



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (553)

2022

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(553)

2022

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. **В.М. Исаев**;
д.т.н. **П.В. Куприянов**; д.т.н. **Н.А. Лябин**;
д.ф.-м.н. **С.П. Морев**; 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;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
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 «Микроволновые системы», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
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».

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(553)

2022

Founded in 1950

Editor-in-chief

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

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **V.M. Isaev**;
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**;
D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**, 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;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIET», Voronezh;
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 «Microwave systems», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, 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».

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

- Карушкин Н.Ф., Обухов И.А.* – Источники излучения на лавинно-пролетных диодах в миллиметровом диапазоне длин волн. Часть II..... 6
- Богданов С.А.* – Использование математического аппарата теории искусственных нейронных сетей при разработке нелинейных моделей полевых транзисторов..... 21
- Богданов С.А.* – Перспективные приборы для цифровых и аналоговых устройств современных систем связи..... 32

Электроракуумные приборы

- Асташов С.Г., Арефьев А.С., Пугнин В.И., Бурдина Т.Н., Мельников С.А., Федотов А.В., Юнаков А.Н.* – Исследование возможности модернизации коллектора мощного многоручевого клистрона..... 43
- Семенов С.О., Роговин В.И., Рафалович А.Д., Кириченко Д.И.* – Анализ теплового режима спутниковой ЛБВ Ka-диапазона с охлаждением коллектора излучением..... 49

Технология и материаловедение

- Дубкова А.С., Рябов В.Н., Тарасов И.В., Хахин Н.Б.* – Эпитаксиальные структуры кремния для СВЧ-приборов..... 58
- Алексеев В.И., Богомоллова Е.А., Васильев В.И., Калёнов Д.С., Карасёв Н.С., Коломин В.М., Насонов В.А., Пархоменко М.П., Рыбкин В.Н., Федосеев Н.А.* – Особенности измерения параметров керамики с высокой диэлектрической проницаемостью в прямоугольном волноводе..... 64
- Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Богачев Р.Ю., Горшкова Е.В., Кириченко Д.И., Шестеркин В.И.* – Технология пайки деталей из искусственных графитов с керамикой ВК-94-2..... 72
- Ермаков А.В., Костишин В.Г., Налогин А.Г., Васильев А.Л.* – Исследование возможности применения многослойных композитов Си–Мо–Си и Си–МД₄₀–Си в качестве теплоотводов СВЧ-приборов..... 78

Медицинская электроника

- Чеканов А.В., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Антиагрегантная эффективность микроволнового излучения..... 90

Краткие сообщения

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Свойства периодических дробей. Часть 3..... 96

История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Женщины-ученые «Истока»..... 100

CONTENTS

Solid-state electronics

- Karushkin N.F., Obukhov I.A.* – Sources of radiation in millimeter wavelength range based on impatt diodes. Part II..... 6
- Bogdanov S.A.* – Using the mathematical apparatus of the artificial neural networks theory in the development of nonlinear models of field-effect transistors..... 21
- Bogdanov S.A.* – Promising devices for digital and analog apparatus of modern communication systems..... 32

Electrovacuum devices

- Astashov S.G., Arefyev A.S., Pugnin V.I., Burdina T.N., Melnikov S.A., Fedotov A.F., Yunakov A.N.* – Studying the possibility for upgrading a high-power multiple-beam klystron collector..... 43
- Semenov S.O., Rogovin V.I., Rafalovich A.D., Kirichenko D.I.* – Analysis of the thermal regime of a satellite *Ka*-band TWT with collector cooling by radiation..... 49

Technology and material science

- Dubkova A.S., Ryabov V.N., Tarasov I.V., Hahin N.B.* – Epitaxial silicon structures for microwave devices..... 58
- Alexeenkov V.I., Bogomolova E.A., Vasilyev V.I., Kalenov D.S., Karasev N.S., Kolomin V.M., Nasonov V.A., Parkhomenko M.P., Rybkin V.N., Fedoseev N.A.* – Features of measuring ceramic parameters with a high permittivity in a rectangular waveguide..... 64
- Babkova N.I., Baimagambetova L.T., Bogachev R.Yu., Gorshkova E.V., Kirichenko D.I., Shesterkin V.I.* – Technology of soldering parts made of artificial graphites with ceramics VK-94-2 72
- Yermakov A.V., Kostishin V.G., Nalagin A.G., Vasilyev A.L.* – Investigation of the possibility of using Cu–Mo–Cu and Cu–МД₄₀–Cu multilayer composites as heat sinks for microwave devices 78

Medical electronics

- Chekanov A.V., Shchelkonogov V.A., Baranova O.A., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.* – Antiaggregant efficiency of microwave radiation..... 90

News in brief

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A.* – Properties of recurrent fractions. Part 3..... 96

History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – Women-scientists of «Istok»..... 100

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДАХ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Часть II

Н. Ф. Карушкин¹, И. А. Обухов²

¹НИИ Орион», г. Киев, Украина

²НИИП «Радиотехника», г. Москва

В этой части статьи приводятся результаты работ по созданию источников СВЧ-мощности непрерывного и импульсного действия на лавинно-пролетных диодах.

КС: лавинно-пролетный диод, генератор, усилитель, умножитель частоты, миллиметровый диапазон, синхронизация

SOURCES OF RADIATION IN MILLIMETER WAVELENGTH RANGE BASED ON IMPATT DIODES

Part II

N. F. Karushkin¹, I. A. Obukhov²

¹Scientific Research Institute «Orion», Kiev, Ukraine

²Scientific-Industrial Company «Radiotechnika», Moscow

This part of the article presents the results of work in the field of creation the continuous and pulse sources of microwave power based on IMPATT diodes.

Keywords: IMPATT diode, generator, amplifier, frequency multiplier, millimeter wavelength range, synchronization

1. ВВЕДЕНИЕ

В первой части этой статьи [1] были рассмотрены проблемы конструирования и стабилизации параметров генераторов на основе лавинно-пролетных диодов (ЛПД). Показано, что методы создания корпусированных ЛПД на основе резонансной трансформации импеданса полупроводниковой структуры при использовании монтажных элементов корпуса решают задачу согласования импеданса диода и нагрузки в широком частотном диапазоне при минимальных энергетических потерях.

Здесь дан обзор результатов работ по созданию источников СВЧ-мощности.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТОК ИСТОЧНИКОВ СВЧ-МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Принцип построения передающих устройств основан на применении генераторов, усилителей и сумматоров мощности на ЛПД, действующих в режиме внешней синхронизации сигналом, который формируется синтезатором частоты либо высокочастотным источником частоты, обеспечивающим высокую стабильность, низкий уровень спектральной мощности фазового шума и переключение парциальных частот выходного сигнала в широком диапазоне (свыше 1 ГГц). В результате большого числа теоретических и экспериментальных работ определены основные принципы построения сумматоров мощности на полупроводниковых активных элементах. Большинство известных сумматоров мощности базируется на применении режима взаимной синхронизации отдельных источников и режима синхронизации сигналом внешнего источника. По принципу построения и характеру внешней полезной нагрузки сумматоры разделяются на два основных класса: системы суммирования мощностей СВЧ в пространстве и системы суммирования мощностей в локализованных нагрузках линий передачи.

На основе сумматоров мощностей первого класса получили широкое распространение антенные фазированные решетки, полигенераторы, излучатели, в которых отдельные источники излучения распределены на некоторой общей излучающей поверхности [2, 3]. К сумматорам мощностей независимых источников относятся прежде всего системы, выполненные с использованием мостовых схем, многополюсников, ответвителей, а также сумматоры, в которых монтируются отдельные активные элементы на общем теплоотводе и суммирование мощности осуществляется в общем синхронизирующем контуре в режиме внешней синхронизации [4–9].

На рис. 1 представлена схема четырехступенчатого передатчика на длине волны 8 мм с выходной импульсной мощностью более 100 Вт. Первые две ступени выполнены однодиодными усилителями с усилением 16...17 дБ на ступень; предоконечная и оконечная ступени (сумматоры мощностей) выполнены на двух ЛПД в каждой ступени.

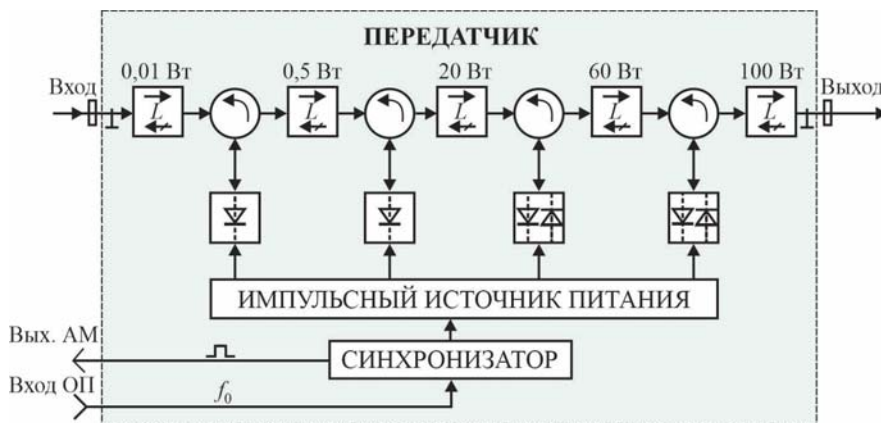


Рис. 1. Структурная схема передатчика 8-мм диапазона с выходной мощностью более 100 Вт

КПД суммирования мощностей передатчика (см. рис. 1) достигает 90 %. Задача эффективного суммирования решается как при установке нескольких ЛПД в единой электродинамической системе, так и при каскадном включении ЛПД. Существенное увеличение КПД суммирования

достигается применением резонансной трансформации импеданса полупроводниковой структуры, созданием параллельного резонансного контура с помощью элементов металлодиэлектрического корпуса ЛПД, применением антипаразитных нагрузок в сумматорах мощностей с минимальными сопротивлениями, достаточными для подавления паразитных колебаний, обеспечением согласования импедансов диода и нагрузки с учетом уровня синхронизирующего сигнала [10].

Существенное расширение полосы синхронизации достигается включением компенсирующих реактивных сопротивлений последовательно с параллельным резонансным корпусом корпусированного ЛПД при максимально достижимом снижении его добротности [11].

Высокая стабильность СВЧ-параметров достигается применением метода электронной компенсации изменения импедансов в полупроводниковых структурах при изменении температуры в пределах длительности импульса или в пакете импульсов, а также применением метода импульсной и непрерывной стабилизации температуры полупроводниковой структуры диода в широком интервале рабочих температур при минимальной величине потребляемой для этой цели мощности. При создании передатчиков в 8-мм диапазоне применяются кремниевые двухпролетные ЛПД с уровнем импульсной мощности свыше 25 Вт при длительности импульса 100...300 нс и минимальной скважности 200 [12].

Каскадное суммирование мощностей представляет значительный интерес в миллиметровом диапазоне, когда размещение большого числа диодов в единой электродинамической системе затруднено из-за её малых размеров. Вследствие малого коэффициента усиления ($G = 3-4$ дБ), построение синхронизированного источника с малым уровнем выходного сигнала требует введения дополнительных ступеней синхронного усиления. Такие конструкции, обеспечивающие высокие уровни выходной мощности только на основе каскадного суммирования, в большинстве случаев оказываются нецелесообразными из-за большого числа ступеней усиления. В связи с этим разработаны и находят применение другие эффективные методы суммирования мощностей диодов [13].

В мостовых и разветвленных системах суммирование сводится к сложению мощностей самостоятельных источников СВЧ-колебаний в независимых электродинамических конструкциях, удовлетворяющих требованиям обеспечения суммирования двух и более источников с максимальным КПД суммирования в широком частотном диапазоне и обеспечения развязки источников друг от друга. При сложении мощностей двух источников применяют 3-дБ щелевые мосты, Т-образные и кольцевые мосты. Анализ характеристик этих конструкций [14] показывает, что эффективность суммирования мало зависит от различия уровней мощности источников в пределах 3...5 дБ. При этом необходим весьма точный фазовый баланс источников в пределах до 30°. Сумматоры мощностей двух источников могут быть включены в общую разветвленную систему суммирования. При увеличении числа суммируемых источников и отсутствии потерь, системы такого типа позволяют неограниченно увеличивать выходную мощность.

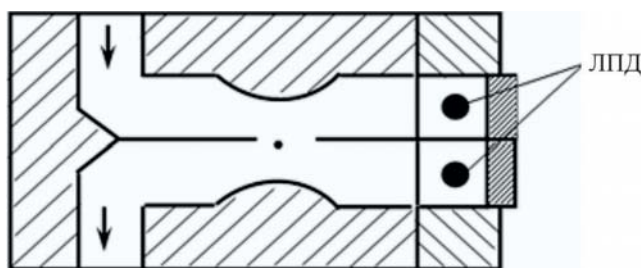


Рис. 2. Схема конструкции усилителя на ЛПД

На рис. 2 представлена упрощенная схема конструкции усилителя импульсного действия, выполненного по схеме суммирования мощностей двух каскадов ЛПД с использованием 3-дБ щелевого моста.

Синхронизированный усилитель работает в диапазоне частот 90...100 ГГц. В рабочей полосе ($F_0 \pm 0,5$) ГГц обеспечивается уровень выходной мощности импульса не ме-

нее 30 Вт при длительности импульсов 80...100 нс и частоте повторения 50 кГц. Для работы усилителя необходимы два источника постоянного напряжения на 49 и 7 В, входной импульсный СВЧ-сигнал мощностью 10 Вт и внешний импульсный сигнал управления *TTL*-уровня.

В НИИ «Орион» (г. Киев) на базе миниатюрных щелевых мостов разработан синхронизированный усилитель, содержащий 10 каскадов ГЛПД, на частоте около 94 ГГц с выходной мощностью в импульсе более 100 Вт, длительностью СВЧ-импульсов 75...100 нс при частоте следования 50 кГц.

В миллиметровом диапазоне находит применение метод суммирования мощностей в единой электродинамической конструкции. В ней диоды устанавливаются на независимых теплоотводящих основаниях и включаются в высокочастотную цепь так, что их мощности складываются в общую нагрузку, автоколебательный режим при этом базируется на взаимной синхронизации сильно связанных между собой диодных генераторов. На основе сумматоров такого класса достигнуты значительные уровни мощностей передающих устройств как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы [13].

В области частот 40...41 ГГц при суммировании мощностей двухпролетных кремниевых ЛПД в количестве 12 шт., установленных в резонаторе прямоугольного сечения, реализовано усиление непрерывной мощности свыше 10 Вт [15]. На частоте 91 ГГц при суммировании мощностей двухпролетных кремниевых ЛПД, установленных в резонаторе прямоугольного сечения, получен уровень мощности 40 Вт при скважности более 200 и длительности импульса 100 нс [16].

Эффективным методом создания мощных СВЧ-устройств непрерывного и импульсного действия является суммирование мощностей мезаструктурных диодов, установленных на общем теплоотводе, при параллельном включении в СВЧ-цепь и цепь питания. Такой сумматор реализован путем установки полупроводниковых структур в единой радиальной линии под общей крышкой без применения отдельных проводников [17, 18].

В рассматриваемой конструкции применена резонансная трансформация суммарного импеданса структур. Резонансный контур в конструкции создается включением параллельно полупроводниковым структурам входной проводимости практически ненагруженной радиальной линии $D > \lambda/2$.

Сложение мощностей отдельных диодов может быть достигнуто применением для этой цели суммирующего модуля, работающего на несимметричных азимутальных гармониках и содержащего синхронизирующий резонатор [17, 18].

Суммирующий модуль (рис. 3) состоит из медного массивного основания 1, используемого как теплоотвод, верхняя часть которого имеет в центре выступ 2 в виде цилиндра, от которого в радиальных направлениях расходятся четыре перегородки 3; металлического диска 4, расположенного на диэлектрической втулке 5, которая смонтирована на основании 1, и установленного в волноводе 8.

Питание к полупроводниковым диодам 6 подается посредством проводников 7. Размеры диска определяются рабочим диапазоном частот. Размеры диэлектрической втулки выбираются из условий требуемой трансформации импеданса к клеммам диода и обеспечения необходимой связи между резонатором и выходным волноводом.

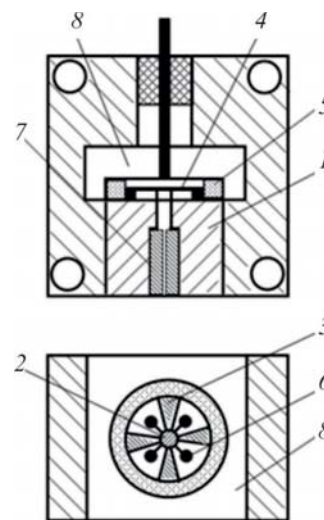


Рис. 3. Упрощенная схема конструкции сумматора мощности

В рассматриваемом модуле решается проблема подавления паразитных типов колебаний при расширении области рабочих частот. Выступ с перегородками эффективно подавляет паразитные азимутальные гармоники и при этом не искажает электромагнитное поле рабочего колебания $TM_{оп}$, так как для последнего электрическое поле равно нулю в местах расположения выступа и перегородок. Модуль разработан для применения в 8-мм диапазоне в режиме работы с большой длительностью импульса и малой скважностью. В модуле использованы кольцевые структуры ЛПД, позволяющие максимально реализовать свои преимущества [19]. При длительности импульса СВЧ $\tau_{и} = 1$ мкс и скважности $\theta = 4$ выходная мощность СВЧ составляет более 15 Вт; при длительности импульсов СВЧ $\tau_{и} = 4$ мкс получена выходная мощность СВЧ 10,4 Вт.

В работе [20] приведены результаты разработки синхронизированных малогабаритных генераторов импульсного действия с электронным переключением частоты от импульса к импульсу. В качестве задающего высокостабильного источника СВЧ-импульса применен малогабаритный синтезатор частоты 8-мм диапазона, формирующий импульсы заданной длительности, с дискретным переключением частоты. Структурная схема генератора приведена на рис. 4.

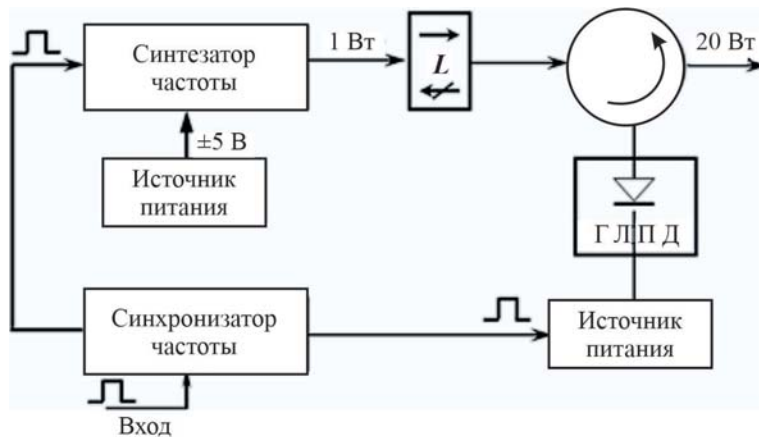


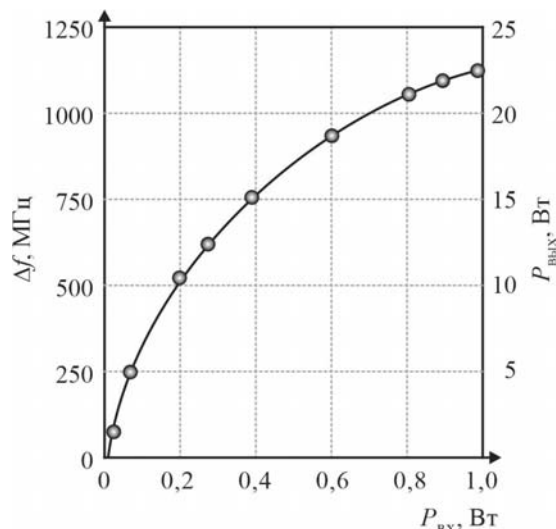
Рис. 4. Структурная схема генератора

Опорный генератор, синхронизированный кварцевым генератором с помощью цифровой системы ФАПЧ, содержит умножитель частоты и усилитель, работающие в импульсном режиме. Синтезатор формирует импульсы СВЧ с уровнем мощности 1...1,2 Вт со стабильностью частоты не хуже $2 \cdot 10^{-6}$. Переключение частоты выполняется трехразрядным двоичным кодом в уровнях *TTL*. Конструкция ГЛПД выполнена на базе волноводно-коаксиального Т-образного сочленения. Согласование высокочастотных нагрузок со структурой ЛПД достигается путем установки диода в параллельный контур, параметры которого определяются выбором геометрических размеров диэлектрической втулки. При этом дополнительные неоднородности в волноводном канале исключаются. Запасенная энергия сосредоточена в основном в области корпусированного диода. Для расширения рабочей частоты генератора последовательно с диодом включен последовательный резонансный контур. Зависимость полосы синхронизации и выходной импульсной мощности синхронизированного ГЛПД от уровня входной импульсной мощности задающего генератора приведена на рис. 5.

При разработке сумматоров-усилителей СВЧ-мощности в миллиметровом диапазоне длин волн целесообразно применение электродинамических конструкций с малыми потерями и пониженным более чем на 20 % значением волнового сопротивления Z_0 в широком диапазоне частот. Этим условиям удовлетворяет несимметричная полосковая линия (НПЛ), образованная за счет

частичного перекрытия металлических покрытий, нанесенных на противоположные стороны плоскопараллельной подложки несимметричной щелевой линии (НЩЛ). НЩЛ устанавливается в E -плоскости металлического волновода и включает в себя переходные распределенные участки согласования волновых сопротивлений (см. [1], рис. 3, δ).

Рис. 5. Зависимость полосы синхронизации и выходной мощности синхронизированного ГЛПД от уровня входной мощности задающего генератора при длительности импульса СВЧ 300 нс



Предложенная конструкция позволяет выполнять линию передачи с любой величиной волнового сопротивления и простой конструктивной реализацией полупроводниковых СВЧ-элементов на её основе в комбинации с НПЛ, располагаемой на теплоотводе.

Подобное соединение микрополосковых линий (МПЛ) в миллиметровом диапазоне длин волн применено при разработке фазовых модуляторов и широкополосных выключателей [21]. Материалом для таких МПЛ передачи энергии служит металлизированный дюрюид с толщиной диэлектрического слоя 0,254 мм, обладающий малыми погонными потерями на СВЧ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$.

Применение НЩЛ для создания синхронизированных усилителей на кремниевых ЛПД в составе сканирующего устройства миллиметрового диапазона представлено на рис. 6. Сканирующее устройство содержит делитель мощности [22], который состоит из входного волновода 1; объемного резонатора 2, выполняющего роль разветвителя; ряда параллельных волноводных каналов 3, связанных с объемным резонатором 2 с помощью отверстий связи 4 и тонких металлических перегородок 5, расположенных одна от другой на расстоянии $\lambda/4$; ряда усилителей 6 на ЛПД 7 и согласующих вставок 8, 9.

Повышенная устойчивость работы усилителей достигается за счет того, что диодные структуры могут быть смонтированы на общем теплоотводе, позволяющем снизить их тепловое сопротивление. На ЛПД сосредоточенного типа в непрерывном режиме на частоте 94 ГГц достигается выходная СВЧ-мощность более 1 Вт. Увеличение выходной мощности следует ожидать при использовании двухпролетных ЛПД распределенного типа, выполненных в виде узких полосок шириной 20...30 мкм, с длиной $l \geq \lambda/2\sqrt{\epsilon}$, либо при использовании кольцевых структур ЛПД большого диаметра [23, 24].

Для создания источников СВЧ-мощности на ЛПД в миллиметровом диапазоне длин волн кроме гибридных технологий находят все более широкое применение монолитные технологии. Это особенно эффективно для приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона, где

изготовление волноводного резонатора представляет значительную трудность. В работе [25] представлена монолитная конструкция ГЛПД и приводятся его параметры при частотах около 60 ГГц. ЛПД выполнен на двухпролетных полупроводниковых структурах GaAs, где каждая область дрейфа имеет длину 0,2 мкм, а концентрация примесей в них составляет $(2...3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

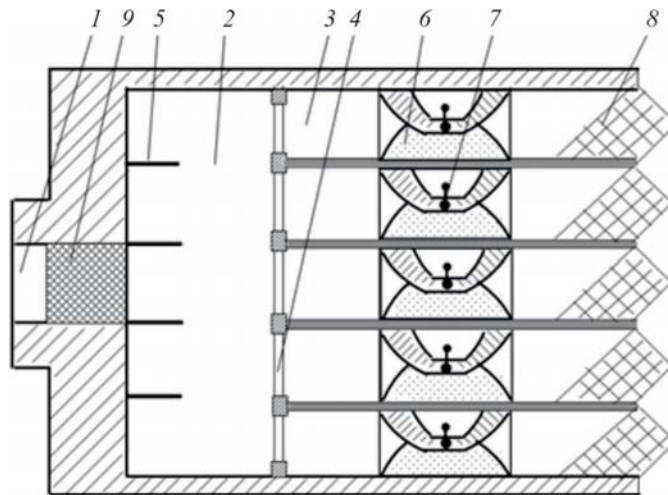


Рис. 6. Сканирующее устройство, содержащее синхронизированные усилители на кремниевых ЛПД и входной делитель мощности СВЧ:

- 1 – входной волновод; 2 – объемный резонатор; 3 – ряд волноводных каналов; 4 – отверстия связи;
5 – металлические перегородки; 6 – усилители на ЛПД; 7 – диодные структуры ЛПД;
8, 9 – согласующие вставки

На рис. 7, а представлена схема конструкции двухдиодного монолитного ГЛПД, а на рис. 7, б – ее поперечное сечение. Конструкция генератора содержит два ЛПД с мезаструктурой диаметром 50 мкм, расположенных на расстоянии 0,75 мм друг от друга и связанных с микрополосковым резонатором через сквозные отверстия в слое полиимида толщиной около 10 мкм. СВЧ-мощность выводится из резонатора с помощью 50-омной МПЛ. На рис. 8 представлена эквивалентная схема конструкции монолитного двухдиодного ГЛПД. Устройство в монолитном исполнении генерирует в непрерывном режиме 1,2 Вт СВЧ-мощности на частоте 60 ГГц при КПД около 8 %.

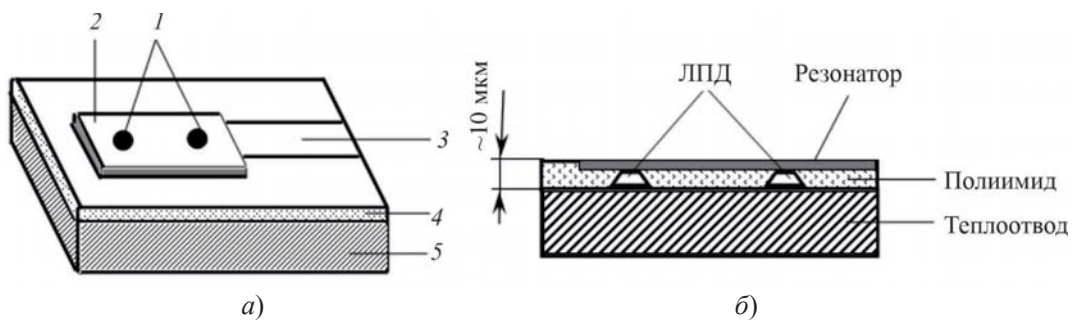


Рис. 7. Схема монолитной двухдиодной конструкции ГЛПД (а) и ее поперечное сечение (б):

- 1 – ЛПД; 2 – резонатор; 3 – 50-омный вывод; 4 – слой полиимида; 5 – теплоотвод

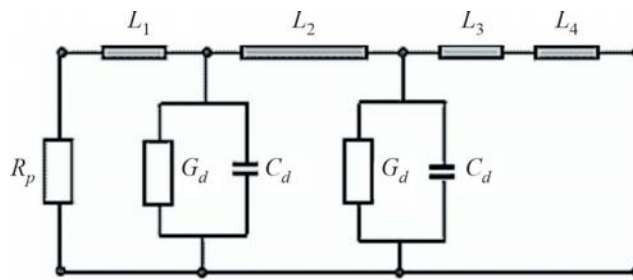


Рис. 8. Эквивалентная схема двухдиодного монолитного ГЛПД:

G_d – отрицательная проводимость диода; C_d – емкость диода; $L_1 \dots L_4$ – длины отрезков передающей линии; R_p – сопротивление резонатора

Ряд применений в миллиметровом диапазоне длин волн находят монолитно-интегрированные ЛПД, конструктивно выполненные подобно планарным $p-i-n$ -диодам. Поверхностно-ориентированные кремниевые (планарные) двухдрейфовые структуры $p^+-p-n-n^+$ -типа в работе [26] использовались для оптической модуляции и внешней синхронизации источников СВЧ-мощности ГЛПД миллиметрового диапазона. На рис. 9 представлена схема оптической подсветки структур ЛПД такого типа.

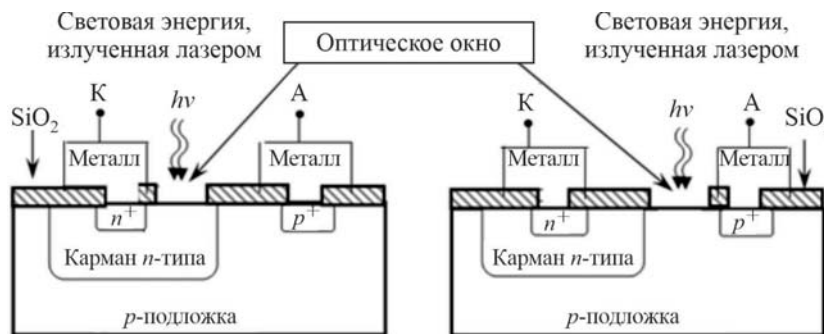


Рис. 9. Схема оптической подсветки на n -слое (слева) и слое двухдрейфовых планарных ЛПД (справа)

На частоте 94 ГГц уровень выходной СВЧ-мощности источника излучения, выполненного на планарной структуре ЛПД, на 11 % меньше, чем уровень мощности источника на ЛПД с двухпролетной вертикальной структурой.

Оптимизация известных характеристик усилителей на ЛПД с сосредоточенными параметрами обычно достигается каскадированием, что сопровождается порой значительным усложнением конструкции, увеличением массы, габаритов и стоимости. При этом на полосу усиления существенное влияние оказывают реактивные параметры каскадов. Большой части из перечисленных выше недостатков можно избежать путем использования усилителей на ЛПД с распределенными параметрами.

Наличие сильной зависимости динамической проводимости распределенного ЛПД от плотности тока питания делает возможным эффективное управление коэффициентом усиления и фазовой скоростью волны в диоде [27–29]. В работе [27] в линейном приближении рассчитаны основные характеристики усилителя бегущей волны на распределенном ЛПД с тонкой

базой. Важным достоинством такого усилителя является удобство соединения с МПЛ и волноводами малого сечения.

Усилитель представляет собой p^+p-n-n^+ -структуру, состоящую из параллельных слоев различной толщины и проводимости. Распространение электромагнитного сигнала вдоль распределенного ЛПД в линейном приближении (см. рис. 10) описывается дисперсионным уравнением

$$K^2 = (R + j\omega L)/(Z_{pn} + r_s), \tag{1}$$

где

$$Z_{pn} = -R + 1/j\omega C. \tag{2}$$

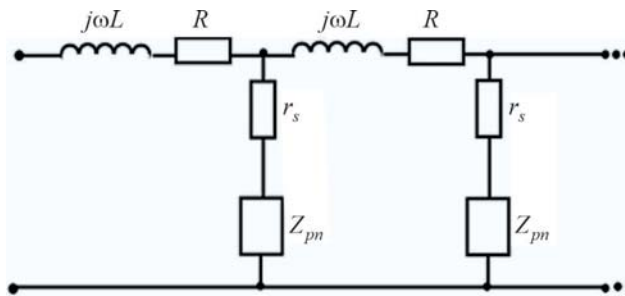


Рис. 10. Эквивалентная схема ЛПД с распределенными параметрами

Наиболее важными характеристиками усилителя на распределенном ЛПД являются постоянная распространения волны $K' = \text{Im}K$ и коэффициент нарастания волны $K'' = \text{Re}K$, их зависимости от частоты ω , постоянного тока обратного смещения I_0 , удельного сопротивления полупроводниковых материалов, а также от некоторых геометрических параметров диода. На рис. 11 приведены расчетные зависимости коэффициента усиления K'' и постоянной распространения K' от частоты для двух значений тока управления I_0 при величине пробивного напряжения $U_{пр} = 55$ В и сопротивлении контактов, равном $8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см.

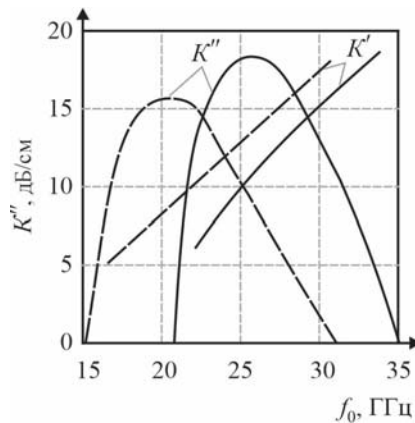


Рис. 11. Зависимости коэффициента усиления K'' и постоянной распространения K' от частоты f_0 для значений плотности обратного тока $I_0 = 1000$ А/см² (---) и $I_0 = 2000$ А/см² (—)

В работе [30] предложен расчет коэффициента шума усилителя распределенного типа, который по определению равен

$$F = 1 + S(\omega)/kT_0K, \quad (3)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности собственных шумов на выходе усилителя; k – постоянная Больцмана; T_0 – температура окружающей среды; $K = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ – коэффициент усиления по мощности.

Эффективная температура $T_{\text{ш}}$ и мера шума $M = T_{\text{ш}}/T_0$ распределенного диода совпадают с соответствующими величинами для сосредоточенного диода, а полученное выражение для коэффициента шума не отличается от выражения для коэффициента шума регенеративного усилителя на сосредоточенном диоде. Следует заметить, что этот результат относится к идеально однородному по длине и согласованному с обоих концов усилителю. Введение в тракт усилителя бегущей волны даже небольшой неоднородности существенно ухудшает его коэффициент шума. Объясняется это тем, что шумовые сигналы, возбуждаемые флуктуациями в каждом элементарном диоде, распространяются в таком усилителе с одинаковым усилением как в прямом, так и в обратном направлении.

Один из возможных способов реализации усилителя бегущей волны на распределенном ЛПД миллиметрового диапазона длин волн в волноводном исполнении представлен на рис. 12, а...в. Полупроводниковая структура ЛПД p^+p-n-n^+ -типа длиной около 400 мкм и шириной около 30 мкм смонтирована на массивном медном теплоотводе, выполняющем дополнительное согласование импедансов линии передачи и участка волновода, содержащего ЛПД.

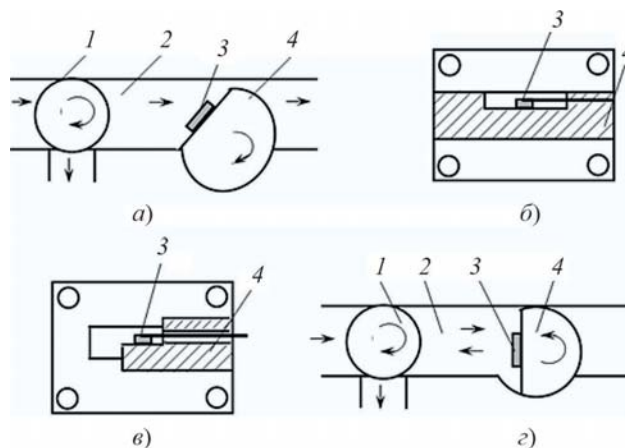


Рис. 12. Схемы конструкций усилителя бегущей волны (а...в) и генератора шума на ЛПД (г):

1 – циркулятор; 2 – волновод; 3 – ЛПД; 4 – теплоотвод

Оптимизация режима усиления достигается при уменьшении волнового сопротивления линии передачи и выборе положения распределенного ЛПД на теплоотводе. При частотах вблизи 94 ГГц усиление синхронизированного сигнала составило величину 12...15 дБ. При положении диода параллельно вектору электрического поля (рис. 12, г) наблюдается генерация шума. Интегральный уровень генерируемой мощности шума, измеренный калориметром, составил 1,2 Вт в полосе частот порядка 8 %.

Один из путей создания источников СВЧ-мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона основан на применении свойств ЛПД в режиме эффективного преобразования час-

тоты высокостабильного низкочастотного СВЧ-сигнала. Известно, что этот режим обеспечивает уровень мощности выходного сигнала на n -й гармонике $P_{\text{вых}} \sim 1/n$, что существенно превосходит достижимые характеристики умножителей частоты на диодах с накоплением заряда, для которых $P_{\text{вых}} \sim 1/n^2$ [31]. Теоретическое рассмотрение характеристик умножителя частоты на ЛПД основано на схеме включения диода в СВЧ-цепь генератора и подведении к ЛПД напряжения $U(t) = U_0 + U_m \sin(\omega t)$. В результате действия опорного напряжения с частотой ω при достаточно большой амплитуде U_m в высокочастотной цепи в течение временных интервалов τ_n проходят импульсы высокой частоты ω_0 , лежащие в рабочей полосе частот генератора. При определенных условиях происходит фазовая синхронизация высокочастотных колебаний n -й гармоники опорного сигнала и возникают последовательно когерентные СВЧ-сигналы с частотой $\omega_0 = n\omega$. Более точное представление о работе умножителя частоты на ЛПД дает его исследование в самосогласованном режиме. В этом случае предполагается, что на ЛПД подается напряжение смещения и заданное напряжение низкой частоты, а нагрузкой ЛПД является параллельный контур, настроенный на высокую частоту [32]. На рис. 13 представлена схема конструкции умножителя. Эквивалентная схема замещения умножителя приведена на рис. 14. Приняты следующие обозначения: $KЗ$ – короткозамыкающий волноводный поршень; PL – радиальная линия; $L_{\text{ш}}$ – индуктивность штыря; $C_{\text{ш}}$ – емкость между штырем настройки и крышкой диода; $L_{\text{к}}$ – индуктивность контактов; Z_d – сопротивление диода; $Z_{\text{в}}$ – сопротивление линии передачи.

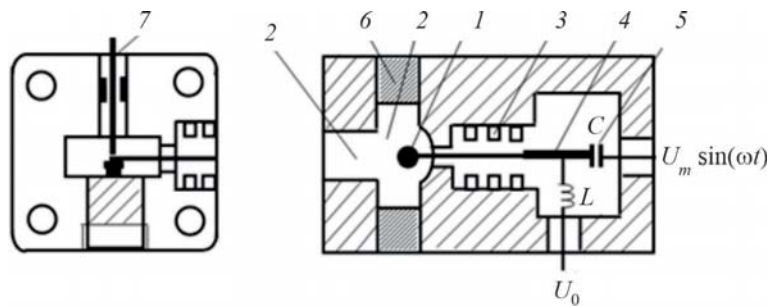


Рис. 13. Схема конструкции умножителя частоты на ЛПД:
 1 – ЛПД; 2 – волновод; 3 – фильтр радиального типа; 4 – НПЛ;
 5 – разделительная емкость; 6 – короткозамыкающий волноводный поршень; 7 – штырь

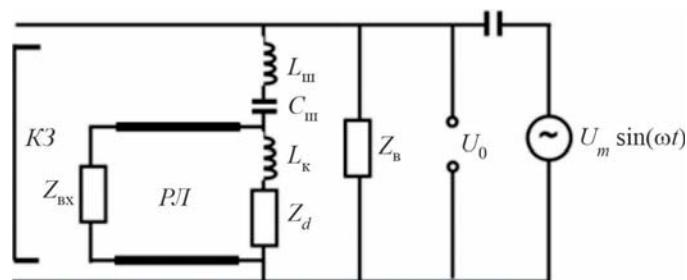


Рис. 14. Эквивалентная схема конструкции умножителя

Совместное решение уравнений, описывающих процессы в ЛПД и в контуре, позволяет исследовать характер высокочастотных колебаний в нагрузке контура. Важным является вопрос о том, определяются ли частота и фаза ВЧ-колебаний только частотой и фазой низкочастотного сигнала, который предполагается высокостабильным, либо они зависят от других факторов? Как показано в работе [33], если фаза ВЧ-колебаний в момент появления нового импульса колебаний постоянна относительно фазы низкочастотного напряжения, то спектр колебаний не будет зависеть от частоты контура (которая может быть нестабильной), а определяется только частотой низкочастотного сигнала, что и требуется для эффективной синхронизации. Как правило, в режиме самовозбуждения ГЛПД синхронизация наблюдается только в узкой полосе. В режиме усиления на отрицательном сопротивлении ЛПД синхронизация наблюдается в достаточно широком интервале изменений низкой частоты. Достигнутые параметры умножителей частоты высокой кратности приведены в таблице.

Параметр	Значение		
Диапазон частот, ГГц	75 – 100	90 – 140	110 – 180
Выходная мощность, мВт	10 – 50	10 – 30	10 – 20
Коэффициент умножения	10 – 15	10 – 15	10 – 20
Рабочая полоса частот, ГГц	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0
Диапазон рабочих частот сигнала синхронизации, ГГц	5 – 10	5 – 10	5 – 10
Смещение на ЛПД, В/А	24/0,15	24/0,15	24/0,15

Конструктивно умножители частоты высокой кратности в диапазоне частот 30...180 ГГц содержат ферритовые волноводные вентили и полосно-пропускающие фильтры. Волноводные вентили защищают выходной сигнал умножителя частоты от влияния нагрузки. Фильтры подавляют ближайшие гармоники в выходном сигнале умножителя на уровне не менее 40 дБ. При модуляции тока управления ЛПД происходит синхронная модуляция выходного сигнала умножителя с глубиной модуляции не менее 70 дБ при частоте модуляции до 100 МГц.

Включение ЛПД в колебательный контур с использованием радиальной линии для реализации процесса умножения частоты аналогично включению и настройке ЛПД для генерации и усиления [34].

В работе [35] показана возможность синхронизации мощных СВЧ-приборов (магнетронов, клистронов). Когерентное излучение таких приборов может быть реализовано с применением полупроводникового когерентного источника импульсного действия, обеспечивающего фазовую синхронизацию колебаний магнетрона на отрезке времени, равном длительности импульса полупроводникового источника. Уменьшение длительности синхронизирующего импульса и уровня его мощности достигается при введении модуляции добротности мощного СВЧ-прибора. При этом уровень мощности синхронизации уменьшается пропорционально добротности мощного прибора во второй степени.

Уменьшение добротности резонансной системы мощного СВЧ-прибора позволяет уменьшить уровень импульсной мощности синхронизирующего сигнала P_s пропорционально квадрату уменьшения добротности. При этом характеристики синхронного режима не изменяются. Уменьшение требуемой мощности P_s позволяет значительно уменьшить габариты синхронизи-

рующего источника СВЧ и блока питания. Единый гибридный комплекс твердотельного и электровакуумного прибора представляет собой мощный импульсный когерентный источник СВЧ-колебаний, позволяющий решить задачу построения радиолокационных станций с селекцией движущихся объектов в миллиметровом диапазоне длин волн [36–42].

В НИИ «Орион» (г. Киев) разработан ряд высокостабильных генераторов импульсного действия для использования в качестве задающего генератора как в аппаратуре общего применения, так и в бортовой аппаратуре в диапазоне частот 30...150 ГГц. В рабочей полосе частот генераторы обеспечивают выходную мощность 2...10 Вт при длительности импульсов 50...100 нс и частоте повторения 50 кГц. Конструктивно генераторы состоят из генераторной камеры, высокодобротного резонатора, выполненного из инвара, волноводного вентиля и импульсного источника тока, температурная нестабильность частоты составляет $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. В диапазоне частот 30...180 ГГц созданы генераторы непрерывного действия с применением специальных корпусированных кремниевых двухпролетных IMRATT-диодов. Выходная мощность составляет 20...50 мВт. Температурный коэффициент частоты равен $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Уровень фазовых шумов – минус 80 дБ/Гц при отстройке от несущей не более 10 кГц. На выходе генераторов установлены волноводные полосно-пропускающие фильтры, подавляющие амплитудные шумы до уровня минус 180 дБ/Гц относительно несущей при отстройке более 1 ГГц [42].

3. ВЫВОДЫ

Создание когерентных генераторов на ЛПД обеспечивается при полном исключении фазовой модуляции, что в случае импульсного режима работы достигается использованием специальной формы импульса тока управления. Для расширения полосы синхронизации необходимо создать колебательную систему с минимальным запасом энергии. При этом целесообразным оказалось использование собственного резонансного контура, содержащего активный элемент, и корпуса без применения дополнительных резонансных элементов в электродинамической системе. В этом случае добротность контура, содержащего активный элемент, составляет 10...15. Это позволяет реализовать 10%-ную рабочую полосу при коэффициенте усиления до 10 дБ и 3%-ную при усилении до 20 дБ.

Опыт разработки синхронизированных генераторов показал, что такие приборы необходимо конструировать совместно с блоком питания. При этом они должны быть сопряжены как по электрическим характеристикам, так и конструктивно. Выполнение этих условий обеспечивает создание когерентных источников мощности миллиметрового диапазона с использованием ЛПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карушкин, Н. Ф.** Источники излучения на лавинно-пролетных диодах в миллиметровом диапазоне длин волн. Ч.1 / Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2022. – Вып. 1(552). – С. 6 – 19.
2. **Воскресенский, Д. И.** Активные антенные решетки (обзор) / Д. И. Воскресенский, В. М. Гостюхин // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* – 1983. – Т. 25, № 2. – С. 4 – 17.
3. **Дворников, А. А.** О внешней синхронизации автоколебательной АФАР / А. А. Дворников, Г. М. Уткин, А. М. Чуков // *Изв. вузов. Радиопизика.* – 1980. – Т. 23, № 5. – С. 547 – 554.
4. **Касаткин, Л. В.** Мощные импульсные полупроводниковые источники миллиметрового диапазона в режиме внешней синхронизации / Л. В. Касаткин, В. П. Рукин // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* – 2005. – Т. 48, № 6. – С. 3 – 19.

5. **Горбачев, А. В.** Каскадное суммирование мощностей в режиме внешней синхронизации / А. В. Горбачев, Л. В. Касаткин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 10. – С. 22 – 27.
6. **Карушкин, Н. Ф.** Импульсные твердотельные генераторы миллиметрового диапазона волн на ЛПД / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин // Изв. вузов. Радиотехника. – 1999. – № 10. – С. 3 – 10.
7. **Дворников, А. А.** О сложении мощностей многих автогенераторов / А. А. Дворников, Г. М. Уткин // Радиотехника и электроника. – 1974. – № 3. – С. 550 – 559.
8. **Чуков, А. М.** О взаимной синхронизации линейки СВЧ-автогенераторов / А. М. Чуков // Труды МЭИ. – 1981. – Вып. 547. – С. 114 – 116.
9. **Тараненко, В. П.** Твердотельные генераторы СВЧ-колебаний миллиметрового диапазона радиоволн / В. П. Тараненко, Б. А. Коцержинский, Е. А. Магусекий // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1978. – Т. 21, № 10. – С. 4 – 24.
10. **Карушкин, Н. Ф.** Опыт разработки твердотельных когерентных передающих устройств высокого уровня мощности в Ka -диапазоне / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин, В. А. Хитровский // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2003. – Т. 46, № 2. – С. 3 – 8.
11. **Касаткин, Л. В.** Широкополосные импульсные генераторы СВЧ на ЛПД в режиме внешней синхронизации / Л. В. Касаткин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2002. – Т. 45, № 2. – С. 15 – 24.
12. **Тарасюк, В. М.** Кремниевые лавинно-пролетные диоды 8-миллиметрового диапазона для мощных импульсных однодиодных СВЧ-генераторов / В. М. Тарасюк, В. В. Басанец, Н. С. Болтовец, А. В. Зоренко, Н. В. Колесник // Приборы и техника СВЧ. – 2011. – № 1. – С. 21 – 23.
13. **Касаткин, Л. В.** Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
14. **Chang, R.** Millimeter-wave power combining techniques / R. Chang, C. Sun // IEEE Transactions on MTT. – 1983. – Vol. 31, No 5. – P. 91 – 107.
15. **Moony, W.** Injection locking performance of 41-GHz 10 W power combining amplifier / W. Moony, F. Bayuk // IEEE Transactions on MTT. – 1983. – Vol. 31, No 2. – P. 171 – 176.
16. **Chang, K.** Power combining near 94 GHz / K. Chang, R. Ebert // IEEE International Solid-State Circuit Conf. Session X: Microwave Circuits, 1980. – P. 16 – 18.
17. **Bauer, T.** A resonant-cap power combiner for two-terminal millimeter wave devices / T. Bauer, J. Treger, M. Claassen // IEEE Transactions on MTT. – 1997. – Vol. 45, No 2. – P. 146 – 148.
18. **Карушкин, Н. Ф.** Источники мощности миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах с распределенными параметрами / Н. Ф. Карушкин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т. 42, № 7. – С. 47 – 54.
19. Теория линий передачи сверхвысоких частот. Ч. II. / Пер. с англ. под ред. А. И. Шпунтова. – М.: Сов. радио, 1951. – 280 с.
20. **Дворниченко, В. П.** Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты Ka -диапазона / В. П. Дворниченко, Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, В. А. Ореховский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 4. – С. 3 – 7.
21. **Карушкин, Н. Ф.** Коммутационные управляемые устройства на $p-i-n$ -диодах миллиметрового диапазона длин волн / Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, А. А. Тухаринов, А. В. Ореховский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 4-5. – С. 34 – 41.
22. **Авт. свид. СССР 425248.** Делитель мощности / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин. – Приоритет 24.12.1973.
23. **Карушкин, Н. Ф.** Использование кольцевых структур ЛПД для увеличения средней импульсной мощности генераторов миллиметрового диапазона / Н. Ф. Карушкин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 46 – 54.
24. **Патент Украины 15048.** Полупроводниковый СВЧ-диод / В. М. Буторин, Н. Ф. Карушкин. – Приоритет 30.06.1997.

25. **Bayraktaroglu, B.** High-power 60 GHz monolithic GaAs impart diode / B. Bayraktaroglu, H. D. Shih // Electronics Letter. – 1986. – Vol. 22, No 10. – P. 562 – 563.
26. **Othonan, M. A.** Si IMPATT diode optimization for performance analysis / M. A. Othonan, N. S. M. Arstad, M. Y. Hussan and Y. A. Rahim // Overview ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9, No 7. – P. 1140 – 1148.
27. **Карнаухов, А. В.** Усиление электромагнитных волн в распределенном лавинно-пролетном диоде / А. В. Карнаухов, В. И. Шабанов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1976. – Т. XIX, № 3. – С. 29 – 33.
28. **Карнаухов, А. В.** Модуляция электромагнитной волны в распределенном лавинно-пролетном диоде / А. В. Карнаухов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1980. – Т. XXIII, № 12. – С. 1505 – 1510.
29. **Давыдова, Н. С.** Линейная теория распределенного усилителя СВЧ на лавинно-пролетном диоде / Н. С. Давыдова, Ю. З. Данюшевский, Л. И. Телятников // Радиотехника. – 1972. – Т. 27, № 8. – С. 77 – 81.
30. **Тагер, А. С.** Коэффициент шума усилителя с бегущей волной на распределенном диоде / А. С. Тагер // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1981. – № 3. – С. 58 – 59.
31. **Дворниченко, В. П.** Работа ЛПД в режиме радиоимпульсного умножения частоты / В. П. Дворниченко, Н. Ф. Карушкин, С. Б. Мальцев, В. Е. Чайка // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1985. – Вып. 4 (376). – С. 40 – 44.
32. **Карушкин, Н. Ф.** Умножители частоты на полупроводниковых диодных структурах / Н. Ф. Карушкин // Технология и конструкция в электронной аппаратуре. – 2018. – № 13. – С. 22 – 36.
33. **Касаткин, Л. В.** Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД / Л. В. Касаткин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 44, № 3. – С. 18 – 25.
34. **Патент Украины 9375.** Корпус полупроводникового СВЧ-диоде / В. Е. Горлачев, В. П. Дворниченко, Н. Ф. Карушкин. – Приоритет 30.09.1996.
35. **Карушкин, Н. Ф.** Фазовая синхронизация в мощных импульсных приборах СВЧ / Н. Ф. Карушкин // В сб. 26-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо'2016. – Сентябрь 2016. – С. 1712 – 1716.
36. **Карушкин, Н. Ф.** Твердотельные СВЧ-модули для радиотехнической аппаратуры и систем миллиметрового диапазона длин волн / Н. Ф. Карушкин, С. Б. Мальцев, В. А. Хитровский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 1. – С. 3 – 7.
37. **Мележик, П. Н.** Экспериментальная оценка характеристик когерентности приемопередающего модуля Ka-диапазона / Н. П. Мележик, Ю. Н. Муськин, В. А. Зуйков, В. Б. Разказовский, Н. Г. Резниченко, М. В. Колесниченко // Техника и приборы СВЧ. – 2008. – С. 19 – 23.
38. **Сидько, В. И.** Высокоточное измерение фазовых сверхмаломощных стабильных генераторов и синтезаторов частоты при воздействии вибрации и акустического шума / В. И. Сидько, В. А. Хитровский // В сб. 10-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо'2010. Севастополь 2010. – С. 540 – 542.
39. **Карушкин, Н. Ф.** Твердотельные приборы электронной техники мм-диапазона / Н. Ф. Карушкин, И. В. Зверщовский, М. И. Пойгина // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1993. – Вып. 5-6. – С. 20 – 24.
40. **Колосов, В. В.** Шумовой радиолокатор миллиметрового диапазона / В. В. Колосов, Е. А. Мясин // РЭНСИТ. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 235 – 256.
41. **Карушкин, Н. Ф.** Твердотельные компоненты и устройства электронной техники терагерцового диапазона в Украине / Н. Ф. Карушкин // Радиофизика и электроника. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 40 – 64.
42. **Web-site:** Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт «Орион», Киев, Украина. – URL : <http://www.orion.org.ua>.

Статья поступила 9 декабря 2021 г.

УДК 51:621.382.323

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕОРИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

С. А. Богданов

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

На основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей разработана нелинейная модель полевого транзистора, особенностью которой является возможность обучения нейронных сетей, используемых для аппроксимации вольт-амперной характеристики и емкостей затвор-сток и затвор-исток нелинейной модели транзистора встроенными в популярные СВЧ САПР алгоритмами оптимизации. Это позволяет использовать известные преимущества нейронных сетей в задачах аппроксимации функций для повышения достоверности результатов нелинейного моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов. Указанный подход может найти широкое применение при разработке библиотек моделей активных и пассивных элементов монолитных интегральных схем без применения специализированного программного обеспечения для обучения нейронных сетей.

КС: нелинейная модель полевого транзистора, искусственные нейронные сети, радиальная базисная сеть, аппроксимация, вольт-амперная характеристика, крутизна, емкость затвор-сток, емкость затвор-исток, функция активации, «SoftPlus»

USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS THEORY IN THE DEVELOPMENT OF NONLINEAR MODELS OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS

S. A. Bogdanov

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

Based on the mathematical apparatus of the artificial neural networks theory, a nonlinear model of a field-effect transistor has been developed, the distinctive feature of which is a possibility of training neural networks used to approximate the current-voltage characteristic and gate-drain and gate-source capacitances of the nonlinear model of the transistor by optimization algorithms built into popular microwave CAD systems. This makes it possible to use the well-known advantages of neural networks in the function approximation tasks to increase the reliability of the results of nonlinear modeling of microwave devices based on field-effect transistors. This approach can be widely used in the development of libraries of models of active and passive elements for monolithic integrated circuits without using specialized software for training neural networks.

Keywords: nonlinear model of field-effect transistor, artificial neural networks, radial basic network, approximation, current-voltage characteristic, steepness, gate-drain capacitance, gate-source capacitance, activation function, «SoftPlus»

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время предъявляются повышенные требования к спектральной эффективности, электромагнитной совместимости, динамическому диапазону и линейности передаточных ха-

характеристик разрабатываемых монолитных интегральных схем и СВЧ-устройств. При этом особое внимание уделяют достоверности нелинейных моделей активных элементов в широком диапазоне рабочих частот, температур и питающих напряжений, поскольку результаты моделирования указанных характеристик проектируемых устройств во многом определяются адекватностью применяемых моделей.

В популярных САПР СВЧ-устройств широко распространены модели полевых транзисторов (ПТ), реализованные в виде эквивалентных схем, в которых зависимости параметров нелинейных элементов от температуры и питающих напряжений аппроксимируются аналитическими функциями [1]. Эти модели можно классифицировать на физические и эмпирические. В физических моделях ПТ нелинейные зависимости параметров элементов эквивалентных схем от температуры и питающих напряжений определяются из физических представлений о работе прибора. Разработка физических моделей сложна, а их практическое применение требует знания конструкции транзистора и особенностей технологических процессов его формирования. Физические модели представляют большой интерес для исследования влияния особенностей физической реализации прибора на его характеристики при их оптимизации, а также разработке транзисторов с заданными характеристиками. В эмпирических моделях указанные нелинейные зависимости получают путем аппроксимации аналитическими функциями, вид которых позволяет модели с достаточной точностью описывать поведение транзистора. Восстановление параметров эмпирических нелинейных моделей ПТ осуществляется по известным методикам [2–4] достаточно оперативно, что позволяет существенно сократить сроки разработки устройств на их основе.

За рубежом активно разрабатываются нелинейные модели транзисторов на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей (ИНС) [5–9]. Такие модели представляют собой одну или совокупность из нескольких математических моделей ИНС, моделирующих поведение транзистора. Наиболее часто применяемые для этих целей математические модели ИНС: сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети – позволяют выявить функциональные связи между набором входных параметров, таких, как напряжения на электродах транзистора и температура кристалла транзистора, и выходных параметров – токах стока, истока и затвора – как в статическом, так и в динамическом режиме работы транзистора. Количество нейронов в рассматриваемых моделях транзисторов на основе ИНС варьируется от десятков до сотен. Выбор архитектуры и процесс обучения ИНС требует применения специализированного программного обеспечения с высокопроизводительными алгоритмами, что существенно усложняет разработку модели транзистора. Кроме того, нетривиально решение задачи экспорта таких моделей в популярные САПР СВЧ-устройств. Разработанные модели транзисторов с использованием математического аппарата теории ИНС демонстрируют высокую точность прогнозирования характеристик транзистора, которая в ряде случаев достигает единиц процентов [7], также к достоинствам таких моделей относят универсальность, независимость методики получения модели от типа транзистора, высокое быстродействие и оперативность разработки [1].

В работе предпринята попытка объединить преимущества эмпирических нелинейных моделей ПТ, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Целью работы является разработка нелинейной модели ПТ с использованием математического аппарата теории ИНС для улучшения достоверности моделирования СВЧ-устройств на основе ПТ.

2. МОДЕЛЬ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Рассмотрим упрощенную эквивалентную схему НЕМТ (рис. 1). В первом приближении будем считать, что нелинейными являются источники зарядов в цепях затвор-исток и затвор-сток, а также источник тока стока, зависящие от напряжений затвор-исток и сток-исток. Такая упрощенная эквивалентная схема широко применяется при построении эмпирических моделей GaAs и GaN НЕМТ в САПР твердотельных СВЧ-устройств.

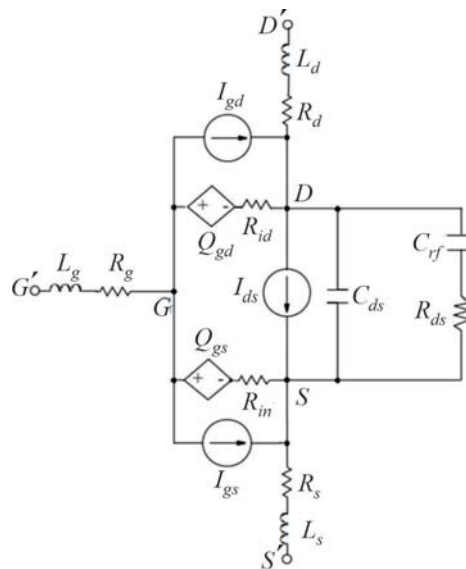


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема НЕМТ

Одной из универсальных эмпирических моделей ПТ является модель Ангелова [10], в которой предложены следующие функциональные зависимости для аппроксимации емкостей затвор-исток C_{gs} , затвор-сток C_{gd} , а также тока стока I_d от напряжений затвор-исток V_{gs} и сток-исток V_{ds} :

$$C_{gs}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gs0}(1 + \tanh(\psi_1(V_{gs}))(1 + \tanh(\psi_2(V_{ds}))), \quad (1)$$

$$C_{gd}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gd0}(1 + \tanh(\psi_3(V_{gs}))(1 - \tanh(\psi_4(V_{ds}, V_{gs}))), \quad (2)$$

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))) \right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}), \quad (3)$$

где

$$\psi_1(V_{gs}) = P_{0gs} + P_{1gs} V_{gs} + P_{2gs} V_{gs}^2 + P_{3gs} V_{gs}^3 \dots,$$

$$\psi_2(V_{ds}) = P_{0gsd} + P_{1gsd} V_{ds} + P_{2gsd} V_{ds}^2 + P_{3gsd} V_{ds}^3 \dots,$$

$$\psi_3(V_{gs}) = P_{0gdg} + P_{1gdg} V_{gs} + P_{2gdg} V_{gs}^2 + P_{3gdg} V_{gs}^3 \dots,$$

$$\psi_4(V_{ds}, V_{gs}) = P_{0gdl} + (P_{1gdl} + P_{1gc} V_{gs}) V_{ds} + P_{2gdl} V_{ds}^2 + P_{3gdl} V_{ds}^3 \dots,$$

$$\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds})) = P_1(V_{gs} - V_{pk}(V_{ds})) + P_2(V_{gs} - V_{pk}(V_{ds}))^2 + P_3(V_{gs} - V_{pk}(V_{ds}))^3 + \dots,$$

$$V_{pk}(V_{ds}) = V_{pk0} + \gamma V_{ds},$$

$C_{gs^0}, C_{gd^0}, I_{pk}, \lambda, \alpha, P_{igsg}, P_{igsd}, P_{igdg}, P_{igdd}, P_{1cc}, P_j, V_{pk^0}, \gamma$ – параметры модели с $i = 0, 1, 2, \dots, j = 1, 2, 3 \dots$ в индексах коэффициентов степенных рядов.

При всех известных достоинствах модели Ангелова [10], к одному из ее недостатков относят низкую достоверность при моделировании нелинейных искажений, обусловленную недостаточно хорошей аппроксимацией крутизны транзистора при описании ВАХ с помощью (3) [11–13]. В работе [14] исследовались нелинейные искажения в однокаскадных усилителях на основе ПТ с различными профилями легирования подзатворной области, где продемонстрировано существенное влияние нелинейности крутизны передаточной характеристики ПТ на амплитудные характеристики гармоник и интермодуляционных составляющих 3-го и 5-го порядков. Несмотря на потенциальную возможность повышения точности моделирования ВАХ (3) путем использования в $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ полиномов более высокого порядка, на практике это не всегда удается реализовать, поэтому часто ограничиваются полиномом пятого порядка. Использование в $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ полинома 5-го порядка не всегда позволяет добиться хорошего согласия с результатами эксперимента. В части улучшения описания крутизны передаточной характеристики модель Ангелова активно развивается рядом авторов [11–13].

В то же время математический аппарат теории ИНС находит широкое применение для решения прикладных задач оптимизации, прогнозирования, управления, классификации, а также аппроксимации функций многих переменных с очень большой точностью [15]. В частности, в [16] приведена архитектура двухслойной нейронной сети (рис. 2), которая может быть обучена аппроксимировать с произвольной точностью любую функцию с конечным числом точек разрыва. Таким образом, повысить достоверность моделирования ВАХ и крутизны транзистора можно путем замены в (3) полиномиальной функции $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ на функцию $R(V_{gs}, V_{ds})$, синтезируемую с помощью математической модели ИНС.

Рассмотрим процесс синтеза аппроксимирующей функции многих переменных с помощью двухслойной нейронной сети (рис. 2).

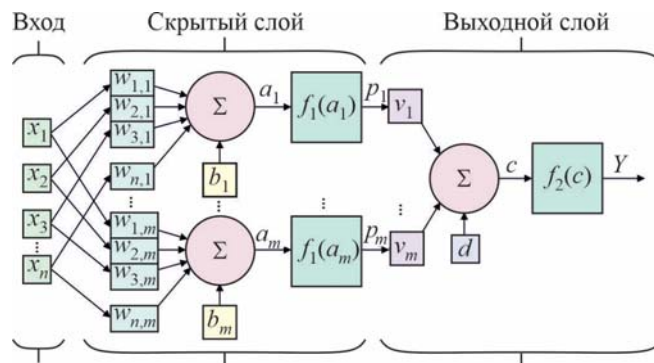


Рис. 2 Архитектура двухслойной нейронной сети для аппроксимации функции многих переменных

В каждом из m нейронов скрытого слоя вычисляется аргумент a_j функции активации нейрона $f_1(a_j)$ путем суммирования произведений входных переменных x_j на соответствующие им весовые коэффициенты $w_{i,j}$ и сдвига результирующего взвешенного входа на величину смещения b_j :

$$a_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{i,j} + b_j.$$

Значения функций активации нейронов скрытого слоя $p_j = f_1(a_j)$ являются входными переменными для нейрона выходного слоя (НВС), где после аналогичного взвешенного суммирования и сдвига на величину смещения НВС формируется аргумент функции активации НВС:

$$c = \sum_{j=1}^m p_j v_j + d,$$

позволяющий определить значение синтезируемой нейронной сетью функции $Y = f_2(c)$.

Таким образом, если решением некоторой задачи является функция $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то обучение нейронной сети состоит в синтезе функции $Y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ путем поиска таких значений весовых коэффициентов $w_{i,j}$, v_j и смещений b_j и d , чтобы минимизировать некоторую функцию ошибки $E(Y(x_1, x_2, \dots, x_n), Z(x_1, x_2, \dots, x_n))$. При наличии большого количества обучающих примеров и способа вычисления функции ошибки, обучение нейронной сети превращается в задачу многомерной оптимизации, имеющую очень большую размерность. Важно отметить, что рассмотренная двухслойная нейронная сеть может быть обучена аппроксимировать с произвольной точностью любую функцию с конечным числом точек разрыва, если её скрытый слой содержит сигмоидальную функцию активации $f_1(a_j)$, а выходной слой – линейную функцию активации $f_2(c)$, при этом точность аппроксимации в значительной степени будет определяться количеством нейронов в скрытом слое [16].

Сигмоидальные функции активации относятся к классу функций со сжимающим отображением, поскольку они отображают бесконечный диапазон значений аргумента в конечный диапазон значений функции и характеризуются тем, что их наклон приближается к нулю, когда значения аргумента существенно возрастают. При использовании для обучения ИНС с такими функциями активации градиентных методов, величина градиента становится малой, что приводит к малым изменениям настраиваемых параметров, даже если они далеки от оптимальных значений. Для обучения ИНС с сигмоидальными функциями активации предложен алгоритм обратного распространения ошибки, реализованный в специализированном для работы с ИНС программном обеспечении и отсутствующий как алгоритм оптимизации в популярных САПР СВЧ-устройств.

Функции активации нейронов могут иметь самый различный вид. Рациональный выбор функции активации нейронов скрытого слоя, учитывающий особенности моделируемого объекта, способен снизить вычислительную сложность математической модели ИНС за счет сокращения количества нейронов в скрытом слое и повысить скорость её обучения, а также сделать обучение возможным с помощью встроенных в САПР СВЧ-устройств алгоритмов оптимизации. Так, к примеру, экспериментальные зависимости крутизны передаточных характеристик ПТ имеют «колоколообразный» вид, а зависимости барьерной емкости контактов металл-полупроводник от напряжения смещения имеют вид

$$C(U) \sim (\varphi_b - U)^{-S}, \quad (4)$$

где S изменяется в диапазоне $S = 1/3 \dots 3$ в зависимости от профиля легирования базовой области полупроводника [17, 18].

Анализ характеристик функций активации нейронов и различных архитектур ИНС позволяет предложить для синтеза функции $R(V_{gs}, V_{ds})$ радиальную базисную сеть (РБС). РБС состоят из большего количества нейронов, чем стандартные сети с прямой передачей сигналов и обучением методом обратного распространения ошибки, но на их создание требуется значительно меньше времени. Эти сети особенно эффективны, когда доступно большое количество обучающих векто-

ров, а также широко применяются для решения задачи аппроксимации функций многих переменных. Разложение по радиальным базисным функциям обеспечивает необходимую гладкость, поэтому их применение для аппроксимации произвольных нелинейных зависимостей вполне оправдано. Разложение по радиальным базисным функциям может быть реализовано на двухслойной нейронной сети, первый слой которой состоит из радиальных базисных нейронов, а второй – из единственного нейрона с линейной характеристикой, на котором реализуется суммирование выходов нейронов первого слоя.

Вход функции активации РБС определяется как модуль разности вектора весов \mathbf{w} и вектора входа \mathbf{p} , умноженный на смещение \mathbf{b} . Функция активации РБС имеет вид

$$f(n) = e^{-n^2},$$

где $n = \|\mathbf{x} - \mathbf{w}\| \cdot \mathbf{b}$, \mathbf{x} – вектор входных переменных, \mathbf{w} – вектор-строка весов, \mathbf{b} – вектор-столбец смещений, а результатом операции $\|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|$ является вектор из элементов $S_i = |\mathbf{x}_i - \mathbf{w}_i|$, которые определяются расстояниями между i -м вектором входа \mathbf{x} и i -й вектор-строкой весов.

В случае двух входных переменных, V_{gs} и V_{ds} ($i = 2$), выход отдельного j -го нейрона первого слоя имеет вид

$$F_j(V_{gs}, V_{ds}) = \exp \left[-b_{i-1,j}^2 (V_{gs} - w_{i-1,j})^2 - b_{i,j}^2 (V_{ds} - w_{i,j})^2 \right],$$

а на выходе РБС из m нейронов в скрытом слое имеем

$$R(V_{gs}, V_{ds}) = c + \sum_{j=1}^m a_j F_j(V_{gs}, V_{ds}).$$

Таким образом, ВАХ нелинейной модели ПТ с применением математического аппарата теории ИНС может быть представлена в виде:

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(R(V_{gs}, V_{ds})) \right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}). \quad (5)$$

Выражения (1) и (2) с точностью 5...10% [10] описывают нелинейные зависимости емкостей затвор-исток C_{gs} и затвор-сток C_{gd} от приложенных напряжений даже при использовании линейных зависимостей в функциях ψ_1, ψ_2, ψ_3 , и ψ_4 . Во многих случаях этого достаточно.

Для аппроксимации нелинейных зависимостей зарядов Q_{gs} и Q_{gd} (см.рис. 1) в качестве альтернативы (1) и (2) может быть предложена приведенная на рис. 2 архитектура ИНС, с линейной функцией активации в выходном слое и с так называемой «SoftPlus» [19] функцией активации нейронов в скрытом слое:

$$f_1(a_m) = \ln(1 + e^{a_m}). \quad (6)$$

Функция активации «SoftPlus» (6) имеет следующие особенности: она монотонная, а ее производная представляет собой сигмоидальную функцию

$$\frac{\partial f(a_m)}{\partial a_m} = \frac{1}{1 + e^{-a_m}}. \quad (7)$$

Таким образом, выражения для зарядов Q_{gd} и Q_{gs} как результат аппроксимации двухслойной нейронной сетью на основе функции «SoftPlus» будут иметь вид:

$$Q(V_{gs}, V_{ds}) = \sum_{j=1}^m a_j \ln \left[1 + \exp(w_{i-1,j} V_{gs} + w_{i,j} V_{ds} + b_j) \right]. \quad (8)$$

В отличие от известных выражений для зарядов Q_{gd} и Q_{gs} , полученных из физических соображений в [20] для барьерной емкости контакта Шоттки в случае однородно легированного полупроводника, а также для емкостей, описываемых выражением (4), функция (8) не имеет разрывов, т. е. обеспечиваются необходимые условия непрерывности:

$$Q_g = Q_{gd} + Q_{gs},$$

$$C_g = \frac{\partial Q_g}{\partial V_g}, C_{gd} = \frac{\partial Q_{gd}}{\partial V_{gd}},$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial V_{gd}} = \frac{\partial C_{gd}}{\partial V_{gs}} \Leftrightarrow \frac{\partial^2 Q_g}{\partial V_{gd} \partial V_g} = \frac{\partial^2 Q_g}{\partial V_g \partial V_{gd}}.$$

3. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИ

Для апробации разработанной модели было проведено экспериментальное исследование ВАХ и S-параметров GaAs НЕМТ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» в диапазоне частот 0,5...18 ГГц для следующих значений питающих напряжений и их приращений: $-2,5 \text{ В} \leq V_{gs} \leq 0,5 \text{ В}$, $\Delta V_{gs} = 0,1 \text{ В}$ и $0 \leq V_{ds} \leq 5 \text{ В}$, $\Delta V_{ds} = 0,2 \text{ В}$. Используя известные методики экстракции параметров паразитных элементов эквивалентной схемы транзистора [2–4], а также с помощью оптимизации по Y- и Z-параметрам при всех значениях питающих напряжений в указанном диапазоне частот строились две нелинейные модели: модель Ангелова [10] с C_{gs} , C_{gd} и I_d , определяемыми выражениями (1)...(3) соответственно, и нелинейная модель, разработанная на основе математического аппарата теории ИНС, где зависимости Q_{gd} , Q_{gs} и I_d заданы выражениями (8) и (5). Количество нейронов скрытого слоя в РБС для описания ВАХ и в скрытом слое нейронной сети для описания зарядовой модели – пять.

Для описания I_{gs} и I_{gd} (см. рис. 1) использовались классические выражения для ВАХ диода. В модели Ангелова при описании ВАХ (3) функция $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ была представлена полиномом 5-го порядка. При обучении РБС встроенными в САПР СВЧ-устройств методами оптимизации, использовалась итерационная процедура формирования РБС – количество нейронов скрытого слоя увеличивалось на единицу в процессе обучения, обучение начиналось с трех нейронов.

На рис. 3...6 для сравнения с результатами эксперимента приведены результаты моделирования крутизны передаточных характеристик при различных напряжениях на стоке транзистора и S-параметры транзистора в зависимости от частоты и напряжения затвор-исток в области насыщения для модели Ангелова и модели на основе математического аппарата теории ИНС (модель на основе ИНС).

Как видно из рис. 3 и 4, применение РБС при моделировании ВАХ позволяет точнее аппроксимировать кру-

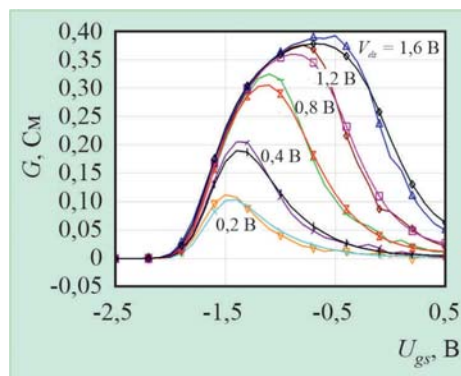


Рис. 3. Зависимости крутизны от напряжения затвор-исток для модели Ангелова

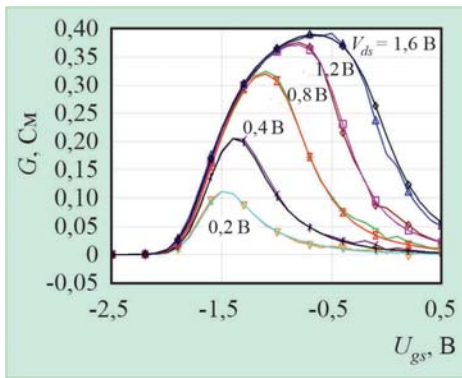


Рис. 4. Зависимости крутизны от напряжения затвор-исток для модели на основе ИНС

тизну передаточной характеристики транзистора. Косвенно по качеству аппроксимации зависимостей $S11$ и $S12$ (рис. 6) можно судить об адекватности предложенной зарядовой модели (8). Для оценки достоверности моделей определялись величины максимального отклонения результатов моделирования и эксперимента по каждому из S -параметров ($\max \Delta S = |\max(S_{\text{мод}} - S_{\text{эксп}})|$), среднее арифметическое отклонение $\frac{\sum \Delta S}{N} = \frac{\sum |S_{\text{мод}} - S_{\text{эксп}}|}{N}$, а также среднее арифметическое величины относительного отклонения теоретической и экспериментальной поверхностей S -параметров $\frac{\sum \delta S}{N} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{S_{\text{мод}} - S_{\text{эксп}}}{S_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\%$,

где N – количество анализируемых точек. Результаты сведены в таблицу.

где N – количество анализируемых точек. Результаты сведены в таблицу.

Оценка достоверности моделей

Модель	$S11$			$S12$			$S21$			$S22$		
	$\max \Delta S11$	$\frac{\sum \Delta S11}{N}$	$\frac{\sum \delta S11}{N}, \%$	$\max \Delta S12$	$\frac{\sum \Delta S12}{N}$	$\frac{\sum \delta S12}{N}, \%$	$\max \Delta S21$	$\frac{\sum \Delta S21}{N}$	$\frac{\sum \delta S21}{N}, \%$	$\max \Delta S22$	$\frac{\sum \Delta S22}{N}$	$\frac{\sum \delta S22}{N}, \%$
Модель Ангелова	0,3773	0,1028	11,6	0,04898	0,0176	31,6	1,712	0,1623	21,0	0,539	0,217	28,4
Модель на основе ИНС	0,1075	0,0226	2,6	0,022	0,0071	11,6	1,608	0,078	10,1	0,129	0,0483	6,5

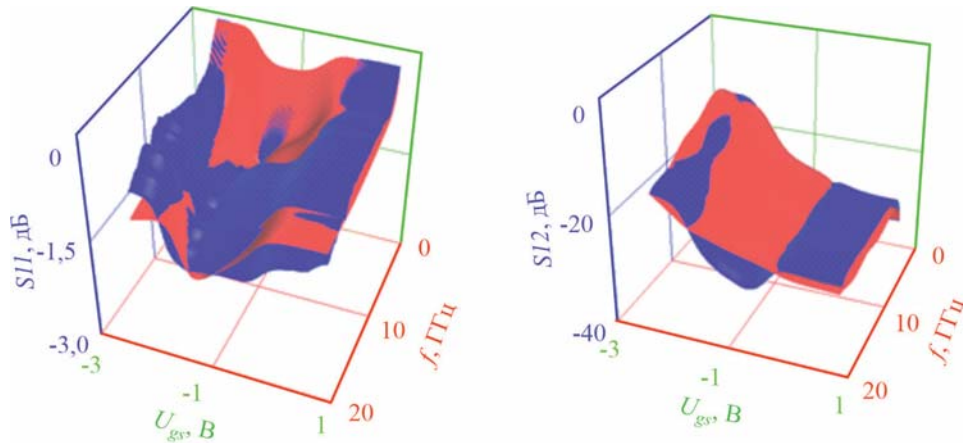


Рис. 5. S -параметры, модель Ангелова (см. также с. 29): поверхности синего цвета – эксперимент; красного – результат моделирования

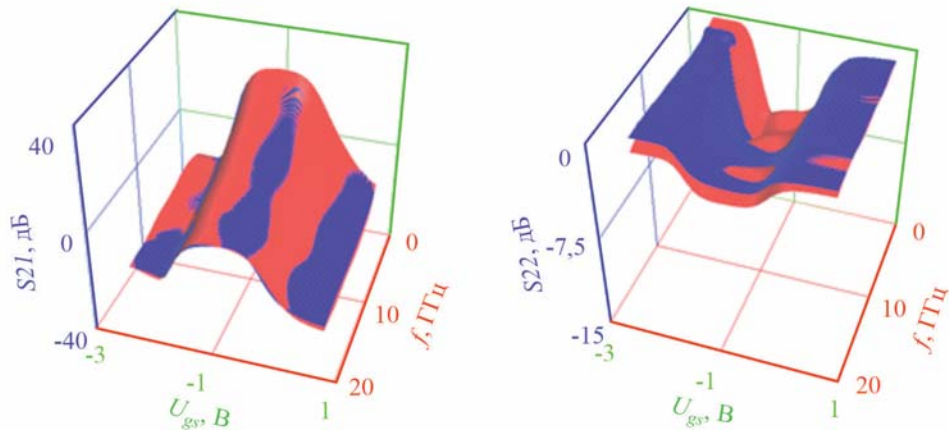


Рис. 5. S -параметры, модель Ангелова (начало на с. 28):
поверхности синего цвета – эксперимент; красного – результат моделирования

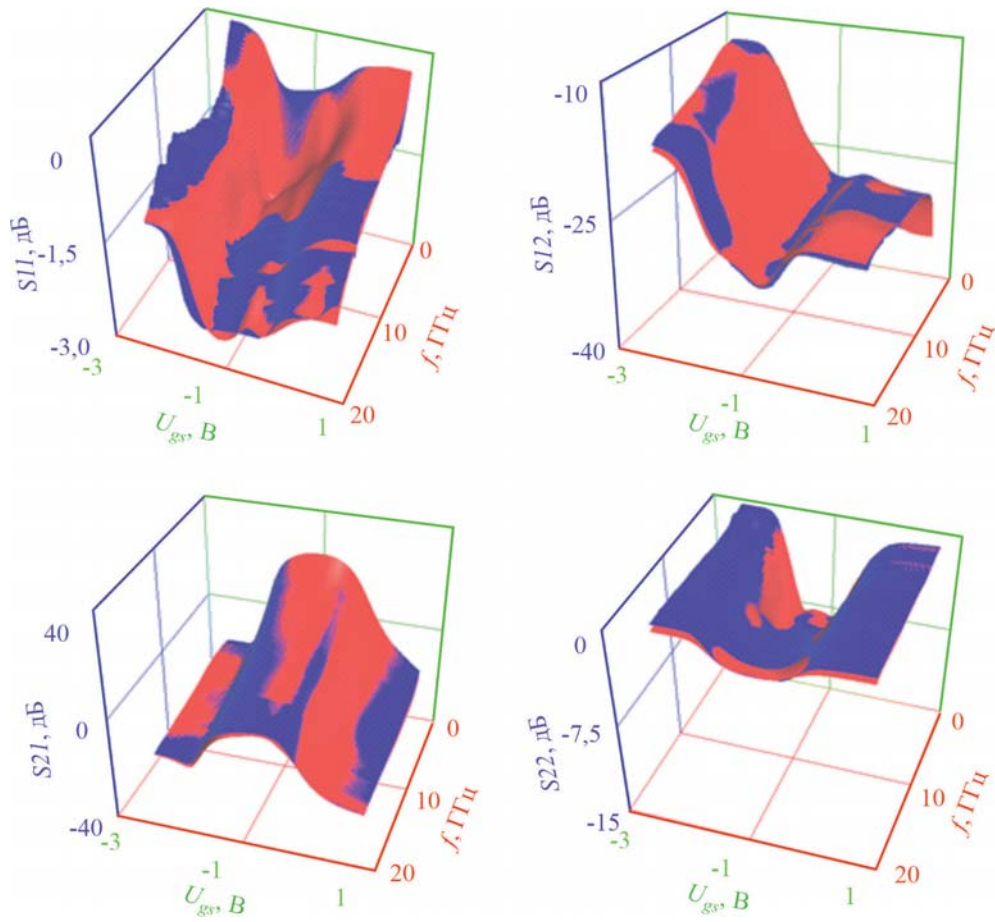


Рис. 6. S -параметры, модель на основе ИНС:
поверхности синего цвета – эксперимент; красного – результат моделирования

Как видно из таблицы, модель полевого транзистора, разработанная на основе математического аппарата теории ИНС по рассматриваемым критериям, превосходит по достоверности моделирования S -параметров классическую модель Ангелова, что позволяет надеяться на ее потенциально более высокую точность и при моделировании нелинейных искажений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования позволяет предположить, что разработанная нелинейная модель ПТ на основе математического аппарата теории ИНС позволит повысить достоверность моделирования СВЧ-устройств на основе ПТ.

В разработанной модели удалось объединить рассмотренные преимущества эмпирических нелинейных моделей ПТ, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Продемонстрированный в работе подход по применению математического аппарата теории ИНС при разработке нелинейной модели ПТ позволяет производить разработку и использование нелинейных моделей активных элементов СВЧ-электроники на основе нейронных сетей непосредственно в схмотехнических САПР, используя возможности их методов оптимизации.

Указанный подход расширяет возможности поиска новых технических решений по улучшению параметров и характеристик радиоэлектронной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коколов, А. А.** Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов / А. А. Коколов, Ф. И. Шеерман, Л. И. Бабак // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2-1 (22). – С. 118 – 126.
2. **Matthias Rudolph.** Nonlinear transistor model parameter extraction techniques / Matthias Rudolph, Christian Fager, David E. Root. – Cambridge Academ, 2011. – 366 p.
3. Обзор методик построения малосигнальных моделей транзисторов для управляющих СВЧ-устройств / А. А. Попов, И. М. Добуш, А. С. Сальников, А. Е. Горяинов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – № 3 (546). – С. 10 – 33.
4. Экстракция параметров моделей гетероструктурного полевого транзистора / Л. И. Аверина, Д. А. Бессонов, Р. А. Рыбалкин, Е. В. Аверина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2012. – № 1. – С. 5.
5. **Qi-Jun Zhang.** Artificial neural networks for RF and microwave design – from theory to practice / Qi-Jun Zhang, K. C. Gupta and V. K. Devabhaktuni // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – April 2003. – Vol. 51, No 4. – P. 1339 – 1350. – DOI: 10.1109/TMTT.2003.809179.
6. Nonlinear HEMT modeling using artificial neural network technique / J. Gao, L. Zhang, J. Xu and Q. -J. Zhang // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2005. – P. 469 – 472. – DOI: 10.1109/MWSYM.2005.1516631.
7. Artificial neural network based modeling of GaAs HBT and power amplifier design for wireless communication system / M. S. Alam, O. Farooq, Izharuddin and G. A. Armstrong // 2006 International Conference on Microelectronics. – 2006. – P. 103 – 106. – DOI: 10.1109/ICM.2006.373277.
8. A wiener-type dynamic neural network approach to the modeling of nonlinear microwave devices / W. Liu, W. Na, L. Zhu [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – June 2017. – Vol. 65, No 6. – P. 2043 – 2062. – DOI: 10.1109/TMTT.2017.2657501.

9. An accurate neural network-based consistent gate charge model for GaN HEMTs by refining intrinsic capacitances / W. Hu, H. Luo, X. Yan and Y.-X. Guo // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – July 2021. – Vol. 69, No 7. – P. 3208 – 3218. – DOI: 10.1109/TMTT.2021.3076064.
10. **Angelov, I.** A new empirical nonlinear model for HEMT-devices / I. Angelov, H. Zirath and N. Rorsman // 1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest. – 1992. – Vol. 3. – P. 1583 – 1586. – DOI: 10.1109/MWSYM.1992.188320.
11. Large-signal modelling and comparison of AlGaIn/GaN HEMTs and SiC MESFETs / K. Angelov, D. Andersson, D. Schreurs [et al.] // Asia-Pacific Microw. Conf. – Dec. 12–15, 2006. – P. 279 – 282.
12. **Sayed, A.** An empirical large signal model for silicon carbide MESFETs / A. Sayed and G. Boeck // Gallium Arsenide and Other Semicond. Appl. Symp. – Oct. 2005. – P. 313 – 316.
13. **Yuk, K. S.** An empirical large-signal model for SiC MESFETs with self-heating thermal model / K. S. Yuk and G. R. Branner // IEEE Trans. MTT. – Nov. 2008. – Vol. 56, No 11. – P. 2671 – 2680.
14. **Богданов, С. А.** Нелинейные искажения усилителей на основе полевых транзисторов с различными концентрационными профилями / С. А. Богданов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – № 2 (549). – С. 6 – 18.
15. **Галушкин, А. И.** Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 496 с.
16. **Медведев, В. С.** Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.
17. **Берман, Л. С.** Введение в физику варикапов / Л. С. Берман. – Л.: Изд-во «Наука». Ленингр. отд., 1968. – 180 с.
18. **Зи, С.** Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
19. **Baggenstoss, P. M.** A neural network based on first principles / P. M. Baggenstoss // ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2020. – P. 4002 – 4006. – DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9054549.
20. GaAs FET device and circuit simulation in SPICE / H. Stutz, P. Newman, I. W. Smith [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – Feb. 1987. – Vol. 34, No 2. – P. 160 – 169. – DOI: 10.1109/T-ED.1987.22902.

Статья поступила 11 апреля 2022 г.

УДК 621.391.3

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИБОРЫ
ДЛЯ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ
СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ**

С. А. БОГДАНОВ

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

Рассмотрены перспективные приборы сверхбыстродействующей наноэлектроники с низким энергопотреблением на основе InSb, которые могут найти применение в вычислительной технике с тактовыми частотами терагерцового диапазона и позволят существенно расширить возможности по цифровой обработке радиосигналов в современных системах связи. Проанализированы характеристики и особенности современных GaAs гетероструктурных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием, цифровыми барьерами, а также гомоструктурных полевых транзисторов с повышенной линейностью передаточной характеристики. Рассмотренные приборы на основе GaAs позволяют существенно улучшить эффективность использования частотного ресурса и обеспечивают продвижение вверх по рабочим частотам, что может найти применение в аналоговых устройствах современных систем связи.

КС: донорно-акцепторное легирование, цифровые барьеры, зонная диаграмма, коэффициент усиления, фазовый шум, нелинейные искажения, антимонид индия, неравновесные эффекты, квантовый провод, квантовый диод, квантовый транзистор, терагерц

**PROMISING DEVICES
FOR DIGITAL AND ANALOG APPARATUS
OF MODERN COMMUNICATION SYSTEMS**

S. A. Bogdanov

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

Promising devices of ultrafast nanoelectronics with low power consumption based on InSb are considered, which can be used in computer technology with clock frequencies of terahertz range and will significantly expand the possibilities for digital processing of radio signals in modern communication systems. The characteristics and features of modern GaAs heterostructural field-effect transistors with donor-acceptor doping, digital barriers, as well as homostructural field-effect transistors with increased linearity of the transfer characteristic are analyzed. The considered devices based on GaAs can significantly improve the efficiency of using the frequency resource and provide advancement in operating frequencies, which can be used in analog devices of modern communication systems.

Keywords: donor-acceptor doping, digital barriers, band diagram, gain, phase noise, nonlinear distortions, indium antimonide, non-equilibrium effects, quantum wire, quantum diode, quantum transistor, terahertz

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых быстроразвивающихся и перспективных сегментов телекоммуникационного рынка являются беспроводные широкополосные системы связи. В сетях пятого поколения (5G) планируется работа колоссального количества устройств, что невозможно без увеличения ско-

рости передачи данных к множеству абонентов. В рамках решения данной проблемы ведутся научные исследования по увеличению эффективности использования частотного спектра и его расширению в терагерцовую область. Так, существенно повысить спектральную эффективность позволяют новые виды модуляции, применение адаптивных антенных систем (AAS), систем с несколькими антеннами (MIMO), развитие методов множественного доступа [1, 2]. Развиваются аппаратура и методы цифровой обработки сигналов, элементная база вычислительной техники с тактовыми частотами терагерцового диапазона. Рост эффективности использования частотных ресурсов неразрывно связан с освоением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн полевыми транзисторами с высокой подвижностью электронов (HEMT) [3], а также улучшением технических характеристик связной аппаратуры: уменьшением коэффициента шума, снижением нелинейных искажений, расширением динамического диапазона.

Улучшение характеристик твердотельных приборов и устройств терагерцовой электроники неизбежно связано с развитием нанотехнологий. Их применение уже сейчас позволяет существенным образом улучшить характеристики традиционных СВЧ-транзисторов и обеспечит возможность в будущем создавать новые приборы, основанные на квантовых эффектах [4–7]. Перспективы для использования широкого спектра квантовых явлений открывают методы управляемого формирования нанопроводов из полуметаллов с требуемыми физико-химическими свойствами [8, 9]. Разрабатываемые на основе нанопроводов полевые транзисторы (NWFET), вероятно, составят основу элементной базы сверхбыстродействующей цифровой нанoeлектроники с низким энергопотреблением [10]. При этом наиболее подходящим материалом для создания квантовых проводов по совокупности электрофизических свойств является антимонид индия (InSb).

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть ряд перспективных сверхбыстродействующих приборов гетероструктурной нанoeлектроники на основе InSb, а также GaAs-транзисторов, потенциал улучшения характеристик которых еще не исчерпан.

2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ GaAs ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Публикации по линейным транзисторам и усилителям на их основе имели место в зарубежной печати [11–20]. В последние годы количество публикаций в этом направлении существенно сократилось, но, судя по техническим характеристикам промышленных СВЧ-усилителей мощности (УМ) ведущих зарубежных производителей, работы перешли в практическую плоскость и дали результат. Так, превышение уровня IP₃ над $P_{1дБ}$ у лучших образцов зарубежных усилителей достигает уже 27 дБ, вместо типичных 10...15 дБ. При этом следует отметить, что, несмотря на технологическое отставание в производстве GaN-приборов, ОПК России во многом сохраняет конкурентоспособность по GaAs-технологии.

В частности, АО «НПП «Исток» им. Шокина» обладает существенным научно-техническим заделом в этой области [21–32]. На предприятии был разработан и изготовлен гомоструктурный (FET) GaAs-транзистор с повышенной линейностью передаточной характеристики. Зависимости входной емкости и крутизны от напряжения на затворе такого транзистора приведены на рис. 1.

В ряде работ показано, что, несмотря на меньший коэффициент усиления, GaAs FET с повышенной линейностью передаточной характеристики позволили снизить уровень фазовых шумов усилителей и автогенераторов примерно на 10...15 дБ при собственных низкочастотных шумах, существенно превосходящих шумы обычного транзистора. Анализ результатов теоретических исследований указывает на возможность дополнительного снижения фазовых шумов автогене-

раторов на основе линейных GaAs FET на величину порядка 10 дБ при отстройке 10 кГц за счет уменьшения количества скрытых дефектов в структуре полевого транзистора, что позволит таким автогенераторам выйти на уровень приборов на биполярных транзисторах [25]. Применение GaAs FET с повышенной линейностью передаточной характеристики в УМ СВЧ дает возможность увеличить мощность в точке 1-дБ компрессии более чем в полтора раза, а также снизить уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка на величину около 20 дБ, что в ряде приложений эквивалентно возможности повышения мощности СВЧ-передатчика в 10 раз [24, 26].

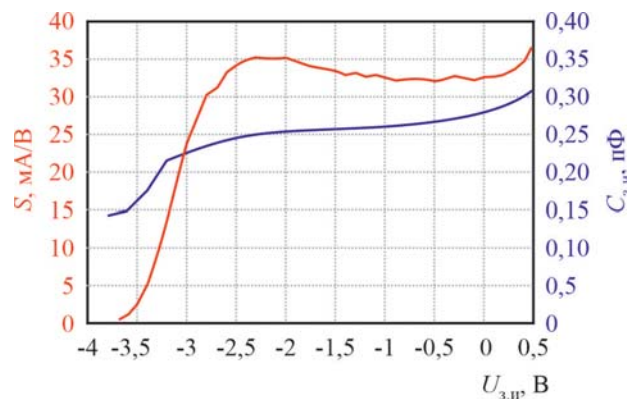


Рис. 1. Зависимости входной емкости и крутизны от напряжения на затворе транзистора с повышенной линейностью передаточной характеристики

Также в России в 2012 г. был создан новый тип транзисторных гетероструктур: гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием [27–30]. Донорно-акцепторное легирование позволило сформировать у границ квантовой ямы дополнительные потенциальные барьеры, оптимизированные для уменьшения поперечного пространственного переноса электронов и увеличения эффекта размерного квантования. Первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на GaAs-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием продемонстрировали двукратное увеличение удельной мощности транзисторов, а также рост малосигнального коэффициента усиления на 3–4 дБ [29]. Следует также отметить, что уже сейчас в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск) по заказу АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработана уникальная гетероструктура с донорно-акцепторным легированием, имеющая поверхностную плотность электронов $4,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при подвижности электронов $5800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что существенно выше, чем у обычных гетероструктур ($3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при подвижности электронов $6000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль разработанной DA-DpHEMT-структуры приведены на рис. 2. Изготовленные на этих гетероструктурах первые полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн [30] при длине T-образного затвора 0,14 мкм на частоте 40 ГГц имеют коэффициент усиления более 15 дБ и более 10 дБ на частоте 67 ГГц, пробивное напряжение затвор – сток достигает 31 В, а удельная плотность тока стока при открытом затворе – 0,7 А/мм.

В 2020 году транспортные свойства псевдоморфных AlGaAs/GaAs/InGaAs-гетероструктур с двухсторонним донорно-акцепторным легированием были существенно улучшены за счет введения дополнительных цифровых потенциальных барьеров из AlAs/GaAs короткопериодных сверхрешеток вокруг легированных областей. Как показывают теоретические расчеты [31],

введение цифровых барьеров на 30...40% повышает всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте их в область сильного поля. Кроме того, существенно возрастает локализация электронов в проводящем канале, а ряд дополнительно проявившихся квантовых эффектов, связанных с локализацией горячих электронов в сверхрешётке, позволяет назвать гетероструктуру с донорно-акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами из AlAs/GaAs-сверхрешеток квантовой (Q-DpHEMT). Первые Q-DpHEMT-гетероструктуры, даже с малым количеством неоптимально расположенных цифровых барьеров, позволили получить приборы с очень высоким усилением [32]. Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль таких Q-DpHEMT-структур приведен на рис. 3. Приборы на основе Q-DpHEMT могут иметь коэффициент усиления до двух раз выше при сохранении неизменными других высоких параметров, свойственных приборам на основе DA-DpHEMT-структур.

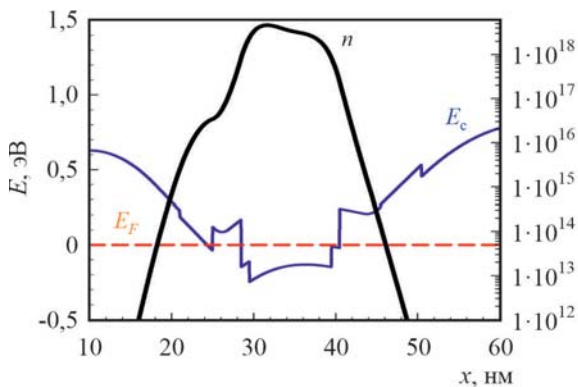


Рис. 2. Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль для DA-DpHEMT-структуры

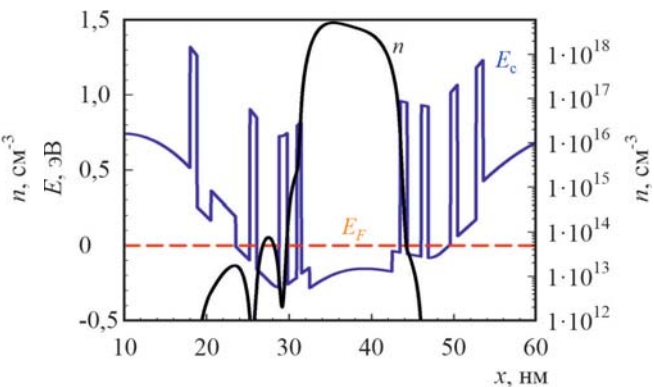


Рис. 3. Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль для Q-DpHEMT-структуры

3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С НИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ InSb

Как отмечалось выше, направления развития беспроводных широкополосных систем связи определяются основными тенденциями в электронике: снижение габаритов и массы электронных устройств; снижение энергопотребления электронных устройств; увеличение объема информации, передаваемой за единицу времени; повышение скорости обработки информации. При этом существенно расширить возможности по цифровой обработке радиосигналов в современных системах связи позволит внедрение элементной базы вычислительной техники с тактовыми частотами терагерцового диапазона.

Одним из наиболее перспективных материалов для формирования элементов сверхбыстродействующей нанoeлектроники с низким энергопотреблением является InSb [33–35]. После того как в 2005 г. Intel объявил о создании квантового транзистора на основе InSb [36], экспериментальные работы по применению этого материала в приборах и функциональных устройствах резко активизировались. Сейчас в США и Китае ведутся интенсивные исследования InSb в качестве одного из кандидатов на замену Si в электронике. Учитывая, что длина размерного

квантования в InSb при комнатной температуре составляет ~ 60 нм, уменьшение размеров наноструктур до десятков и единиц нанометров позволяет существенно изменять ширину их эффективной запрещенной зоны [37]. Это дает возможность создавать квантовые приборы, в основе функционирования которых лежат неравновесные эффекты, возникающие на границах между квантовыми проводами с различным поперечным сечением. В ряде работ [34, 38, 39] показано, что, используя указанные эффекты, можно спроектировать приборы, которые будут иметь электрические характеристики, аналогичные характеристикам обычных диодов и транзисторов. То есть имеется шанс создать элементную базу нанoeлектроники, которая позволит при меньших размерах элементов и более высоких рабочих частотах воспроизвести все необходимые характеристики современных электронных устройств [40]. На рис. 4...6 приведены варианты реализации и вольт-амперные характеристики рассмотренных в работах [34, 38, 39] релаксационных квантовых диода и транзистора, а также квантового транзистора с инжекционным затвором. Плотность интеграции в электронных схемах на основе таких квантовых приборов будет достигать 10^{10} элементов на квадратный сантиметр, а предельные частоты будут превышать 100 ГГц.

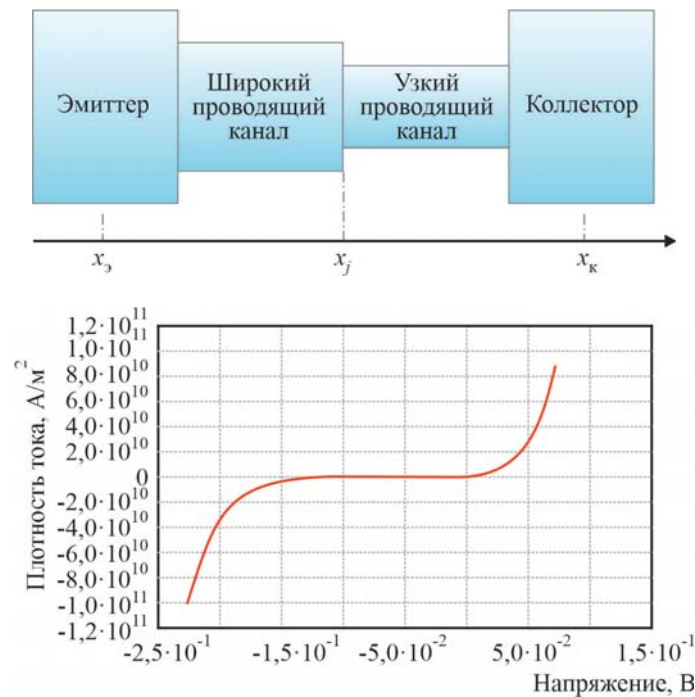


Рис. 4. Релаксационный квантовый диод и его вольт-амперная характеристика [34, 38, 39]

СВЧ-элементы из InSb обладают уникальными частотными свойствами (300 ГГц и выше) и способны работать при напряжениях менее 0,5 В [41]. Применение антимонида индия в качестве проводящего канала полевого транзистора на нанопроводе позволяет решить характерную для этого типа приборов проблему низкой крутизны ВАХ [42, 37]. Транзистор, созданный в 2011 г. в Purdue University (West Lafayette, Indiana, USA) при поддержке DARPA [43], имеет вполне

приемлемую крутизну характеристики ($\sim 10^5$ А/В) и высокую плотность тока ($\sim 10^4$ А/см²). Аналогичные показатели продемонстрировал и *p*-канальный полевой транзистор с каналом из нанопровода InSb, легированного углеродом [44].

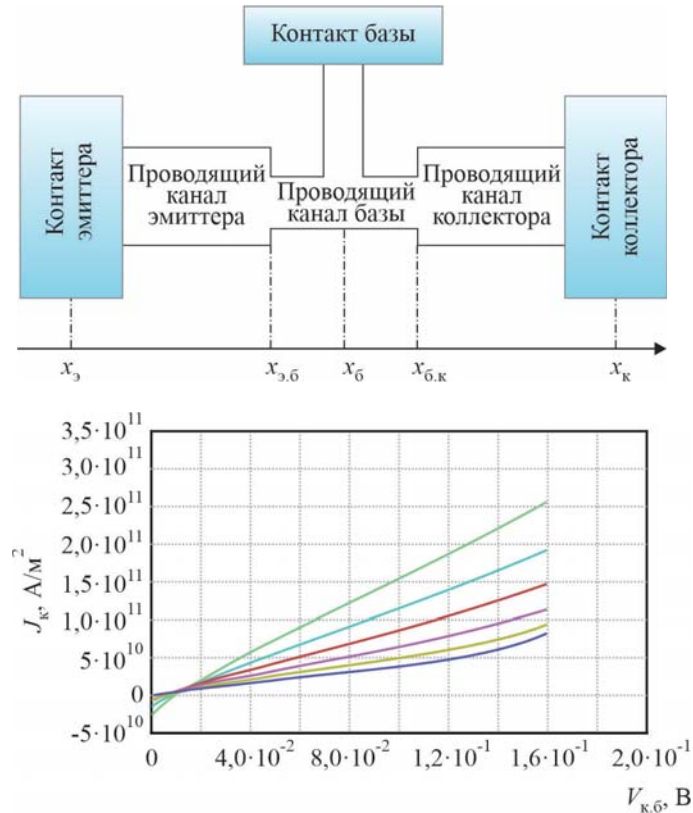


Рис. 5. Релаксационный квантовый транзистор и семейство его вольт-амперных характеристик [34, 38, 39]

В США при поддержке DARPA и Intel [45] ведутся работы по созданию сверхбыстродействующей элементной базы с низким энергопотреблением для применения в цифровых схемах на основе InSb, InAs. Целевые приборы – транзисторы на нанопроводах. Созданы экспериментальные образцы ряда элементов сверхбыстродействующей нанoeлектроники с низким энергопотреблением [44–46] на основе InSb: транзистор с квантовой ямой и полевой транзистор на нанопроводе. Уже эти первые образцы способны функционировать на частотах 300 ГГц и более. Теоретические оценки [47, 48] показывают, что предельные частоты для квантовых приборов на основе нанопроводов могут достигать десятков терагерц.

Современные отечественные технологии позволяют формировать в регулярных порах матриц анодного оксида алюминия нанопровода из InSb диаметром от 30 нм [9]. Таким образом, имеется возможность использовать на практике размерное квантование энергии электронов в этих объектах. Указанными свойствами можно воспользоваться для создания функциональных электронных устройств на основе нанопроводов из InSb, таких, как активные элементы генераторов терагерцового излучения, фоточувствительные приборы, локальные системы охлаждения, антенные решетки терагерцового диапазона частот.

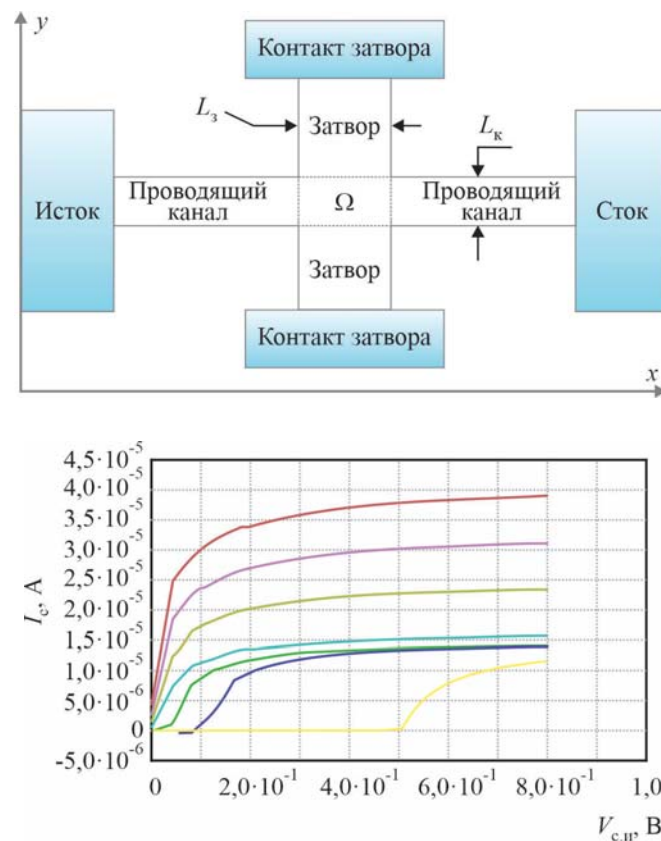


Рис. 6. Квантовый транзистор с инжекционным затвором и семейство его вольт-амперных характеристик [34, 38, 39]

В статье [6] показано, что нанопровод может быть активным элементом генератора СВЧ-колебаний в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Принципиально важным для функционирования нанопровода в качестве активного элемента генератора является наличие гетеропереходов между его проводящим каналом и контактными областями. Для обеспечения генерации необходимо минимизировать активное сопротивление канала, сделав его достаточно коротким и изготовив из материала с максимальной подвижностью электронов – антимонида индия. Технология создания таких структур описана в работе [48]. В работе [49] предложен генератор электромагнитных волн в диапазоне частот $0,3 \dots 1$ ТГц с активным элементом в виде матрицы нанопроводов из антимонида индия. Определены электрические и геометрические параметры активного элемента: оптимальный диаметр и длина нанопроводов, размеры и проводимость контактных площадок – для согласования параметров резонатора и активного элемента и генерации СВЧ-мощности. Расчетная мощность генератора в непрерывном режиме работы составила 12,8 мВт. Представленные расчеты позволяют надеяться, что на основе матриц нанопроводов из антимонида индия удастся создать твердотельный генератор электромагнитных колебаний терагерцового диапазона частот.

Однако, несмотря на полученные многочисленные положительные экспериментальные результаты [45], прогнозы о скором широком промышленном применении квантовых приборов на основе нанопроводов из InSb пока не оправдываются. Это связано с отсутствием промышленной

технологии создания нанопроводов с заданными геометрическими и электрофизическими характеристиками. Измеренная подвижность в InSb-нанопроводах оказалась не столь большой, как ожидалось [50]. В разных экспериментах она изменяется в широких пределах, от 120 до 25 000 см²/(В·с), и существенно зависит от технологии изготовления нанопровода и свойств подложки, на которую он помещен [51].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение новых технических решений при разработке современных транзисторных гетероструктур, а также квантовых приборов, в основе функционирования которых лежат неравновесные эффекты, возникающие на границах между квантовыми проводами с различным поперечным сечением, позволяет создавать перспективную элементную базу цифровых и аналоговых устройств современных систем связи. Разработка промышленной технологии создания квантовых приборов на основе нанопроводов из InSb и широкое внедрение рассмотренных в работе приборов окажут несомненно положительное влияние на высокочастотные и эксплуатационные характеристики современной радиоэлектронной аппаратуры различного функционального назначения, способствуя в том числе более эффективному использованию частотного спектра.

Крайне важно опираться на отечественные прорывные технологии, развивать их, и это вопрос не только информационной, но и национальной безопасности страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихвинский, В. О. Перспективы сетей 5G и требования к качеству их обслуживания / В. О. Тихвинский, Г. С. Бочечка // Электросвязь. – 2014. – № 11. – С. 40 – 43.
2. Ерохин, С. Д. Анализ спектральной эффективности современных широкополосных систем связи / С. Д. Ерохин, Ю. М. Зайцева // Материалы VII Международной научно-технической конференции INTERMATIC. – 2010. – С. 166 – 169.
3. Samoska, L. A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime / L. A. Samoska // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 9 – 24.
4. Карушкин, Н. Ф. Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ-диапазона. Ч. 1 / Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов, Е. А. Смирнова // Нано- и микросистемная техника. – 2019. – № 3. – С. 165 – 172.
5. Асеев, А. Л. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / А. Л. Асеев // Вестник Российской академии наук. – 2006. – № 7. – С. 603 – 611.
6. Обухов, И. А. Нанопровод как активный элемент генератора СВЧ-излучения / И. А. Обухов, Е. А. Смирнова // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – № 8. – С. 509 – 517.
7. Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применение для генерации СВЧ-излучения / И. А. Обухов, Г. Г. Горох, А. А. Лозовенко, Е. А. Смирнова // Наноиндустрия. – 2017. – № 7. – С. 96 – 108.
8. Формирование массивов нанопроводов Вi и Sb в порах анодного оксида алюминия для перспективных тепломеров / Г. Г. Горох, А. А. Лозовенко, И. А. Обухов, Е. А. Смирнова // 26-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). – Севастополь, 2016. – С.1471 – 1477.

9. Технология формирования нанопроводов антимонида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия / И. В. Божьев, Г. Г. Горох, А. А. Лозовенко [и др.] // 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). – Севастополь, 2018. – С. 996 – 1002.
10. **Обухов, И. А.** Квантовые приборы: история, перспективы, проблемы / И. А. Обухов // 26-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). – Севастополь, 2016. – С. 96 – 102.
11. A highly linear MESFET / S. L. G. Chu, J. Huang, W. Struble [et al.] // IEEE MTTs Digest. – 1991. – P. 725 – 728.
12. High linearity monolithic broadband pseudomorphic spike-doped MESFET amplifiers / S. L. G. Chu, J. C. Huang, A. Bertrand [et al.] // GaAs IC Symp. Tech. Dig. – 1992. – P. 211 – 214.
13. High dynamic range microwave FET / P. K. Ikalainen [et al.] // Electronics Letters. – May 23, 1991. – Vol. 27, No 11. – P. 945 – 946.
14. **Ikalainen, P. K.** Low-noise low DC power linear FET / P. K. Ikalainen, L. C. Witkowski, Y.-C. Kao // European Microwave Conference Proceedings. – 1992. – P. 570 – 575.
15. **Ikalainen, P. K.** Low-noise, low DC power linear amplifiers / P. K. Ikalainen, L. C. Witkowski, K. R. Varian // IEEE MTTs Digest. – 1993. – Vol. 1. – P. 357 – 360.
16. A C-band 25 Watt linear power FET / Y. Taniguchi, Y. Hasegawa, Y. Aoki, J. Fukaya // IEEE MTT-S Digest. – 1990. – P. 981.
17. **Otobe, K.** Super low-distortion and high power hetero GaAs MESFETs with asymmetrical LDD structure / K. Otobe, K. Nakata, S. Nakajima // GaAs IC Symposium 2000. 22nd Annual. – 2000. – P. 67 – 70.
18. A high linearity high efficiency pseudomorphic HEMT / S. Shanfield, M. Schindler, L. Aucoin [et al.] // Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium 1992. Technical Digest 1992. 14th Annual IEEE. – 1992. – P. 207 – 210.
19. High PAE and low intermodulation distortion performance of newly developed GaAs FETs using ion implantation process / Kazutaka Takagi, Hideki Kimura, Tomohito Ohmori, Takuji Yamamura // Microwave Conference 2009. APMC 2009. Asia Pacific. – 2009. – P. 1679 – 1682.
20. A δ -doped InGaP/InGaAs pHEMT with different doping profiles for device linearity improvement / Y.-C. Lin, E. Y. Chang, H. Yamaguchi [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – P. 1617 – 1625.
21. **Богданов, Ю. М.** Полевой транзистор с низкой модуляционной чувствительностью для маломощных СВЧ-устройств / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 2. – С. 346 – 355.
22. **Богданов, Ю. М.** Зависимость низкочастотных флуктуаций входной емкости полевого транзистора от профиля легирования канала / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Микроэлектроника. – 1993. – № 2. – С. 15 – 19.
23. Полевой транзистор с низкой чувствительностью для маломощных СВЧ-генераторов / Ю. М. Богданов, А. К. Балыко, А. Б. Пашковский [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1993. – № 3. – С. 14 – 19.
24. Полевые транзисторы с повышенным уровнем линейности / С. А. Богданов, Ю. М. Богданов, В. Г. Лапин [и др.] // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). – Севастополь, 2018. – С. 24 – 29.
25. Новый метод снижения фазовых шумов генераторов на полевых транзисторах / С. А. Богданов, Ю. М. Богданов, Н. О. Викторова [и др.] // 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). – Севастополь, 2018. – С. 34 – 39.
26. **Богданов, С. А.** Нелинейные искажения усилителей на основе полевых транзисторов с различными концентрационными профилями / С. А. Богданов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – № 2 (549). – С. 6 – 18.

27. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, № 17. – С. 84 – 89.
28. Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 684 – 692.
29. Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-HEMT / А. А. Борисов, А. Б. Пашковский, В. М. Лукашин [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – № 1. – С. 65 – 69.
30. DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн / С. А. Богданов, С. Н. Карпов, В. Г. Лапин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – № 2 (549). – С. 19 – 31.
31. Перспективы улучшения быстродействия DA-DpHEMT транзисторов миллиметрового диапазона длин волн / С. А. Богданов, А. К. Бакаров, К. С. Журавлёв [и др.] // 31-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2021). – Севастополь, 2021. – С. 250 – 251.
32. A. V. Pashkovskii, S. A. Bogdanov, A. K. Bakarov [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2021. – Vol. 68, No 1. – P. 53.
33. **Обухов, И. А.** Электронные приборы на основе антимонида индия / И. А. Обухов, Г. Г. Горох // 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). – Севастополь, 2012. – С. 653 – 654.
34. **Obukhov, I. A.** Some aspects of nanoelectronics development in Russia / I. A. Obukhov // WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials. – S. Petersburg, 1997. – P. 116 – 125.
35. **Обухов, И. А.** Материалы нанoeлектроники / И. А. Обухов // 7-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'1997). – Севастополь, 1997. – С. 383 – 385.
36. http://www.ci.ru/inform01_06/p_22.htm ; <http://citforum.ru/hardware/microcon/thermal/>.
37. Single- and multi-wall carbon nanotube field effect transistors / R. Martel, T. Shmidt, H. R. Shea [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73, No 17. – P. 2447 – 2449.
38. **Обухов, И. А.** Особенности функционирования квантовых приборов / И. А. Обухов // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 7. – С. 38 – 45.
39. **Обухов, И. А.** Неравновесные эффекты в электронных приборах / И. А. Обухов. – Москва – Киев – Минск – Севастополь: Изд-во «Вебер», 2010. – 303 с.
40. **Обухов, И. А.** Некоторые возможности квантовых интегральных схем / И. А. Обухов, В. М. Балабанов // 9-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'1999). – Севастополь, 1999. – С. 76 – 77.
41. Infrared detection using an InSb nanowire / H. Chen, X. Sun, K.W.C. Lai [et al.] // IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference.
42. **Obukhov, I. A.** Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices / I. A. Obukhov. – LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 132 p.
43. Room temperature device performance of electrodeposited InSb nanowire field effect transistors / R. Das Suprem, J. Delker Collin, Dmitri Zakharov [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – P. 243504-1 – 243504-3.
44. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors / Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang [et al.] // Nanoscale. – 2013. – Vol. 5. – P. 9671 – 9676.

45. **Datta, S.** The 21st century energy efficient logic transistor, formerly with advanced transistor & nanotechnology group intel corporation hillsboro. – Oregon, USA, October 9th, 2007. – URL: <http://www.semtech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>.
46. InSb based quantum well transistor for high speed, low power applications / T. Ashley, A. R. Barnes, L. Buckle [et al.] – URL: <http://csmantech.pairserver.com/Digests/2005/2005papers/14.18.pdf>.
47. **Obukhov, I. A.** Planar one-dimensional quantum devices / I. Obukhov // Nanoscience and Nanotechnology. – 2013. – No 3 (5). – P. 115 – 122.
48. **Горох, Г. Г.** Массивы нанопроводов из антимонида индия для перспективных термоэлектрических устройств / Г. Г. Горох, И. А. Обухов, А. А. Лозовенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 1. – С. 3 – 11.
49. Генератор терагерцового диапазона на основе матрицы нанопроводов / В. М. Балабанов, Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов [и др.] // 27-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). – Севастополь, 2017. – С. 1097 – 1107.
50. Электрические характеристики нанопроводов антимонида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия / И. В. Божьев, Г. Г. Горох, Н. Ф. Карушкин [и др.] // 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). – Севастополь, 2018. – С. 1041 – 1046.
51. Kouwenhoven towards high mobility InSb nanowire devices / Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen [et al.] // Nanotechnology. – 2015. – Vol. 26. – P. 215202-1 – 215202-7.

Статья поступила 21 апреля 2022 г.

≡≡≡ **НОВЫЕ КНИГИ** ≡≡≡

РЭНДАЛ У. БИАРД, ТИМОТИ У. МАКЛЭЙН. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 312 с.

Это издание посвящено управлению беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Акцент в книге делается на системы повышения устойчивости управления. Других изданий, которые бы охватывали вопросы моделирования динамики летательных аппаратов, разработки автопилотов (решающих задачи «низкого уровня»), оценки состояния БЛА, а также расчета траектории полета (задачи «высокого уровня»), в настоящее время нет.

Целевой аудиторией являются студенты, которые прошли подготовку в области электротехники, компьютерной техники, машиностроения и информатики и прослушали вводный курс по системам управления с обратной связью или робототехнике. Также книга будет интересна инженерам в области аэронавтики, которые заинтересованы во вводном курсе в автономные системы.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.623

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛЛЕКТОРА МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

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

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

Проведено исследование возможности снижения температуры внутренней токовоспринимающей поверхности коллектора. Рассмотрен опыт проектирования коллектора мощного многолучевого клистрона в программах SolidWorks и CST Studio, а также результаты практического применения разработанной конструкции.

КС: многолучевой клистрон, коллектор, электронный поток, плотность мощности, амплитуда импульсной температуры, электрический пробой

STUDYING THE POSSIBILITY FOR UPGRADING A HIGH-POWER MULTIPLE-BEAM KLYSTRON COLLECTOR

S. G. Astashov, A. S. Arefyev, V. I. Puginin,
T. N. Burdina, S. A. Melnikov, A. F. Fedotov, A. N. Yunakov

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

A possibility for reducing the temperature of the internal current receiving surface of the collector was studied. The experience of designing a high-power multiple-beam klystron collector in SolidWorks and CST Studio programs, as well as the results of practical applications of the developed design were considered.

Keywords: multiple-beam klystron, collector, electron flow, power density, pulse temperature amplitude, electrical breakdown

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные импульсные многолучевые клистроны (МЛК) широко применяются в отечественных радиолокационных станциях самого различного назначения. Клистроны для радиолокационных станций должны обладать рядом параметров [1]: широкой полосой рабочих частот, возможностью работы при различной длительности импульса, высоким уровнем выходной импульсной и средней мощности, длительным сроком службы, а также высокой электрической прочностью. Практически в каждой радиолокационной системе требуется предусмотреть возможность работы клистрона в полном электрическом режиме, но при отсутствии входной мощности (статический режим).

Безотказная работа мощного импульсного МЛК в статическом режиме при подводимой средней мощности в несколько десятков киловатт в основном определяется стабильной работой

коллектора. При компактном расположении лучей в МЛК, в коллекторе, в местах попадания электронных лучей на его токовоспринимающую поверхность, могут возникать локальные перегревы. Это приводит к газовыделению из материала коллектора и отравлению катода, а также увеличению вероятности электрических пробоев и снижению долговечности приборов.

Целью данной работы является повышение надежности работы мощного МЛК путем оптимизации конструкции коллектора, при сохранении габаритных размеров МЛК.

2. КОЛЛЕКТОР С КОНУСНОЙ ТОКОВОСПРИНИМАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И НЕДОСТАТОК ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЛК

Структура коллектора исследуемого прибора представлена на рис. 1. Она включает тело коллектора с развитой внешней зубчатой поверхностью охлаждения, рубашку охлаждения и распределительную крышку со штуцерами. Характерной особенностью является овальная форма коллектора, переходящая в конус, необходимая для вывода из соленоида ввода и вывода энергии.

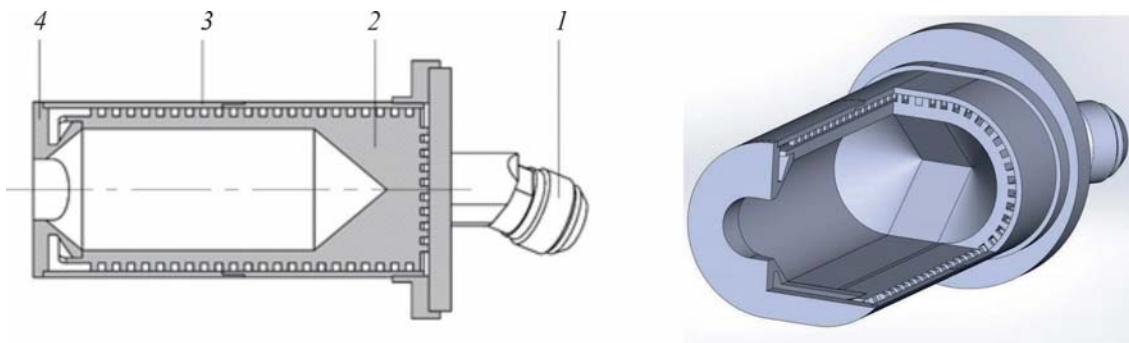


Рис. 1. Базовая конструкция коллектора мощного МЛК в разрезе:

1 – штуцера подвода охлаждающей жидкости; 2 – тело коллектора с внешней зубчатой поверхностью; 3 – стальная рубашка; 4 – дно коллектора

Использование такого коллектора в исследуемом МЛК приводило к частым электрическим пробоям и малому сроку службы прибора. После вскрытия коллектора было обнаружено, что на его конусной части имеются следы оплавления, рис. 2.

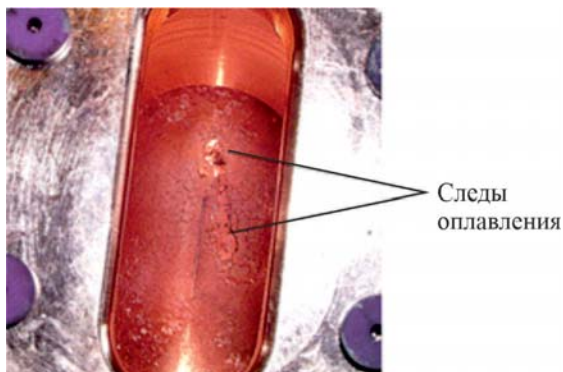


Рис. 2. Фото внутренней поверхности базовой конструкции коллектора с оплавлением конусообразной поверхности

Таким образом, конструктивным недостатком коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью является малая площадь рассеивания мощности в торце коллектора. Это приводит к локальному перегреву верхней части коллектора, где съем тепла недостаточен из-за небольшой площади теплоотвода в области крышек.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ КОЛЛЕКТОРА

С целью теоретического исследования причин оплавления внутренней поверхности коллектора и возможности снижения температуры нагрева токовоспринимающей области была разработана следующая методика расчета коллектора (расчет производился для средней мощности электронного потока, дополнительно оценивался импульсный нагрев коллектора):

1. С помощью методов трехмерного моделирования в программе CST Particle Studio [2] для реального распределения магнитного поля в исследуемом клистроне и коллекторе рассчитывается распределение траекторий электронов, рис. 3.

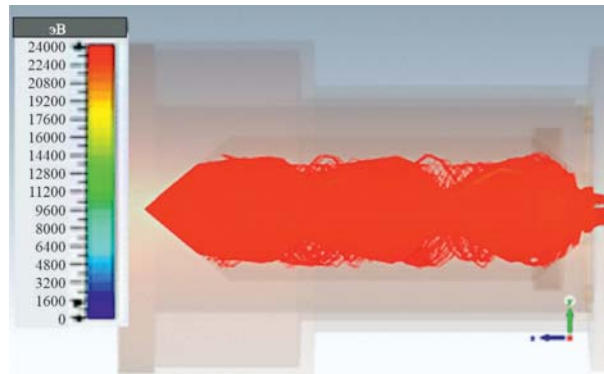


Рис. 3. Распределение траекторий электронов в продольном сечении базовой конструкции коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью в исследуемом МЛК

2. По результатам расчета оседания электронов в программе CST Multiphysics определяется плотность мощности на поверхности коллектора, рис. 4.

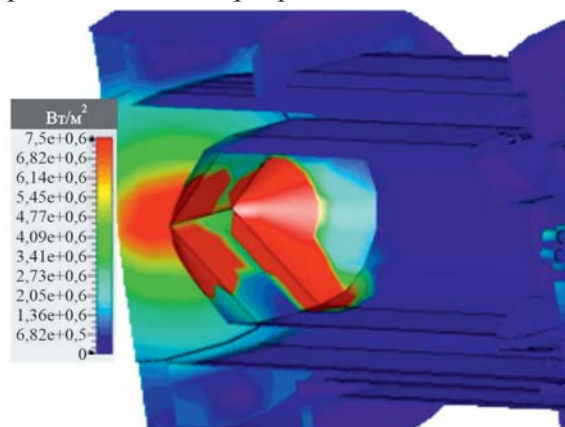


Рис. 4. Распределение плотности мощности на внутренней поверхности коллектора с конусной токовоспринимающей поверхностью в исследуемом МЛК

3. Используя значения полученной плотности мощности, расхода охлаждающей жидкости (65 л/мин) и температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения (70 °С), с помощью теплового моделирования в программе SolidWorks Flow Simulation [3] определяется распределение внутренней температуры коллектора, рис. 5.

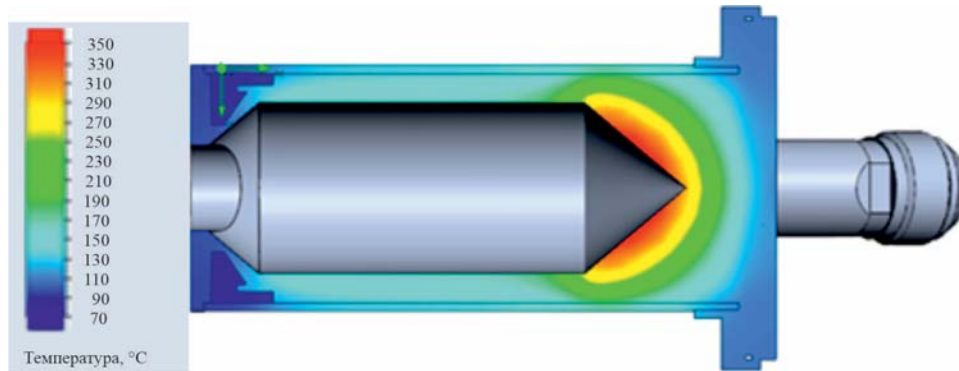


Рис. 5. Распределение температуры в базовой конструкции коллектора исследуемого МЛК

Из рис. 3 видно, что в базовой конструкции коллектора основная часть электронного потока осаждается на конусообразную часть коллектора, при этом максимальная удельная мощность на ней составила 750 Вт/см² (см. рис. 4). Тепловой расчет базовой конструкции коллектора показал, что максимальная температура нагрева конусной части с учетом только средней мощности достигает 350 °С (см. рис. 5), что значительно меньше температуры плавления меди.

4. РАСЧЕТ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ КОЛЛЕКТОРА

Поверхностный слой коллектора мощного МЛК во время каждого импульса нагревается, а в промежутках между импульсами остывает. Тепло, выделившееся на нагреваемой поверхности металла, не успевает за время импульса дойти до охлаждаемой поверхности. Расширение и сжатие поверхностного слоя вызывает внутреннее напряжение, образуя микротрещины в металле коллектора. Неоднородности затрудняют передачу тепла, что приводит к резкому возрастанию температуры поверхностного слоя. При этом температуру токовоспринимающей поверхности невозможно снизить ни уменьшением толщины металла, ни снижением температуры охлаждаемой поверхности. Разрушение поверхностного слоя происходит не сразу, а через некоторое количество импульсов. Количество импульсов, необходимое для разрушения металла, зависит от амплитуды импульсной температуры – разности между наибольшей и наименьшей температурой нагрева поверхности.

Амплитуду импульсной температуры рассчитали по формуле, предложенной В. Ф. Коваленко [4]:

$$\Delta T = \frac{0,27 \cdot P \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{\rho \lambda c}}, \quad (1)$$

где ΔT – амплитуда импульсной температуры, °С; P – импульсная удельная мощность электронного потока, Вт/(см²·с); τ – длительность импульса, с; λ – удельная теплопроводность вещества, кал/(с·см); c – удельная теплоемкость вещества, кал/(г·°С); ρ – плотность вещества, г/см³.

По формуле (1) для максимальной длительности импульса была рассчитана амплитуда импульсной температуры базовой конструкции коллектора: $\Delta T \approx 110$ °С. Безопасная амплитуда импульсной температуры для меди $\Delta T_6 < 110$ °С [4]. На основании этого расчета был сделан вывод, что температура токовоспринимающей поверхности коллектора базовой конструкции в импульсном режиме является предельной.

Для решения данной проблемы было рассмотрено несколько вариантов новой внутренней конструкции тела коллектора. Идея состояла в увеличении площади оседания электронного потока на проводящую поверхность, а также смещении максимального нагрева в среднюю часть коллектора, для обеспечения оптимального съема тепла жидкостью. Конструкция и размеры каналов охлаждения остаются неизменными.

Поставленная задача была решена изменением формы внутренней полости коллектора с цилиндрической на клинообразную (рис. 6), в которой электронный поток оседает на поверхность, расположенную под углом α относительно электронного потока.

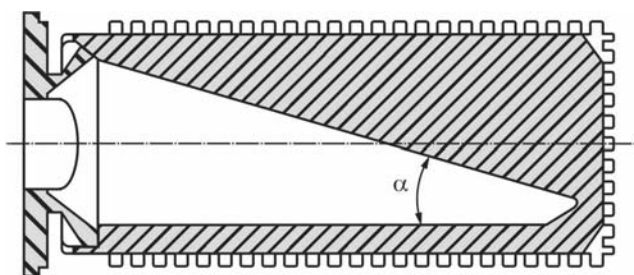


Рис. 6. Тело коллектора с клинообразной внутренней полостью в разрезе

По описанной выше методике был проведен цикл расчетов для выбора конструкции коллектора с клинообразной внутренней поверхностью. Определен оптимальный (с точки зрения минимального нагрева) угол токовоспринимающей поверхности относительно электронного потока. Он составил 16 град. На рис. 7 приведены результаты расчета для такой конструкции коллектора.

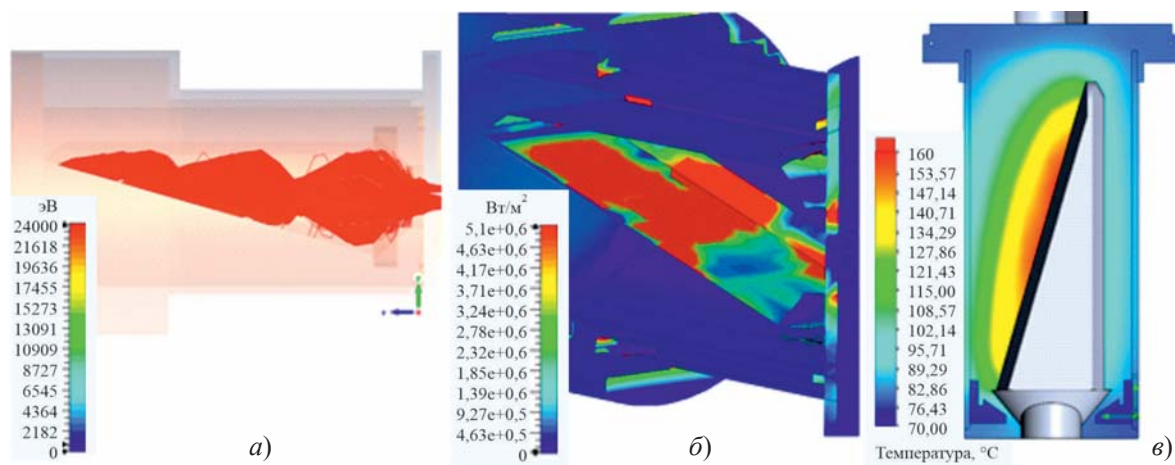


Рис. 7. Расчет модернизированного коллектора с клинообразной внутренней полостью методом трехмерного моделирования:

а – распределение траекторий электронов; *б* – распределение плотности мощности, осаждаемой на поверхности; *в* – распределение температуры в коллекторе в разрезе

Благодаря данной конструкции, удалось увеличить площадь, непосредственно воспринимающую электронный поток. При этом максимальная удельная мощность на поверхности коллектора снизилась до 510 Вт/см^2 , а максимальная температура нагрева в рабочем режиме – до $160 \text{ }^\circ\text{C}$.

По формуле (1) была рассчитана амплитуда импульсной температуры для данной конфигурации коллектора, которая составила $\Delta T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, что практически в 1,5 раза меньше безопасной амплитуды импульсной температуры для меди. Это исключает возможность оплавления поверхностного слоя.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование клинообразной внутренней полости коллектора мощного МЛК позволило существенно уменьшить тепловую нагрузку на токовоспринимающую поверхность и снизить максимальную температуру внутренней поверхности коллектора с 350 до $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Определен оптимальный угол токовоспринимающей поверхности относительно электронного потока – 16 град. Модернизированный коллектор изготовлен и успешно испытан в мощном МЛК.

ЛИТЕРАТУРА

1. The new generation of high-power multiple-beam klystrons / Edward A. Gelvich, Ludvik M. Borisov, Yevgeny V. Zhary [et al.] // IEEE. – January 1993. – Vol. 41, No 1.
2. **Ефремова, М. В.** Моделирование СВЧ-приборов с помощью программы CST Particle Studio / М. В. Ефремова, И. М. Иванов, А. А. Курушин. – М.: СОЛОН-Пресс, 2019. – 332 с.
3. **Matsson, John E.** An introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation / John E. Matsson. – 2019.
4. **Коваленко, В. Ф.** Теплофизические процессы и электровакuumные приборы / В. Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1975. – С. 169 – 184.

Статья поступила 13 апреля 2022 г.

УДК 621.385.632

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СПУТНИКОВОЙ ЛБВ Ka-ДИАПАЗОНА С ОХЛАЖДЕНИЕМ КОЛЛЕКТОРА ИЗЛУЧЕНИЕМ

С. О. Семенов^{1,2}, В. И. Роговин^{1,2}, А. Д. Рафалович¹, Д. И. Кириченко¹

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет»

Проведен анализ теплового режима 135-ваттной ЛБВ Ka-диапазона с охлаждением коллектора излучением. Рассмотрены режимы критических элементов ЛБВ, таких, как спиральная замедляющая система, магниты МПФС, коллектор и его радиатор. Определены величины отводимой тепловой мощности от плиты за счет теплопроводности и от радиатора коллектора за счет излучения в космическое пространство. Показана устойчивость разработанной конструкции ЛБВ к тепловым нагрузкам.

КС: лампа бегущей волны, Ka-диапазон, тепловой режим, многоступенчатый коллектор, охлаждение излучением в космическое пространство

ANALYSIS OF THE THERMAL REGIME OF A SATELLITE Ka-BAND TWT WITH COLLECTOR COOLING BY RADIATION

S. O. Semenov^{1,2}, V. I. Rogovin^{1,2}, A. D. Rafalovich¹, D. I. Kirichenko¹

¹JSC «RPE «Almaz», Saratov

²FSEI HE «National Research Saratov State University»

An analysis of the thermal regime of a 135-Watt Ka-band TWT with collector cooling by radiation has been carried out. The regimes of the TWT critical elements, such as the spiral slow-wave structure, MPFS magnets, collector and its radiator are considered. The values of the heat power removed from the plate due to thermal conductivity and from the collector radiator due to radiation into the outer space are determined. The stability of the developed TWT design to thermal loads is shown.

Keywords: travelling-wave tube, Ka-band, thermal regime, multi-stage collector, cooling by radiation into the outer space

1. ВВЕДЕНИЕ

Характеристики спиральных ламп бегущей волны (ЛБВ) с выходной мощностью более 100 Вт на частотах выше 10 ГГц превосходят характеристики твердотельных усилителей, и такие ЛБВ широко применяются в выходных каскадах ретрансляторов спутников связи. В виде полезного сигнала из мощности электронного пучка в ЛБВ на указанных частотах преобразуется не более 30...35 %, т. е. большая часть мощности остается в пучке. Многоступенчатая рекуперация хотя и позволяет уменьшить величину тепловой мощности, рассеиваемой в коллекторе (до 50...80 % от величины выходной мощности), но величина тепловой нагрузки остается значительной, и для ее эффективного отвода используют излучение.

В [1] проведен тепловой анализ отдельно коллектора с отводом тепла излучением и рассмотрено влияние на температурный режим размеров радиатора, свойств покрытия и т. д.

Целью настоящей работы являлся тепловой анализ всей ЛБВ с охлаждаемым излучением коллектором и взаимосвязи тепловых режимов ее узлов.

2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Высокочастотный (ВЧ) пакет 135-ваттной ЛБВ *Ka*-диапазона (рис. 1) состоит из стальных наконечников, спаянных с медной трубкой, в которой тремя керамическими стержнями из BeO с Т-образным сечением закреплена спираль из материала МАГТ-0,2 сечением $0,1 \times 0,2$ мм с внутренним диаметром 0,8 мм. К полюсным наконечникам МПФС припаивались медные тепловики, которые, в свою очередь, припаивались к плите мягким припоем.

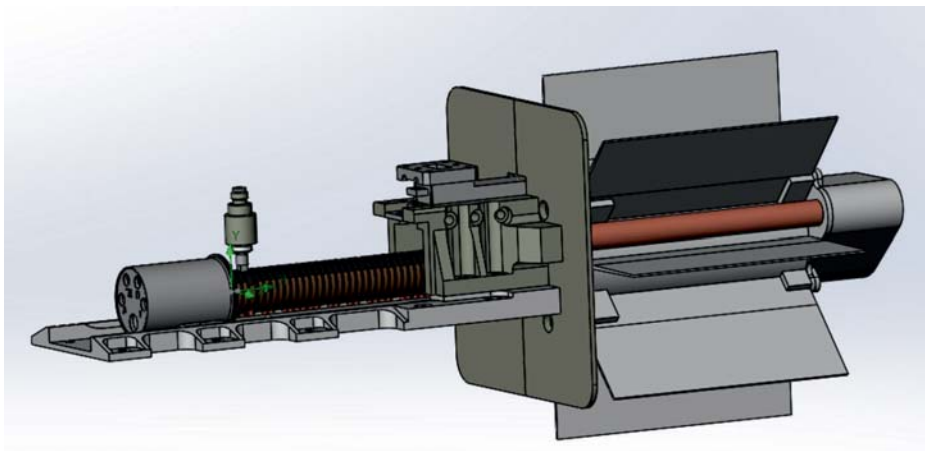


Рис. 1. 3D-модель ЛБВ

Конструкция четырехступенчатого коллектора описана в [1]. При той же длине радиатора 100 мм его внешний диаметр был уменьшен со 170 до 145 мм.

Для проведения тепловых расчетов из конструкции ЛБВ были удалены мелкоструктурные элементы, например траверсы электродов, керамические изоляторы, ножки высоковольтных вводов, которые не влияют на тепловой режим, но существенно усложняют построение сетки конечных элементов.

Катод электронной пушки имеет рабочую температуру 1100 °С, которая во всех режимах обеспечивается его типовой и отработанной сложной конструкцией. Поэтому в расчетах температурный режим катода не рассматривался, катод заменялся простым телом и учитывался тепловой поток от него с соответствующим заданием мощности подогревателя.

Отвод тепла от части ЛБВ, находящейся внутри корпуса спутника, осуществляется только за счет теплопроводности на плиту, поэтому все внешние поверхности этой части ЛБВ считались неизлучающими, температура посадочной поверхности плиты и температура окружающей среды внутри спутника задавалась равной +75 °С.

Расчеты проводились по инженерному пакету Solid Works.

Важным при анализе теплового режима замедляющей системы (ЗС) является определение предельных тепловых нагрузок и соответственно допустимых величин токооседания пучка, возможных при включении пучка или юстировке МПФС. Также на оседание пучка на коллиматор и входную часть ЗС влияют допуски и несоосности изготовления электронной пушки и ВЧ-пакета.

С учетом тепловых контактов между оболочкой ВЧ-пакета и стержнями, а также стержнями и спиралью максимальная температура спирали при тепловой нагрузке 1 Вт/виток составила 254,6 °С (рис. 2). Увеличение тепловой нагрузки до 2 Вт/виток привело к росту температуры до 480,6 °С, до 3 Вт/виток – до 892 °С. Причиной резкого нелинейного роста температуры явилось значительное уменьшение коэффициента теплопроводности стержней из окиси бериллия с ростом температуры. Так, при нагрузке 2 Вт/виток перепад температуры по высоте стержня составил 41 °С, а при увеличении нагрузки в 1,5 раза перепад вырос почти в 5 раз.

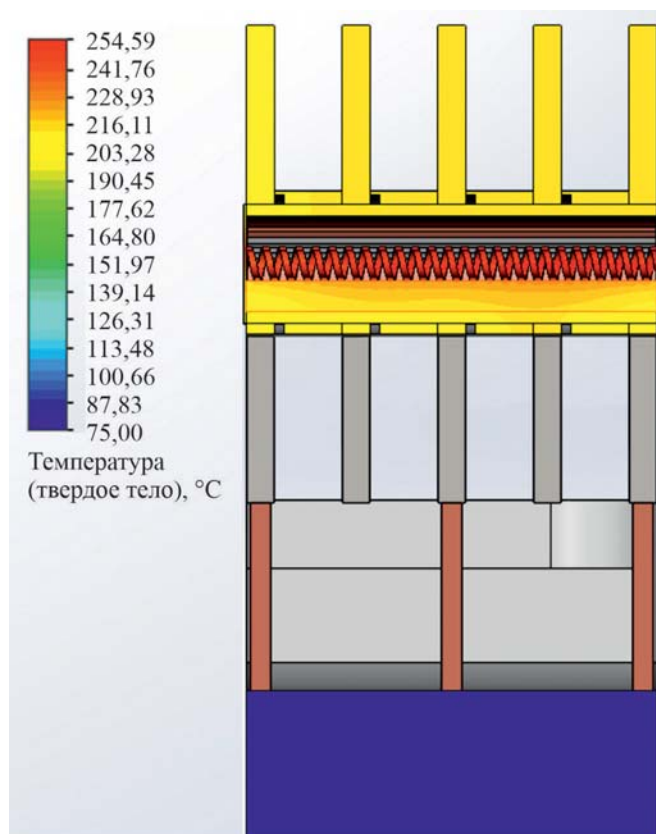


Рис. 2. Тепловой режим спиральной ЗС

Отметим, что из-за хорошей теплопроводности материала спирали МАГТ даже при максимальной нагрузке 3 Вт/виток изменение температуры витка в азимутальном направлении не превышало 20 °С (рис. 3).

Если принять в качестве безопасной температуру спирали 500 °С, то при напряжении на ЗС 7,5 кВ тепловой мощности 2 Вт соответствует оседание (равномерно по азимуту) на виток спирали 0,27 мА тока пучка.

Тепловая нагрузка на выходную часть ЗС максимальна в режиме насыщения выходной мощности. В этом режиме на последние 10 мм спирали (примерно 24 витка), примыкающие к выводу энергии, задавалась тепловая мощность 20,4 Вт, которая складывалась из ВЧ-потерь и прямого оседания пучка на этот участок. На предыдущие 10 мм спирали тепловая нагрузка за счет ВЧ-потерь составила 4,56 Вт.

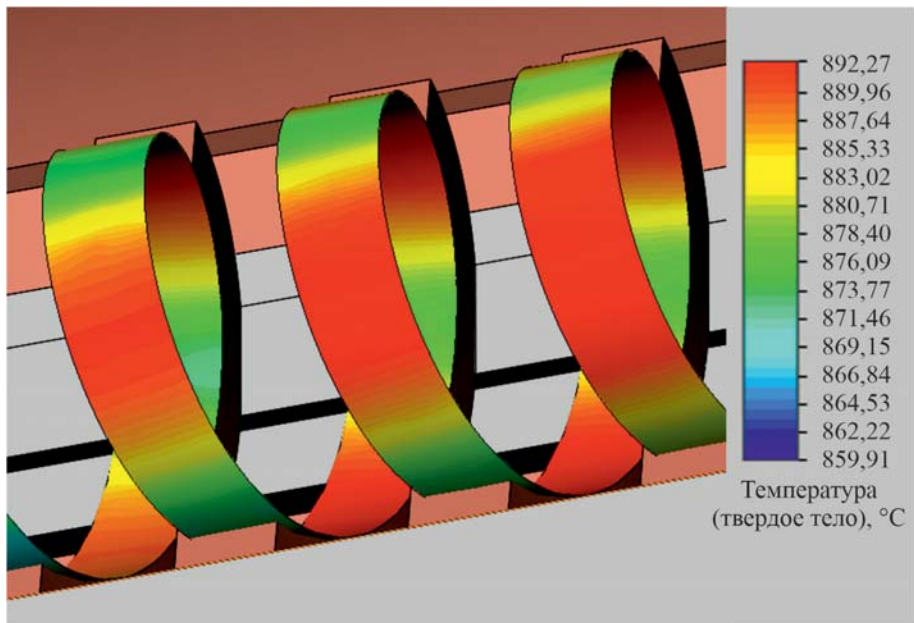


Рис. 3. Распределение температуры по виткам спирали

Максимальная температура спирали, рассчитанная с учетом тех же контактов стержень – оболочка и стержень – спираль, составила $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4), причем в случае нулевых тепловых сопротивлений указанных контактов температуры спирали составила бы $137,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

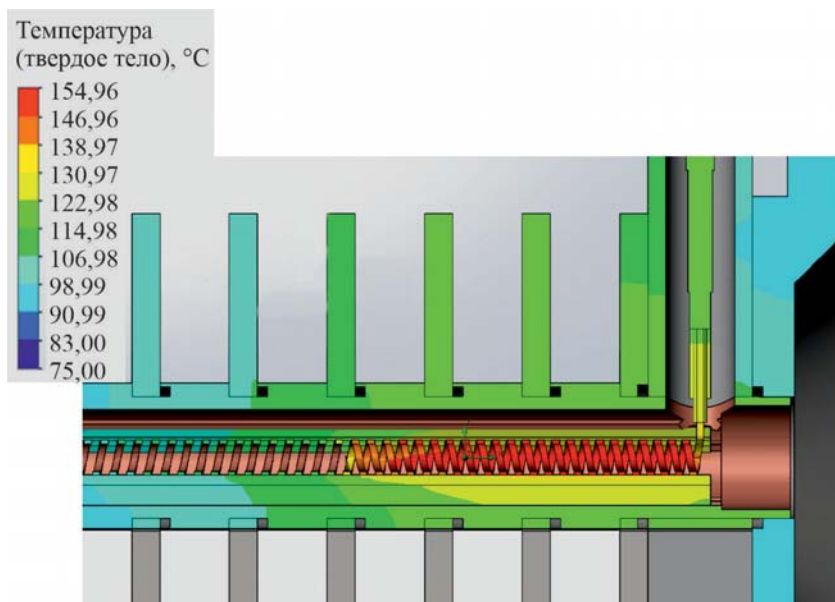


Рис. 4. Распределение температур в выходной части ВЧ-пакета

Меньшие значения температуры последних витков спирали при близкой к случаю на рис. 2 тепловой нагрузке ($0,85\text{ Вт/виток}$) связаны с наличием тепловиков, припаянных к каждому полюсному наконечнику, а также с перетоком тепла в продольном направлении.

3. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЛБВ

Рассматривались два режима работы ЛБВ: режим насыщения выходной мощности и режим -5 дБ ниже уровня насыщения.

В первом режиме суммарная тепловая нагрузка на находящуюся внутри спутника часть ЛБВ задавалась равной 39 Вт (табл. 1), из которых 11,42 Вт – на входную часть ЛБВ (4 Вт – мощность подогревателя катода; 7,42 Вт – токооседание на коллиматор и входную часть спирали) и 27,58 Вт – на выходную часть (ВЧ-потери в выходной секции спирали, токооседание, потери в окне вывода энергии и волноводе). Суммарная тепловая нагрузка на ступени коллектора в этом режиме составила 60,75 Вт, а ее распределение задавалось из результатов траекторного анализа движения электронов в коллекторе. Максимальная тепловая мощность 16,7 Вт выделялась на первой ступени.

Таблица 1

Режим ЛБВ	Задаваемая тепловая нагрузка на элементы ЛБВ, Вт		Отводимая тепловая мощность через элементы ЛБВ, Вт		Переток тепловой мощности от коллектора на плиту, Вт	Максимальная температура электродов коллектора, °С
	ВЧ-пакет	Коллектор	Плита	Коллектор		
Насыщение без солнечного освещения	39	60,75	46,25	53,5	7,25	208,4
Насыщение с освещением Солнцем	39	60,75 (+ 19,32 за счет солнца)	47,92	71,15	8,927	224,8
-5 дБ (без солнечного освещения)	34,14	66,98	42,03	59,09	7,89	214,27
-5 дБ (с освещением Солнцем)	34,14	66,98 (+ 19,32 за счет солнца)	43,43	77,01	9,29	230,17

Во втором режиме тепловая нагрузка на входную часть ЛБВ оставалась той же, а на выходную часть уменьшилась и в сумме составила 34,14 Вт. Тепловая нагрузка на коллектор увеличилась до 66,98 Вт.

Для уменьшения размерности сетки конечных элементов спираль была заменена трубкой с соответствующими поперечными размерами.

Как и в предыдущем случае, температура посадочной поверхности плиты и окружающей среды внутри спутника задавалась равной 75 °С. Влияние на радиатор коллектора близко расположенных поверхности спутника и радиаторов соседних ЛБВ учитывалось заданием эквивалентной по тепловому воздействию окружающей радиатор среды с температурой +130 °С.

Степень черноты внешней поверхности радиатора равна 0,8. Обращенная к коллектору поверхность экрана считалась неизлучающей.

В режиме насыщения выходной мощности максимальную температуру 208,4 °С имела входная часть первой ступени коллектора (рис. 5, табл. 1) при температуре радиатора 192...200 °С.

Поскольку температура коллекторного фланца в области соединения с корпусом коллектора (198,5 °С) выше температуры фланца в области соединения с оболочкой ВЧ-пакета (157 °С), про-

исходит переток тепловой мощности по фланцу от коллектора на плиту ЛБВ, с которой отводится тепловая мощность 46,25 Вт, что на 7,25 Вт больше, чем задавалось. Фланец коллектора выполнен из стали с низкой теплопроводностью, выполняет функцию магнитного экрана и обеспечивает прочное соединение массивного коллектора с ВЧ-пакетом, поэтому допустимое уменьшение его толщины мало влияет на распределение мощностей.

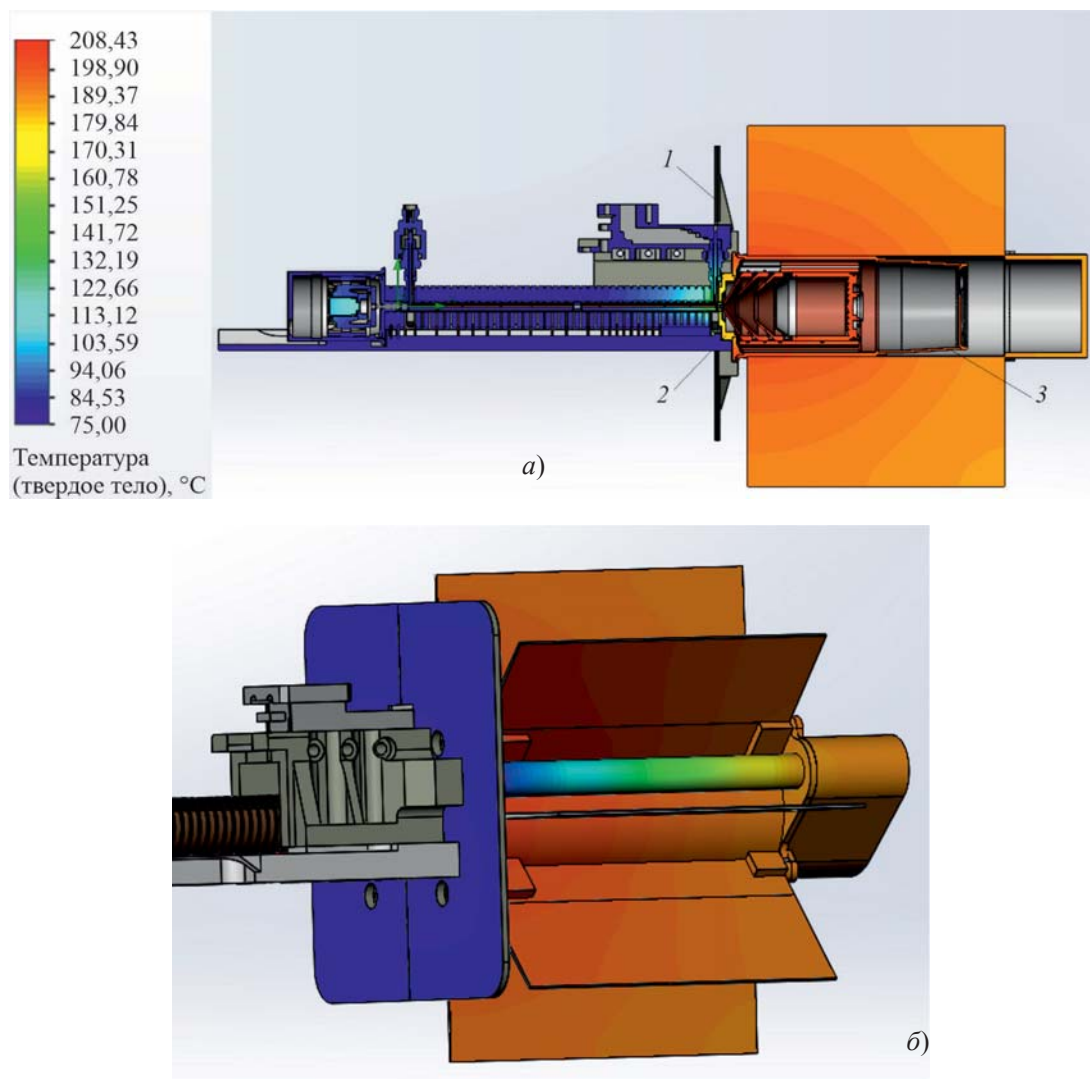


Рис. 5. Распределение температур в ЛБВ в режиме насыщения выходной мощности:

1 – экран между коллектором и ВЧ-пакетом; *2* – фланец коллектора; *3* – стакан коллектора

С течением времени под действием солнечного излучения возможны деградация покрытия радиатора и уменьшение степени его черноты. Например, при снижении ϵ до 0,6 при той же тепловой нагрузке температура электродов коллектора и радиатора увеличится на 18...20 °С, что приведет к незначительному росту перетекающей тепловой мощности.

Рассмотрим влияние экрана *1* (см. рис. 5, *a*), расположенного перед коллектором, на тепловой режим. Экран между коллектором и ВЧ-пакетом ЛБВ имеет хороший теплоотвод на плиту, и

его температура близка к температуре плиты. В случае, если обращенная к радиатору поверхность экрана будет излучающей и воспринимающей излучение с такой же, как у радиатора, $\varepsilon = 0,8$, часть излучаемой радиатором мощности будет передаваться на экран и с плиты уже будет отводиться тепловая мощность 53,39 Вт, а с радиатора коллектора – 46,36 Вт, т. е. большая часть тепловой мощности ЛБВ будет отводиться уже на систему охлаждения спутника. Величина перетекающей мощности увеличивается в 2 раза, и эффективность применения теплоотвода излучением значительно снижается. При степени черноты поверхности экрана 0,05 (полированный алюминий) расчетные данные близки к приведенным в табл. 1. Таким образом, оптимальной для теплового режима ЛБВ будет защита экрана от теплового излучения радиатора.

Еще одним важным параметром теплового режима ЛБВ является температура магнитов фокусирующей системы, максимальную величину которой (150 °С) имеет последний магнит МПФС, расположенный на выводе энергии (рис. 6). После настройки МПФС обычно заливают теплопроводящим компаундом, что улучшает теплоотвод от магнитов и позволяет уменьшить их температуру.

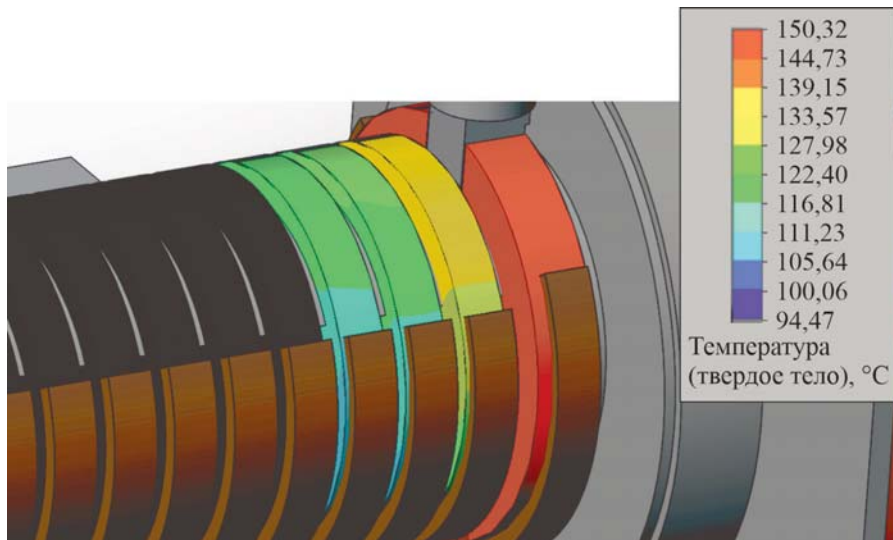


Рис. 6. Температура магнитов МПФС в области вывода энергии в режиме насыщения выходной мощности

Плита ЛБВ устанавливается на теплоотводящую поверхность с использованием различных термопаст. Например, при использовании слоя термопасты толщиной 100 мкм с коэффициентом теплопроводности 1,8 Вт/(м·К), как показали проведенные расчеты, по сравнению со случаем идеального контакта с нулевым тепловым сопротивлением из-за небольшой удельной плотности тепловой мощности максимальная температура 3С увеличилась всего на 1,3 °С.

В режиме -5 дБ относительно насыщения при большей тепловой нагрузке на коллектор соответственно возросла и температура элементов коллектора. Величина перетока тепловой мощности от коллектора к плите увеличилась незначительно.

Влияние солнечного излучения на температурный режим ЛБВ учитывалось как дополнительная тепловая нагрузка на половину радиатора коллектора при освещении его по нормали к оси ЛБВ. Коэффициент поглощательной способности солнечного излучения для современных покрытий

в начале срока службы составляет 0,4...0,5. В конце срока службы (например, в течение 15 лет) он может увеличиться до 0,7...0,8. Для оценки сверху возьмем значение коэффициента равным 0,8, и тогда величина дополнительной тепловой нагрузки составит 19,32 Вт. Увеличение тепловой нагрузки на коллектор привело к небольшому повышению температуры элементов коллектора и ВЧ-пакета в области вывода энергии. Величина перетекаемой тепловой мощности от коллектора увеличилась на 1,4...1,7 Вт (см. табл. 1).

В рассматриваемой ЛБВ основная тепловая нагрузка на ВЧ-пакет сосредоточена в области вывода энергии и дополнительно увеличивается за счет перетока тепловой мощности от коллектора в эту зону, поэтому во всех рассмотренных вариантах тепловой нагрузки на ЛБВ в распределении отводимой через плиту ЛБВ тепловой мощности имеется локальная область, расположенная под выводом энергии, где плотность теплового потока достигает $4,5 \text{ Вт/см}^2$ (рис. 7), что является допустимой величиной для системы охлаждения аппаратуры спутника.

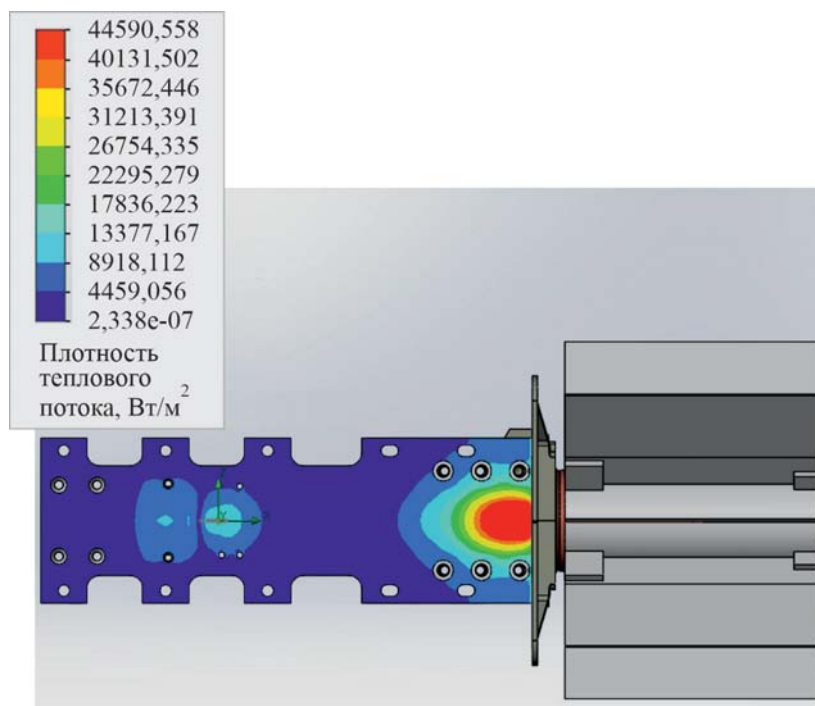


Рис. 7. Распределение отводимой удельной тепловой мощности по плите ЛБВ в режиме насыщения

Стакан коллектора 3 (см. рис. 5, а), в дно которого впаиваются керамические изоляторы, соединен с корпусом коллектора и имеет ту же температуру, что и середина основания радиатора. В рассмотренных случаях температура стакана изменялась в диапазоне $195...210 \text{ }^\circ\text{C}$. Эту же температуру будут иметь и керамические изоляторы, и присоединяемые к ним высоковольтные провода.

Для проверки надежности рассмотренной конструкции ЛБВ далее были рассмотрены ее тепловые режимы при повышенных тепловых нагрузках. Считая значение технического КПД ЛБВ постоянным, для вариантов с выходной мощностью 165 и 200 Вт тепловая нагрузка на элементы ЛБВ была увеличена пропорционально увеличению выходной мощности. Например, при теп-

ловых нагрузках, соответствующих выходной мощности 200 Вт, максимальная температура первой ступени коллектора увеличилась до 245 °С, радиатора – до 219...232 °С (табл. 2).

Таблица 2

Выходная мощность, Вт	Задаваемая тепловая нагрузка на элементы ЛБВ, Вт		Отводимая тепловая мощность через элементы ЛБВ, Вт		Переток тепловой мощности от коллектора на плиту, Вт	Максимальная температура электродов коллектора, °С	Температура радиатора коллектора, °С
	ВЧ-пакет	Коллектор	Плита	Коллектор			
165	48,45	77,15	56	69,6	7,55	227,6	206 – 216
200	57,8	93,5	47,92	85,7	7,8	245,5	219 – 232

Таким образом, рассмотренная конструкция ЛБВ обеспечивает приемлемые тепловые режимы критических элементов до уровней выходной мощности 200 Вт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ теплового режима 135-ваттной ЛБВ Ka-диапазона с охлаждением коллектора излучением. Рассмотрены режимы критических элементов ЛБВ, таких, как спиральная замедляющая система, магниты МПФС, коллектор и его радиатор. Определены величины отводимой тепловой мощности от плиты за счет теплопроводности и радиатора коллектора за счет излучения. Показана устойчивость разработанной конструкции ЛБВ к тепловым нагрузкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведков, И. П. Расчет характеристик спутниковой ЛБВ Ka-диапазона с высоким КПД и охлаждением коллектора излучением / И. П. Медведков, В. И. Роговин, С. О. Семенов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 37 – 47.

Статья поступила 29 декабря 2021 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.315.592

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ ДЛЯ СВЧ-ПРИБОРОВ

А. С. Дубкова, В. Н. Рябов, И. В. Тарасов, Н. Б. Хахин

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

Развитие микроэлектроники предъявляет все более жесткие требования к эпитаксиальным структурам, на которых изготавливаются СВЧ-диоды. В статье приведены технологические приемы, позволяющие методом газофазной эпитаксии получать структуры с толщиной активных *n*- и *p*-областей 0,1 мкм и менее и уровнем легирования порядка 10^{18} см⁻³.

КС: кремний, газофазная эпитаксия, поверхностная сегрегация, СВЧ-диод, ВИМС

EPITAXIAL SILICON STRUCTURES FOR MICROWAVE DEVICES

A. S. Dubkova, V. N. Ryabov, I. V. Tarasov, N. B. Nahin

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

The development of microelectronics imposes increasingly stringent requirements on epitaxial structures on which microwave diodes are fabricated. The article presents technological methods that make it possible to obtain structures with a thickness of active *n*- and *p*-regions of 0.1 μm or less and a significant doping level of about 10^{18} cm⁻³ using the gas-phase epitaxy method.

КС: silicon, gas-phase epitaxy, surface segregation, microwave diode, SIMS

1. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые СВЧ-диоды в настоящее время остаются широко востребованными. Создаются СВЧ-диоды на сверхтонких эпитаксиальных структурах. Так, например, для изготовления кремниевых однодрейфовых и двухдрейфовых ЛПД, работающих в диапазоне до 200 ГГц, необходимы структуры с толщиной активных *n*- и *p*-областей 0,2 мкм и менее и уровнем легирования порядка 10^{18} см⁻³.

При эпитаксиальном наращивании для снижения автолегирования, мешающего получению таких тонких слоев, максимально снижают температуру эпитаксии до момента, когда растущие слои еще остаются монокристаллическими и бездефектными.

Путем применения низкотемпературного процесса газофазной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе (10...20 кПа) с использованием пиролиза моносилана можно снизить температуру совершенного роста эпитаксиальных слоев кремния до 850...950 °С. Осаждение при пониженном давлении улучшает качество растущих кристаллических слоев и позволяет снизить температуру эпитаксии благодаря подавлению газофазных реакций, снижению сорбции

водорода, кислорода, галогенов и других посторонних атомов на поверхности роста, активации поверхностных реакций локальным газовым разрядом при использовании ВЧ-нагрева.

При такой температуре эпитаксиального наращивания термодиффузия примесей и автолегирование проявляются незначительно, а преобладающее влияние на формирование профиля легирования слоев оказывает эффект сегрегации примеси в приповерхностном слое. Эффект сегрегации примеси обусловлен особыми свойствами поверхности растущего слоя – границы двух фаз. Первая фаза газовая (приповерхностный слой), в ней проходят химические реакции по образованию ростовых и легирующих компонентов и транспорт этих компонентов. Вторая фаза твердая, представляющая собой растущий кристалл, решетку которого можно считать идеальной в глубине выращенного слоя и сильно деформированной у поверхности из-за наличия оборванных ковалентных связей. Кристаллическая решетка кремния у поверхности роста искажена, искажение убывает с удалением от поверхности, при этом глубина, на которой проявляется эффект, может достигать десятков межатомных расстояний. Большая часть примесей накапливается преимущественно в этой искаженной области кристалла. Поэтому на начальной стадии эпитаксиального роста легирующая примесь расходуется на обогащение тонкого, около 0,01 мкм, слоя. При сравнительно малой толщине слоя количество сегрегированных атомов примеси существенно, так как концентрация их превышает равновесную концентрацию в глубине выращенного слоя на два порядка, в зависимости от температуры роста и типа примеси. На профиле легирования начального участка выращенной структуры можно наблюдать недостаток концентрации примеси. Если же наращивать слаболегированный слой на сильнолегированный, то эффект проявляется в медленном спаде концентрации, а легирующая примесь из сегрегационного расходуется в растущий слой. Такие аномалии в легировании затрудняют получение структур с резкими переходами между слоями, отличающимися уровнем легирования и типом проводимости. Поэтому с целью уменьшения влияния эффекта приповерхностной сегрегации примеси для каждого слоя многослойной эпитаксиальной структуры кремния проводятся предварительный запуск лигатуры перед наращиванием для создания на поверхности необходимого избытка атомов примеси и высокотемпературный отжиг после наращивания слоя для освобождения поверхности от сегрегированной примеси. Режимы запуска и отжига зависят от типа и концентрации примеси.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

На рис. 1 представлено распределение легирующих примесей в эпитаксиальной структуре кремниевого лавинно-пролетного диода $p^{++}n^{+}nn^{++}$ -типа, выращенной с учетом сказанного выше на установке «Эпикрем». Профиль, приведенный на рис. 1, *a*, получен методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), любезно предоставлен М. Н. Дроздовым (Институт физики микроструктур РАН). На рис. 1, *б* – профиль, полученный методом вольт-фарадных измерений с последующим расчётом распределения концентрации примеси по глубине структуры. Все последующие профили были получены теми же способами.

В приведенной структуре n -слой ($N \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) легирован фосфором, температура роста равна 950 °С, n^{+} -слой ($N \approx 1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) – мышьяком. Использование мышьяка в качестве легирующей примеси позволяет получать слои с высоким уровнем легирования более тонкими. Толщины n^{+} -области в структурах составляют 0,05...0,1 мкм.

На рис. 2 представлен профиль распределения атомов бора и мышьяка в структуре $p^{++}p^{+}n^{+}n^{++}$ -типа.

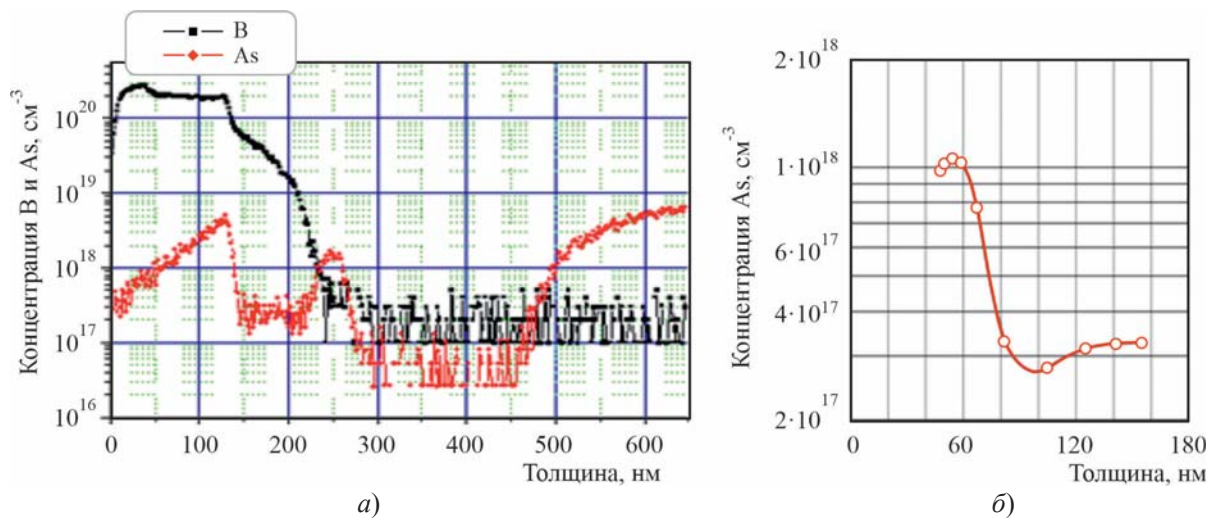


Рис. 1. Профили распределения атомов легирующей примеси в структуре $p^+n^+nn^+$ -типа, полученные методами ВИМС (а) и вольт-фарадных измерений (б)

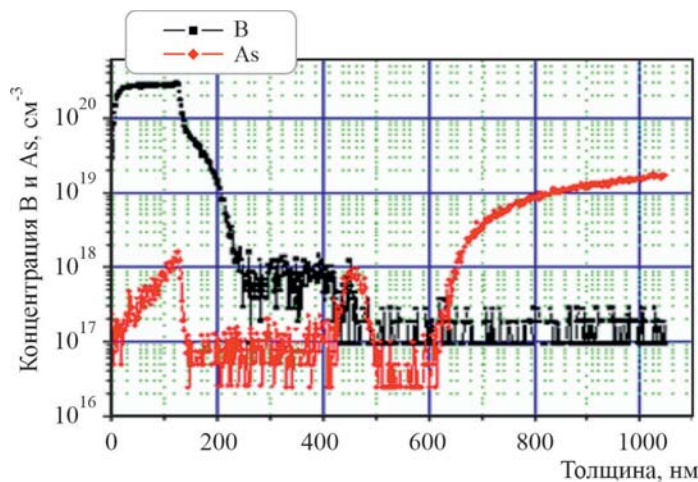


Рис. 2. Структура $p^+pp^+nnn^+$ -типа (ВИМС)

На рис. 2, как и на рис. 1, а, в области контактного p^+ -слоя проявляется выделение примеси n -типа (мышьяка) с уменьшающейся концентрацией. Это можно объяснить тем, что после выращивания высоколегированного n^+ -слоя на поверхности образуется область с сегрегационными атомами примеси мышьяка. Отжиг после наращивания n^+ -слоя уменьшает количество атомов мышьяка в области сегрегации, но не удаляет их полностью. При росте последующих слоев мышьяк расходуется незначительно, остается в области сегрегации и перемещается вместе с поверхностью роста. После добавления большого количества примеси p -типа (более 10^{20} см^{-3}) атомы мышьяка вступают во взаимодействие с атомами бора, утрачивают подвижность, и концентрация мышьяка уменьшается. Механизм данного взаимодействия требует дальнейшего исследования.

Для получения эпитаксиальной структуры кремниевого ЛПД $p^+pp^+nnn^+$ -типа были проведены исследования по подбору технологических параметров роста высоколегированных слоев, различающихся типом проводимости.

Для исследования p^+ -слоев были выращены структуры $n^{++}pp^+pp^{++}$ -типа. Обнаружено, что для них уровень легирования p -слоев, граничащих с p^+ -слоем и подложкой, почти не зависит от уровня легирования подложки p^{++} ($4 \cdot 10^{19}$, $1,5 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$), но зависит от температуры наращивания, и чем выше температура, тем выше уровень. Это совпадает с написанным ранее в работе [1], что при понижении температуры осаждения слоя автолегирование бором уменьшается, а автолегирование мышьяком – увеличивается. Было исследовано влияние предварительного запуска на профиль легирования. Замечено, что профиль легирования переходных областей p^+ -слоя зависит не только от режима наращивания слоя, но и от режимов предварительного запуска лигатуры в реактор и отжига слоя. Для примера на рис. 3 приведены профили легирования p^+ -слоя структур $n^{++}pp^+pp^{++}$.

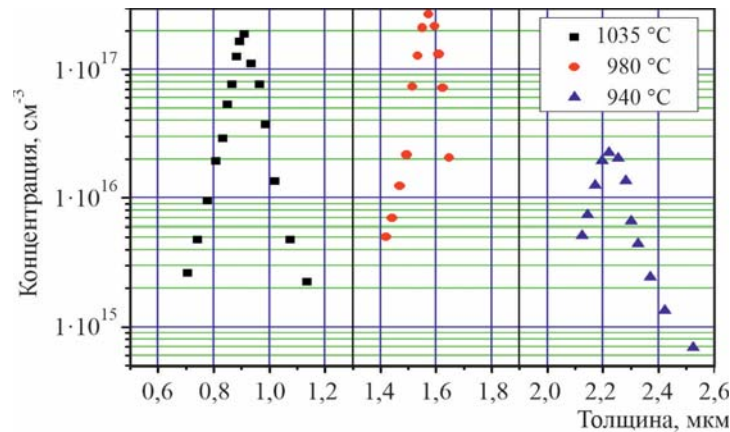


Рис. 3. Профили легирования p^+ -слоя структур $n^{++}pp^+pp^{++}$ -типа, температура предварительного запуска равна 940, 980, 1035 °C

Структуры получены при температуре роста 940 °C, варьировались лишь температура предварительного запуска и расход лигатуры (в небольших пределах), последнее, впрочем, не должно сказываться на толщине p^+ -слоя. Из профилей, приведенных на рис. 3, видно, что нет однозначной зависимости толщины p^+ -слоя от температуры запуска. Существует оптимальная температура, при неизменных других параметрах режима эпитаксии, позволяющая получать наименьшую толщину p^+ -слоя, в нашем случае – 980 °C. Это может быть связано с тем, что при уменьшении температуры снижается диффузионное размытие сторон слоя. С другой стороны, при дальнейшем снижении температуры увеличивается влияние сегрегационного накопления атомов бора в приповерхностном слое структуры за счет уменьшения десорбции. Поэтому для получения структур с заданными параметрами необходимо каждый раз подбирать оптимальную температуру.

На рис. 4 представлен типовой профиль структуры кремниевого лавинно-пролетного диода $p^{++}pp^+pnn^+nn^{++}$ -типа.

Эффективный профиль легирования эпитаксиальной структуры приведен на рис. 5.

Особенность метода вольт-фарадных характеристик заключается в том, что профиль легирования просчитывается из изменения области обеднения p - n -перехода при вариации прикладываемого напряжения. Толщина области обеднения увеличивается при увеличении запирающего напряжения p - n -перехода и зависит от концентрации примеси в слоях. В данном случае область обеднения распространяется и в p -, и в n -области. Из-за совместного измерения

на профиле есть только один пик, который содержит в себе пики электронного и дырочного типа проводимости. При примерно одинаковых пиках в структуре, на профиле значение концентрации выглядит в 2 раза меньше истинной концентрации, а толщина – в 2 раза больше. В данном случае концентрация примеси бора и мышьяка в p - и в n -слоях приблизительно равная и составляет $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщина высоколегированных слоев – 0,09 мкм.

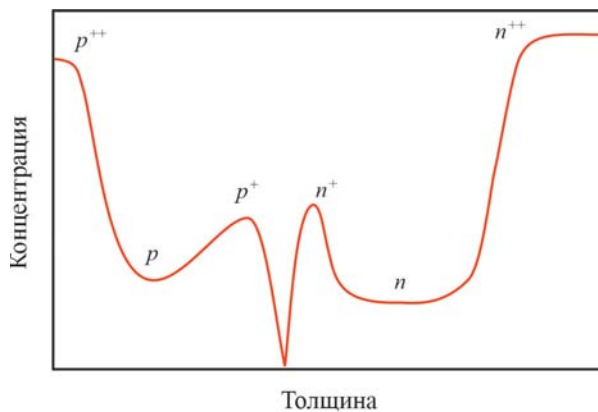


Рис. 4. Типовой профиль легирования структуры $p^{++}pp^{+}ppn^{+}nn^{++}$

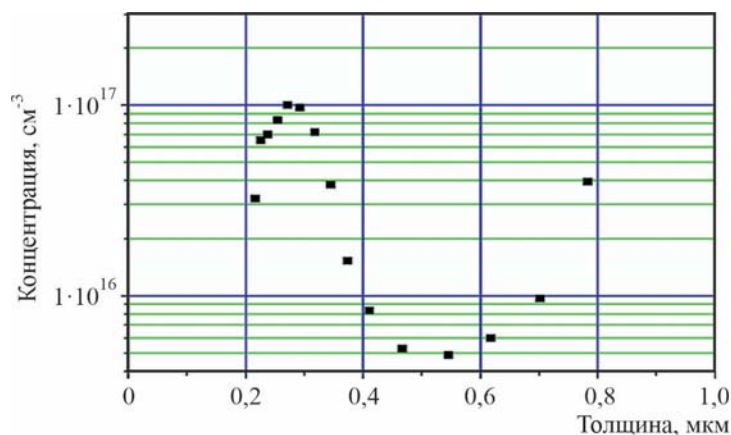


Рис. 5. Эффективный профиль легирования структуры $p^{++}pp^{+}ppn^{+}nn^{++}$

Используя разработанные технологические приемы получения тонких слоев, можно наращивать в едином процессе сложные многослойные структуры СВЧ-диодов, не только ЛПД, но и варакторных диодов с большим (до 20 и более) перекрытием по емкости, стабилитронов и других. Так, например, на рис. 6 представлена линеаризованная вольт-фарадная характеристика варакторного диода $p^{++}n(x)n^{++}$ -типа для генераторных модулей. Уровень легирования $n(x)$ -слоя такой эпитаксиальной структуры изменяется от $3 \cdot 10^{15}$ у подложки до 10^{17} см^{-3} у контактного слоя по заданному закону.

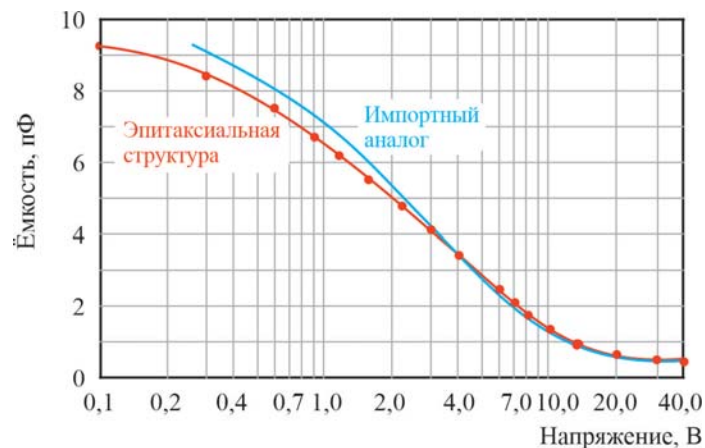


Рис. 6. Линеаризованная вольт-фарадная характеристика варакторного диода $p^{++}n(x)n^{+-}$ -типа

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана возможность получения слоев толщиной 0,05...0,1 мкм с высоким уровнем легирования. Закономерности легирования n - и p -слоев различаются. В зависимости от приборных задач, получение тонких слоев требует технологической оптимизации всех этапов наращивания. Исследования поверхностной сегрегации примеси бора и мышьяка при оптимизации режимов наращивания тонких слоев кремния будут продолжены. Для разных типов структур с различным уровнем легирования, чередованием слоев нужны определенные режимы наращивания каждого слоя, в том числе важна отработка режимов предварительного запуска лигатуры и послеростового отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зи, С.** Технология СБИС. В 2 кн. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с.
2. **Никулов, В. В.** Сегрегационная модель автолегирования кремния в эпитаксиальном слое / В. В. Никулов, В. Н. Рябов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. – 1988. – Вып. 10 (414). – С. 53 – 54.
3. **Эрвье, Ю. Ю.** О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии / Ю. Ю. Эрвье // Материалы электронной техники. – 2013. – № 2. – С. 4 – 10.
4. **Keith, H. Chung.** Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy / Keith, H. Chung. – Princeton, 2010. – 149 p.
5. Atomic-scale imaging of individual dopant atoms and clusters in highly n -type bulk Si / P. M. Voyles, D. A. Muller, J. L. Grazul [et al.] // Nature. – 2002. – Vol. 416. – P. 826 – 829.

Статья поступила 25 апреля 2022 г.

УДК 666.3:621.372.8

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КЕРАМИКИ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

В. И. Алексеенков, Е. А. Богомолова, В. И. Васильев, Д. С. Калёнов, Н. С. Карасёв,
В. М. Коломин, В. А. Насонов, М. П. Пархоменко, В. Н. Рыбкин, Н. А. Федосеев

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

Рассмотрены границы применимости классического метода измерения параметров диэлектриков в прямоугольном волноводе. Выяснена природа возникновения резонансов при измерении диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ и зависимость их от размеров щелей между широкой и узкой стенками волновода. Доказана необходимость перехода к резонансному или расчетному методу анализа экспериментальных данных для получения параметров диэлектриков с большим ϵ . Предложены простые формулы для анализа резонанса, которые позволяют оценить параметры диэлектрика с погрешностью менее 2%. Минимизация размеров щелей не приближает к точному решению из-за различного характера граничных условий. Показано влияние применения вазелиновой пасты с медными опилками и квазистатического метода на результаты анализа параметров диэлектрика.

КС: измерение диэлектриков, высокая диэлектрическая проницаемость, влияние зазоров, классический волноводный метод, паста, квазистатический метод

FEATURES OF MEASURING CERAMIC PARAMETERS WITH A HIGH PERMITTIVITY IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE

V. I. Alexeenkov, E. A. Bogomolova, V. I. Vasilyev, D. S. Kalenov, N. S. Karasev,
V. M. Kolomin, V. A. Nasonov, M. P. Parkhomenko, V. N. Rybkin, N. A. Fedoseev

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

The applicability limits of the classical method for measuring the parameters of dielectrics in a rectangular waveguide have been considered. The nature of the occurrence of resonances when measuring dielectrics with a high permittivity ϵ and their dependence on the size of slots between the wide and narrow walls of the waveguide were found out. The necessity of transition to resonance or calculation method of the experimental data analysis to obtain the parameters of dielectrics with high ϵ was proved. Simple formulas for resonance analysis are proposed, which make it possible to estimate the dielectric parameters with an error of less than 2%. Minimizing the size of the slots does not bring us closer to the exact solution due to different nature of the boundary conditions. The influence of using vaseline paste with copper filings and the quasi-static method on the results of the analysis of dielectric parameters is shown.

Keywords: measuring dielectrics, high permittivity, influence of slots, classical waveguide method, paste, quasi-static method

1. ВВЕДЕНИЕ

Классический волноводный метод измерения параметров материалов (рис. 1) позволяет получать относительную диэлектрическую проницаемость ϵ в широкой полосе частот [1, 2]. Но суще-

ствует ряд причин, которые ограничивают его применение. Главная из них – наличие зазоров по узкой и широкой стенкам волновода. Зазор по узкой стенке мало сказывается на результатах измерений, поскольку электрическое поле в зазоре близко к нулю. Наоборот, зазор по широкой стенке приводит к появлению в нем электрического поля, в ϵ раз большего, чем в диэлектрике. Высокое значение ϵ становится причиной больших отражений и возникновения резонансов, что препятствует применению классического метода. Цель данной работы провести анализ ситуации, чтобы определить границы применимости классического метода и выбрать способ измерения диэлектриков с высокой величиной ϵ .

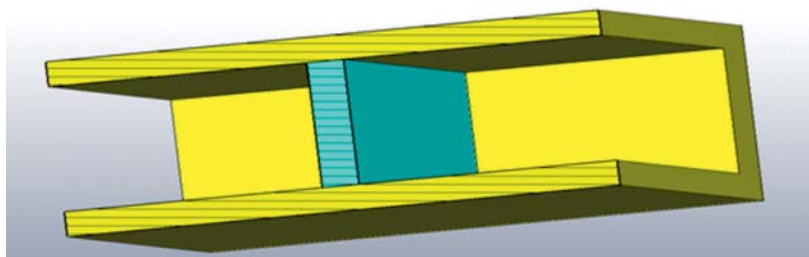


Рис. 1. Размещение диэлектрика в прямоугольном волноводе для измерения его параметров

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КЕРАМИКИ БСТ В ВОЛНОВОДЕ

Для измерения параметров материала в волноводе сечением $a \times b = 22,86 \times 10,16$ мм выбран прямоугольный образец БСТ-керамики с размерами: $A = 22,84$ мм, $B = 10,13$ мм – и толщиной $L = 1,68$ мм. Измеренные S -параметры образца в диапазоне частот 8...12 ГГц хорошо совпадают с рассчитанными по программе CST (рис. 2...5).

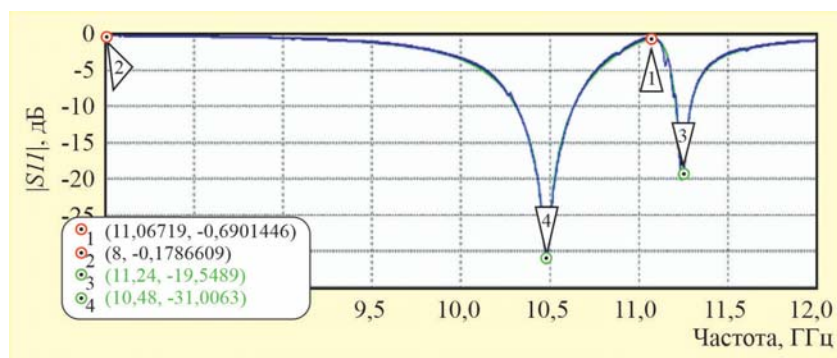


Рис. 2. Рассчитанный и измеренный модуль коэффициента отражения

На рис. 2 имеются два резонанса для коэффициента отражения. Нижний резонанс на частоте 10,48 ГГц соответствует случаю, когда толщина пластины равна половине длины волны $LM11$ [3, 4], распространяющейся в диэлектрике в направлении оси Z волновода. Эпюра поля E_y этой волны, нормированной к полю в центре волновода, приведена на рис. 6. Заметим, что возбуждающее электрическое поле E_y , перпендикулярное широкой стенке волновода, постоянно для волны $H10$ пустого волновода, а в диэлектрике для волны $LM11$ описывается косинусоидой. Поле в 5 раз отличается от его значения в центре волновода.

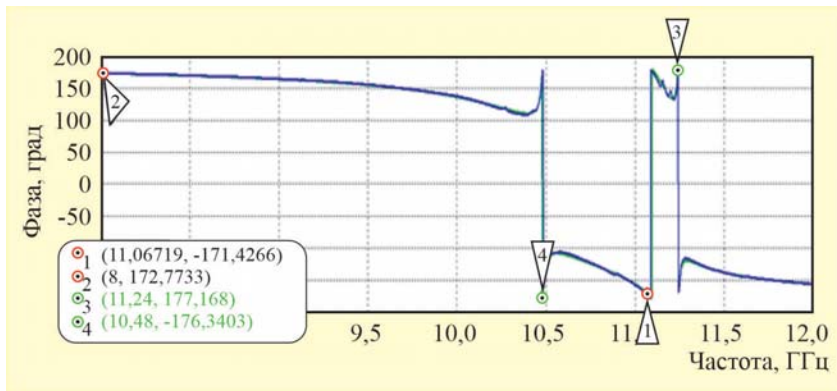


Рис. 3. Рассчитанная и измеренная фаза коэффициента отражения

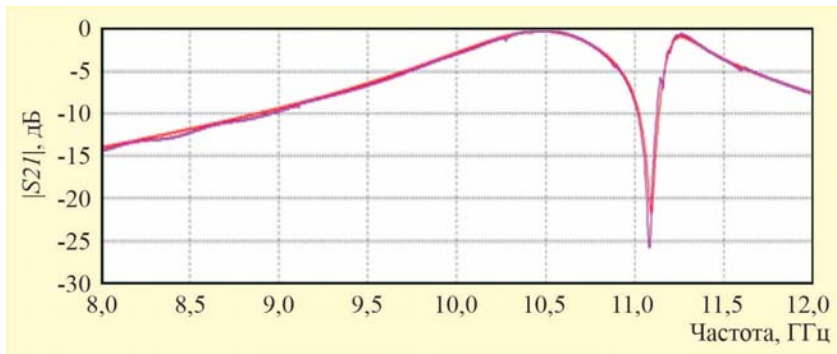


Рис. 4. Рассчитанный и измеренный модуль коэффициента передачи

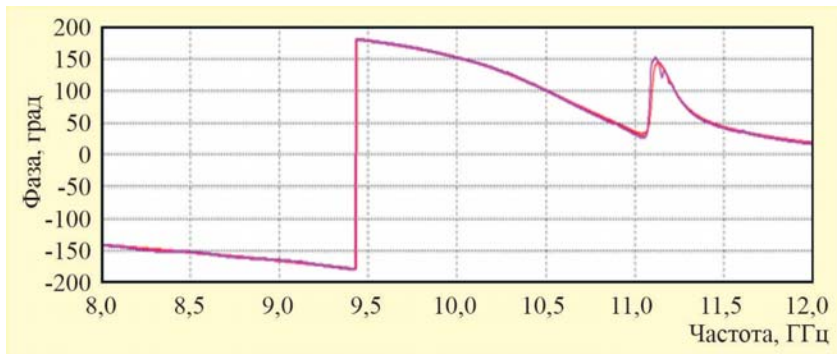


Рис. 5. Рассчитанная и измеренная фаза коэффициента передачи



Рис. 6. Эпюра напряженности электрического поля волны $LMII$

Верхний резонанс на частоте 11,24 ГГц аналогичен нижнему, но для волны $LM13$. Модуль поля E_y для волны $LM13$ представлен на рис. 7. Поле E_y нормировано к полю в центре волновода и на краю диэлектрика в 18 раз превышает его. Это объясняет более сильную зависимость его резонансной частоты от размеров щели между диэлектриком и широкой стенкой волновода.

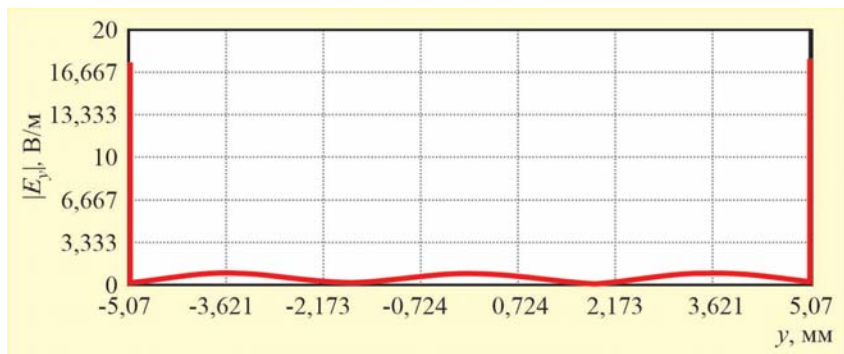


Рис. 7. Модуль поля E_y волны $LM13$

На рис. 8 показано, как изменяется частота резонансов при изменении зазора по широкой стенке от 30 до 5 мкм. Зазор в 10 мкм по узкой стенке дает незначительное искажение верхнего по частоте резонанса.

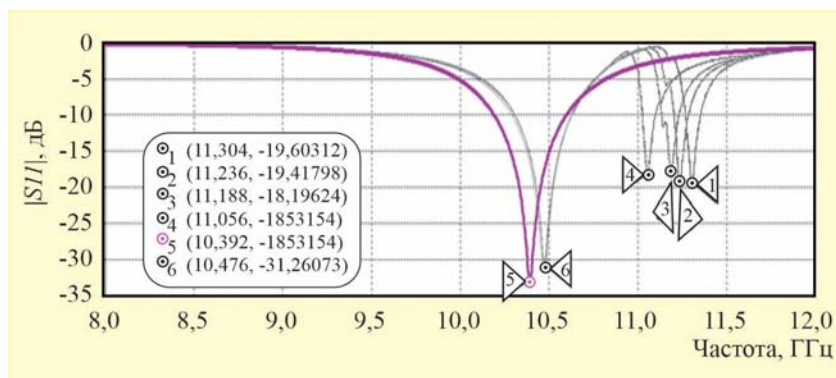


Рис. 8. Рассчитанный по программе CST модуль коэффициента отражения при изменении зазора по широкой стенке от 30 до 5 мкм. Верхний по частоте резонанс соответствует зазору в 30, 15, 10 и 5 мкм соответственно (тонкие кривые). Жирная кривая – без зазоров

Из рис. 8 следует, что верхний по частоте резонанс значительно сильнее, чем нижний, зависит от величины зазора между широкой стенкой и образцом и может быть использован для уточнения зазора, а нижний резонанс определяет ϵ и $\text{tg}\delta$ керамики. Из расчета дисперсионных характеристик для волн $LM11$ и $LM13$ [3] видно, что резонансная частота для нижнего резонанса меняется на 0,8 %, а для верхнего – на 3,6 % при изменении зазора с 30 до 1 мкм.

3. ПАРАМЕТРЫ КЕРАМИКИ БСТ, ПОЛУЧЕННЫЕ КЛАССИЧЕСКИМ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

Перейдем теперь к параметрам диэлектрика, полученным из измеренных характеристик известными методами. Возьмем идеальный случай полного заполнения сечения волновода ди-

электрическим образцом толщиной $L = 1,68$ мм. В этом случае в диэлектрике не возникают высшие типы колебаний и мы можем рассчитать точные S -параметры и получить параметры диэлектрика методом Nicolson-Ross-Weir (NRW) [1, 2]. Из системы двух уравнений для комплексных S_{11} и S_{21} находятся комплексные ϵ и μ . В этом случае хорошие результаты (точки на графике) получаются везде, за исключением области, близкой к резонансу (рис. 9), где пропадает информация о параметрах пластины. На этом же графике представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных для вышеуказанного образца с учетом квазистатической коррекции влияния зазора (сплошная линия – $\epsilon = 90$, погрешность – 21 %). Суть квазистатической коррекции состоит в том, что находится емкость плоского конденсатора, образованного керамикой с зазором. Затем емкость этого конденсатора приравнивается к емкости конденсатора, полностью заполненного эффективной диэлектрической проницаемостью [5]. Далее методом NRW находится диэлектрическая проницаемость, которая считается эффективной. А по ней находится истинная диэлектрическая проницаемость обратным пересчетом. Пунктирная кривая показывает, как меняются результаты, если зазор заполнить пастой из медных опилок в вазелине ($\epsilon = 80$, погрешность – 10 %) [6]. При этом результаты измерения параметров диэлектрика приближаются к истинным в области частот до резонанса. Выше резонанса оба метода не работают и дают большую ошибку, связанную с наличием зазора и большой диэлектрической проницаемостью образца.

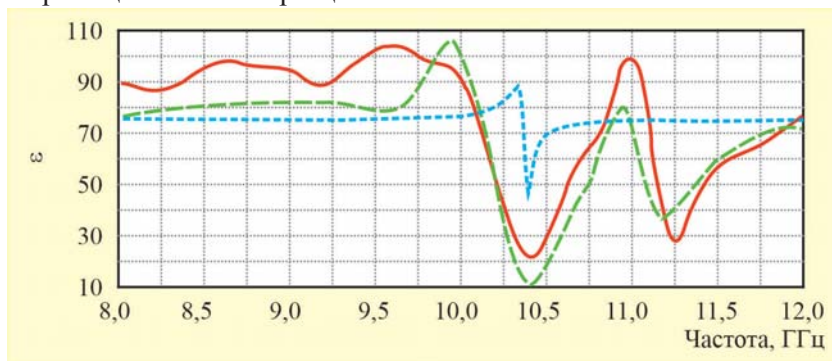


Рис. 9. Диэлектрическая проницаемость БСТ-керамики:

точки – полное заполнение без воздушных зазоров; сплошная кривая – зазор 15 мкм, обработка измерений с квазистатической поправкой; пунктир – паста с медными опилками в зазоре

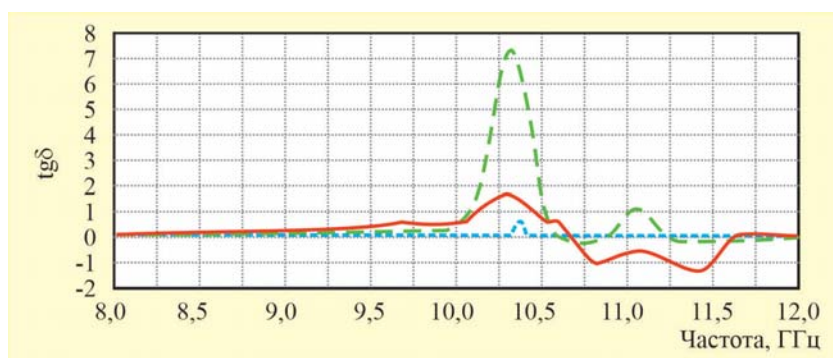


Рис. 10 Тангенс угла диэлектрических потерь БСТ-керамики:

точки – полное заполнение без воздушных зазоров ($\text{tg}\delta = 0,0026$);
 сплошная кривая – зазор 15 мкм, обработка измерений с квазистатической поправкой ($\text{tg}\delta = 0,17$);
 пунктир – паста с медными опилками в зазоре ($\text{tg}\delta = 0,15$)

4. РАСЧЕТНЫЙ И РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКА

Существующие методы измерения параметров диэлектриков в волноводе позволяют уверенно измерять методом NRW диэлектрики с относительной диэлектрической проницаемостью ниже 5. Экспериментально доказано, что, используя квазистатическое приближение, область измерения с помощью NRW-метода можно расширить до 15. Результаты измерения с пастой зависят только от её качества. Измерение диэлектриков с диэлектрической проницаемостью более 15 встречает ряд трудностей (возникновение резонансов, влияние зазоров, неидеальность изготовления образцов). Преодолеть эти трудности можно, аппроксимируя измерения расчетными данными, полученными с помощью программы CST и резонансным методом. Этот метод заключается в следующем. Предположим, что все поле сосредоточено в керамике с полностью отражающими стенками, тогда приблизительно диэлектрическую проницаемость можно найти из экспериментальных данных по формуле для прямоугольного резонатора:

$$\varepsilon = (C/2f_0)^2 \left(\frac{1}{L^2} + \frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} \right), \quad \text{tg}\delta = \frac{\Delta f (1 - S_{21})}{f_0} = \frac{1}{Q_0},$$

где C – скорость света в воздухе; Q_0 – собственная добротность; f_0 – частота первого резонанса; Δf – полоса частот на уровне -3дБ относительно частоты f_0 ; S_{21} – измеренный модуль коэффициента передачи на частоте f_0 .

Здесь учтено, что поле E_y определяется косинусоидой (см. рис. 6) по осям y , x и z , а колебание имеет тип H_{111} . Используя эти формулы, мы получаем: $\varepsilon = 74,97$ и $\text{tg}\delta = 0,00255$. Совмещая измеренную резонансную частоту и модуль коэффициента отражения для нижнего резонанса с расчетной по программе CST, получаем более точное значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 74,2$ и потери $\text{tg}\delta = 0,0026$ из расчетов. Верхний резонанс позволяет уточнить величину зазора: $d = 15$ мкм. При этом результаты расчетов и измерений должны совпадать везде, как показано на рис. 2. Результаты, полученные из резонансной кривой для ε и $\text{tg}\delta$, отличаются от результатов расчета соответственно на 1 и 2 %. На рис. 11 и 12 показаны зависимости от частоты ε и $\text{tg}\delta$ для керамики БСТ, рассчитанные по программе CST, учитывающей релаксационный процесс по модели Дебая 1-го порядка.

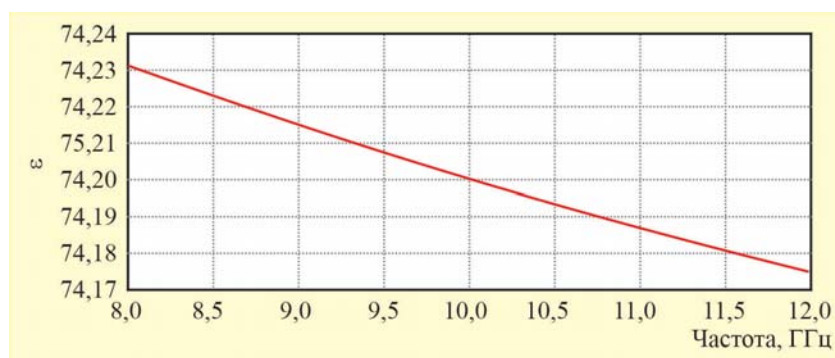


Рис. 11. Рассчитанная зависимость от частоты относительной диэлектрической проницаемости

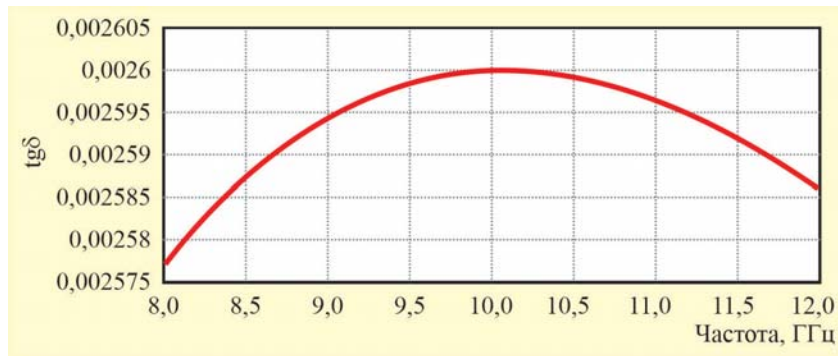


Рис. 12. Рассчитанная зависимость от частоты тангенса угла потерь

Оценим границы применимости резонансного метода. Предельное ϵ , которое можно измерить, определяется минимальной толщиной пластины диэлектрика, пока она не изгибается. Для середины одноволнового режима волновода длина волны $\lambda = 3a/2$. Из приведенной выше формулы для ϵ , пренебрегая маленькими слагаемыми, получим

$$\epsilon_{\max} < \left(\frac{3a}{4L} \right)^2.$$

Нижнюю границу определим из условия, что частота верхнего резонанса меньше критической для волны H_{02} . Частоту верхнего резонанса приблизительно можно определить по формуле

$$f_3 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{1}{a^2} + \left(\frac{3}{b}\right)^2}.$$

Пренебрегая малым слагаемым, определим:

$$\epsilon > \left(\frac{a}{2L} \right)^2 + \left(\frac{3a}{2b} \right)^2.$$

Отсюда в нашем случае область измерения ϵ резонансным методом лежит в пределах от 47 до 105.

5. ВЫВОДЫ

1. Предложен расчетный метод и метод резонансов для измерения керамики с большой диэлектрической проницаемостью.
2. Резонанс определяет границу применимости квазистатического и NRW-методов.
3. Резонансные методы позволяют получить хорошее начальное приближение, используя правильное распределение поля.
4. Нижний резонанс несет информацию о диэлектрике.
5. Верхний – о размерах щели.
6. Уменьшение размеров щели не приводит к точному решению. (Короткое замыкание и холостой ход диаметрально отличаются.)

7. Точные результаты, полученные аппроксимацией результатов измерения по программе CST, отличаются от резонансного метода по ϵ на 1 %, по $\text{tg}\delta$ на 2 % на резонансной частоте.
8. Определены границы применимости резонансного метода.
9. Расчетный метод предполагает слабую или известную зависимость параметров диэлектрика от частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nicolson, A. M.** / A. M. Nicolson, G. F. Ross // IEEE Trans. – 1970. – Vol. IM-19, No 4. – P. 377.
2. **Weir, W. B.** / W. B. Weir // Proc. IEEE. – 1974. – Vol. 62, No 1. – P. 33.
3. **Егоров, Ю. В.** Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю. В. Егоров. – М.: Сов. радио, 1967.
4. Диэлектрические резонаторы / Под ред. проф. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989.
5. **Musil, J.** Microwave measurements of complex permittivity by tree spase methods and their applications / J. Musil and F. Zaces. – Amsterdam: Elsevier, 1986.
6. **Wilson, S. B.** Model analysis of the gap effect in waveguide dielectric measurements / S. B. Wilson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1988. – Vol. 36, No 4. – P. 752 – 756.
7. Повышение точности измерений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в сверхвысокочастотном диапазоне волноводным методом / М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, И. С. Еремин [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 8. – С. 764 – 768.

Статья поступила 11 апреля 2022 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Усилители мощности класса F и инверсного класса F / В. В. Воронович, В. П. Галах, В. А. Кузьмин, А. Ю. Потапов; под ред. В. В. Вороновича. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 154 с.

В книге изложены элементы теории и основы проектирования высокоэффективных усилителей мощности класса F и инверсного класса F . Материал, приведенный в настоящем издании, иллюстрируется примерами расчетов.

Для радиоспециалистов, связанных с созданием радиоэлектронной аппаратуры.

УДК 621.793.1

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИСКУССТВЕННЫХ ГРАФИТОВ С КЕРАМИКОЙ ВК-94-2

Н. И. Бабкова, Л. Т. Баймагамбетова, Р. Ю. Богачев,
Е. В. Горшкова, Д. И. Кириченко, В. И. Шестеркин

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Рассмотрены вопросы технологии металлизации токоприемных деталей коллекторов электронов из графитов марок МПГ-7, МИГ-2 и анизотропного пиролитического графита и их пайки с керамикой ВК-94-2.

КС: коллектор электронов, искусственные графиты, керамика, пайка

TECHNOLOGY OF SOLDERING PARTS MADE OF ARTIFICIAL GRAPHITES WITH CERAMICS VK-94-2

N. I. Babkova, L. T. Baimagambetova, R. Yu. Bogachev,
E. V. Gorshkova, D. I. Kirichenko, V. I. Shesterkin

JSC «RPE «Almaz», Saratov

The article discusses the technology of metallization of current-collecting parts of electron collectors made of graphite grades MPG-7, MIG-2 and anisotropic pyrolytic graphite and their soldering with ceramics VK-94-2.

Keywords: electron collector, artificial graphites, ceramics, soldering

1. ВВЕДЕНИЕ

К современным ЛБВ для космической связи в настоящее время предъявляются высокие требования по КПД. Каждый процент его повышения достигается с большим трудом. Когда все конструктивные и технологические возможности его повышения практически исчерпаны, остается, пожалуй, только один способ – уменьшение обратного потока электронов из коллектора в пространство взаимодействия за счет использования материалов токоприемных элементов коллекторов электронов с низким значением коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ). Традиционно токоприемные элементы коллекторов изготавливают из меди и сплавов МД. Отдавая приоритет их высокой теплопроводности, разработчики приборов «закрывают глаза» на высокое значение КВЭЭ данных материалов. Так, КВЭЭ меди составляет 1,3...2,0. Для снижения КВЭЭ детали из меди покрывают пленками из углерода или TiC [1]. Недостатком пленочных покрытий является их «истощение» в процессе эксплуатации, что снижает долговечность ЛБВ. К материалам с низким значением КВЭЭ относится углерод в различных его модификациях: различные марки искусственных графитов (МПГ-6, МПГ-7), пиролитический графит (изотропный и анизотропный). Максимальное значение КВЭЭ для графита МПГ-7 составляет около 0,7 при энергии первичного электронного пучка 200 В за счет высокого значения работы выхода электронов (4,6...4,7 эВ) и пористости, степень которой для графита марки МПГ-7

составляет 12...15 %. Детали из углеродных материалов не изменяют свои физико-химические и механические свойства при температуре до 2000 °С и могут быть использованы в теплонагруженных узлах электровакуумных приборов, какими и являются коллекторы электронов.

Особенностью углеродных материалов является их химическая инертность, которая препятствует образованию устойчивых химических связей с расплавами большинства металлов и затрудняет формирование металлизационных пленочных покрытий под пайку. В этой связи для получения прочных паяных соединений используют многокомпонентные припои с добавками адгезионно-активных элементов (Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, Ni и др) [2].

В работе [3] представлены результаты проектирования и испытаний космической ЛБВ Ки-диапазона с выходной мощностью 140 Вт при усилении более 55 дБ с 4-ступенчатым коллектором электронов. В качестве материала ступеней коллектора был использован высокоплотный графит марки DFP-1С. Графитовый материал пропитан медью для увеличения теплопроводности и электрической проводимости. Текстурирование внутренних поверхностей графитовых ступеней ионами аргона позволило снизить КВЭЭ до 0,2...0,3. Обезгаживание внутренних поверхностей ЛБВ осуществлялось при температуре 450 °С в течение 100 ч. В процессе высокочастотных испытаний и после их завершения дегазации со стенок деталей прибора не обнаружено. Парциальные давления различных газов после полного обезгаживания составляли $(1...1,2) \cdot 10^{-9}$ мбар.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности получения неразъемных соединений токоприемных деталей коллектора электронов ЛБВ из различных марок искусственных графитов с алюмооксидной керамикой ВК-94-2 с необходимыми для ЛБВ прочностными характеристиками при помощи традиционного припоя ПЗлМ37,5В.

2. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Технологии металлизации обрабатывались для искусственных графитов марки МПГ-7, МИГ-2 и изотропного пиролитического графита (ПГИ). Учитывая химическую инертность углеграфитовых материалов, для улучшения адгезии металлизационных покрытий поверхность деталей подвергалась текстурированию двумя способами: обработкой в серной кислоте в течение нескольких секунд (рис. 1) и термохимическим травлением пленкой никеля в среде водорода [4].

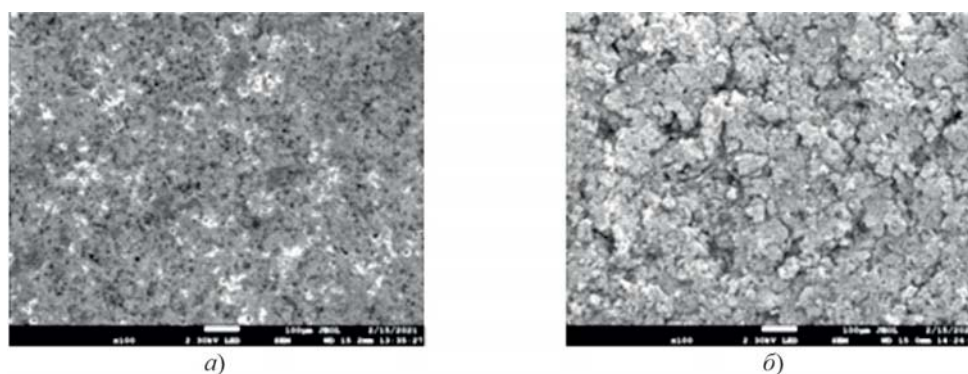


Рис. 1. Поверхность графита МПГ-7 до (а) и после (б) обработки в серной кислоте (см. также с. 74)

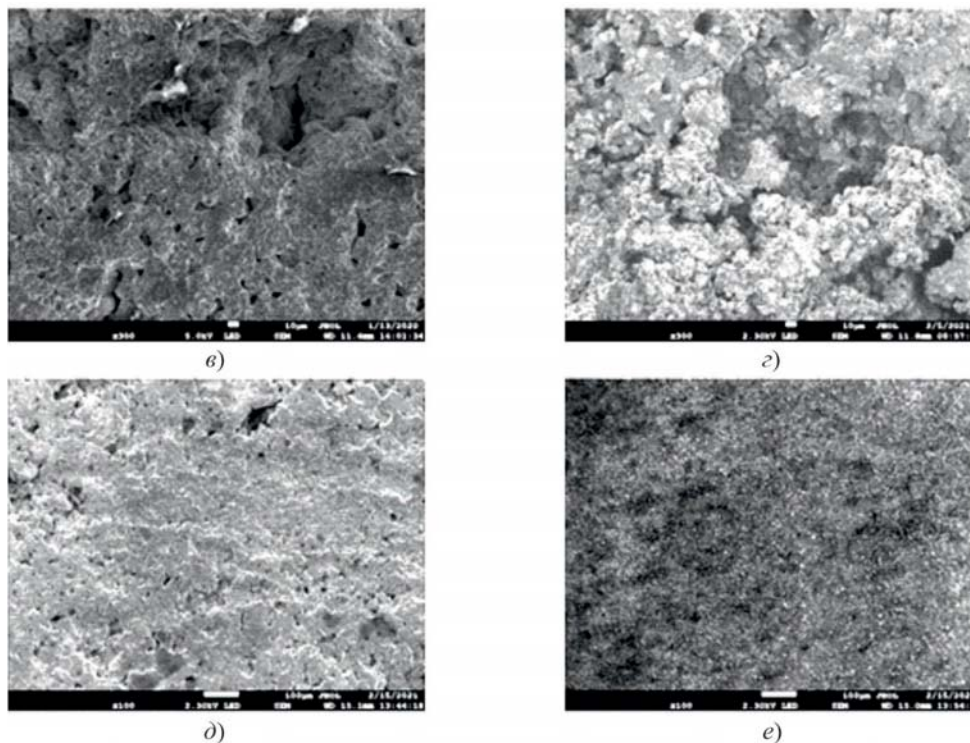


Рис. 1. Поверхности графитов МИГ-2 до (а) и после (б) обработки в серной кислоте и ПГИ до (с) и после (д) обработки в серной кислоте (начало на с. 73)

При увеличении времени травления до одной минуты наблюдались разрыхление поверхности и разрушение краев деталей при незначительных механических нагрузках. В качестве материала металлизационного покрытия в виде тонких пленок были использованы молибден и никель. Перед металлизацией графитовые детали подвергались химической очистке в фосфатно-щелочном растворе с последующими ультразвуковой очисткой в ацетоне и сушкой на воздухе. Формирование пленки молибдена толщиной 1,8...2,0 мкм осуществлялось методом ионно-плазменного напыления в вакууме. Нанесение пленки никеля толщиной 5...6 мкм осуществлялось методом гальванического осаждения.

3. ПАЙКА ГРАФИТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С КЕРАМИКОЙ ВК-94-2

Отрабатывались технологии торцевых графитокерамических спаев припоем ПЗлМ37,5В из фольги диаметром 10,5 мм. Торцевым спаем были соединены графитовые (МПИ-7, МИГ-2 и ПГИ) и керамические стержни диаметром 10,5 мм и длиной 49 мм.

Торцы соединяемых стержней были металлизированы пленкой молибдена толщиной 1,8...2,0 мкм. Пайка осуществлялась в среде водорода.

Прочность торцевых спаев графитов МПИ-7 и МИГ-2 с керамикой ВК-94-2 исследовалась на разрывной машине «Импульс Р5». Концы спаянных стержней размещались на металлических конусообразных опорах. Воздействие механической нагрузки осуществлялось деталью в форме конуса в точке спая. Скорость опускания нагрузки составляла 0,5 мм/мин. На трех исследуемых образцах торцевых спаев произошло разрушение графитовых стержней при усилии 0,35...0,235 кН (36,7...24,0 кгс) (рис. 2).

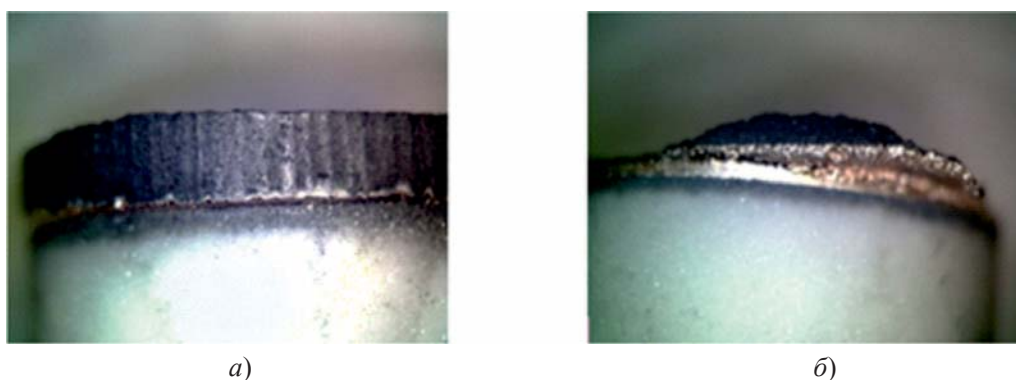


Рис. 2. Торцевые спаи стержней из МПГ-7 (а) и МИГ-2 (б), покрытых пленкой из молибдена, и керамики ВК-94-2

Аналогичные испытания на прочность спаев были проведены для металлизационного покрытия торцов стержней из МПГ-7 и МИГ-2, покрытых пленкой никеля толщиной 5...6 мкм с последующим термическим отжигом в водороде. Торцы графитовых стержней перед никелированием текстурированию в серной кислоте не подвергались. Спаи разрушились по торцам графитовых стержней из всех указанных марок графитов при нагрузке 0,16...0,18 кН (16,3...18,3 кгс) (рис. 3).

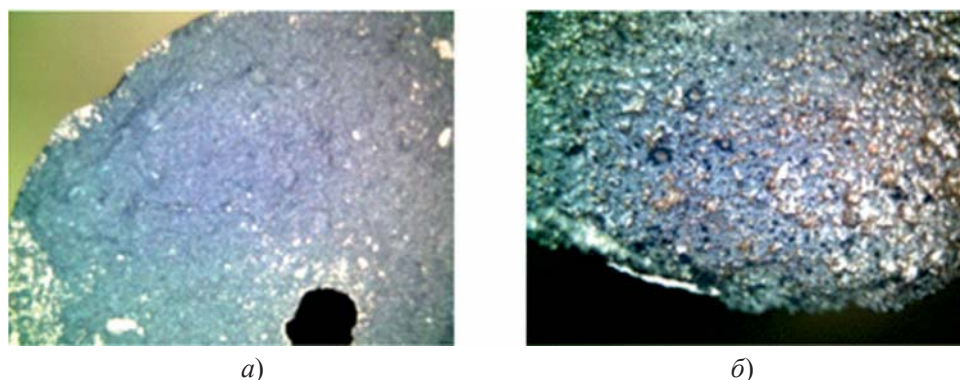


Рис. 3. Плоскости излома стержней из МПГ-7 (а) и из МИГ-2 (б), покрытых Ni

Были проведены исследования возможности пайки пластины из анизотропного пиролитического графита (АПГ) толщиной 200 мкм с пластиной из молибдена. Поверхность АПГ была металлизирована пленкой молибдена толщиной 1,8...2,0 мкм с двух сторон (со стороны базы и осаждения). Базовая сторона пластины из АПГ – это сторона, прилегающая к графитовой подложке, на которой выращивали пластину АПГ методом термохимического осаждения из углеродсодержащего газа. Шероховатость поверхности базовой стороны АПГ соответствовала шероховатости поверхности графитовой подложки, которая была отполирована до седьмого класса чистоты. Обратная сторона поверхности пластины (сторона осаждения) имела большую шероховатость. Пайка осуществлялась припоем из фольги МВ 0,05 в среде водорода. Образец, металлизированный со стороны базы, разрушился по спаю при незначительном усилии из-за недостаточной адгезии пленки из молибдена. Спай со стороны осаждения разрушился по графиту при нагрузке 0,01...0,021 кН (1...2,2 кгс) (рис. 4).



Рис. 4. Спаи по поверхности со стороны базы (а) и со стороны осаждения (б)

4. ОХВАТЫВАЮЩИЙ СПАЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ГРАФИТА МПГ-7 С КЕРАМИКОЙ ВК-94-2

Цилиндрические спаи графит – керамика одной из ступеней коллектора ЛБВ (графит марки МПГ-7 с напылением молибдена или никеля, керамика ВК-94-2, припой ПЗлМ37,5В), паянные в колпаковой водородной печи, представлены на рис. 5.

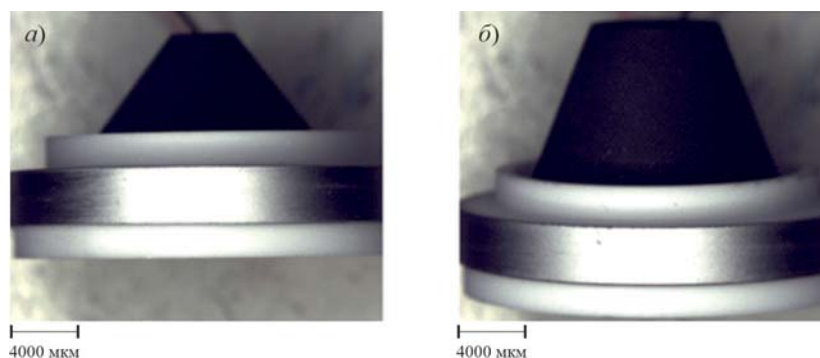


Рис. 5. Спаянные узлы МПГ-7 – ВК-94-2 с металлизацией Мо (а) и Ni (б)

Паяные графитокерамические узлы с металлизацией графита Мо и Ni успешно прошли испытания на 30 термоударов в среде азота при температуре от 40 до 700 °С и от 700 до 40 °С со скоростью изменения температуры не менее 80 °С/мин на установке термоциклирования. После термоударов внешний вид узлов не изменился, трещины и сколы на поверхности и кромках деталей отсутствовали.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований получения неразъемных соединений деталей из искусственных графитов марки МПГ-7 и МИГ-2 с керамикой ВК-94-2 с использованием припоя ПЗлМ37,5В продемонстрировали получение соединений, удовлетворяющих по прочности предъявляемым требованиям. Прочность спая АПГ с молибденом со стороны осаждения качественно оценить

не удалось, так как механическая прочность АПГ ниже, чем прочность спая. Прочность пайки АПГ со стороны базы неудовлетворительная.

Работы по улучшению адгезии покрытий графитовых деталей пленкой никеля требуют проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ramins, P.** Performance of textured carbon in copper electrode multistage depressed collectors with medium power traveling wave tubes / P. Ramins, A. N. Curren // NASA. TP. – 1986. – No 2665. – P. 1.
2. **Сотникова, Е. М.** Углеродистые материалы и способы их соединения с металлами / Е. М. Сотникова, Н. М. Радзимовская // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. – 1984. – Вып. 7 (1023). – 62 с.
3. Design and development of high efficiency 124 W space TWT with graphite collector / V. Srivastava, G. Purohit, R. K. Sharma [et al.] // Journal of Physics: Conference Series 114 (2008) 012051.
4. **Пат. 2734323 Российская Федерация** / Д. И. Кириченко, П. Д. Шалаев, В. И. Шестеркин. – Заявлено 30.01.2020; опубл. 15.10.2020, Бюл. № 29.

*Статья поступила 30 марта 2022 г.,
после переработки 11 мая 2022 г.*

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ДМИТРИЕВ, В. Г. Радиоэлектронная борьба: функциональное поражение радиоэлектронных средств: монография / В. Г. Дмитриев. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 268 с.

Рассматриваются принципиальные возможности, технические приемы проектирования и использования средств функционального поражения одноразового и много-разового применения, оснащенных сверхвысокочастотными и сверхширокополосными импульсными генераторами.

Для специалистов в области радиоэлектронной и информационной борьбы. Издание может быть полезно студентам и аспирантам, изучающим технику радиоэлектронных систем и комплексов в вузах.

УДК 669.018.95:621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ Cu–Mo–Cu И Cu–МД₄₀–Cu В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОТВОДОВ СВЧ-ПРИБОРОВ

А. В. Ермаков¹, В. Г. Костишин², А. Г. Налогин¹, А. Л. Васильев¹

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

²НИТУ МИСИС, г. Москва

Рассмотрены вопросы применения металломатричных композитов в качестве теплоотводящих элементов для СВЧ-приборов. Описана возможность замены металломатричных композитов на основе меди и молибдена, а также из SiC–Al многослойными композитами. Приведены теоретический расчет теплофизических параметров многослойных композитов Cu–Mo–Cu, Cu–МД₄₀–Cu и сравнение полученных данных с экспериментальными. Проведено моделирование процесса отвода тепла от мощного транзистора на основе GaN, смонтированного на теплоотводящие основания из металломатричного материала на основе SiC–Al и многослойного материала на основе Cu–Mo–Cu. Теплоотводящее основание из Cu–Mo–Cu позволяет снизить температуру нитридагаллиевого кристалла за счет равномерного распределения тепловой энергии по всему объему.

КС: многослойный металлический композиционный материал, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), диффузионная сварка

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING Cu–Mo–Cu AND Cu–МД₄₀–Cu MULTILAYER COMPOSITES AS HEAT SINKS FOR MICROWAVE DEVICES

A. V. Yermakov¹, V. G. Kostishin², A. G. Nalogin¹, A. L. Vasilyev¹

¹JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

²National University of Science and Technology «MISIS», Moscow

The issues of using metal-matrix composites as heat-removing elements for microwave devices are considered. The possibility of replacing metal-matrix composites based on copper and molybdenum, as well as from SiC–Al with multilayer composites, is described. A theoretical calculation of the thermo-physical parameters of Cu–Mo–Cu, Cu–МД₄₀–Cu multilayer composites and a comparison of the obtained data with experimental ones are presented. The process of heat removal from a high-power GaN-based transistor mounted on heat-removing bases made of a metal-matrix material based on SiC–Al and a multilayer material based on Cu–Mo–Cu is simulated. The heat-removing base made of Cu–Mo–Cu makes it possible to reduce the temperature of the gallium nitride crystal due to the uniform distribution of thermal energy throughout the whole volume.

Keywords: multilayer metal composite material, temperature coefficient of linear expansion (TCLE), diffusion welding

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при разработке мощных полупроводниковых транзисторов и интегральных микросхем прослеживается тенденция в сторону миниатюризации при сохранении, а иногда и повышении их мощностных характеристик и, как следствие, увеличении плотности выделяемой мощности и необходимости ее отвода. Из-за чего растет потребность в разработке новых материалов, с улучшенными теплофизическими свойствами, совместимых с полупроводниками

по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР), для создания теплоотводящих оснований. В качестве таких материалов как в России, так и за рубежом широко используются металломатричные композиционные материалы (МКМ): CuMo, SiC–Al и т. п. [1–6]. Свойства композитов зависят, прежде всего, от свойств входящих в них материалов: армирующих элементов и матрицы. Кроме того, их соединение даёт эффект синергизма ($1+1>2$), связанный с появлением у композиции свойств, не характерных для отдельных материалов.

Можно констатировать, что на сегодняшний момент накоплен значительный объем теоретических и экспериментальных данных по разработке технологий получения и исследованиям свойств и характеристик композиционных материалов (КМ).

Существуют проблемы при производстве теплоотводящих оснований из МКМ толщиной менее 0,5 мм и малыми геометрическими размерами, которые используются при производстве мощных транзисторных сборок и микросхем, связанные со сложностью производства металломатричных композитов, их механообработкой, теххимическими процессами нанесения защитных покрытий, что приводит к увеличению стоимости продукции. При механической обработке происходят многочисленные сколы и крошение материала, а при химической обработке – избирательное воздействие на отдельные компоненты ввиду сильного различия химических свойств.

Поэтому в последние годы за рубежом широкое распространение при изготовлении теплоотводов для мощных СВЧ-приборов нашли слоистые КМ. В результате наличия жесткого каркаса внутри и материала с высокой теплопроводностью снаружи данные КМ хорошо зарекомендовали себя при использовании в качестве конструкционного теплоотводящего материала в приборах с высоким тепловыделением.

Вопрос реализации необходимых свойств в слоистых КМ связан с управлением характеристиками композитов в процессе изготовления путем сочетания слоев из различных материалов. Для того чтобы КМ обладал стабильными свойствами при повышенных температурах, его материалы должны быть химически совместимы. Понятие химической совместимости включает понятия термодинамической совместимости и кинетической совместимости.

Термодинамическая совместимость – способность материалов контактирующих слоев композита находиться в состоянии термодинамического равновесия неограниченное время при температурах получения и эксплуатации. Термодинамически совместимо в изотермических условиях ограниченное число КМ, состоящих из практически не растворимых друг в друге в широком интервале температур материалов. В качестве примера можно привести многослойные КМ на основе меди, молибдена, вольфрама: Cu/Mo₇₀Cu/Cu, Cu/Mo/Cu/.../Cu и Cu/W₈₅Cu/Cu [5, 6].

Кинетическая совместимость – способность контактирующих слоев КМ находиться в состоянии метастабильного равновесия, контролируемого такими факторами, как адсорбция, скорость диффузии, скорость химической реакции и т. п. Термодинамически несовместимые составляющие КМ в определенных температурно-временных интервалах могут быть совместимы кинетически и достаточно надежно работать в конструкциях (например, Cu/Ni/Mo/Ni/Cu).

Наряду с химической совместимостью важно обеспечить механическую совместимость слоев КМ, т. е. соответствие их упругих постоянных, ТКЛР и показателей пластичности, позволяющее достичь прочности связи, необходимой для эффективной передачи напряжений через поверхность раздела. При проектировании и производстве теплоотводящих оснований для СВЧ полупроводниковых приборов помимо традиционных требований необходимой прочности, жёсткости и теплопроводности при минимуме массы добавляется требование размерной термостабильности.

В работе [7] проведено сравнение внутренних механических напряжений композитов системы вольфрам-медь и МКМ на основе меди и молибдена. При максимальных измеренных напряжениях разница составляет более чем в 2 раза в пользу многослойного материала (рис. 1). Для мощных СВЧ-транзисторов и интегральных схем данный критерий имеет большое значение, т. к. в этих приборах нарушение плоскостности теплоотводящего основания может привести к отказу. Однако следует отметить, при правильном подборе в слоистом композите толщины слоев материалов с различным сопротивлением, растяжением и сжатием, положение его нейтральной линии определяется однозначно [8].

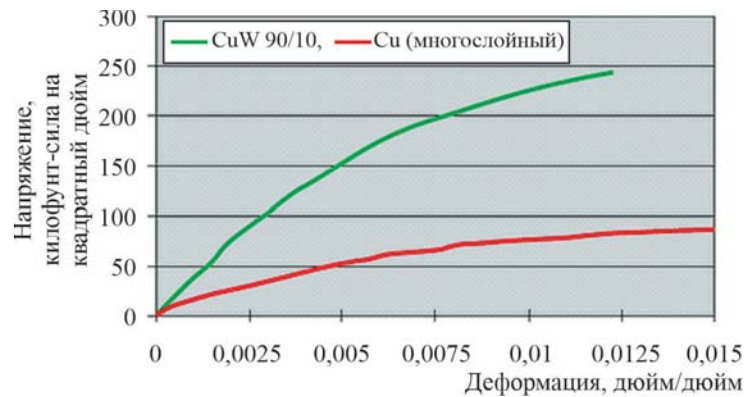


Рис. 1. Механические напряжения WCu и Cu–Mo–Cu

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследовались два типа слоистых КМ, на основе структур Cu–Mo–Cu (Cu/Ni/Mo/Ni/Cu) (рис. 2, а, б) и Cu–МД₄₀–Cu (Cu/Mo₆₀Cu/Cu) (рис. 2, в, г). При производстве этих композитов используются материалы с большим различием свойств, что налагает на разработчика ряд определенных задач в части расчета физических свойств конечного продукта. Для изготовления слоистой структуры композита применялся метод диффузионной сварки в вакууме с последующей пластической деформацией на прокатном стане. В первом случае между молибденом и медью нанесен слой химического никеля.

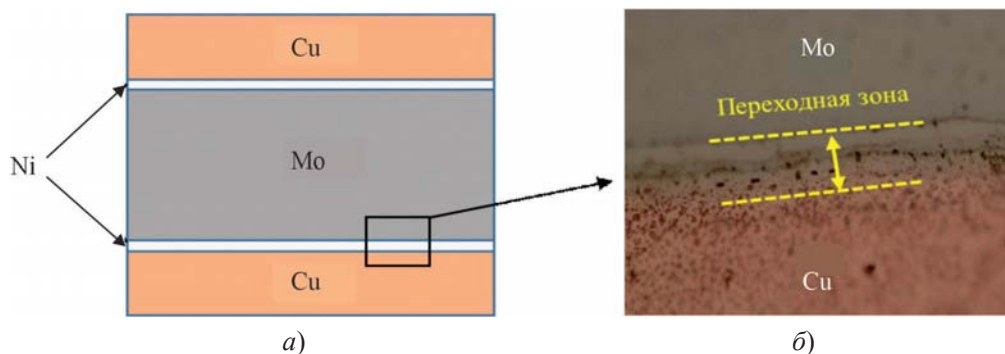


Рис. 2. Структуры слоистых композитов:

а и б – конфигурация слоев и микроструктура сварного шва в композите Cu–Mo–Cu с прослойкой Ni (см. также с. 81)

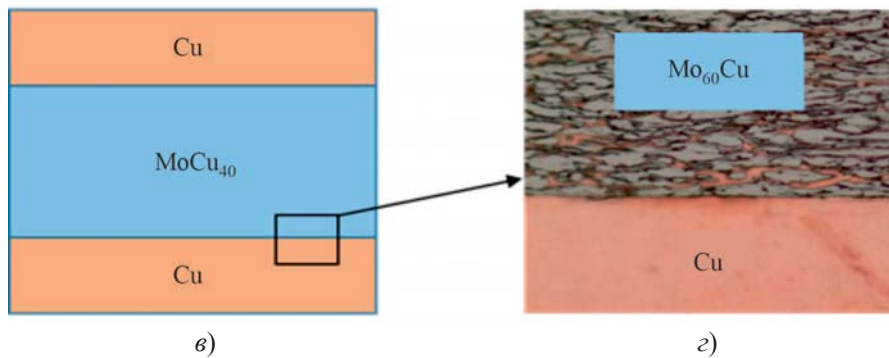


Рис. 2. Структуры слоистых композитов:
 в и з – конфигурация слоев и микроструктура сварного шва
 в композите Cu–Mo₆₀Cu–Cu (начало на с. 80)

3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для расчета ТКЛР композитов обычно применяют приближенные методы [9–15], которые обеспечивают приемлемую для инженерных расчетов точность, в основном при простых структурах армирования (однонаправленные и слоистые композиты).

Теоретический расчет тепломеханических взаимодействий слоистых КМ является сложной задачей, т. к. «армирующий» (центральный) слой взаимодействует с «матрицей» – обкладками только поверхностными слоями, из-за чего вклад каждого из слоев при расширении получается неполным. В случае создания МКМ из слоев с сильно различающимися ТКЛР, одни слои будут ограничивать ТКЛР других, вследствие чего может возникнуть внутреннее межслойное напряжение, которое пагубно скажется на дальнейшей эксплуатации материала.

При первичном расчете можно сделать допущение, что в качестве армирующих элементов будет принят средний жесткий слой, а в качестве матрицы – внешние обкладки. В этом случае рассчитать эффективный коэффициент расширения таких композитов можно, используя формулу для двухфазной механической смеси, с учетом упругих взаимодействий между частицами [16]:

$$\alpha_{эф} = \frac{E_m \alpha_m v_m + E_a \alpha_a v_a}{E_m v_m + E_a v_a}, \quad (1)$$

где α_m , E_m , v_m – соответственно ТКЛР, модуль упругости, объемная доля матрицы; α_a , E_a , v_a – соответственно ТКЛР, модуль упругости, объемная доля армирующих элементов.

Исходные данные и результаты расчетов $\alpha_{эф}$ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики компонентов для композита Cu–Mo–Cu

Материал	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$E, \text{ГПа}$	Объемная доля компонента v	$\alpha_{эф} \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$
Cu	16,6	1,236	0,58	5,63
Mo	5,6	290	0,4	
Ni	13	1,8	0,02	

Таблица 2. Характеристики компонентов для композита Cu/Mo₆₀Cu/Cu

Материал	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$E, \text{ГПа}$	Объемная доля компонента v	$\alpha_{\text{эф}} \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$
Cu	16,6	1,236	0,4	17,1
Mo ₆₀ Cu	9,8	2,06	0,6	

Для измерения ТКЛР МКМ изготавливали заготовки размерами 5×0,3×40 мм. Измерения проведены на dilatометре DIL 402C (Netzsch, Германия). Температурные зависимости относительного удлинения и ТКЛР многослойных композитов Cu–Mo–Cu и Cu–МД₄₀–Cu в температурном интервале 20...300 °С представлены на рис. 3. Также на рис. 3 нанесены зависимости изменения относительного удлинения для керамики LTCC и AlN от температуры.

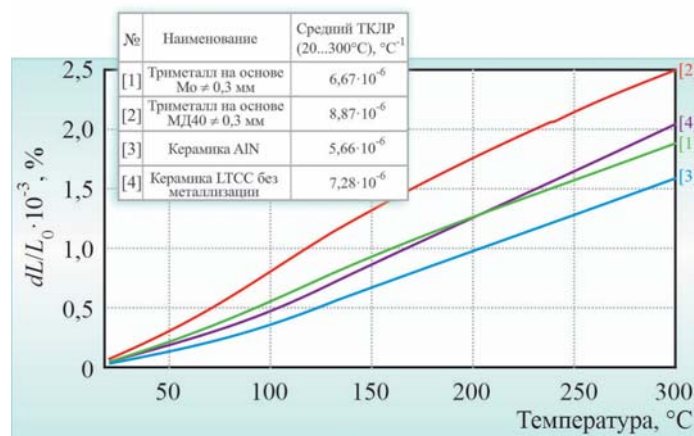


Рис. 3. Зависимости относительного удлинения dL/L_0 образцов композитов на основе меди и молибдена, керамики LTCC и AlN от температуры

Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что наиболее близким по ТКЛР к этим видам керамики является триметалл Cu–Mo–Cu. При сопоставлении мы получили, что рассогласование по ТКЛР с керамикой LTCC составляет 8,5 %, а с керамикой AlN – 17 %.

В табл. 3 занесены значения средних ТКЛР, измеренных в диапазоне от 20...300 °С, а также рассчитанные по формуле (1).

Таблица 3. ТКЛР многослойных материалов

Материал	Расчет $\alpha_{\text{эф}} \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	Эксперимент (20...300 °С) $\alpha_{\text{эк}} \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$
Cu–Mo–Cu	5,53	6,67
Cu–Mo ₆₀ Cu–Cu	11,7	8,87

Такое различие расчетных и экспериментальных данных можно объяснить тем, что для расчета исходные данные берутся при нормальных условиях, а при эксперименте значение ТКЛР определяется в интервале температур 20...300 °С и усредняется. В нашем случае для КМ Cu–Mo–Cu $\alpha_{\text{эф}} < \alpha_{\text{эк}}$, т. к. в диапазоне температур ~20...100 °С угол наклона кривой 1 на рис. 3

более пологий, чем в диапазоне 100...300 °С, ввиду использования в качестве сердечника тугоплавкого материала с низким ТКЛР. Для КМ Cu–Mo₆₀–Cu ситуация обратная, на диапазоне 20...100 °С угол наклона кривой 2 (см. рис. 3) более крутой, чем в диапазоне 100...300 °С. Это можно объяснить тем, что ввиду использования в качестве сердечника материала Mo₆₀–Cu, с заметно большим ТКЛР, чем у молибдена, на начальных этапах вносит больший вклад ТКЛР КМ.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Задача теории контактного теплообмена слоистых КМ заключается в определении взаимосвязи между передаваемым через соединение тепловым потоком или его плотностью и разностью температур на взаимодействующих поверхностях. Ее решение состоит из нескольких основных этапов:

- установление геометрии системы твердых тел в данных термомеханических условиях;
- выяснение влияния геометрии на распределение температуры в пределах каждой непрерывной среды;
- вычисление теплофизических свойств в возмущенных слоях материалов для данного температурного поля;
- расчет контактного термического сопротивления, определяющего потери температурного напора в соприкасающихся телах и равного отношению приведенного перепада температуры на средних контактных плоскостях к плотности теплового потока.

Отсюда следует, что граница раздела твердых тел в зоне фактического контакта слоистого КМ имеет конечную термическую проводимость, т. е. термическое сопротивление тесного контакта не равно нулю. Существование собственного термического сопротивления тесного контакта твердых тел можно объяснить рассеянием электронов на границе раздела непрерывных сред.

Тепло в металлах изменяется вместе с электропроводностью, согласно закону Видемана-Франца. Это связано с тем, что валентные электроны, свободно перемещаясь по кристаллической решетке металла, переносят не только электрическую, но и тепловую энергию. На границе раздела металлов возникает контактная разность потенциалов, причиной которой является различие концентраций в контактирующих металлах. Для оценки влияния границы раздела контактирующих металлов на теплопроводность контактную разность потенциалов можно связать с работой выхода электронов из металла:

$$e\varphi_1 - e\varphi_2 = 1/e(A_1 - A_2). \quad (2)$$

Внутренняя контактная разность потенциалов возникает в двойном электрическом слое, образующемся в приконтактной области и называемом **контактным слоем**. Это означает, что между контактирующими поверхностями металлов существует электрическое поле. Толщина контактного слоя в металлах составляет примерно 10^{-10} м, т. е. соизмерима с междоузельными расстояниями в решетке металла. Число электронов, участвующих в диффузии через контактный слой, составляет примерно 2 % от общего числа электронов, находящихся на поверхности металла. Для меди работа выхода составляет 4,36 эВ, молибдена – 4,2 эВ, никеля – 4,91 эВ. Столь незначительное изменение потенциала в контактном слое, с одной стороны, и малая по сравнению с длиной свободного пробега электрона его толщина, с другой, не могут привести к заметному изменению проводимости контактного слоя по сравнению с остальной частью металла. Поэтому в нашем случае при инженерных расчетах данный эффект можно не учитывать.

При поиске теплопроводности слоистых КМ нам приходится решать классическую задачу прохождения теплового потока через многослойную стенку.

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока для каждого слоя с плоскопараллельными стенками можно записать как

$$q = \frac{\lambda_n \cdot (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}})}{\delta_n}, \quad (3)$$

где λ_n – теплопроводность слоя n ; δ_n – толщина слоя n ; $t_{\text{ср1}}$, $t_{\text{ср2}}$ – температуры наружных поверхностей слоя n .

При теоретическом расчете теплопроводности многослойной композиции необходимо принять некоторые допущения: весь тепловой поток направлен сквозь пластину, следовательно, отсутствуют потеря тепла через боковые стенки и распределение по поверхности; слои многослойных композитов плотно прилегают друг к другу и, благодаря идеальному тепловому контакту, температуры их поверхностей одинаковы; материалы каждого слоя однородны.

Для расчета необходимо ввести понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойной стенки. Он равен коэффициенту теплопроводности однородной стенки той же толщины, с теми же температурами поверхностей, пропускающей тот же тепловой поток. Преобразовав выражение (3) при условии постоянного теплового потока через многослойный материал, можно определить значение эквивалентного коэффициента теплопроводности для всего многослойного материала:

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}, \quad (4)$$

где $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – толщины 1-го, 2-го и n -го слоя соответственно, мм; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$ – теплопроводности 1-го, 2-го и n -го слоя соответственно, Вт/(м·К).

В качестве примера рассмотрим МКМ на основе меди и молибдена со следующими сочетаниями слоев: Cu/Ni/Mo/Ni/Cu и Cu/Mo₆₀Cu/Cu – толщиной 0,3 мм.

Часто такого расчета достаточно для примерного определения условий работы материала. Однако такой расчет справедлив главным образом для идеальных систем.

При расчете эквивалентного коэффициента теплопроводности по формуле (4) для триметаллов на основе меди и молибдена были получены следующие результаты (табл. 4). Значения коэффициентов удельной теплопроводности материалов, используемых при создании многослойных композитов, варьируются в зависимости от источника. Поэтому были выбраны наиболее часто встречающиеся значения [17].

Таблица 4. Результаты расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойных композитов

Материал	Компонент	Толщина слоя, мкм	λ , Вт/(м·К)	Расчет $\lambda_{\text{эк}}$, Вт/(м·К)
(Cu/Ni/Mo/Ni/Cu)	Cu	60	400	191
	Ni	5	91	
	Mo	170	146	
	Ni	5	91	
	Cu	60	400	

Окончание

Материал	Компонент	Толщина слоя, мкм	λ , Вт/(м·К)	Расчет $\lambda_{эк}$, Вт/(м·К)
Cu/Mo ₆₀ Cu/Cu	Cu	60	400	250
	Mo ₆₀ Cu	180	200	
	Cu	60	400	

Часто такого расчета достаточно для ориентировочного определения условий работы материала. Однако такой расчет справедлив главным образом для идеальных систем.

Существует большое количество методов для определения удельной теплопроводности материалов [18]. Для нахождения истинных значений коэффициентов теплопроводности МКМ в нашем случае целесообразен косвенный метод, в основе которого лежит методика определения температуропроводности материала методом лазерной вспышки. Для разогрева материала используются импульсы с малой длительностью, что можно сравнить с единичным тактом работы мощного импульсного транзистора. В результате большая часть теплоты направляется сквозь материал. Формула для расчета коэффициента теплопроводности в этом случае будет выглядеть так

$$\lambda(T) = a(T) \cdot \rho(T) \cdot C_p(T), \quad (5)$$

где a – температуропроводность; ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость.

Для определения удельной температуропроводности образцов использовался прибор XFA 500 фирмы Linseis. Образцы в форме шайбы помещаются в держатель образцов, который с помощью подъемной системы располагается в печи. После установления заданной температуры измерения фронтальная сторона пробы поглощает импульс ксеноновой лампы. Затем в образце происходит выравнивание температуры. При этом с помощью ИК-детектора регистрируется относительное изменение температуры на обратной стороне образца. Для испытаний готовят образцы цилиндрической формы, на поверхности которых не должно быть сколов и трещин. Торцы образцов должны быть параллельными, отклонение от плоскости не должно превышать 0,01 мм.

Измерение плотности образцов проводили на аналитических весах UW620H (Shimadzu Corporation, Япония) с приспособлением для гидростатического взвешивания SMK-101. В качестве жидкости с точно известным удельным весом использовалась дистиллированная вода. Вес образца измеряли в воздухе W_a и в жидкости W_l . Плотность образца определяли по формуле:

$$\rho = \rho_0 \cdot (W_a / (W_a - W_l)), \quad (6)$$

где ρ – плотность образца; ρ_0 – известная плотность жидкости; W_a – вес образца в воздухе; W_l – вес образца в жидкости.

Измерения температуропроводности триметаллов проводили методом лазерной вспышки. Данный способ нагрева больше всего подходит при моделировании процессов тепловыделения, которые происходят при работе мощных полупроводниковых приборов в импульсном режиме. Одной из особенностей данного метода является то, что короткий импульс энергии поглощается в тонком слое поверхности, а вызванное тем самым изменение температуры регистрируется на тыльной поверхности.

Измерение теплоемкости триметаллов проводилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Измерение проходило на установке Q20 (TA instruments, США) в диапазоне температур 40...400 °С, со скоростью нагрева 10 °С/мин в потоке Ar (50 мл/мин). Массы образцов составляли 2,1 мг. На рис. 4 и 5 показаны зависимости изменения теплового потока сквозь многослойные композиты Cu–Mo–Cu (*S1*) и Cu–Mo₆₀–Cu–Cu (*S2*) соответственно при изменении температуры. Согласно показанным кривым ДСК, при температуре выше 150 °С образцы *S1* и *S2* представляют термостабильные структуры. Уменьшение удельного теплового потока, выраженное в искривлении кривой ДСК, можно объяснить возрастанием удельной теплоемкости металла с ростом температуры. Эндотермические эффекты, согласно ДСК, составляют: $\Delta H_{S1} = 9,44$ Дж/г с температурой пика 78,77 °С и $\Delta H_{S2} = 10,26$ Дж/г с температурой пика 67,78 °С.

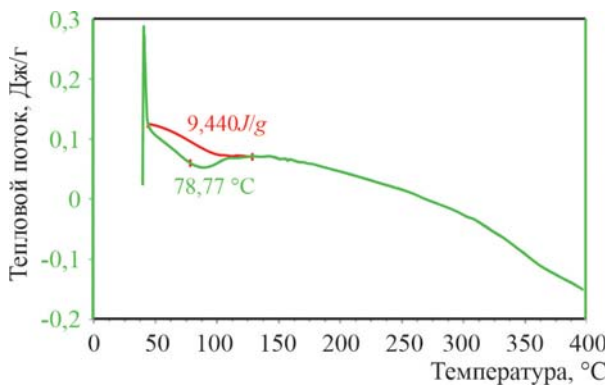


Рис. 4. Кривые ДСК для образца Cu–Mo–Cu

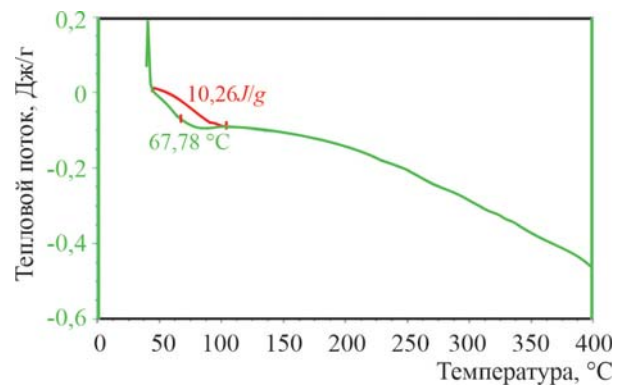


Рис. 5. Кривые ДСК для образца Cu–Mo₆₀–Cu–Cu

Для расчета теплоемкости образца используют следующее уравнение:

$$C_{p,обр} = \frac{Q_{обр} - Q_{БЛ}}{Q_{стнд} - Q_{БЛ}} \cdot \frac{m_{стнд}}{m_{обр}} \cdot C_{p,стнд} \quad (7)$$

где $Q_{обр}$, $Q_{стнд}$, $Q_{БЛ}$ – тепловые потоки для образца, стандарта и пустой кюветы соответственно; $m_{обр}$ и $m_{стнд}$ – массы образца и стандарта соответственно. В качестве стандарта для измерения был использован Al_2O_3 с $m = 21,8$ г. Удельная теплоемкость сапфира Al_2O_3 $C_{p,стнд}$ при 50 °С составляла 825,8 Дж/(кг·К) (ГОСТ 23630.1–79). Метод определения удельной теплоемкости включает три измерения: базовой линии с пустыми кюветами, стандарта Al_2O_3 и образца. Удельные теплоемкости $C_{p,S1}$ и $C_{p,S2}$ для образцов *S1* и *S2* на основе экспериментальных данных рассчитывались при 50 °С.

5. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Расчет теплопроводности триметаллов производился по формуле (5).

Результаты вычисления коэффициентов теплопроводности МКМ представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчета коэффициентов теплопроводности многослойных композитов на основе экспериментальных данных

Композит	ρ , г/см ³	C_p , Дж/(г·К)	a , см ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\lambda_{эк}$, Вт/(м·К)
Cu–Mo–Cu	9,7	271,849	0,622	164	191
Cu–Mo ₆₀ –Cu–Cu	9,4	309,158	0,801	233	250

Ожидаемо, экспериментальные данные оказались ниже расчетных, что можно объяснить в первую очередь рассеянием теплоты вдоль поверхности материала при измерении удельной теплопроводности материалов, а также неидеальностью системы и наличием теплового сопротивления на границах раздела материал-материал и материал-детектор.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ТЕПЛООТВОДЯЩЕМ ОСНОВАНИИ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Для сравнения целесообразности использования рассматриваемых триметаллов взамен металломатричных композитов в качестве материала для теплоотводящих оснований транзисторных сборок и микросхем, произведем моделирование тепловых процессов, происходящих в реальной сборке усилителя мощности: активный элемент площадью 1 мм² на основе GaN установлен на теплоотвод из металломатричного композита SiC–Al, который в свою очередь расположен на поверхности LTCC-керамики, а вся эта конструкция базируется на алюминиевом теплоотводе, имеющем постоянную температуру 50 °С. Т. к. теплопроводность LTCC-керамики крайне мала, в ней предусмотрены вертикальные каналы, изготовленные из материала с высокой теплопроводностью (Ag). Для задания мощности активного элемента необходимо учитывать, что большинство таких приборов работают в импульсном режиме. Для моделирования зададим выделяемую мощность активного элемента 5 Вт. Моделирование производилось с использованием программного комплекса «Ansys» (рис. 6).

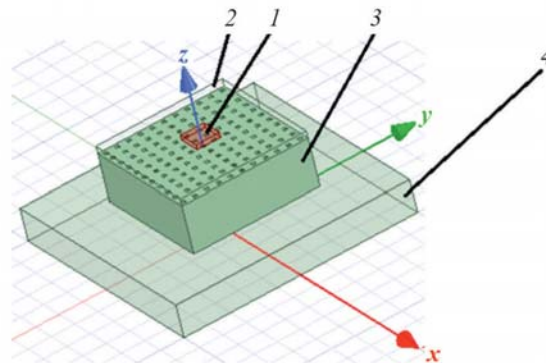


Рис. 6. Расчетная 3D-модель транзисторной сборки:

1 – активный элемент на основе GaN; 2 – теплоотвод из металломатричного композита SiC–Al (или из Cu–Mo–Cu); 3 – LTCC-керамика с вертикальными каналами из серебра; 4 – алюминиевый теплоотвод

Теперь заменим материал теплоотвода на многослойный композит Cu–Mo–Cu и проведем моделирование при прочих равных условиях. Данный материал выбран ввиду близости с GaN по ТКЛР.

Как можно видеть из рис. 7 и 8, температуры на поверхности кристалла в обоих случаях близки. Однако при использовании сборки с теплоотводом Cu–Mo–Cu, показанной на рис. 8,

температура ниже, что можно объяснить тем, что в данном случае тепловой поток идет более широким фронтом, задействуя тем самым большее количество теплопроводных каналов в LTCC-керамике.

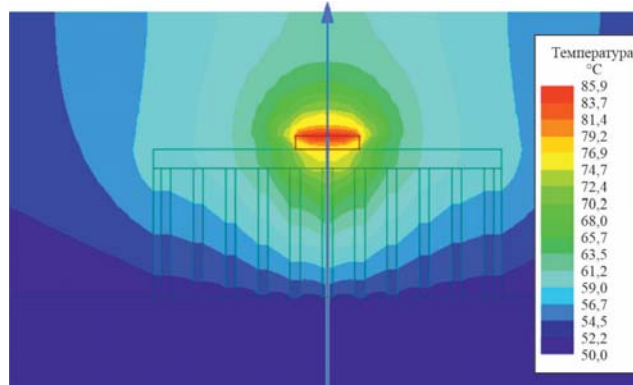


Рис. 7. Распределение температуры в срединной плоскости симметрии расчетной 3D-модели транзисторной сборки с теплоотводом SiC–Al

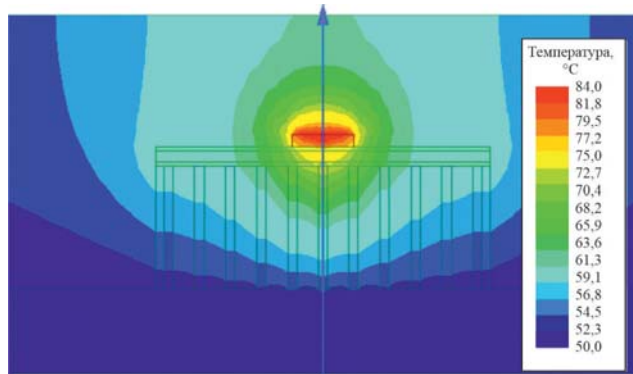


Рис. 8. Распределение температуры в срединной плоскости симметрии расчетной 3D-модели транзисторной сборки с теплоотводом Cu–Mo–Cu

В табл. 6 приведены основные характеристики металломатричных материалов, наиболее часто применяемых при изготовлении теплоотводов СВЧ-транзисторов и микросхем, и описанных выше МКМ.

Таблица 6. Основные характеристики часто используемых металломатричных композитных материалов и триметаллов

Марка	Плотность, г/см ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	ТКЛР·10 ⁻⁶ , °C ⁻¹
МД-50	9,50±0,05	255	11,7
МД-25	9,45±0,05	180	7,7
SiC–Al	2,9...3,5	>180	6,5...8,5
Cu–Mo–Cu	9,65±0,05	164	6,9±0,2
Cu–Mo ₆₀ –Cu–Cu	9,35±0,05	233	8,7±0,3

7. ВЫВОДЫ

Несмотря на то, что постоянно появляются новые конструкционные материалы с улучшенными термо- и массогабаритными характеристиками, в РФ основная доля теплоотводящих оснований изготавливается из материалов, произведенных по методу порошковой металлургии.

Анализ результатов расчётных и экспериментальных исследований термомеханических характеристик слоистых композитов на основе меди и молибдена позволяет сделать следующие выводы:

– благодаря сочетанию высокой теплопроводности меди и низкого ТКЛР молибдена, данные материалы сравнимы по своим характеристикам с используемыми в данный момент металло-матричными материалами, а в некоторых аспектах превосходят их;

– низкий ТКЛР материалов позволяет использовать данные композиты совместно с современными конструкционными материалами (LTCC, AlN и т. д.);

– в отличие от металло-матричных материалов, у рассматриваемых многослойных композитов на поверхности располагается однородный материал (медь), на который легко наносить все основные защитные и функциональные покрытия.

Также немаловажной особенностью МКМ является возможность без существенного изменения технологии производства изменять ключевые параметры (ТКЛР, теплопроводность и т. д.) за счет изменения соотношения толщины и количества слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilleo, K. MEMS/MOEMS packaging concepts, designs, materials and processes / K. Gilleo // McGraw-Hill Nano-Science and Technology Series, United States of America, 0-07-158909-0. – 2005. – P. 84 – 93.
2. Ральченко, В. CVD-алмазы. Применение в электронике / В. Ральченко, В. Конов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4. – P. 58 – 67.
3. Исследование физических свойств металло-матричного композиционного материала AlSiC / К. Н. Ницев, М. И. Новопольцев, Н. Е. Фомин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2011. – № 4 (20). – P. 78 – 85.
4. Потапов, С. Композитные теплоотводящие материалы для изделий электроники / С. Потапов // Электроника. – 2015. – № 9. – P. 102 – 107.
5. Torrey Hills Heat Sinks. – 2013. – www.torreyhillstech.com.
6. www.plansee.com.
7. Бондарь, Д. Металлические и композитные теплопроводящие материалы для мощных полупроводниковых корпусов / Д. Бондарь // Компоненты и технологии. – 2014. – № 12. – P. 155 – 160.
8. Амбарцумян, С. А. Разномодульная теория упругости / С. А. Амбарцумян // Наука. – Глав. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 320 с.
9. Сплавы молибдена / Н. Н. Моргунова, Б. А. Клыпин, В. А. Бояршопов [и др.]. – М.: Металлургия, 1975.
10. Christensen, R. M. Mechanics of composite materials / R. M. Christensen // Wiley-Interscience. – New York, 1979. – 348 p. [In Russian: Christensen R. M. Vvedenie v mekhaniku kompozitov. Moscow, Mir Publ., 1982, 336 p.].
11. Tarnopolskiy, Yu. M. Prostranstvenno armirovannye kompozitsionnye materialy // Spatially Reinforced Composite Materials / Yu. M. Tarnopolskiy, I. G. Zhigun, V. A. Polyakov. – Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. – 224 p.
12. Zarubin, V. S. Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskii zhurnal / V. S. Zarubin, G. N. Kuvyrkin, I. Y. Savelyeva // Science and Education: Electronic Scientific and Technical Journal. – 2015. – № 2. – P. 197 – 215.
13. / Zhiguo Ran, Ying Yan, Jianfeng Li [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. – October 2014. – Vol. 27, iss. 5. – P. 1180 – 1187.

Статья поступила 16 мая 2022 г.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

АНТИАГРЕГАНТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**А. В. Чеканов^{1,3}, В. А. Щелконогов^{1,2,3}, О. А. Баранова¹,
И. Г. Полников³, К. Д. Казаринов³**

¹ФГАОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова Минздрава России, г. Москва

²МИРЭА – Российский технологический университет (ИТХТ), г. Москва

³ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Представлены экспериментальные данные, показывающие, что микроволновое излучение в диапазоне КВЧ способно изменять агрегационную способность клеток крови человека. Было установлено также, что микроволновое излучение низкой интенсивности снижает активность тромбоцитов в среде этанола. Предложен механизм наблюдаемых биологических эффектов КВЧ-излучения.

КС: КВЧ-диапазон, обогащенная тромбоцитами плазма, тромбоциты, индукторы агрегации, метанол, этанол, механизм биологического действия КВЧ-излучения

ANTIAGGREGANT EFFICIENCY OF MICROWAVE RADIATION

**A. V. Chekanov^{1,3}, V. A. Shchelkonogov^{1,2,3}, O. A. Baranova¹,
I. G. Polnikov³, K. D. Kazarinov³**

¹FSAEI HE Pirogov Russian National Research Medical University,
Russian Ministry of Health, Moscow

²«MIREA» Russian Technological University (RTU), Moscow

³FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The experimental data showing that microwave radiation in EHF range can change the aggregation ability of human blood cells are presented. It was also found that low-intensity microwave radiation reduces the activity of platelets in ethanol medium. A mechanism for the observed biological effects of EHF radiation is proposed.

Keywords: EHF range, platelet-rich plasma, platelets, aggregation inductors, methanol, ethanol, mechanism of biological action of EHF radiation

1. ВВЕДЕНИЕ

В области изучения биологического действия микроволнового излучения клеточная биология занимает особое место. Клетки, как основные структурные элементы органов и тканей, а также межклеточное взаимодействие, которое, в конечном счете, управляет процессами функ-

ционирования, рождения и смерти организмов, остаются всегда в центре внимания специалистов. Результаты наших предшествующих экспериментов посвящены изучению влияния микроволнового излучения на клетки человека, находящиеся в стрессовом состоянии. Окислительный стресс играет существенную роль при патологических процессах. В тканях окислительный стресс приводит к апоптозу, которому подвергаются не только ядродержащие, но и безъядерные клетки, такие, как эритроциты и тромбоциты. Функционирование тромбоцитов является одной из основных причин сосудистых патологий – клеток кровяного русла. Однако не всегда удается преодолеть агрегацию тромбоцитов и предотвратить развитие тромботических осложнений с помощью антитромбоцитарных препаратов. В данной работе рассматривается один из аспектов применения крайне высокочастотного (КВЧ) в микроволновом диапазоне излучения в медицинских приложениях, а именно как фактор коррекции нарушений реологических свойств крови.

Известно, что алкоголь вызывает апоптоз (программируемую смерть) в эукариотических клетках, таких, как гепатоциты, нервные клетки, фибробласты роговицы. Кроме того, было показано, что алкоголь стимулирует апоптоз тромбоцитов и это приводит к ухудшению гемостаза. Подобные данные показывают возможный патогенез геморрагических симптомов у пациентов с алкогольной интоксикацией. Кроме того, известны литературные экспериментальные данные о влиянии этанола на агрегацию тромбоцитов. Так, при потреблении крысами этанола в течение 21 дня было обнаружено снижение агрегации тромбоцитов [1]. В исследованиях [2] было показано, что снижение уровня холестерина (липопротеинов высокой плотности) может объяснить только 50 % защитного эффекта алкогольных напитков; остальные 50 % могут быть частично связаны с уменьшением активности тромбоцитов. Эта антитромбоцитарная активность вина объясняется как этанолом, так и полифенольными компонентами, которыми богаты красные вина.

Представленные в предшествующей нашей публикации [3] результаты по изучению эффектов КВЧ-излучения на элементы крови человека свидетельствуют о том, что КВЧ-излучение низкой интенсивности в условиях нашего эксперимента способно снизить активность межклеточного взаимодействия. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации – ристомицина, а также в уменьшении скорости агрегации тромбоцитов. Задача данной работы состояла в изучении влияния КВЧ-излучения на агрегационную активность тромбоцитов в присутствии водных растворов этилового спирта.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Повышенная агрегация тромбоцитов лежит в основе патогенеза большого количества заболеваний. Тромбоциты, как известно, являются одними из основных участников сосудистых катастроф при ишемической болезни сердца (ИБС). Однако не всегда удается преодолеть агрегацию тромбоцитов и предотвратить развитие тромботических осложнений с помощью антитромбоцитарных препаратов. Известно, что апоптозу подвергаются не только ядродержащие клетки, но и безъядерные клетки, такие, как эритроциты [4] и тромбоциты [5].

Попыткой преодолеть некоторые нежелательные явления, связанные с активацией тромбоцитов, а также регламентировать участие их в различных патологических состояниях обусловлен поиск иных подходов к проблеме, в том числе и рассмотрение участия в апоптозе этих клеток известных индукторов агрегации: коллагена, арахидоновой кислоты, тромбина, АДФ, ионофора кальция А23187 и др. [6]. Установлен бимодальный характер влияния, в зависимости от величины

концентрации индуктора. При низких концентрациях наблюдается активация тромбоцитов, а при высоких – запускается программа апоптоза (транслокация фосфатидилсерина с внутренней поверхности цитоплазматической мембраны на внешнюю; открытие гигантских митохондриальных пор и выход цит *c*; каскадная активация каспаз и фрагментация клетки для последующей утилизации фагоцитами). При апоптозе прерываются патологические процессы, приводящие к стимуляции тромбообразования. Модулируя с помощью микроволнового излучения активацию тромбоцитов, мы тем самым надеемся осуществлять выбраковку различных субпопуляций тромбоцитов [7].

В данной статье рассматривается только случай низких концентраций индуктора, приводящий к коррекции агрегационной функции тромбоцитов.

Эксперименты проводились *in vitro* на образцах крови, взятых у относительно здоровых доноров в полистирольные вакуумные пробирки с цитратом натрия (IMPROVACUT-ER. Кат. № 455689). Кровь, стабилизированную цитратом натрия, центрифугировали 10 мин при 200g со скоростью 1000 об/мин для получения обогащенной эритроцитами плазмы (ОТП). Далее ОТП отбиралась в чистую пробирку. Оставшуюся плазму повторно центрифугировали в течение 25 мин при 400g со скоростью 2800 об/мин для получения бедной тромбоцитами плазмы. Далее ОТП отбиралась в отдельную чистую пластиковую пробирку. Образцы хранили при +37 °С не более 3 ч.

После выделения ОТП производился подсчет клеток. Проба была объемом 250 мкл. Количество клеток составляло примерно 300 тыс./мл. Затем добавляли индуктор агрегации – водные растворы ристомицина. Конечная концентрация составляла 0,1 мг/мл.

Для исследования влияния КВЧ на агрегацию тромбоцитов использовался метод агрегометрии. Измерения были проведены на четырехканальном приборе AggRam Helena (Великобритания). Кюветы для данного прибора были из силиконизированного стекла, размеры их – 8×60 мм. Температура инкубации составляла (37±1) °С. Длина волны, на которой проводились измерения, 650 нм. Для перемешивания использовались магниты с покрытием, размерами 3,5×4 мм.

Далее регистрировали кинетику агрегации в течение 20 мин. В качестве контроля использовали пробу, которая представляла ОТП с добавлением индуктора. Калибровка прибора осуществлялась с помощью бедной тромбоцитами плазмы. Оценка производилась по изменению светопропускания ОТП при добавлении индуктора агрегации, в нашем случае ристомицина. После добавления индуктора образуются агрегаты тромбоцитов. Параллельно с этим процессом увеличивается светопропускание до достижения плато, что указывает на необратимую агрегацию. Степень агрегации представляет собой разницу между минимальным и максимальным процентами светопропускания. Скорость агрегации оценивалась по тангенсу угла наклона агрегатограммы [4]. Полученные результаты обрабатывались с помощью программ Excel (Microsoft office) и STATISTICA версия 6, StatSoft Corporation (USA). Для анализа различий количественных признаков в трех и более несвязанных группах использовался статистический критерий Краскелла-Уоллиса ANOVA, в двух несвязанных группах применялся критерий Манна-Уитни. Достоверными считались различия при $p < 0,05$.

Генератор на основе диода Ганна с частотой 32,9...39,6 ГГц (длина волны соответственно 9,1...7,6 мм) и мощностью излучения 3...30 мВт использовался в качестве источника микроволнового излучения. Установка микроволнового облучения обеспечивала подведение излучения к исследуемому объекту с помощью волновода сечением 7,2×3,4 мм² с согласующими элементами. Осуществлялся контроль режима бегущей волны, мощности микроволнового излучения и

длины волны излучения. Образцы подвергались микроволновому воздействию в ближнем поле рупорной антенны, расположенной вертикально, и находясь над ней на расстоянии 6 см от открытого конца рупора, т. е. в ближней зоне облучателя. Образцы перемешивали осторожным встряхиванием каждые 5 мин. Температуру в образцах измеряли с использованием волоконно-оптического микротермодетектора МТ-4МО (Россия) с точностью 0,05 °С.

Оценка межклеточного взаимодействия производилась по изменению светопропускания обогащенной тромбоцитами плазмы при добавлении индуктора агрегации, в нашем случае ристомидина. После добавления индуктора образуются агрегаты тромбоцитов, в результате этого процесса увеличивается светопропускание ОТП до достижения плато, что указывает на необратимую агрегацию. В ходе активации тромбоцитов происходит изменение структуры плазматической мембраны, осуществляется активное перераспределение и движение ионов через мембрану, наблюдается гидролиз инозитольных фосфолипидов, что приводит к присоединению или отсоединению от биомембраны различных белков. Также происходит высвобождение из тромбоцитов и окисление арахидоновой кислоты и изменение метаболизма циклических нуклеотидов.

На рис. 1, 2 представлены результаты, показывающие влияние КВЧ в присутствии этанола на степень агрегации и скорость агрегации тромбоцитов. Данные были получены при обработке агрегатограмм здоровых доноров. Как видно, добавление 1 мкл этанола вызывало незначительное повышение степени агрегации тромбоцитов, что возможно обусловлено образованием гидроксиэтильных радикалов, которые являются дополнительными модуляторами тромбоцитарной активности [8, 9].

Рис. 1. Влияние КВЧ на степень агрегации тромбоцитов в присутствии этанола: 1 – ОТП + КВЧ-облучение; 2 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 1 мкл; 3 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 2,5 мкл; 4 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 10 мкл; 5 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 15 мкл

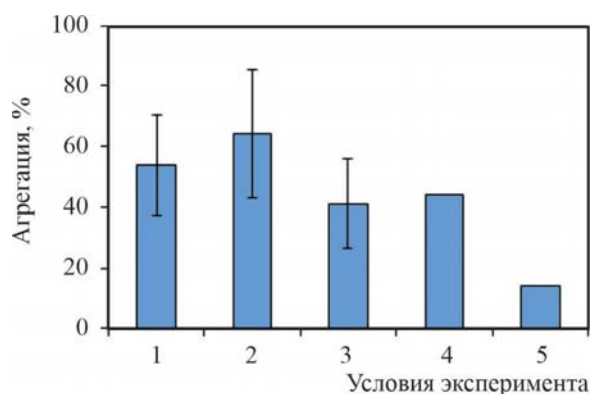
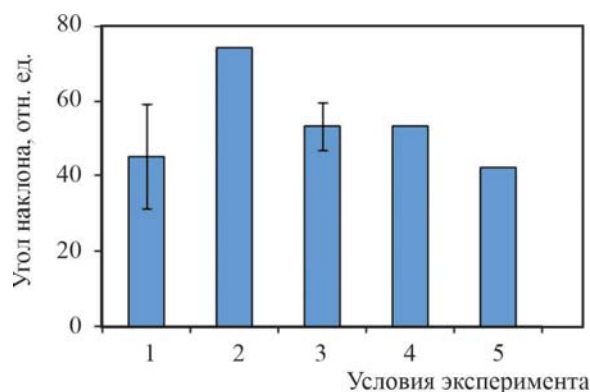


Рис. 2. Влияние КВЧ на скорость агрегации тромбоцитов в присутствии этанола: 1 – ОТП + КВЧ-облучение; 2 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 1 мкл; 3 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 2,5 мкл; 4 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 10 мкл; 5 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 15 мкл



На основании результатов недавних исследований можно предположить, что активированные тромбоциты образуют две субпопуляции, одна из которых способна эффективно агрегировать, а другая осуществляет экстернализацию фосфатидилсерина на внешней стороне мембраны и таким образом ускоряет ход мембранно-зависимых реакций свертывания крови. При этом стимулируются реакции активации тромбоцитов и увеличения концентрации кальция в его цитоплазме. В дальнейшем происходит аккумуляция кальция в митохондриях до «критического уровня», что является пусковым моментом апоптоза в тромбоцитах. Запускается процесс «митохондриального некроза» тромбоцитов, который сопровождается активным выходом кальция и свободных радикалов из митохондрий, а также деградацией и разрушением цитоскелета, что приводит к сильному увеличению размера тромбоцитов [10, 11]. В работе [12] было показано, что в активированных тромбоцитах повышается синтез активных форм кислорода. Этанол индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов, приводит к снижению количества циркулирующих тромбоцитов. Он вызывает деполяризацию митохондриального внутреннего трансмембранного потенциала, активацию Вах, подавление Bcl-2 и активацию каспазы-3, блокирует поверхностную экспрессию связывания Р-селектина или РАС-1. Эта последовательность реакций приводит к гибели значительного количества тромбоцитов, участвующих в агрегации, и, следовательно, к снижению регистрируемого уровня агрегации и скорости ее нарастания в процессе эксперимента.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в результате выполнения данной экспериментальной работы было установлено, что КВЧ-облучение низкой интенсивности в длинноволновой области снижало уровень агрегации тромбоцитов. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации – ристомидина, а также в уменьшении угла наклона агрегатограммы (скорости агрегации тромбоцитов). Добавление в среду этанола способствовало дальнейшему снижению уровня агрегации и угла наклона агрегатограммы в зависимости от количества этанола, добавленного в среду инкубации. Предложен механизм наблюдаемого эффекта, связанный с тем, что этанол индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов и приводит к снижению количества циркулирующих тромбоцитов. КВЧ-излучение за счет влияния на водную среду и структуру мембран тромбоцитов ускоряет этот процесс [13]. Результаты работы открывают перспективы применения КВЧ-излучения как безопасного фактора воздействия с целью коррекции патологий реологических свойств крови человека, и в частности при алкогольной интоксикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chronic heavy ethanol consumption is associated with decreased platelet aggregation in rats / O. Baysan, K. Kaptan, K. Erinf [et al.] // The Tohoku Journal of Experimental Medicine. – 2005. – No 2. – P. 85 – 90.
2. **Ruf, J. C.** Alcohol, wine and platelet function / J. C. Ruf // Biol. Res. – 2004. – Vol. 37, No 2. – P. 209 – 215.
3. Экспериментальные результаты изучения эффектов КВЧ-излучения на межклеточные взаимодействия в плазме крови человека / К. Д. Казаринов, О. А. Баранова, В. А. Щелконогов, А. В. Чеканов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2 (545). – С. 79 – 86.

4. **Birka, C.** Enhanced susceptibility to erythrocyte «apoptosis» following phosphate / C. Birka, A. P. Lang, S. D. Kempe // *Eur. J. Physiol.* – 2004. – Vol. 448. – P. 471 – 477.
5. Intravenous immunoglobulin inhibits anti-GPIIb-induced platelet apoptosis in a murine model of ITP / V. Leytin, S. Mykhaylov, A. F. Starkey [et al.] // *Br. J. Haematol.* – 2006. – Vol. 133. – P. 78 – 82.
6. Surface expression and functional characterization of alpha-granule factor V in human platelets: effects of ionophore A23187, thrombin, collagen, and convulxin / L. Alberio, O. Safa, K. J. Clemetson [et al.] // *Blood.* – 2000. – Vol. 95. – P. 1694 – 1702.
7. **Березовская, Г. А.** Апоптоз тромбоцитов: причины недостаточной эффективности антитромбоцитарных препаратов / Г. А. Березовская // *Бюллетень СО РАМН.* – 2011. – Т. 32, № 4. – С. 17 – 27.
8. Свободнорадикальное окисление в интактных и активированных тромбоцитах / Е. Н. Ермолаева, Л. В. Кривохижина, С. А. Кантюков, Е. Ф. Сурина-Марышева // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – № 7 – 1. – С. 61 – 65.
9. **Sobotková, A.** Antioxidants change platelet responses to various stimulating events / A. Sobotková, L. Mášová-Chrastinová, J. Suttar // *Free Radic Biol Med.* – 2009. – Vol. 47, No 12. – P. 1707 – 1714.
10. **Терентьева, В. А.** Биофизические механизмы контактной активации свертывания плазмы крови / В. А. Терентьева, А. Н. Свешникова, М. А. Пантелеев // *Биофизика.* – 2017. – Т. 62, № 5. – С. 909 – 919.
11. **Obydennyu, S. I.** Dynamics of calcium spiking, mitochondrial collapse and phosphatidylserine exposure in platelet subpopulations during activation / S. I. Obydennyu, A. N. Sveshnikova, P. M. Ataulakhanov // *Journal of Thrombosis and Haemostasis.* – 2016. – Vol. 14, No 9. – P. 1867 – 1881.
12. **Hartwig, J. H.** The platelet: form and function / J. H. Hartwig // *Seminars in Hematology.* – 2006. – Vol. 43, No 1. – P. 94 – 100. – DOI:10.1053/j.seminhematol.2005.11.004.
13. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2018. – Вып. 2. – С. 62 – 75.

Статья поступила 25 апреля 2022 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 51

СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДРОБЕЙ

Часть 3

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко

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

Для периодической дроби $1/p$ (p – простое число) с четным значением длины периода L , представимой в виде $1/p = 0,(AB)$, получено соотношение между двумя полупериодами: $B + 1 = (p - 1) \cdot (A + 1)$.

КС: простые числа, периодические дроби, длина периода

PROPERTIES OF RECURRENT FRACTIONS

Part 3

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, I. A. Balyko

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

For a recurrent fraction $1/p$ (p is a prime number) with an even value of the period length L , represented as $1/p = 0,(AB)$, a relation $B + 1 = (p - 1) \cdot (A + 1)$ between two half-periods is obtained.

Keywords: prime numbers, recurrent fractions, period length

В предыдущих работах [1–3] мы рассмотрели свойства простых чисел и периодических дробей. В настоящей статье мы продолжим развивать тему и расскажем о полученных нами результатах.

Периодические дроби – результат от деления единицы на простое число p : $1/p = 0,(a_1 a_2 \dots a_L) = 0, a_1 a_2 \dots a_L + 10^{-L}/p$, где $a_1 a_2 \dots a_L$ – период; L – длина периода.

Длина периода L может принимать различные значения. Примерно для половины (48 %) простых чисел $L = p - 1$.

Уникальность периодических дробей, которая привлекает к ним математиков, состоит в том, что для целого ряда больших p значение L может быть небольшим числом, иногда даже однозначным (3, 5, 7, 13 и т. д.). Карл Гаусс, проделав вычисления с 1000 простыми числами, показал, что всегда L кратно $p - 1$.

Позже было доказано, что если L – четное число, то периодическая дробь представима в виде $1/p = 0,(AB)$, где A и B – два полупериода: $A = a_1 a_2 \dots a_{L/2}$ и $B = a_{L/2+1} a_{L/2+2} \dots a_L$, и $A + B = 10^{L/2} - 1 = 99 \dots 99$, где число 9 повторяется $L/2$ раз. Для $p = 7$, $1/p = 0,(142857)$ и $142 + 857 = 999$.

Полное доказательство этой теоремы довольно сложное. Значительно проще оно выглядит для простейшего случая: $L = p - 1$.

Пусть b_m ($m = 1, 2, \dots, L$) – остатки от деления 1 на p . Классическое правило деления (в столбик) представим в виде системы L уравнений, которую для четного L удобно разбить на две подсистемы по $L/2$ уравнений в каждой:

$$\begin{aligned} b_0 &= 1, \\ 10 \cdot b_0 &= p \cdot a_1 + b_1, \\ 10 \cdot b_1 &= p \cdot a_2 + b_2, \end{aligned} \tag{1a}$$

$$\begin{aligned} &\dots\dots\dots \\ 10 \cdot b_{L/2-1} &= p \cdot a_{L/2} + b_{L/2}. \\ \hline 10 \cdot b_{L/2} &= p \cdot a_{L/2+1} + b_{L/2+1}, \\ 10 \cdot b_{L/2+1} &= p \cdot a_{L/2+2} + b_{L/2+2}, \\ &\dots\dots\dots \\ 10 \cdot b_{L-1} &= p \cdot a_L + b_L, \\ b_L &= 1. \end{aligned} \tag{1б}$$

Умножая уравнения (1а) последовательно на убывающие степени $10^{L/2-k}$ ($k = 1, 2, \dots, L/2$), получим

$$\begin{aligned} 10^{L/2} \cdot b_0 &= p \cdot a_1 \cdot 10^{L/2-1} + b_1 \cdot 10^{L/2-1}, \\ 10^{L/2-1} \cdot b_1 &= p \cdot a_2 \cdot 10^{L/2-2} + b_2 \cdot 10^{L/2-2}, \\ &\dots\dots\dots \\ 10^{L/2} \cdot b_{L/2-2} &= p \cdot a_{L/2-1} \cdot 10^1 + b_{L/2-1} \cdot 10^1, \\ 10 \cdot b_{L/2-1} &= p \cdot a_{L/2} \cdot 10^0 + b_{L/2} \cdot 10^0. \end{aligned} \tag{2}$$

При сложении этих уравнений одинаковые составляющие, входящие в правую и левую части, сократятся, и в результате получим одно уравнение:

$$10^{L/2} \cdot b_0 = p \cdot (a_1 \cdot 10^{L/2-1} + a_2 \cdot 10^{L/2-2} + a_3 \cdot 10^{L/2-3} + \dots + a_{L/2}) + b_{L/2}. \tag{3}$$

Выражение в скобках – первый полупериод дроби $1/p$:

$$A = a_1 a_2 a_3 \dots a_{L/2} = a_1 \cdot 10^{L/2-1} + a_2 \cdot 10^{L/2-2} + a_3 \cdot 10^{L/2-3} + \dots + a_{L/2}, \tag{4}$$

поэтому формулу (3) можно переписать в компактном виде

$$10^{L/2} \cdot b_0 = p \cdot A + b_{L/2}. \tag{5}$$

Проделав аналогичные операции с подсистемой (1б), получим второе уравнение:

$$10^{L/2} \cdot b_{L/2} = p \cdot B + b_L. \tag{6}$$

Складывая (5) и (6) и учитывая, что $b_L = b_0 = 1$, приходим к равенству

$$A + B = (10^{L/2} - 1) \cdot (b_{L/2} + 1) / p. \tag{7}$$

Так как при $L = p - 1$ остатки от деления 1 на p будут неповторяющимися числами натурального ряда от 1 до L включительно, то каждый остаток $b_{L/2} < p$.

В формуле (7) сумма $A + B$ – целое число, выражение $10^{L/2} - 1$ – целое число, поэтому отношение $(b_{L/2} + 1)/p$ должно быть также целым числом. Так как знаменатель в этом отношении – простое число, а $b_{L/2} < p$, то единственное значение отношения $(b_{L/2} + 1)/p$ равно 1, то есть $b_{L/2} = p - 1$. Тогда $A + B = 10^{L/2} - 1 = 999\dots 9$, где 9 повторяется $L/2$ раз.

Выражение $A + B = 10^{\frac{L}{2}} - 1$ и формула $B + A \cdot 10^{\frac{L}{2}} = \frac{10^L - 1}{p}$, полученная из определения периодической дроби $1/p = 0,AB + (10^{-L}/p)$, составляют систему двух уравнений, после решения которой получаем

$$A = \frac{10^{\frac{L}{2}} + 1}{p} - 1,$$

$$B = 10^{\frac{L}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{p}\right) - \frac{1}{p}.$$

Исключив из этих уравнений постоянную величину $10^{L/2}$, получим окончательное выражение

$$B + 1 = (A + 1) \cdot (p - 1). \quad (8)$$

Для рассмотренного выше примера: $p = 7, L = 6, A = 142, B = 857$ – формула (8) дает равенство $143 \cdot 6 = 858$.

После рассмотрения простейшего случая, когда L – четное число, исследуем другие возможности, например когда L – нечетное составное число, $L = 15 = 3 \cdot 5$, состоящее в данном примере из произведения трех и пяти частей. Тогда периодическую дробь можно представить в двух разных формах: $\frac{1}{p} = 0, A_1 A_2 A_3 + \frac{10^{-L}}{p}$ и $\frac{1}{p} = 0, A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 + \frac{10^{-L}}{p}$.

Используя метод деления дроби с остатком, покажем, что в первой форме сумма трех частей периода $A_1 + A_2 + A_3 = 10^{L/3} - 1$.

Для первой трети периода имеем

$$\begin{aligned} b_0 &= 1, \\ 10 \cdot b_0 &= p \cdot a_1 + b_1, \\ 10 \cdot b_1 &= p \cdot a_2 + b_2, \\ &\dots\dots\dots \\ 10 \cdot b_{L/3-1} &= p \cdot a_{L/3} + b_{L/3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Умножая уравнения (9) на степени $10^{L/3-k}$ ($k = 1, 2 \dots L/3$), получим систему уравнений, при сложении которой одинаковые составляющие сократятся; в результате имеем

$$10^{L/3} \cdot b_0 = p \cdot (a_1 \cdot 10^{L/3-1} + a_2 \cdot 10^{L/3-2} + a_3 \cdot 10^{L/3-3} + \dots a_{L/3}) + b_{L/3}. \quad (10)$$

Выражение в скобках A_1 – первая часть периодической дроби. Формулу (9) запишем в сжатом виде: $10^{L/3} \cdot b_0 = p \cdot A_1 + b_{L/3}$. Проведем аналогичные операции с другими частями периода дроби, получим $10^{L/3} \cdot b_{L/3} = p \cdot A_2 + b_{2L/3}$ и $10^{L/3} \cdot b_{2L/3} = p \cdot A_3 + b_L$. Сложение полученных трех уравнений дает

$$10^{L/3} (b_0 + b_{L/3} + b_{2L/3}) = p(A_1 + A_2 + A_3) + (b_0 + b_{L/3} + b_{2L/3}). \quad (11)$$

Отсюда $A_1 + A_2 + A_3 = (10^{L/3} - 1) (b_0 + b_{L/3} + b_{2L/3}) / p$. Поскольку, как указывалось выше, сумма $b_0 + b_{L/3} + b_{2L/3} = p$, то получаем окончательно $A_1 + A_2 + A_3 = 10^{L/3} - 1 = 99 \dots 9$, где число 9 повторяется $L/3$ раза.

Таким образом, если L кратно любому числу m , то $\sum_{k=1}^m A_k = 10^{\frac{L}{m}} - 1$.

Если период L – простое число, то в этом случае требуются более сложные исследования. Несмотря на то, что число простых чисел, у которых длина периода L тоже простое число, составляет менее 5 % от общего числа простых чисел, интерес к ним не перестает будоражить умы математиков, поскольку именно в них они стараются найти разгадку уникальности простых чисел в натуральном числовом ряду.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балыко, А. К.** Свойства периодических дробей. Ч. 1 / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3. – С. 108 – 113.
2. **Балыко, А. К.** «Непростые» простые числа / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 1. – С. 53 – 59.
3. **Балыко, А. К.** Свойства периодических дробей. Ч. 2 / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 3. – С. 54 – 59.

Статья поступила 11 апреля 2022 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГРИГОРЬЕВ А. Д. Терагерцовая электроника. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 308 с.

В книге рассматриваются свойства электромагнитных колебаний и волн терагерцового диапазона, особенности их взаимодействия с веществом и причины образования так называемого «терагерцового провала» Изложены принципы действия, элементы теории, конструкции и параметры источников и детекторов терагерцового излучения, основанных как на квантовых эффектах, так и на процессах транспорта носителей заряда в различных средах. Рассматриваются лазеры терагерцового диапазона, источники и детекторы, основанные на фотопроводимости; полупроводниковые, сверхпроводящие и вакуумные источники и детекторы. Подробно описаны проблемы продвижения «классических» микроволновых электровакуумных приборов в терагерцовый диапазон.

Автор надеется, что книга будет полезна разработчикам приборов и аппаратуры терагерцового и микроволнового диапазонов, аспирантам и студентам, изучающим микроволновую электронику, а также ученым и инженерам, использующим терагерцовое излучение в своей деятельности.

ИСТОРИЯ

УДК 9

ЖЕНЩИНЫ-УЧЕНЫЕ «ИСТОКА»

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, Т. А. Балыко

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

WOMEN-SCIENTISTS OF «ISTOK»

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, T. A. Balyko

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

НПП «Исток» гордится своими учеными. Здесь зародились и развились несколько отечественных научных школ, известных во всем мире. Следует отметить, что заметный вклад в развитие отечественной СВЧ-электроники внесли женщины-ученые «Истока». Поэтому научная и производственная деятельность каждой из них заслуживает отдельных слов благодарности.

Ранее мы уже рассказывали о некоторых женщинах-ученых «Истока»: Герое Социалистического Труда Л. А. Парышкуро (2018, вып. 4), кандидате технических наук, лауреате Государственной премии СССР В. В. Бакакиной (2021, вып. 1), ведущем инженере Н. П. Ни (2022, вып. 1), кандидатах технических наук Е. С. Евтифеевой (2020, вып. 3) и Т. Н. Тагер (2020, вып. 1), ведущем инженере З. Д. Ковтуновой (2020, вып. 2), сотрудницах предприятия А. Д. Гавриловой (2020, вып. 2), К. К. Степиной (2020, вып. 2) и Т. А. Донаковой (2020, вып. 3). Продолжим наше повествование.

ВЕРА ИВАНОВНА МНОЯН



В. И. Мноян

11 августа 2018 года исполнилось 100 лет со дня рождения Веры Ивановны Мноян. Для молодого и среднего поколений жителей г. Фрязино фамилия Мноян сегодня ассоциируется прежде всего со всеми уважаемым преподавателем детской музыкальной школы, руководителем детских и взрослых хоров, заслуженным работником культуры России, депутатом Фрязинского городского Совета 1994 – 2001 гг. Ириной Васильевной Мноян, дочерью Веры Ивановны.

А. К. Балыко вспоминает: «Я работал в лаборатории доктора технических наук, лауреата Ленинской премии, профессора А. С. Тагера. Однажды в лабораторию зашла одна из его знакомых. По ее уверенному поведению и уважительному, даже, скорее, дружескому, отношению к ней профессора, можно было сказать, что это не просто его знакомая. Около часа они беседовали на технические темы, а после их расставания Александр Семенович обратился к сотрудникам лаборатории, в основном молодым спе-

циалистам, и сказал, что это была Вера Ивановна Мноян, выдающийся разработчик СВЧ электровакуумных приборов – ламп бегущей волны (ЛБВ), лауреат Ленинской премии. “Придя на предприятие молодым специалистом в начале 50-х годов, – сказал он, – я по ее просьбе выполнил ряд теоретических и экспериментальных работ по улучшению шумовых характеристик ЛБВ и на их основе позднее защитил кандидатскую диссертацию”».

На протяжении всей своей истории славу «Истоку» создавали и создают разработчики и ученые, многие из которых руководят НПК, отделениями, цехами, отделами. Хотя среди сотрудников «Истока» число мужчин и женщин примерно одинаковое, подавляющее большинство руководителей – мужчины, число руководителей-женщин – единицы, но они, скажем прямо, украшают административный состав «Истока». Однако, чтобы стать таким украшением, надо иметь недюжинный талант и превосходить мужчину по научным, производственным и организаторским способностям. Всеми этими достоинствами обладала В. И. Мноян.

Вера Ивановна родилась в семье священника Ивана Константиновича Теплова в селе Серго-Поливаново Пензенской губернии. Окончила в Пензе среднюю школу с золотой медалью и в 1937 г. поступила на физический факультет Ленинградского университета. В 1939 г. она вышла замуж за выпускника Ленинградского института внешней торговли Василия Ананьевича Мноян. Молодая семья переехала в Москву, по месту работы мужа. В апреле 1940 г. родилась дочь Ирина. Через год Вера Ивановна продолжила учебу на физическом факультете Московского государственного университета (МГУ), но война внесла в ее жизнь свои безжалостные коррективы. Семья Мноян вынуждена была эвакуироваться в Пензенскую область. В марте 1942 г. ушел из жизни любимый супруг Веры Ивановны.

Уже после возвращения из эвакуации в Москву В. И. Мноян закончила МГУ и была направлена сначала на работу в московский НИИ-9, а затем в НИИ-20 Министерства вооружения СССР, где под руководством выдающегося советского ученого В. А. Афанасьева был создан первый опытный образец малошумящей ЛБВ. В феврале 1951 года по специальному распоряжению Правительства СССР лаборатория В. А. Афанасьева в полном составе была переведена в НИИ-160. С того времени и до последнего дня жизнь Веры Ивановны была связана с НПП «Исток», в создание славы которого она внесла огромный вклад.

Перед прибывшими на предприятие московскими специалистами была поставлена сложнейшая задача: до конца года разработать уже не опытный, а промышленный образец ЛБВ. Самоотверженная работа коллектива привела к небывалому в истории электроники СВЧ результату – с 1952 года начался серийный выпуск первой отечественной ЛБВ УВ-1. О значении этого достижения говорит тот факт, что только в 1953 г. появилось сообщение о создании в США аналогичной ЛБВ. Выдающаяся работа разработчиков УВ-1, и в их числе В. И. Мноян, была представлена на соискание Сталинской премии, но в связи со смертью вождя присуждение премий с 1955 г. было прекращено.

В середине 50-х годов Правительство СССР ставит перед НИИ-160 еще более масштабную задачу: разработать СВЧ ЭВП различного типа, предназначенные для резкого увеличения дальности действия радиолокационных станций средств ПВО.

О важности задачи говорит тот факт, что к ее решению были привлечены сразу три отдела НИИ, которыми руководили выдающиеся ученые В. А. Афанасьев, А. П. Федосеев и И. Е. Роговин, на их основе в 1955 г. был образован отдел 190 под руководством М. С. Акулина. В 1956 г. после назначения М. С. Акулина главным инженером предприятия отдел 190 возглавила Вера Ивановна Мноян.

Широта и глубина ее познаний, высокая интеллигентность и доброжелательность, уважительное отношение между руководителем и сотрудниками позволили Вере Ивановне выполнить исключительно важную миссию, которая, возможно, и была посильна только ей – создать уникальный творческий коллектив из разработчиков, конструкторов, технологов, техников, слесарей, токарей, монтажниц, откатчиц, рабочих.

К впечатляющим достижениям последующих двух десятилетий относится разработка коллектива отдела 190 целого ряда широкополосных ЛБВ для различных диапазонов СВЧ: маломощных и сверхмаломощных, малой и большой мощности. Созданные под руководством В. И. Мнойн десятки типов ЛБВ нашли широкое применение в системах ПВО С-75, С-125 и С-200, судовых РЛС, спутниках связи, в народном хозяйстве.

Результаты этой плодотворной работы были высоко оценены руководством страны. Вера Ивановна была награждена орденом Трудового Красного Знамени, медалью «За трудовую доблесть», другими медалями и наградами. В 1966 году сотрудникам предприятия В. А. Афанасьеву, В. И. Мнойн, Ю. П. Мякинкову, К. Г. Ноздриной, С. П. Кантюку, В. Я. Эфросу, А. И. Салтыкову, Н. И. Воронкову и разработчику ЛБВ из НИИ-108 Л. Н. Лошакову была присуждена Ленинская премия.

Вера Ивановна была не только выдающимся начальником отдела и главным конструктором многочисленных разработок, но и активным участником освоения разработанных ЛБВ на опытном заводе «Рений», на серийном заводе «Знамя» в Полтаве. Она была председателем секции КНТС МЭП СССР по усилительным ЛБВ и ЛОВ, ее с почетом и уважением принимали на всех научно-производственных форумах. Доброжелательное отношение ее к собеседникам, сердечная отзывчивость к просьбам сотрудников предприятия сыскали ей славу истинно интеллигентной женщины.

В 1974 году после очередной реорганизации на «Истоке», в том числе создания на базе отдела 190 научно-производственного комплекса НПК-8, и достижения ею пенсионного возраста Вера Ивановна оставляет любимый отдел, которому отдала много сил и энергии, знаний и опыта, и становится во главе отраслевой лаборатории электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств, которую возглавляла до 1988 года. Благодаря ее активной творческой деятельности, работа по проблеме ЭМС вышла на качественно новый высокий уровень.

В течение всей производственной деятельности Вера Ивановна вела большую научную работу, была членом редакционной коллегии журнала «Электроника СВЧ». Она автор 3 обзоров, 15 статей, 5 изобретений, многочисленных отчетов по НИОКР и нормативных документов.

В. И. Мнойн ушла из жизни 26 июня 1999 года.

Память о Вере Ивановне навсегда слилась с созданными ею многочисленными приборами и изделиями электронной техники СВЧ, на протяжении десятилетий укреплявшими силу и мощь нашей отчизны.

О светлом облике выдающегося разработчика электронных приборов СВЧ, начальника крупного подразделения «Истока», талантливого организатора науки и производства Веры Ивановны Мнойн напоминают нам ее светлый ум, глубокая любовь к своей профессии, искренняя доброжелательность, всеобъемлющее уважение ко всем сотрудникам «Истока»: от генерального директора и ученых с мировым именем до слесаря-«мастера золотые руки» и впервые переступивших порог предприятия выпускников фрязинских школ.

ЛЮБОВЬ МОИСЕЕВНА РЕШЕТИНА

подавляющее большинство руководителей подразделений «Истока» были мужчины, женщин-руководителей можно посчитать по пальцам: Л. А. Парышкуро, В. И. Мнойн, К. Г. Ноздрин, В. В. Бакакина, И. П. Максимова, Т. Б. Фогельсон.

В этом же ряду, без сомнения, находится Л. М. Решетина. Более тридцати лет Любовь Моисеевна возглавляла несколько цехов опытного завода «Рений», неизменно добиваясь выполнения планов и высокой стабильности в работе, а это, согласитесь, говорит о многом. Её трудовые заслуги были отмечены высокими правительственными наградами.

Любовь Моисеевна Решетина (Перельштейн) родилась в 1926 году. В 1949 году она окончила ЛЭТИ им. Ульянова (Ленина) по специальности «инженер-вакуумщик». Самостоятельная производственная деятельность молодого специалиста Л. М. Решетиной началась в НИИ-160 в 1950 году. Но уже в январе 1953-го года, в разгар борьбы против врачей-вредителей



Л. М. Решетина

(«разгром вакуумщиков под Москвой»), которая докатилась и до Фрязино, Любовь Моисеевну в числе 26 специалистов-евреев вызвали в дирекцию предприятия и предложили* поехать работать на родственное предприятие в Саратов, но затем разрешили распределиться «вольно». Она выбрала Рязань, но там ее взяли отказались. Тогда Л. М. Решетина поехала в Москву, в Министерство промышленности средств связи. Там она повстречала своего бывшего начальника цеха, и тот порекомендовал расстроенную молодую специалистку директору завода электровакуумных приборов в г. Запрудня Московской области. Однако и на этом заводе Л. М. Решетиной удалось проработать совсем недолго. Через месяц после смерти «вождя народов» на завод пришел вызов из НИИ-160, в котором Любви Моисеевне в числе других изгнанных сотрудников было разрешено возвратиться на родное предприятие.

Вернувшись на «Исток», она сначала продолжила работу в цехе 35, но вскоре была переведена в отдел главного технолога (ОГТ) куратором цеха 35. Считалось, что это – повышение. В эти годы на предприятии шло становление нового отношения к технологии и технологической документации. Все новые технологические изменения в изготовлении приборов проходили через ОГТ. Кураторы цехов тесно взаимодействовали с разработчиками и конструкторами приборов. Л. М. Решетина считала эту работу важной и ответственной. Вместе с Любовью Моисеевной в ОГТ трудились замечательные специалисты: химик-технолог М. Л. Усвятцев, технолог В. Я. Темнов, специалист по литью и штамповке Н. А. Соколов, механики С. А. Чуприков, В. Н. Лосиков, А. С. Мурахвер и многие другие.

В 1954 году по распоряжению Правительства СССР в Китайскую Народную Республику для оказания помощи в строительстве электролампового завода в Пекине была послана группа высококлассных специалистов из НИИ-160, в том числе и главный технолог опытного завода Б. П. Никонов. На его место был назначен руководитель ОГТ С. Ю. Гапонов, который, в свою очередь, пригласил Л. М. Решетину стать его заместителем и одновременно возглавить технологическое бюро завода. Любовь Моисеевна согласилась, хотя и с некоторым страхом, ведь тогда ей всего-то было 28 лет.

*Из воспоминаний Т. Б. Фогельсон.

Работа оказалась очень интересной. Во-первых, значительно расширился круг задач, которые приходилось ей решать, ближе познакомилась с технологами различных направлений, ведущими разработчиками, главными конструкторами предприятия. Во-вторых, продолжилось накопление знаний и опыта. Ей посчастливилось работать непосредственно с главным инженером завода, участником Великой Отечественной войны Александром Яковлевичем Астафьевым. Он научил ее быть требовательной не только к сотрудникам, но и прежде всего к самой себе. Воспитал в молодом руководителе любовь и уважение к технологии производства электровакуумных приборов. Указал на то значимое место, которое занимает технология в производстве этих приборов. При А. Я. Астафьеве началось кардинальное изменение на заводе в части строгого соблюдения технологии и технологических процессов, повышения качества технологической документации. Активное участие в развитии «астафьевских» методов в технологии сыграла и Любовь Моисеевна.

В 1960 году директор предприятия М. М. Федоров предложил Л. М. Решетиной вернуться в цех 35 старшим технологом. Это было в некотором смысле понижением по службе, но тем не менее Любовь Моисеевна согласилась с предложением директора. Цехом 35 в это время руководил кандидат технических наук Владислав Павлович Беляев, но вскоре, после назначения в 1962 году директором предприятия Сергея Ивановича Реброва, с которым В. П. Беляев был в очень хороших отношениях, его назначили руководителем НПК-3, а начальником цеха 35 предложили стать Любови Моисеевне. Определяющую роль, по-видимому, сыграло и то обстоятельство, что цех 35 регулярно выполнял план, изделия шли хорошо, без серьезных срывов. Четырнадцать лет Л. М. Решетина руководила этим цехом. Некоторое время цех 35 выпускал традиционные электровакуумные лампы: тиратроны и другие приборы, в том числе и приборы, разработанные под руководством выдающегося разработчика предприятия Я. А. Юхвидина. С 1965 года цех стал изготавливать еще и лазеры. Это было трудное, но одновременно и интересное предложение. Технология промышленного выпуска лазеров была проработана недостаточно хорошо, цеху нужны были свежие силы. Именно в это время в цех пришли уникальные молодые специалисты, среди которых был и Евгений Николаевич Покровский. Впоследствии он стал старшим технологом, а затем возглавил цех 35. В этой должности ярко проявился его талант организатора производства. В короткий срок под его руководством в цехе удалось освоить выпуск первых отечественных газовых лазеров и атомно-лучевых трубок на парах цезия для создаваемой тогда системы ГЛОНАСС. Впоследствии Е. Н. Покровский на протяжении многих лет был заместителем генерального директора НПП «Исток» по производству.

Цех 35, возглавляемый Л. М. Решетиной, всегда был в числе передовых. И в 1970 году начальник цеха Л. М. Решетина была награждена медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина», а в 1971 году – орденом Октябрьской Революции.

В середине 70-х годов начал давать сбои цех 41. Цех был очень сложный, он выпускал и традиционные ЭВП СВЧ, и новые твердотельные изделия, разрабатываемые в подразделениях предприятия. Дирекция приняла решение назначить начальником цеха 41 Л. М. Решетину. В сравнительно короткие сроки цеху удалось добиться стабильности в работе. Эта стабильность не нарушилась даже тогда, когда в цех были переданы совершенно новые для завода изделия –

усилители «Одиссея» на полевых транзисторах с барьером Шоттки, разработанные в лаборатории кандидата технических наук Георгия Васильевича Ровенского. Твердотельная технология потребовала дополнительных усилий со стороны всех сотрудников цеха 41, включая и начальника цеха. Но и эта технология была успешно освоена, и важные для обороны страны шесть типоминиалов приборов «Одиссея» стали выпускаться в требуемых количествах и в заданные сроки. Для дальнейшего серийного выпуска эти приборы передавались на другие предприятия отрасли. Важно отметить, что этап передачи производства твердотельных приборов на серийные заводы проходил практически безболезненно. Сказывалась заложенная начальником цеха 41 высокая требовательность сотрудников цеха к отработке технологии и технологической документации.

Любовь Моисеевна подняла авторитет цеха на небывалую для него высоту. С начала 70-х годов на протяжении трех пятилеток цех 41 неизменно становился победителем социалистического соревнования. Л. М. Решетина дважды заносилась на аллею Почета предприятия, она была награждена знаком «Почетный работник электронной промышленности».

Л. М. Решетина с большим вниманием и заботой относилась к молодежи. Несмотря на огромную и напряженную работу, Любовь Моисеевна никогда не отказывалась участвовать в качестве члена жюри в конкурсах и выставках молодых ученых и специалистов предприятия, видя в них источник свежей силы, питающей НПП «Исток». Ее замечания и советы были, как правило, значимы и высоко ценились.

Любовь Моисеевна проработала начальником цеха 41 вплоть до ухода в 1993 году на заслуженный отдых. Более тридцати лет она руководила коллективами цехов 35 и 41, добиваясь выполнения планов и высокой стабильности в работе. На предприятии говорили, что Л. М. Решетина была способна «поднять с колен» любой цех. Наверное, это и есть самая главная похвала красивой и умной женщине, посвятившей себя производству электронных приборов. Любовь Моисеевна Решетина ушла из жизни в 2008 году, в возрасте 82 лет...

НИНА ГРИГОРЬЕВНА ОТМАХОВА

Славу и авторитет «Истоку» принесли многочисленные СВЧ-приборы, разработанные выдающимися сотрудниками предприятия. К их числу, несомненно, относится и Нина Григорьевна Отмахова.

Н. Г. Отмахова родилась 22 июля 1929 г. в селе Слобода Омской области. В школьные годы она из всех предметов выделяла химию, причем с годами интерес к этой науке только усиливался. Мечта стать известным на всю страну химиком стала реализовываться, когда она в 1947 году поступила на химический факультет Казанского государственного университета им. С. М. Кирова. Выбор высшего учебного заведения был не случаен. Дело в том, что в годы Великой Отечественной войны в этом университете работали многие именитые профессора из Москвы и Ленинграда. Некоторые из них продолжили преподавательскую деятельность в Казани и после войны.



Н. Г. Отмахова

В 1952 году, закончив Казанский университет с отличием, Н. Г. Отмахова была направлена на работу в НИИ-160 во Фрязино. Свою трудовую деятельность Нина Григорьевна начала в отделе главного технолога. Молодой инженер-химик быстро решала новые для нее задачи, и уже через три месяца ее перевели старшим технологом в цех 38 с удвоенным повышением в окладе. Несмотря на интересную и важную работу, Н. Г. Отмахову больше привлекала научная деятельность, поэтому спустя некоторое время она перешла в научный отдел предприятия, где занималась разработкой новых технологических процессов изготовления изделий электронной техники, в частности новыми разновидностями пайки и сварки. В 1962 г. Нина Григорьевна была назначена начальником лаборатории, пройдя путь от инженера до руководителя за 10 неполных лет.

В 1970 году Н. Г. Отмахова успешно защитила кандидатскую диссертацию и одна из первых женщин вошла в элиту ученых «Истока». Она автор более 100 научных работ и публикаций, имеет 20 изобретений. Предложенные Ниной Григорьевной технологические методы широко использовались не только на родном предприятии, но и на других предприятиях страны. В 80-е годы она руководила секцией пайки Координационного совета Министерства электронной промышленности СССР, входила в состав аналогичного Совета при «Институте электросварки им. Е. О. Патона» Академии наук Украинской ССР. Под ее руководством разрабатывались многие комплексные программы по сборке изделий СВЧ-техники.

На протяжении нескольких десятилетий Н. Г. Отмахова активно передавала свой богатый опыт молодежи. Она преподавала в Московском энергетическом институте, руководила дипломными работами студентов втуза, а впоследствии и филиала МИРЭА, руководила аспирантами, читала лекции в отделе подготовки кадров предприятия.

За большой вклад в развитие технологии СВЧ-приборов Нина Григорьевна награждена медалями «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина» и «Ветеран труда», многочисленными грамотами. Ее имя занесено в книгу «Летопись трудовой славы НПП «Исток».

В 1991 году Н. Г. Отмахова ушла на заслуженный отдых. Сотрудники предприятия и НПК-7 с огромным уважением относились к ней, отмечая ее принципиальность и стремление прийти на помощь в трудную минуту. Не забывают они Нину Григорьевну и сегодня, поздравляя с днем рождения и красными датами календаря.

ВЕРА АЛЕКСЕЕВНА МОРОЗОВА

Вера Алексеевна Морозова, ведущий инженер теоретического отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина», родилась в семье рабочих. Мать ее еще до замужества девять лет проработала на Московском автомобильном заводе им. Сталина, затем заболела и вернулась на родину, в г. Кузнецк Пензенской области. Вышла замуж. В 1940 году родила дочь. Маленькой Вере практически не довелось насладиться радостью общения с отцом – в 1942 году он погиб на фронтах Великой Отечественной войны. А через год девочка сильно переболела инфекционной болезнью, после чего у нее существенно упало зрение. После окончания семилетки подала документы в Пензенский техникум, но не прошла по здоровью – из-за зрения. Продолжила учиться в школе, которую закончила с золотой медалью. В старших классах полюбила математику. К счастью, в Саратовский университет принимали и с пониженным зрением. Послала документы на механико-математический факультет по почте – поехать в областной центр она не смогла, у матери не хватило на это денег. И только когда пришел положительный ответ, поехала в Саратов.

В университете училась хорошо. Много читала художественной литературы. Любила ходить в театры, на концерты в филармонию. Здесь же, в университете, познакомилась с однокурсником В. С. Морозовым. В 1961 году, за год до окончания университета, они сыграли свадьбу. В трудолюбивой, умной женщине Виктор Степанович нашел заботливую супругу и верную помощницу, прожил с ней в любви и согласии 56 лет. Во Фрязино Морозовы попали, можно сказать, по воле случая. Сотрудники теоретического отдела «Истока» Р. А. Силин и А. Н. Захарова, приехавшие в Саратовский университет за молодыми специалистами, остановили свой выбор на чете Морозовых. Хотя в дни приезда они с Морозовыми так и не встретились, но уж больно хорошо отзывались о них преподаватели университета.



В. А. Морозова

В лаборатории А. Н. Захаровой Вера Алексеевна и начала свою трудовую деятельность. Первые задачи молодого специалиста-математика касались в основном создания программ для расчета СВЧ-устройств на ЭВМ «Урал». С годами работы прибавлялось. Разработчики ощутили преимущества машинных методов расчета и проектирования приборов различного назначения. Особенно интересно Вере Алексеевне было работать над задачами, поступающими непосредственно от разработчиков СВЧ-приборов, и со специалистами, занимающимися этими проблемами, – Ф. М. Шапиро, В. В. Лисс, В. И. Бацев и другие. Вместе с супругом ею были созданы мощные комплексы программ для выделения информативных признаков объектов, кодирования статистической информации и построения оптимальных координатных систем для решения задач классификации объектов. С виду отвлеченные математические понятия помогли существенно упростить процедуру отбора приборов, повысив тем самым процент выхода годных изделий.

Позднее развитые ими информативные методы классификации объектов электронной техники, как ни странно, нашли свое применение в медицине и использовались для диагностики злокачественных новообразований пищевода и желудка в Московском институте гастроэнтерологии. Одним из постоянных пользователей результатами расчетов, выполненных В. А. Морозовой, был доктор медицинских наук Семен Исаакович Рапопорт, ставший позднее главным гастроэнтерологом страны, лечащим Президента России Б. Н. Ельцина. В Институте психиатрии им. Сербского эти же методы применил для определения сроков реабилитации психически больных людей известный профессор В. М. Шумаков. Многочисленные работы, выполненные Верой Алексеевной совместно с супругом кандидатом технических наук В. С. Морозовым и начальником отдела 110 доктором технических наук В. П. Сазоновым, были опубликованы в медицинских журналах страны.

Большой объем работ выполнен В. А. Морозовой под руководством начальника лаборатории доктора технических наук А. С. Победоносцева и кандидата технических наук В. Г. Бороденко. Эти исследования касались в основном методов определения оптимальных параметров ЭВП СВЧ, разрабатываемых и выпускаемых на предприятии.

Параллельно с основной работой Вера Алексеевна успешно занималась проблемами автоматического раскроя материалов при изготовлении деталей приборов. В. С. Морозов привлек ее к поиску необходимого математического обеспечения, которое позволяло бы переводить графическую информацию в машинные коды. Досконально изучив графическую систему

AutoCAD, Вера Алексеевна взвалила на себя весь труд по вводу в ЭВМ графической информации. Каждое изделие, изготовленное в отделении 10 на установке раскроя материалов, прошло через руки В. А. Морозовой.

Несмотря на колоссальную загруженность на производстве, нелегкий труд по уходу за незрячим супругом, Вера Алексеевна очень много внимания уделяла дочери. Вместе с ней они побывали во всех театрах столицы, часто посещали консерваторию.

Дочь, на радость родителям, росла умницей, после окончания с золотой медалью школы поступила в 1-й Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова и блестяще закончила его с красным дипломом. Длительное время она работала главным аллергологом Московской области, заведовала кабинетом в консультативной поликлинике при МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского. «Жизнь, – говорила Вера Алексеевна, – прошла как-то очень быстро. Вся она была в работах и заботах».

Может быть, в том и состоит счастье женщины, что в каждый момент жизни она ощущала себя необходимой дочери, супругу, родным, коллегам, просто окружающим, дарила им свою любовь и в благодарность получала тот целительный эликсир, который помогает ей долго жить.

СОФИЯ АЛЕКСЕЕВНА ДУБРОВИНА

София Алексеевна много лет проработала в НПП «Исток». Общий трудовой стаж ее составляет более 60 лет. Последняя ее должность перед выходом на заслуженный отдых – главный эксперт по сертификации систем менеджмента, руководитель службы контроля качества и сертификации гражданского и военного регистров в НПП «Циклон – Тест».

С. А. Дубровина родилась 14 января 1936 года в городе Ростове-на-Дону в семье подполковника, руководителя областного управления МВД по строительству. Ее мама, имея юридическое образование, в годы войны работала хирургической медсестрой, после войны – юристом в Военном трибунале области. Единственная и неповторимая их дочь уже в пятилетнем возрасте пережила многое: расстрел беззащитных мирных беженцев немецкими самолетами, опасный переход через Каспий в г. Красноводск, последующую эвакуацию в Казахстан и Киргизию, а через два года обратный переезд сначала в Пятигорск, а затем в Ростов-на-Дону. В 1944 г., вернувшись в родной город, София сразу проявила себя отличной ученицей, перспективной спортсменкой и активным организатором школьных дел. В пятом классе выполнила норматив первого разряда по спортивной гимнастике (и сегодня видны ее заложенные в детстве физические данные). С восьмого класса начала посещать математический кружок при Ростовском государственном университете, в девятом классе познакомилась с математическим анализом Исаака Ньютона и петербургского академика Леонарда Эйлера, геометрией русского гения Николая Ивановича Лобачевского.

После окончания школы поступила в Таганрогский радиотехнический институт. В 1958 году окончила его по редкой в те годы специальности «Математические машины и счетно-решающие приборы и устройства» и была распределена на одно из предприятий Саратовской области, где



С. А. Дубровина

впоследствии получила разрешение на переезд в родной город. В 1959 году поступила на работу в Ростовское высшее артиллерийское училище. Замужество и рождение сына внесло в активную трудовую и научную деятельность Софьи Алексеевны некоторую коррекцию. Ее муж Г. И. Дубровин работал на авиазаводе с авиаконструктором А. Н. Туполевым, занимался проблемами ночной посадки самолетов, позднее стал лауреатом Государственной премии СССР.

В сентябре 1960 года София Алексеевна пришла на работу в НИИ п/я 17, в теоретический отдел профессора В. С. Лукошкова. В лаборатории И. М. Блейваса ей поручили разработку физических и математических моделей электровакуумных приборов СВЧ для бурно развивающихся автоматизированных систем проектирования. Моделирование тогда проводилось с помощью электролитических ванн, затем стал использоваться цифровой дифференциальный анализатор, в разработке которого София Алексеевна принимала самое активное участие. В 1965 году передатчик СВЧ, созданный А. С. Тагером и В. В. Пуховым, демонстрировался С. А. Дубровиной на выставке достижений электронной промышленности, а в 1970 году передатчик этого же типа, существенно усовершенствованный ею совместно с С. А. Перегоновым, был показан министру электронной промышленности СССР А. И. Шокину. Помимо этого, София Алексеевна несколько раз встречалась с Александром Ивановичем на различных выставках, коллегиях министерства по качеству военной и гражданской продукции и во время посещения министром НПП «Исток». Начальник лаборатории И. М. Блейвас в те годы активно пропагандировал в рамках министерства замену аналоговых вычислительных устройств на цифровые ЭВМ типа М-220 и «БЭСМ-6», а С. А. Дубровина была ответственным разработчиком прикладного обеспечения для первого отечественного комплекса БЭСМ.

В 1967 году София Алексеевна второй раз вышла замуж за лауреата Ленинской премии, кандидата технических наук В. Ф. Коваленко (годы жизни 1907 – 1989). Совместная жизнь с Вадимом Федоровичем была насыщена не только научной и производственной деятельностью, но и регулярными посещениями театров, концертных залов, выставок.

За полтора десятилетия работы в НПП «Исток» С. А. Дубровина получила 4 авторских свидетельства на изобретения, опубликовала 10 научных работ и 7 научно-технических отчетов, окончила заочную аспирантуру под научным руководством начальника Главного научно-технического управления МЭП СССР В. М. Пролейко.

Начатая ею научная работа некоторое время продолжалась и в НПП «Циклон – Тест», куда С. А. Дубровина по рекомендации В. М. Пролейко перевелась в 1976 году, но затем направление ее производственной деятельности коренным образом изменилось. Она была избрана по конкурсу старшим научным сотрудником и возглавила сначала отдел стандартизации, а затем отдел технической документации НПП «Циклон – Тест». В 1996 году ее назначили главным специалистом, а чуть позже руководителем службы контроля качества и сертификации. Сертификация – это проверка соответствия систем оборудования и услуг требованиям нормативных документов. Сертификации подлежит промышленная продукция, бытовая радио- и электронная аппаратура, оборудование информационных технологий, ремонт и техническое обслуживание, услуги и др. Для получения сертификата каждый из перечисленных компонентов должен пройти строгую государственную проверку, поэтому сотрудникам сертификационных служб приходилось ездить по всей стране, чтобы удостовериться в соответствии продукции и услуг нормативным документам. С. А. Дубровина побывала практически во всех бывших союзных республиках, поскольку исполняла должность председателя комиссии Межрегионального объединения по сертификации.

В последние годы во время отпусков София Алексеевна путешествовала по миру. Она побывала во многих странах Северной и Южной Америки; посетила чилийский остров Пасхи в Тихом океане; в Египте поднималась вверх по Нилу от Асуанской плотины до самого истока великой реки, знакомясь с удивительной культурой африканских стран; на мысе Доброй Надежды с восторгом следила за слиянием Тихого и Атлантического океанов; наслаждалась прохладой брызг водопада Виктория в Южной Африке.

В 2019 года Софию Алексеевну, оставившую свою производственную деятельность, как специалиста по сертификации привлекли к проблеме, связанной с возведением во дворе дома по улице Московской антенны для мобильной связи. С. А. Дубровина выявила ряд расхождений изготовленной аппаратуры с нормативной документацией и представила их в администрацию города, и ошибка была исправлена.

С. А. Дубровина – участник Международной конференции по сертификации, проходившей в 2016 г. на острове Русский во Владивостоке.

София Алексеевна имеет 30 научных трудов. При ее непосредственном участии были сертифицированы 35 предприятий Щелковского района и Московской области и выданы более 150 сертификатов. За свою многолетнюю безупречную трудовую деятельность С. А. Дубровина награждена медалью «В память 850-летия Москвы» и медалью «Ветеран труда».

НАТАЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА АБАКУМОВА



Н. В. Абакумова

В сентябре 2022 года исполняется 60 лет со дня создания высшего технического учебного заведения (ВТУЗ) на территории «Истока» и 30 лет, как ВТУЗ стал филиалом Московского института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА). Большая роль в становлении института принадлежит генеральному директору «Истока» С. И. Реброву, который долгое время руководил кафедрой в институте. За 60 лет здесь было подготовлено около 4000 специалистов. Многие из них стали известными отечественными учеными, разработчиками приборов СВЧ, технологами, конструкторами. Начавшиеся в стране в начале 90-х годов прошлого столетия «реформы» негативно сказались на многолетнем благополучии филиала МИРЭА. Директор филиала кандидат физико-математических наук Юрий Михайлович Ермолаев в эти годы предпринимал шаги по стабилизации деятельности филиала. Однако кардинальные меры по сохранению филиала МИРЭА были сделаны Н. В. Абакумовой.

Наталья Владимировна Абакумова родилась 14 февраля 1947 года в г. Коврове.

Ее родители были инженерами-механиками. По-видимому, это и повлияло на выбор её будущей профессии. Закончив с золотой медалью среднюю школу, она в 1965 г. поступила в МВТУ им. Н. Э. Баумана. Окончив его в 1970 г. с красным дипломом, Н. В. Абакумова была распределена в г. Фрязино, в НИИ электронной техники (в настоящее время АО «НПП «Исток» им. Шокина»). Годы работы в НПК-6 и жажда новых знаний подвели ее к необходимости продолжения научно-образовательного образования, и она поступила в аспирантуру родного ей МВТУ им. Н. Э. Баумана. Опытные

руководители и постоянный рост квалификации привели Наталию Владимировну к успешной защите диссертации. Получив научную степень кандидата технических наук, Н. В. Абакумова, возвратившись на родное предприятие, начинает работать в филиале МИРЭА при НПП «Исток» сначала ассистентом, а затем доцентом по специальности теоретическая механика и сопротивление материалов. С середины 80-х годов она исполняла обязанности заместителя директора филиала по учебно-воспитательной работе, а в 1999 году после окончания курсов повышения квалификации по специальности «Электронные и полупроводниковые приборы СВЧ» (руководитель к.т.н. А. К. Балыко) возглавила филиал МИРЭА. В непростые годы перестройки благодаря деятельному участию Наталии Владимировны и поддержке со стороны генерального директора предприятия А. Н. Королева филиал МИРЭА получил новый мощный импульс развития. Было введено дневное обучение студентов с освобождением от военной службы; реорганизованы специальности обучения студентов, в том числе появилась специальность «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»; решены актуальные на тот период проблемы с арендой помещений; в дальнейшем при активном участии генерального директора АО «НПП «Исток» им. Шокина» А. А. Борисова был выполнен капитальный ремонт всех относящихся к филиалу помещений, расположенных на территории базового предприятия; обновлен библиотечный книжный фонд учебной литературы; широко стала освещаться в СМИ работа филиала – статьи о филиале РТУ МИРЭА и его преподавателях регулярно начали публиковаться на страницах городской газеты «Ключ» и в «Информационном бюллетене НПП «Исток».

В 2014 г. после смены руководства в головном институте фрязинский филиал готовили к закрытию – соответствующий приказ был уже подготовлен, шло согласование во всех инстанциях. Вокруг этого документа закрутилась почти детективная история с участием заместителя Председателя Правительства РФ Д. О. Рогозина, лидера КПРФ Г. А. Зюганова, заместителя министра образования А. В. Климова и фрязинских защитников филиала, одним из самых рьяных борцов за сохранение была директор филиала Н. В. Абакумова. Учебное учреждение удалось отстоять. Сегодня из 17 филиалов РТУ МИРЭА, работавших на территории бывшего СССР (в Дубне, Махачкале, Александрове, Сергиевом Посаде и других городах), осталось только два: один во Фрязино, на территории НПП «Исток», и второй в г. Ставрополе.

Все нововведения Н. В. Абакумовой находили широкую поддержку у ректора МИРЭА академика РАН А. С. Сигова; Генерального конструктора, Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора МИРЭА С. И. Реброва; генерального директора НПП «Исток» лауреата Государственной премии РФ, доктора технических наук, профессора МИРЭА А. Н. Королева; генерального директора АО «НПП «Исток» им. Шокина» лауреата премии Правительства РФ, доктора технических наук, профессора МИРЭА А. А. Борисова. Большую роль в укреплении филиала МИРЭА сыграли Главы наукограда Фрязино лауреат Государственной премии Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор В. П. Савченко и кандидат технических наук В. В. Ухалкин, а также заместитель Главы города по вопросам наукограда кандидат технических наук А. Г. Михальченков.

На протяжении трех созывов жители города избирали Наталию Владимировну Абакумову депутатом Фрязинского городского Совета, что, несомненно, подтверждает огромный авторитет ее среди жителей наукограда Фрязино.

По сей день из уст бывших студентов в адрес Наталии Владимировны звучат теплые слова благодарности за ее всеобъемлющую заботу и знания, открывшие им дорогу в профессию. Наталия Владимировна всегда с благодарностью говорит о своих сотрудниках, которых на ее жизненном

пути было немало. Перечислить всех невозможно, назовем лишь преподавателей с учеными степенями: доктора наук Б. П. Никонов, Г. М. Стрелков, Р. А. Силин, Е. И. Нефедов, Б. Ч. Дюбуа, А. Г. Жуков, В. А. Иовдальский, В. Г. Лапин, П. В. Куприянов, Ю. Н. Горбунов, А. И. Панас и кандидаты наук Ю. М. Ермолаев, А. Д. Ходневич, И. М. Олихов, Л. Н. Вагин, Т. А. Кузнецова, В. Б. Хомич, К. И. Алмазов-Долженко, В. В. Пухов, М. П. Пархоменко, Г. И. Гольшева, Е. А. Леонтьев, Г. В. Рувинский, Е. И. Черненко, К. Б. Джурицкий, Ю. П. Кернов, Е. А. Наумов, Э. М. Зелинский, В. Ф. Федоров, Н. П. Литвиненко, А. Н. Вилков, Ю. И. Рудин, Л. А. Троицкая, Е. И. Исмагилова, Д. А. Ковтунов, Ю. А. Жугрин, М. И. Захаров, В. И. Шаповалов, Н. В. Ганюшкина, А. И. Греков, Н. В. Кочетков, В. Д. Коган, Г. А. Яковлев, А. И. Фурменко, И. М. Гаврилов, В. М. Жариков, Г. Ф. Корепин, И. О. Лобанова, Л. Г. Садыхова, А. В. Павличенко, В. Е. Сизов, С. А. Плешанов, А. К. Балыко и многие другие. Замечательно, что, кроме преподавательской деятельности, А. Н. Королев, Е. И. Нефедов, К. И. Алмазов-Долженко, К. Б. Джурицкий, В. А. Иовдальский широко известны в стране и за рубежом своими монографиями по техническим проблемам, а Е. И. Черненко как автор трех романов и сборника художественных рассказов.

Несколько лет назад всеми была горячо поддержана идея создания на базе филиала МИРЭА и «Истока» городского учебно-производственного центра. Н. В. Абакумова и директор предприятия «Гамма+» И. М. Олихов подготовили все необходимые документы, организовали совещание всех заинтересованных лиц, но, к сожалению, важное для наукограда начинание приостановилось.

Как многолетнему руководителю филиала МИРЭА, Наталии Владимировне безусловно хочется, чтобы руководители подразделений «Истока» с еще большим вниманием относились к студентам филиала и после окончания института принимали их на работу. Кроме того, считает она, необходима более широкая агитация среди выпускников школ, чтобы в стенах нашего института обучалось больше юношей и девушек не только из Фрязино, но и из близлежащих городов, ведь еще каких-то сорок лет назад жители Щелково и Ивантеевки ездили работать не в Москву, а на предприятия города Фрязино.

Руководители и депутаты городского Совета наукограда Фрязино, директора научно-производственных предприятий, жители наукограда, сотрудники НПП «Исток», преподаватели и студенты филиала МИРЭА сердечно поздравляют Наталию Владимировну Абакумову с юбилейной датой и от всей души желают ей, ее родным и близким крепкого здоровья, долголетия, счастья и благополучия в жизни.

Напутствие выпускникам школ, колледжей и институтов от Наталии Владимировны Абакумовой

Кажется, совсем недавно для Вас прозвучал первый звонок. С необъяснимыми смешанными чувствами любопытства Вы переступили порог школ. Преподаватели ввели Вас в мир новых знаний, окружили заботой, научили самостоятельно мыслить и, главное, научили Вас трудиться, ибо во все времена учеба была и остается тяжелым трудом, связанным с огромными умственными и физическими напряжениями. С поступлением в институт для Вас начался новый этап познаний. Учиться стало трудней, но и интересней. Появились любимые предметы и любимые преподаватели. С каждым днем они открывали неизвестные Вам законы природы и человеческой жизни. Вы узнали, что было на земле много лет назад, и научились предсказывать явления в будущем. Все свои знания, весь свой опыт педагоги и преподаватели открыто, с добрым сердцем передавали Вам. Для них не было и нет важнее цели: учить Вас всему, что знают сами,

цели гуманной и благородной, осуществлению которой Ваши учителя и преподаватели отдали свои лучшие годы. И вот настал тот момент, чарующий и грустный, когда Вы последний раз переступаете порог ставших Вам родными школ или институтов. Покинете Вы их в совершенно другом качестве: самостоятельными и образованными молодыми людьми с пахнувшими свежей краской аттестатами зрелости и дипломами. Каждый из Вас выберет свою дорогу жизни. Но, где бы Вы ни были, кем бы ни работали, воспоминания о прекрасной поре – школьных и институтских годах – не покинут Вас никогда. С гордостью несите высокое звание выпускника фрязинского филиала РТУ МИРЭА. Не забывайте своих учителей и преподавателей. Цените их тяжелый, не всегда объективно оцениваемый труд. Стремитесь к дальнейшему пополнению и обновлению Ваших знаний. Передавайте набранный Вами опыт другим. Уважайте старших, защищайте младших. Бережно и заботливо относитесь к родным и близким Вам людям. Любите жизнь и природу – источник знаний. Будьте счастливы, дорогие наши выпускники!

НИНА ВАЛЕНТИНОВНА ГАНЮШКИНА

... – Девочки, подойдите на минутку сюда! – Алексей Юрьевич Кравченко, член-корреспондент Российской академии художеств, заслуженный художник РФ, профессор Академии акварели и изящных искусств Сергея Андрияки и наш преподаватель в одноименной школе, держал в руках мою новую работу «Рябина», которую я принесла на очередной отчет-просмотр (их в школе устраивают каждые полгода). «Девочки», почтенные дамы от 30 до ... 80 лет, оторвались от своих мольбертов и окружили нас.

– Смотрите, вот это – настоящее произведение искусства! – Постоянно иронизирующий по поводу нашего творчества препод был очень серьезен. От неожиданности у меня перехватило дыхание... – вспоминает Нина Валентиновна.

Семь лет назад во Фрязинском выставочном зале Культурного центра на ул. Комсомольская, 28 проходила выставка талантливых фрязинских художников-акварелистов, подаривших жителям города много минут душевной радости.

В день её закрытия выставку посетили четверо знаменитых людей нашего города: Виталий Николаевич Батыгин, кандидат технических наук, лауреат Ленинской премии, главный инженер «Истока» с 1982 по 2010 годы; Владимир Петрович Савченко, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии РФ, Глава г. Фрязино с 1993 по 2001 годы; Владимир Петрович Марин, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственных премий СССР и РФ, генеральный директор ФГУП «Атом»; Гулам Садырович Садыхов, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии РФ, г.н.с. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Их совместный визит оказался неслучайным. Они приехали поздравить участницу выставки Нину Валентиновну Ганюшкину, которая представила на суд зрителя три великолепных натюрморта, написанных настолько талантливо, что когда смотришь на её акварели, то хочется подойти и взять с написанного красками подноса налитые соком ягоды и дыни.

Ганюшкина Н. В. – кандидат технических наук, работает старшим научным сотрудником в теоретическом отделении «Истока».

Нина Валентиновна Ганюшкина успешно окончила флагман отечественного высшего технического образования – Московский энергетический институт, а вслед за ним, не покидая стен родного института, аспирантуру. Ее кандидатская диссертация новизной и оригинальностью решенных в ней проблем привела в восхищение членов ученого совета.



Н. В. Ганюшкина

В 1989 году Н. В. Ганюшкина переступила порог «Истока» и вошла в его славный коллектив, на многие годы связав свою судьбу с теоретическим отделением. Коллектив лаборатории принял красивую и умную девушку с большой любовью и доброжелательностью, а она, в свою очередь, внесла в производственную жизнь лаборатории много приятных минут.

Обучение в Московском энергетическом институте дало Нине Валентиновне глубокие знания, которые, умноженные на ее ум, трудолюбие и стремление познать новое в короткий срок, превратили дипломированный и увенчанный научной степенью бутон в прекрасный цветок – гордость теоретического отделения.

Разработкой методов решения задач теплопроводности и термоупругости, возникающих при создании приборов СВЧ, в лаборатории Ильи Марковича Блейваса начали заниматься с конца 1963 года. Проведенные сотрудниками исследования показали, что многие классические методы становятся малопродуктивными в случае решения нелинейных и нестационарных уравнений теплопроводности. В связи

с этим Н. В. Ганюшкиной удалось разработать новые уникальные по эффективности методы расчета. Использование их позволило на порядок повысить скорость вычислений на ЭВМ. Применение новых методов к решению трехмерных нелинейных задач стало настоящим прорывом в проектировании приборов с учетом тепловых проблем. Поскольку каждый из приборов СВЧ при своей работе выделяет тепло и подвергается различного рода механическим воздействиям, то Нина Валентиновна за короткий период стала одной из самых востребованных специалистов в области проектирования электровакуумных и твердотельных приборов.

Несмотря на крутой разворот в истории страны, совпавший с ее приходом на предприятие, и не в лучшую сторону изменившееся отношение к отечественной электронике, Н. В. Ганюшкина осталась в теоретическом отделении вместе с теми, кто пережил на «Истоке» трудные времена, стараясь сохранить отделение и для себя, и для тех, кто его любит и помнит. Этот ее патриотизм к родному предприятию был по достоинству оценен руководством теоретического отделения и предприятия, она была назначена старшим научным сотрудником по ключевому направлению

в теории электронных приборов и устройств. В настоящее время представить отделение без нее просто невозможно.

У Нины Валентиновны очень высокий научный, технический и творческий потенциал. Она автор 70-ти научных публикаций и научно-технических отчетов. Ее энциклопедичность знаний просто восторгает. Наука и техника, культура и спорт, политика и религия – нет ни одной обсуждаемой темы, о которой она не высказала бы мнение не только сведущего человека, но и человека, обладающего своей точкой зрения. Нина Валентиновна легко воспринимает все новое, современное и не боится остаться со своим мнением в меньшинстве. Деятельность Н. В. Ганюшкиной не ограничивается только производственными задачами. Она обладает удивительным талантом просто и понятно объяснять самые сложные процессы, происходящие в приборах СВЧ, и доходчиво излагать свои мысли. Это высокое качество на протяжении почти 30 лет высоко оценивают не только студенты, но и руководители филиала МИРЭА в г. Фрязино, где она является доцентом. Дочь Алена – выпускница Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, также посвятила себя науке.

– **Нина Валентиновна, расскажите, пожалуйста, о себе. Как Вы оказались в Киргизии?**

– Мой папа окончил с отличием Московский энергетический институт. Он был невероятно разносторонним и открывал передо мной двери многих знаний и умений в различных областях науки, техники, спорта. Мама закончила Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева. Дипломный проект она готовила в институте легендарного советского учёного Игоря Васильевича Курчатова под руководством академика Георгия Николаевича Флёрва, одного из крупнейших ядерных физиков XX века, участвующего в создании первой советской атомной бомбы и в открытии целого ряда новых элементов таблицы Менделеева. Мама, работая потом технологом по извлечению урана из ураносодержащего сырья, стала автором многих изобретений и внедрений по усовершенствованию этих процессов. Её биография заслуживает того, чтобы об этом поговорить отдельно. В 1951 г. после окончания столичных вузов мои родители были направлены создавать атомную промышленность в Киргизии, где сначала на Иссык-Куле, а потом в городке Кара-Балта создавался Горнорудный комбинат по добыче и обогащению урановых руд. В этой республике они и прожили долгие годы. Я родилась в 1962 году и провела там 17 лет, пока не уехала учиться в Москву.

– **Когда у Вас проявился интерес к рисованию?**

– В детстве, как я говорила, наша семья жила в городке Кара-Балта. В 1972 г. в городе по случаю 50-летия СССР проводился конкурс рисунка на асфальте. Помню, как мы с папой накануне конкурса придумывали, что бы нарисовать по этой теме. Все дорожки парка были расчерчены на большие зоны для рисунков, которые потом превратились в красочную выставку детских работ. Я тогда училась в 3-м классе. И неожиданно для самой себя стала победителем этого конкурса. Меня пригласили в городскую изостудию, в которую ходила два года. Помню, что мне постоянно хотелось рисовать. Дома, когда рисовала и надо было прерваться по другим делам, оставляла маме записку: «Ничего не убирай, я приду и продолжу рисовать». Тяга к рисованию была какая-то сверхъестественная. Рисовала даже на уроках. Обычно шаржи на своих одноклассников и учителей. У меня до сих пор хранятся эти шаржи, и даже, в это сейчас трудно поверить, на... членов Политбюро ЦК КПСС.

– **И тем не менее, Вы стали учёным, а не художником.**

– Это тоже выглядит удивительным. В старших классах у меня была проблема выбора специальности. Кроме рисования, я ходила в музыкальную школу и обожала играть на фортепиано.

Не забывая классику, самостоятельно занималась импровизацией и подбором всего, что мне нравилось. На выпускном экзамене по специальности после прослушивания обязательной части члены комиссии попросили меня устроить концерт из этих вещей. Директор музыкальной школы пригласил меня в группу учащихся, которых он готовил для поступления в консерваторию им. Гнесиных в Москве. И всё же я решила пойти по стопам своих родителей. Музыка навсегда осталась моим спутником. После окончания с отличием школы с физико-математическим уклоном поступила во флагман отечественного высшего образования – Московский энергетический институт. Интерес к рисованию как-то растворился, хотя я, как и многие советские студенты, с интересом посещала выставки изобразительного искусства, иногда часами выстаивала в очереди на просмотр привезённых из-за границы шедевров.

Вслед за институтом, который тоже окончила с отличием, не покидая его стен, закончила аспирантуру под руководством Щукина Льва Николаевича, академика, профессора, советского и российского авиаконструктора, изобретателя многофункционального безаэродромного летательного аппарата с дисковидным фюзеляжем – экранолета «ЭКИП», известного как «русская летающая тарелка». Работать с ним было очень интересно! В нём удивительным образом сочетался талант великолепного учёного и мудрого организатора. Я самозабвенно занималась своей кандидатской диссертацией. Каждый пройденный этап дарил нам кучу новых идей. Защита диссертации прошла успешно, с рекомендацией продолжения интереснейших исследований по этой тематике в области гидрогазодинамики и теплообмена. Но скоростной уход Льва Николаевича нарушил планы по продолжению совместных работ.

В 1989 г. я пришла работать на «Исток» и на многие годы связала свою судьбу с теоретическим отделением. МЭИ дал мне хорошие знания в различных областях техники. Ещё будучи в МЭИ, я увлекалась тепловыми проблемами. С настойчивостью и интересом искала решения одного из самых сложных уравнений в частных производных – уравнения теплопроводности. От всей души радовалась, если после многих бессонных ночей удавалось получить красивое решение в аналитическом виде, либо найти численное решение сложнейшей задачи. Огромную помощь в освоении этой тематики оказал мне незабвенный Михаил Ильич Захаров, кандидат технических наук, доцент филиала МИРЭА, за что я ему очень благодарна.

– Что же подвигло Вас вновь заняться живописью?

– Лет двадцать тому назад сотрудник нашей лаборатории рассказал, что в московском Манеже проходит выставка учащихся и педагогов московской школы акварели Сергея Андрияки. Я много читала об этом художнике, знала, что имя его широко известно и не только в нашей стране. Мы с дочкой Алёной поехали на выставку. Видимо, во мне что-то перевернулось при взгляде на огромное число выставленных там высокохудожественных акварелей. А когда руководитель школы Сергей Андрияка провёл с посетителями мастер-класс и предложил записываться в школу, я стала настойчиво предлагать Алёне пойти туда, но она отказалась. И тогда я ей сказала: «А я пойду и буду учиться!» Успешно прошла отборочный тур и стала посещать занятия. Выкраивала время, как могла. Моя мама ворчала, мол, зря тратишь время, тем не менее, во всём мне помогала. Школу акварели я окончила через 5 лет, затем через 3 года окончила курсы повышения мастерства. И сейчас продолжаю совершенствоваться и сотрудничать с замечательными художниками из школы и академии Сергея Андрияки.

В 2016 году меня приняли в Творческий союз художников России. Все эти годы были насыщены интересными проектами в Москве, городах Подмосковья и России, за рубежом, в которых мне посчастливилось участвовать: большая выставка в Московском Манеже со школой С. Анд-

рияки; с группой художников школы в Московском Центральном Доме художника на Крымском валу; в фестивале искусств «Творческая волна» в Греции; в совместных с МСХ-проектах к 90-летию Подмосковья, «Малые города России», «Планета – Русь», фестивалях акварели «Яблоневый сад» и др. В общей сложности, более 30 различных выставок, среди которых 4 персональных; 2 печатных издания. Очень приятно, что теперь мои работы на выставках иногда оказываются рядом с работами моих дорогих преподавателей.

– Какие у Вас ближайшие планы и мечты?

– На работе поглощена интереснейшей проблемой поиска решения в области надежности конструкции прибора. Придя с работы домой, мечтаю встретиться опять со своей, еще не завершенной акварелью и вступить вновь в резонанс познания тайн простого листа бумаги. А в выходные планирую съездить всей семьёй в Третьяковку на Крымском – там сейчас идёт большая персональная художественная выставка памяти двух замечательных художников и скульпторов – двоюродной сестры моей мамы и её мужа: «Гурий Захаров. Татьяна Соколова. Вдвоём.»

Статья поступила 1 июня 2022 г.

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

ПЕРУНОВ, Ю. М. Радиоэлектронная борьба в информационных каналах: монография / Ю. М. Перунов, А. И. Куприянов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 452 с.

Рассматриваются радиоэлектронные системы и средства, функционирующие в условиях информационного противоборства, проблемы радиоэлектронного подавления информационных каналов систем различной структуры и функционального назначения, технические решения при построении средств радиоэлектронной разведки и радиопротиводействия, а также методы оценки эффективности средств радиоэлектронной борьбы и тенденции развития этих средств.

Для специалистов в области теории и техники радиоэлектронных систем, а также для студентов и аспирантов, изучающих методы исследования и проектирования радиоэлектронных систем и комплексов, предназначенных для работы в условиях информационного конфликта.

**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 опубликования (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 программе Word 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 полутонных 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.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

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 / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 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 20.6.2022 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 14,5
Уч.-изд. л. 15,0
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
12 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а,
корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru

Подписной индекс 36292



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2022, вып. 2(553), с. 118