокиным, именем которого названо наше предприятие?

– Александр Иванович несколько раз приезжал на наше предприятие, в основном для награждения коллектива правительственными наградами. Первый раз это было в 1966 году, мы получили орден Ленина. Я тогда был председателем профкома. В беседе с руководителями «Истока» он несколько раз обращался ко мне, спрашивал об очереди на жилье, о питании в столовых и о местах отдыха трудящихся. В другой раз, в 1981 году, когда я был директором завода, он приезжал награждать «Исток» орденом Трудового Красного Знамени и тоже задавал вопросы, касающиеся в основном выполнения планов завода по конкретным изделиям.

Несколько раз я присутствовал на коллегиях Министерства электронной промышленности уже в ранге директора завода. По отношению к себе никаких разносов я от него не получал, хотя некоторых руководителей он ругал крепко.

В целом хочу отметить, что Александр Иванович всегда уделял «Истоку» огромное внимание. Он поддержал выдвижение на должность генерального директора «Истока» Сергея Ивановича Реброва, который четверть века руководил предприятием и вывел его на передовые позиции в мировой электронике СВЧ, за что и был удостоен звания Героя Социалистического Труда. Еще со времен Великой Отечественной войны А. И. Шокина связывали теплые дружеские отношения с заместителем генерального директора «Истока» по науке, Героем Социалистического Труда, академиком АН СССР и РАН Николаем Дмитриевичем Девятковым. С большим уважением Александр Иванович относился к главным инженерам «Истока» Ивану Ивановичу Девяткину, Юрию Петровичу Уточкину, Виталию Николаевичу Батыгину, заместителю генерального ди-

3(538).indd 117 19.11.2018 14:34:04

ректора Константину Алексеевичу Амосову, выдающимся разработчикам приборов СВЧ Героям Социалистического Труда Ларисе Анатольевне Парышкуро, Владимиру Александровичу Афанасьеву и Владимиру Ивановичу Волку, к видным нашим ученым, разработчикам, конструкторам, технологам, рабочим разных специальностей, создававшим уникальные электровакуумные приборы: А. С. Зусмановскому, А. В. Красилову, Б. М. Цареву, А. И. Мельникову, В. С. Лукошкову, С. В. Королеву, Ю. П. Мякинькову, А. С. Тагеру, В. И. Мноян, М. Б. Голанту, С. П. Кантюку – и многим другим сотрудникам «Истока».

– Иван Михайлович, расскажите о тех людях, которые сыграли важную, даже, может быть, решающую роль в Вашей трудовой деятельности.

– Как Вы понимаете, я прожил довольно долгую жизнь. За 65 лет работы на дорогом мне предприятии я встречался почти с сотней тысяч сотрудников «Истока», очень многих знал лично и почти все знали и знают меня. Это, конечно, не может не радовать любого человека, в том числе и меня, посвятившего свою жизнь людям, начиная от улучшения их бытовых условий и заканчивая, говоря возвышенно, укреплением обороноспособности нашей общей родины. За все эти годы одних начальников отделов, отделений, цехов, НПК на «Истоке», думаю, было не менее тысячи. И почти каждый из них в какой-то мере повлиял на мою жизнь и трудовую деятельность. Кто-то в большей степени, кто-то в меньшей. Чтобы не обидеть никого из этого многочисленного славного коллектива, я расскажу только о руководителях, так сказать, высшего звена, сыгравших большую роль в долгой и в целом плодотворной моей трудовой деятельности. О дорогих мне А. А. Захарове и К. А. Амосове я уже выше рассказывал.

Безусловно, ключевым моментом в моей жизни была встреча с Сергеем Ивановичем Ребровым. Так получилось, что мы оказались с ним близки по духу, по взглядам на пути развития страны, предприятия, города. Думаю, что такое бывает не со всеми, но со мной это произошло, и я благодарю Господа за то, что он меня наградил такой счастливой встречей с С. И. Ребровым и последующей нашей совместной деятельностью. Не без гордости я могу сказать, что по моей инициативе и при непосредственном моем участии на предприятии в 2013 году была учреждена «Медаль имени С. И. Реброва», которой награждаются выдающиеся специалисты отечественной электроники СВЧ. О Сергее Ивановиче много сказано и написано хороших слов, я приведу слова А. А. Борисова из вышедшей в этом году интереснейшей 1000-страничной книге, которая лежит на моем столе, о 60-летней истории военно-промышленной комиссии страны: «Сергей Иванович 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».

В 1988 году на конференции трудового коллектива генеральным директором научно-производственного объединения (НПО) «Исток» был избран Александр Николаевич Королев. На предприятие он пришел из Фрязинского отделения ИРЭ АН СССР уже сложившимся ученым и организатором, на «Истоке» возглавлял подразделения научной части, которые с заводом практически не были связаны. Близкое наше знакомство произошло уже в начале 90-х годов, когда НПО «Исток», а с ним и завод «Рений» прекратили свое существование и заводское производство изделий электроники СВЧ было разобрано научно-производственными комплексами

3(538).indd 118 19.11.2018 14:34:04

научно-производственного предприятия (НПП) «Исток». Генеральный директор предложил мне возглавить взаимодействие с военными заказчиками, поскольку с руководителями оборонных предприятий я был хорошо знаком. А поскольку Александр Николаевич родился во Львове и мы закончили один и тот же Львовский политехнический институт, то между нами возникли теплые, я бы даже сказал, дружеские отношения. А. Н. Королев предложил мне также стать его главным помощником в общественной работе – ответственным секретарем в Совете директоров промышленных предприятий наукограда Фрязино.

Мне с Александром Николаевичем было интересно работать, он часто советовался со мной не только по научно-производственным вопросам, но и по социальным проблемам трудящихся, которые в 90-е годы просто раздирали коллектив «Истока». В 1988 году вряд ли кто мог предполагать, что всего через 5 лет ситуация в стране и на предприятии круто изменится. Рухнет военно-промышленный комплекс страны, на протяжении многих десятилетий питавший «Исток» своими заказами, лавинообразно станет расти число обанкротившихся предприятий, бюджеты городов напрямую станут зависеть от объема выпускаемой продукции на градообразующих предприятиях. Просто непонятно, как в этих условиях только ещё начинавший свою карьеру директора и ещё далеко не искушенный в управленческих делах А. Н. Королёв мог сохранять выдержку и спокойствие, убеждать сотрудников перспективой будущих заказов, развитием бизнеса в новых направлениях и находить какие-то минимальные финансы для поддержания коллектива предприятия. С той огромной ношей, которая легла на плечи А. Н. Королева, он справился почти идеально. Твердость духа, светлый ум, глубокие и всесторонние знания, неиссякаемый оптимизм и доброе человеческое отношение к сотрудникам предприятия – вот те качества Александра Николаевича, которые помогали ему вести предприятие верным, порой единственно возможным путем. Он, несомненно, был одним из лучших директоров отрасли, сумевшим найти пути выживания предприятия в самые тяжелые годы. Оказалось, что только наш генеральный директор обладал именно теми качествами, не характерными для руководителя советского периода, которые и позволили «Истоку», в отличие от других фрязинских предприятий, выжить. Думаю, что в это время таким, как А. Н. Королёв, и должен был быть генеральный директор крупного градообразующего предприятия.

Поскольку ЦНИИ 22 Министерства обороны страны было основным нашим заказчиком, то я хорошо знал многих его руководителей, в том числе и начальника ЦНИИ 22 А. А. Борисова, поэтому мы с А. Н. Королевым в 2010 году поддержали назначение Александра Анатольевича на должность генерального директора НПП «Исток», считая это решение руководства Государственной корпорации «Российские технологии» верным и своевременным. Но, честно скажу, я даже и не подозревал, каким Александр Анатольевич окажется эффективным руководителем. Во-первых, он в короткие сроки покончил с хаосом в сроках выплаты заработной платы, чем сразу же расположил к себе трудовой коллектив «Истока»; во-вторых, стабилизировал численность коллектива на уровне 5 тыс. человек; в-третьих, провел систему мер, благодаря которой на «Исток» стала возвращаться молодежь. Но самое главное, Александр Анатольевич развернул преобразование «Истока» в таких масштабах, о которых мы могли только мечтать. Это даже не реконструкция, это глубокое и широкомасштабное обновление как производственных площадей, так и технологических направлений деятельности предприятия. Не буду кривить душой, мне порой было больно смотреть, когда сносились корпуса цехов, которые строились в бытность мою директором завода, но когда сейчас видишь возвышающиеся на территории предприятия семь огромных современных

3(538).indd 119 19.11.2018 14:34:04

корпусов – приходишь в восторг и думаешь: «Хорошо, что я дожил до такого эпохального обновления дорогого мне предприятия». Поэтому от всей души хочу пожелать Александру Анатольевичу, его заместителям Е. В. Истомину, С. В. Щербакову, В. С. Доброву, А. А. Вялову, А. И. Панасу, А. С. Котову и другим руководителям его команды успехов в их поистине могучей деятельности.

Не могу не сказать добрых слов в адрес Виталия Николаевича Батыгина. В 1956 году он возглавил работы на «Истоке» по созданию вакуумно-плотной керамики. В короткие сроки ему с сотрудниками удалось разработать уникальную технологию и получить керамический материал 22ХС, выполненный на основе дешевого сырья – глинозема. В 1982 году по предложению С. И. Реброва начальник отдела 280 и главный технолог предприятия В. Н. Батыгин становится главным инженером предприятия. Выдающийся ученый, лауреат Ленинской премии переходит на чисто административную работу, где на первом месте – забота об энергообеспечении предприятия и руководство хозяйственными службами. Многие, в том числе и я, сомневались, что ученый сможет выполнить такие задачи. Однако в течение 25 лет В. Н. Батыгин превосходно справлялся с этой работой. От эффективной деятельности его служб напрямую зависело и производство изделий на заводе, поэтому мы практически ежедневно обсуждали с ним вопросы, связанные с работой инфраструктуры предприятия. Очень важно, что по всем вопросам Виталий Николаевич находил оптимальные решения, при этом я никогда не слышал, чтобы он на кого-то повышал голос. Удивительно интеллигентный человек!

Много лет я проработал душа в душу с главным инженером завода Гелием Федоровичем Панкиным. Ветеран Великой Отечественной войны, пришел с фронта с серьезным ранением, прихрамывал. Заводу он отдавал всю свою душу, любил завод, как родного человека, знал и помнил все тонкости работы механизмов и аппаратуры в цехах. Начальники цехов его очень уважали, и в их среде ходила такая притча: «Гелий Федорович знал о цехах все, вплоть до того, какие моторы работают нормально, а какие «стучат»». Уникальный был человек!

На моих глазах и где-то даже под моим руководством вырос в крупного руководителя производством Евгений Николаевич Покровский. На «Истоке» он работает с 1963 г. Последовательно занимал должности инженера, начальника цеха, главного инженера завода, заместителя генерального директора НПП по производству. Талант организатора высокотехнологичного производства начал проявляться у Евгения Николаевича уже в должности начальника цеха. В короткие сроки ему с сотрудниками удалось освоить выпуск новых для тематики «Истока» электронных приборов – лазеров. С его именем связаны выдающиеся достижения в выпуске первых высококачественных отечественных газовых лазеров. Этот опыт работы позволил Е. Н. Покровскому в дальнейшем довести до совершенства выпуск атомно-лучевых трубок на парах цезия для систем единого времени и стандартов частоты, используемых в системах глобального позиционирования ГЛОНАСС. Под его руководством был осуществлен сложнейший организационный переход в производстве изделий электронной техники, при котором цеха завода были переданы в разрабатывающие подразделения. На протяжении многих лет Евгений Николаевич обеспечивает руководство подразделениями и службами предприятия по организации промышленного выпуска изделий различного класса. Евгений Николаевич – лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства Российской Федерации.

Много лет мне довелось работать с Сергеем Алексеевичем Зайцевым. Он вместе с А. Н. Королевым пришел на «Исток» из ФИРЭ РАН, также, как и Александр Николаевич, на нашем предприятии прошел через все научно-административные должности, а в 1986 году был назначен заместителем генерального директора «Истока» по научной работе. Честно скажу, меня

3(538).indd 120 19.11.2018 14:34:05

всегда удивляла и восхищала широта его познаний в радиотехнике и электронике. От него нельзя было утаить ни один пробел в разрабатываемых изделиях, поэтому, мне казалось, что многие начальники подразделений при докладах о положении дел его просто побаивались. Сергей Алексеевич провел ряд важнейших работ по автоматизированному проектированию электровакуумных и твердотельных изделий СВЧ, гибридных интегральных и монолитных схем. Под его руководством был совершен настоящий прорыв в создании уникального отечественного цифрового комплекса с программируемым процессором сигналов и многопроцессорным модулем обработки радиолокационных данных – «Синтез 10».

Добрым словом хочу упомянуть Роберта Мануковича Тирацуяна, руководителя крупнейшего в истории завода подразделения по металообработке, а также главного бухгалтера Владимира Елисеевича Коренского и славных «моих» А. Я. Астафьева, А. Н. Ковтунова, В. В. Окшина, И. М. Винника, Е. И. Курбалу, В. Д. Гриднева, Р. К. Ижбулатова, Л. М. Решетину, Д. П. Максимову, В. Я. Эфроса, Н. В. Потаеву, Ю. А. Гусарова, Л. М. Коровину, Н. Ф. Скальского, В. Е. Коноплева, А. А. Белокопытова и многих других руководителей подразделениями завода.

И буквально несколько слов о руководителях общественными организациями. Полвека я был членом КПСС, много лет входил в состав парткомов предприятия и завода. Очень хорошие отношения у меня складывались со всеми секретарями парткомов: Ю. И. Седенковым, В. Б. Степанищевым, Д. Г. Араповым, А. А. Зыковым, В. П. Савченко, но особенно теплые – с А. Г. Михальченковым. Даже когда Анатолий Гаврилович работал руководителем предприятий в Москве и Фрязино, а также заместителем Главы города, он не прерывал отношений с родным предприятием, заходил к нам, советовался по широкому кругу вопросов, искал поддержки у старших товарищей, каким я и являюсь.

Деловые, а порой и дружеские отношения у меня были со всеми руководителями города: В. Д. Башлыковой, В. Н. Колодинским, В. П. Савченко и уже в нынешнем столетии с Владимиром Васильевичем Ухалкиным, о чем мне приятно вспоминать.

– Иван Михайлович, расскажите, пожалуйста, о Вашей семье.

– В 90 лет самые теплые слова я отношу к своей любимой супруге. 25 февраля 1954 года мы вместе с Карасевой Ниной Ивановной, москвичкой, выпускницей Московского автомеханического института, скрепили свои отношения брачным союзом, «посадив, тем самым, во фрязинскую землю молодое дерево» с редким для этих мест названием (фамилией) – Панас. Надо сказать, что дерево быстро принялось, окрепло и к настоящему времени представляет собой большое и, мне хочется, как основателю семейства, верить, красивое, ветвистое дерево с дальнейшей перспективой роста. Семья, изначально состоящая из двух человек, за 64 года разрослась до 20 ее членов, включая двоих детей, четверых внуков, шестерых правнуков. Несколькими словами о всех, о них, конечно, не расскажешь, да и выделенного для статьи места не хватит для этого. Потому что у каждого взрослого члена нашего большого семейства своя интересная биография, свои достижения и завоеванный в городе авторитет. Хочу сказать, что все они внесли определенный вклад в то, что фамилия Панас часто на слуху и перестала быть для города экзотикой. Я горжусь своей семьей, и, может быть, придет время, я соберусь с мыслями и напишу о ней более подробно. Мне кажется, она этого заслуживает.

– Дорогой Иван Михайлович! Большое Вам спасибо за интересный и содержательный рассказ о славном нашем предприятии.

Разрешите мне от имени трудового коллектива «Истока» и жителей наукограда Фрязино поздравить Вас с Юбилеем и пожелать Вам крепкого здоровья и успехов в Вашей активной деятельности на благо «Истока» и города!

3(538).indd 121 19.11.2018 14:34:05



И. М. Панас в гостях на даче у В. М. Молотова



Слева направо: С. И. Ребров, Ю. И. Седенков, А. Г. Михальченков,
И. М. Панас, представитель ЦК КПСС, Л. А. Парышкуро,
начальник 1-го ГУ МЭП СССР И. Т. Якименко, В. И. Волк

3(538).indd 122 19.11.2018 14:34:05



На первом плане слева направо: С. И. Ребров,
министр электронной промышленности А. И. Шокин, Ю. И. Седенков,
И. М. Панас, И. Т. Якименко (фото М. Лихачева)



И. М. Панас с очередной наградой заводу – Красным Знаменем,
И. Т. Якименко, С. И. Ребров

3(538).indd 123 19.11.2018 14:34:05



Сидят слева направо: Герой Социалистического Труда, министр, секретарь ЦК КПСС, курирующий ВПК, член ГКЧП О. Д. Бакланов; З. А. Колмогорова; генеральный директор ПО «Электронприбор», председатель Госстандарта СССР Г. Д. Колмогоров; генерал армии А. В. Старовойтов. Стоят: третий слева – директор завода «Рений» И. М. Панас; пятый – заместитель главного инженера завода «Рений» В. В. Симаков; седьмой – начальник лаборатории НПП «Исток» Ю. И. Молдованов; последний – заместитель директора ПО «Электронприбор» А. Г. Христофоров



На отдыхе. Слева направо: А. А. Маклаков, К. А. Амосов, Е. П. Демин и И. М. Панас

3(538).indd 124 19.11.2018 14:34:06



Совет директоров
промышленных предприятий г. Фрязино

3(538).indd 125 19.11.2018 14:34:06

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.

3(538).indd 126 19.11.2018 14:34:06

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2018 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (18 %). 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./факс: (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 2018 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 17.9.2018 г. Усл. п. л. 15,5 Формат 60×88 1/8
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ" Уч.-изд. л. 16,0 Тираж 500
г. Москва Индекс 36292 15 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. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

3(538).indd 127 19.11.2018 14:34:06

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2018, вып. 3 (538), с. 126

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

3(538).indd 128 19.11.2018 14:34:07