



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (568)

2025

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(568)

2025

Издаётся 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);

д.ф.-м.н. А.И. Панас (ответственный секретарь);

к.ф.-м.н. А.В. Галдешкий; 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.Б. Пашковский;

д.т.н. К.Г. Симонов;

к.т.н. С.Б. Александров, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;

д.т.н. Л.И. Бабақ, ТУСУР, г. Томск;

д.т.н. А.В. Баранов, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;

д.т.н. С.А. Гамкрелидзе, ИСВЧПЭ РАН, г. Москва;

к.т.н. П.П. Куцько, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;

д.т.н. И.Е. Лысенко, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;

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

Учредитель: АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Сборник 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 сборник «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» (квартиль 2).

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(568)

2025

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);

D.Ph.M.Sc. A.I. Panas (executive secretary);

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.B. Pashkovsky;

D.T.Sc. K.G. Simonov;

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.T.Sc. S.A. Gamkrelidze, IMWFSE RAS, Moscow;

C.T.Sc. P.P. Kutsko, JSC «NIIET», Voronezh;

D.T.Sc. I.E. Lysenko, INEP ITA SFU, Taganrog;

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

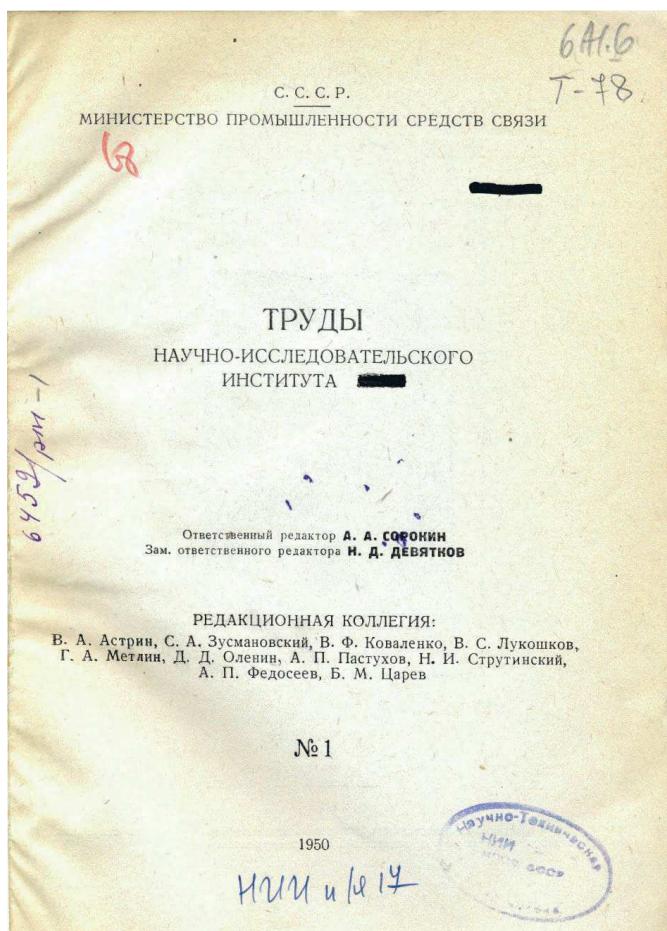
Founder: JSC «RPC «Istok» named after Shokin».

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-tehnika» 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» (quartile 2).

Нам 75!

Научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» издается АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года. За прошедшие десятилетия сборник стал одним из ведущих специализированных изданий России по СВЧ-технике. У его истоков стояли известные ученые: д.т.н., академик АН СССР Н. Д. Девятков, д.т.н., профессор С. А. Зусмановский и др. Начиная с 1950 года до настоящего времени издано 568 номеров. За это время сборник сменил несколько названий. В 1950 году он назывался «Труды научно-исследовательского института № 160», затем «Электроника», «Вопросы радиоэлектроники», «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ», и нынешнее его название – «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника». Научно-технический сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук». Авторами статей в нашем научно-техническом сборнике были крупные ученые с мировым именем, научные сотрудники, широко известные в нашей стране, молодые инженеры, специалисты.



Перед вами фотография
первого номера нашего
сборника

СОДЕРЖАНИЕ

Электровакуумные приборы

<i>Галдецкий А.В., Богомолова Е.А.</i> – Особенности электродинамических характеристик пла- нарных замедляющих систем миллиметрового диапазона длин волн.....	7
<i>Голованов Н.А., Рулев А.А.</i> – Проектирование клистронов: многокритериальная оптимизация параметров пространства взаимодействия с использованием генетического алгоритма.....	20

<i>Медянкова Е.В., Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Савин А.Н.</i> – Перспективные конструкции широкополосных выводов СВЧ-энергии для электровакуумных приборов.....	28
---	----

<i>Крачковская Т.М.</i> – Исследование деградации эмиссионной поверхности модифицированных nanoуглеродом катодов М-типа в процессе наработки.....	37
--	----

Твердотельная электроника

<i>Пчелин В.А., Гринберг Д.С., Кужненкова С.И., Басманов М.А.</i> – Оперативный метод «фик- сированной нагрузки» для определения оптимальных согласующих цепей мощных СВЧ- транзисторов.....	50
--	----

<i>Усыченко В.Г., Чернова А.С.</i> – Морфология вольт-амперных характеристик нелегированных GaN/AlGaN-транзисторов в расширенном диапазоне напряжений и токов.....	56
---	----

Радиоэлектронные устройства

<i>Джуринский К.Б., Андросов А.В.</i> – Основные направления развития коаксиальных радиоком- понентов микроэлектроники СВЧ.....	64
--	----

<i>Карасев М.С., Коротаев Н.А., Тлюстягелов Р.А., Воронцов Е.Н., Будзинский С.Ю., Щёголев С.А., Кинденов Д.С., Быковский Г.В., Полозов Д.Н., Адиатулин А.В.</i> – Исследование и разработка отечественных пружинных контактов для передачи СВЧ-сигналов в составе конструкции перспективных приемопередающих модулей.....	74
---	----

Технология и материаловедение

<i>Жуков А.С., Бобырь В.В., Кузнецов П.А., Валеев Р.А., Миляев И.М., Лазаренко Г.Ю.</i> – Струк- тура и магнитные свойства материала, полученного селективным лазерным сплавлением порошка 30Х23К.....	86
--	----

<i>Дьяконова О.А., Федосеев Н.А., Васильев В.И.</i> – Автоматизированный измерительный комп- лекс на основе рефлектометров сантиметрового и миллиметрового диапазонов.....	98
---	----

Тематический указатель.....	106
------------------------------------	-----

Алфавитный указатель.....	110
----------------------------------	-----

CONTENTS

Electrovacuum devices

<i>Galdetsky A.V., Bogomolova E.A.</i> – Features of electrodynamic characteristics of planar slow-wave structures in millimeter wavelength range.....	7
<i>Golovanov N.A., Rulev A.A.</i> – Klystron design: multi-objective optimization of interaction space parameters using a genetic algorithm.....	20
<i>Medyankova E.V., Galdetsky A.V., Bogomolova E.A., Savin A.N.</i> – Promising designs of broadband microwave energy outputs for electrovacuum devices.....	28
<i>Krachkovskaya T.M.</i> – Studying the degradation of the emission surface of M-type cathodes modified with nanocarbon during the operating time process.....	37

Solid-state electronics

<i>Pchelin V.A., Grinberg D.S., Kuzhnenkova S.I., Basmanov M.A.</i> – An operational «fixed load» method to determine the optimal matching circuits for high-power microwave transistors.....	50
<i>Usychenko V.G., Chernova A.S.</i> – Morphology of current-voltage characteristics of undoped GaN/ALGaN transistors in an extended range of voltages and currents.....	56

Radioelectronic devices

<i>Dzhurinsky K.B., Androsov A.V.</i> – The main directions of the development of coaxial radio components of microwave microelectronics.....	64
<i>Karasev M.S., Korotaev N.A., Tlyustangelov R.A., Vorontsov E.N., Budzinskiy S.Yu., Shchegolev S.A., Kindenov D.S., Bykovskiy G.V., Polozov D.N., Adiatulin A.V.</i> – Research and development of domestic spring contacts for transmitting microwave signals as part of the design of advanced transceiver modules.....	74

Technology and material science

<i>Zhukov A.S., Bobyr V.V., Kuznetsov P.A., Valeev R.A., Milyaev I.M., Lazarenko G.Yu.</i> – Structure and magnetic properties of the material obtained by selective laser fusion of 30X23K powder...	86
<i>Dyakonova O.A., Fedoseev N.A., Vasilyev V.I.</i> – Automated measuring system based on reflectometers in the centimeter and millimeter ranges.....	98

Subject index.....	106
---------------------------	------------

Alphabetical index.....	110
--------------------------------	------------

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова

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

В обзорной статье рассматриваются основные характеристики планарных замедляющих систем (ЗС), предназначенных для использования в ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн. Анализируются различные конструкции планарных ЗС, обсуждаются преимущества и недостатки.

КС: планарная ЗС, дисперсионная характеристика, сопротивление связи, потери, ЛБВ, миллиметровый диапазон

FEATURES OF ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF PLANAR SLOW-WAVE STRUCTURES IN MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

А. В. Галдеский, Е. А. Богомолова

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

The review paper discusses the main characteristics of planar slow-wave structures (SWSs) designed for use in millimeter-wave TWTs. Various designs of planar SWSs are analyzed, their advantages and disadvantages are discussed.

Keywords: planar SWS, dispersion characteristic, interaction impedance, losses, TWT, millimeter-wave range

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электровакуумные приборы (ЭВП) миллиметрового диапазона длин волн играют ключевую роль в развитии современных систем связи, радиолокации, спектроскопии и других областей науки и техники [1–4]. Среди ЭВП лампы бегущей волны (ЛБВ) выделяются своей способностью обеспечивать высокую выходную мощность и широкую полосу пропускания. Однако создание эффективных и компактных ЛБВ для миллиметрового диапазона представляет собой сложную задачу, требующую разработки новых типов замедляющих систем (ЗС).

Традиционные объемные ЗС, такие, как спирали и гребенки, становятся менее эффективными при переходе к более коротким длинам волн из-за уменьшения размеров элементов и увеличения потерь. В связи с этим планарные ЗС, изготавливаемые с использованием микро- и нанотехнологий, привлекают все больше внимание исследователей. Планарные структуры обладают рядом преимуществ, включая возможность точного контроля геометрических параметров, а также совместимость с современными технологиями производства интегральных схем.

Зарубежные коллеги выпустили книгу [5], посвященную планарным ЗС. К сожалению, в ней освещены преимущественно разработки иностранных разработчиков. Это создает неполную картину вклада в данную область, поскольку в России, в частности на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина», подобные системы также активно и успешно разрабатывались. Таким образом, для полноты картины и объективной оценки вклада в развитие планарных ЗС необходимо учитывать достижения российских ученых и инженеров.

В данном обзоре рассматриваются различные типы планарных ЗС, предназначенных для использования в ЛБВ миллиметрового диапазона. Особое внимание уделяется анализу их дисперсионных характеристик, сопротивления связи и потерь. Обсуждаются преимущества и недостатки различных конструкций, а также перспективы их применения в высокоэффективных и компактных ЛБВ. Рассматриваются методы оптимизации параметров ЗС для достижения максимальной эффективности и полосы пропускания ЛБВ.

2. КОНСТРУКЦИИ ПЛАНАРНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Следует подчеркнуть, что планарность ЗС должна быть относительной: если толщина металла окажется заметно меньше периода ЗС, то это неизбежно приведет к токооседанию на диэлектрик и его зарядке. Кроме того, увеличенная толщина проводников позволяет экранировать влияние зарядов на диэлектрике от электронного пучка, подобно тому, как это происходит в спиральных ЛБВ.

Еще одно общее для всех планарных ЗС ограничение обусловлено необходимостью обеспечения одномодового режима работы ЗС. В частности, необходимо обеспечить запредельность для волноводной моды, которая способна реализовывать обратную связь и спровоцировать самовозбуждение ЛБВ. Отсюда ширина полости ЗС должна быть заметно меньше $\lambda/2$.

Планарная конструкция ЗС предполагает использование ленточного электронного пучка. Однако надо иметь в виду, что нередко существует значительный перепад сопротивления связи по ширине планарной ЗС, что необходимо учитывать при проектировании и что сильно усложняет расчет. Транспортировка сильноточных ленточных пучков затруднена из-за S-образного загиба краев ленты в процессе движения пучка к коллектору, приводящего к деградации токопрохождения и процессам вторичной эмиссии с поверхности диэлектрика. Для уменьшения эффекта S-образного загиба краев ленты используют большие амплитуды магнитного поля, что в свою очередь существенно увеличивает массогабаритные параметры лампы и ее стоимость.

Традиционная конструкция ЗС

Классическая планарная ЗС состоит из диэлектрической подложки, на которую нанесен тонкий слой металла, формирующий периодическую структуру замедления (рис.1) [6].

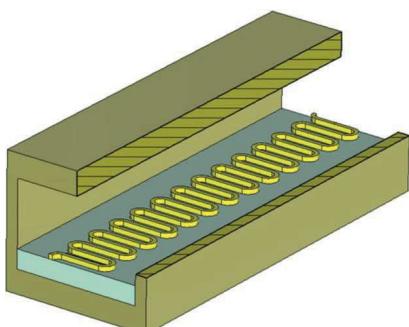


Рис.1. Классическая конструкция планарной ЗС типа «меандр»

Интерес к простым и относительно недорогим ЗС, изготовленным по технологии фотолитографии, был проявлен еще в 70-х годах. Так, например, фирма Varian (США) в 1971 г. провела исследования по возможности создания ЛБВ, основные узлы которой (фокусирующая и замедляющая системы, коллектор, электроды, СВЧ-ввод и вывод) выполнены методами пленочной технологии на плоских диэлектрических подложках [7]. Разработана технология изготовления пленочных ЗС для прибора с электростатической фокусировкой пучка и методы экспериментального измерения СВЧ-характеристик такого прибора.

В 1972 г. Varian представила образец ЛБВ [8, 9], все элементы которой были изготовлены по технологии фотолитографии на двух диэлектрических подложках (рис. 2), которые одновременно служили вакуумной оболочкой прибора. Фокусировка электронного луча осуществлялась двумя магнитами в виде пластин, расположенных снаружи диэлектрических подложек. Фирмой разработаны четыре модели таких приборов: с мощностью в непрерывном режиме 20 Вт в диапазоне частот 1...2 ГГц; со средней мощностью 200 Вт и импульсной 2 кВт в диапазоне частот 2...4 ГГц; с мощностью в непрерывном режиме 20 Вт в диапазоне частот 2...4 ГГц; с импульсной мощностью 100 Вт в диапазоне частот 8...12,5 ГГц.

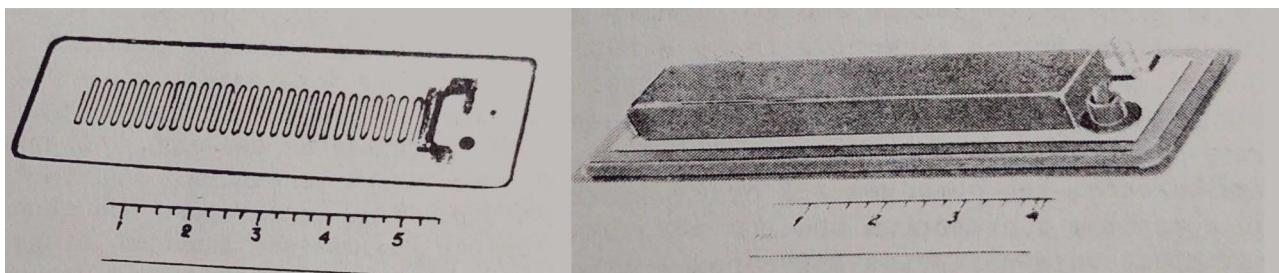


Рис. 2. Печатная схема ЛБВ (вид сверху – слева) и внешний вид ЛБВ (справа)

На сегодняшний день полученные Varian выходные мощности ЭВП в S- и X-диапазонах не могут конкурировать с выходными характеристиками твердотельных приборов. Однако, основываясь на успешной разработке планарных ЛБВ, разработчики рассматривают данный класс ЛБВ перспективным в освоении миллиметрового диапазона.

Для отвода тепла от элементов ЗС (см. рис. 1) приходится располагать подложку на стенке волновода, что резко увеличивает потери и ухудшает сопротивление связи ЗС. Для устранения указанных недостатков в ряде работ [10–13] предлагаются новые конструктивные решения.

Модернизированные конструкции ЗС

В Национальной лаборатории науки и техники по вакуумной электронике г. Чэнду (Китай) прорабатывается вариант конструкции «меандровой» ЗС на диэлектрической подложке из кварца с $\epsilon = 3,75$ (рис. 3) [10]. Подъем полоска на 50 мкм повышает значение сопротивления связи более чем в 2 раза относительно классической конструкции (рис. 4). Данную ЗС планируется изготавливать по технологии LIGA.

Расчет выходных параметров ЛБВ в полосе частот 80...95 ГГц с ускоряющим напряжением 6,7 кВ и током 0,1 А демонстрирует выходную мощность более 24 Вт, а усиление – 24 дБ (рис. 5). Однако работоспособность предложенного авторами [10] варианта конструкции ЗС вызывает сомнения из-за плохого теплоотвода.

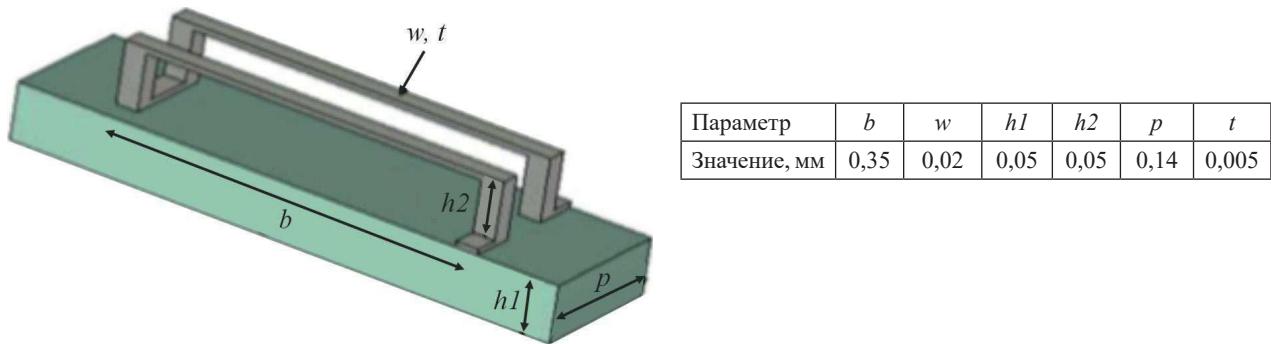


Рис. 3. Макет одного периода планарной ЗС с приподнятыми проводниками

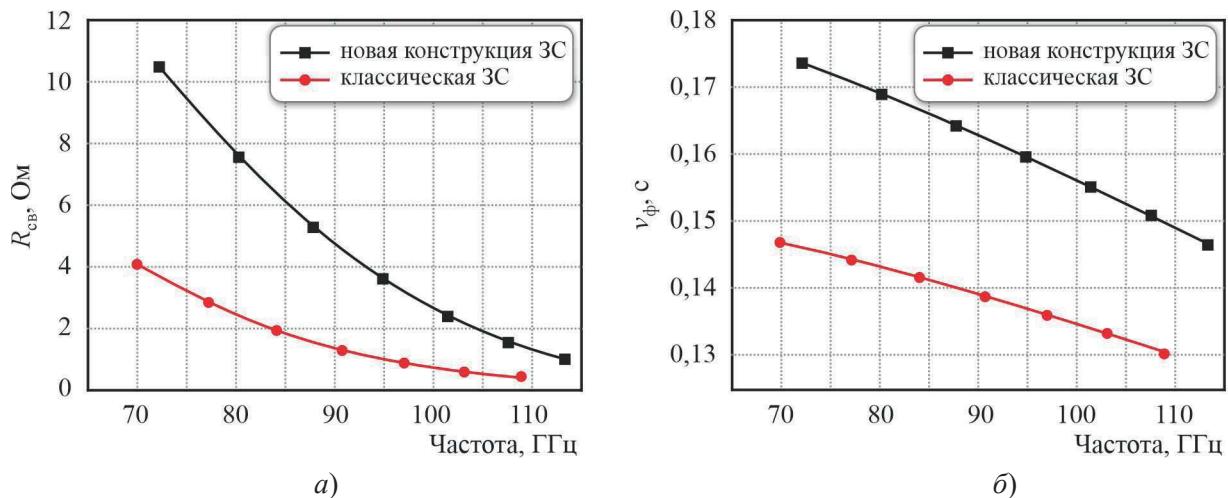


Рис. 4. АЧХ сопротивления связи (а) и фазовой скорости (б) в полосе прозрачности ЗС для новой конструкции и классической

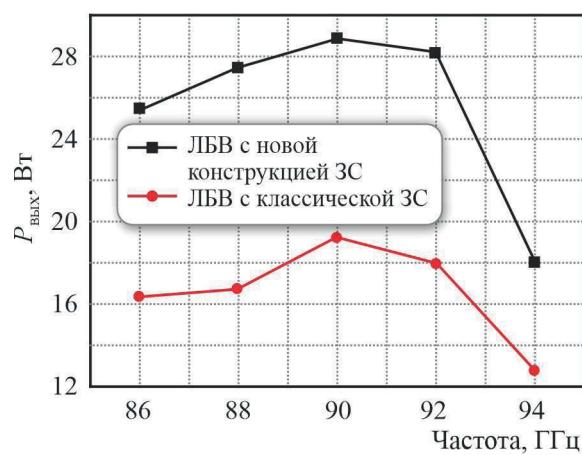


Рис. 5. АЧХ выходной мощности ЛБВ в рабочей полосе частот

В работе [11] университета Ланкастера (Великобритания) анализируется возможность создания ЛБВ в диапазоне 71...76 ГГц для спутниковой линии связи с «меандровой» ЗС (рис. 6).

В качестве материала проводников «меандра» используется золото, а подложка – оксид алюминия с диэлектрической проницаемостью 9,9. Согласно расчету, сопротивление связи превышает 10 Ом в полосе частот 71...76 ГГц (рис. 7). Для изготовления данной ЗС планируется воспользоваться фотолитографией в сочетании с гальваническим наращиванием металлизации. Авторы работы [11] полагают, что предложенная конструкция ЗС обладает более высокой эффективностью, чем традиционные планарные ЗС.

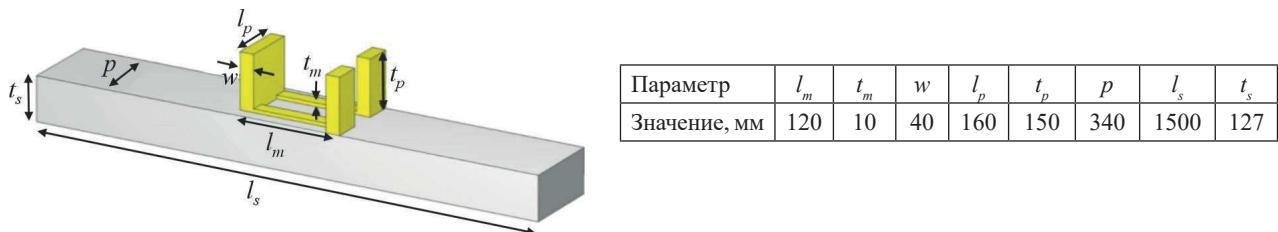


Рис. 6. Макет одного периода планарной ЗС с высотой периферийной части «меандра» 150 мкм

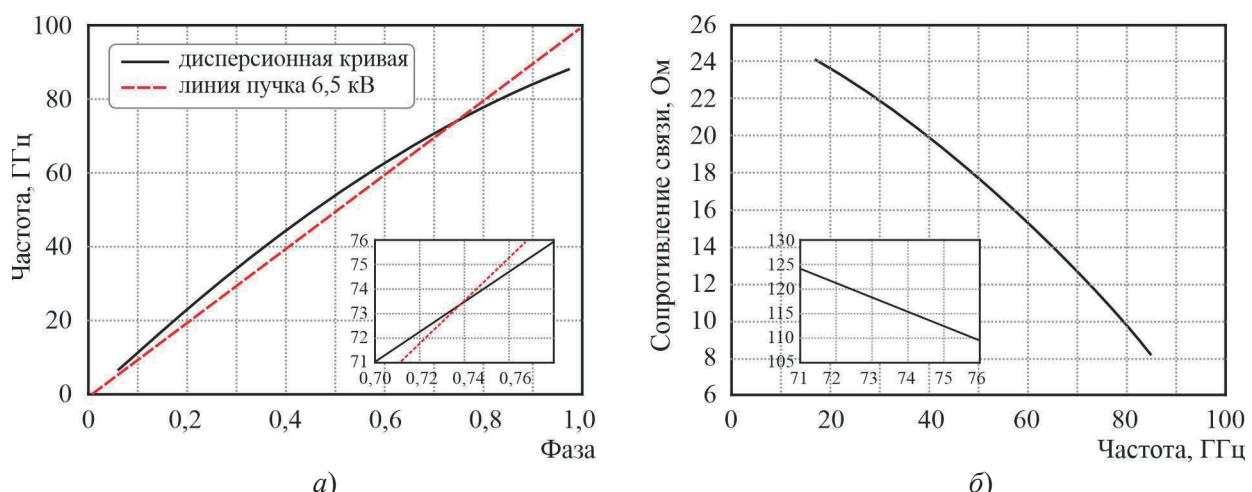


Рис. 7. Диаграмма Бриллюэна (а) и АЧХ сопротивления связи в полосе прозрачности (б)

Однако высокое значение диэлектрической проницаемости подложки и близость к экрану не обеспечат необходимого комплекса параметров для создания практической конструкции ЛБВ.

На рис. 8 представлены расчетные выходная мощность и коэффициент усиления ЛБВ с ускоряющим напряжением 6,5 кВ и током катода 40 мА (плотность тока – 200 А/см²). Фокусировка электронного пучка осуществляется магнитным полем 0,6 Тл.

Расчетные выходная мощность и коэффициент усиления ЛБВ составили более 20 Вт и 26 дБ соответственно.

Авторы работы [12] исследуют возможность создания ЛБВ на частоте 160 ГГц при ускоряющем напряжении 14,6 кВ с планарной ЗС типа двойной медный «меандр» на подложке из кварца (рис. 9). В работе подробно исследована технология изготовления пленочной ЗС, в которой используются процессы, основанные на магнетронном распылении, УФ-литографии и травлении ионным пучком аргона. Процесс осаждения занимает в общей сложности 40 мин, включая вакуумную откачуку. Фотография изготовленного образца представлена на рис. 10.

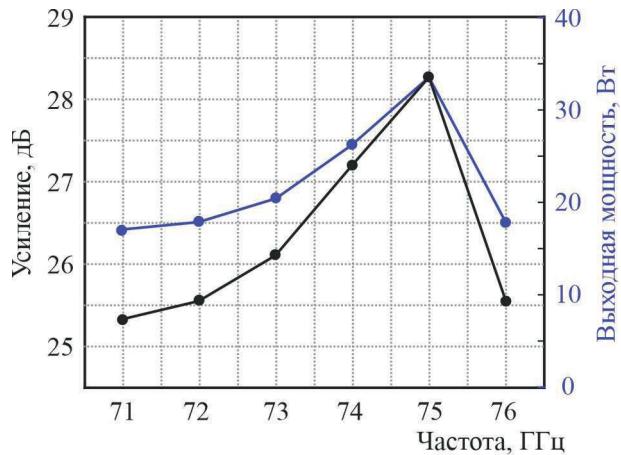


Рис. 8. АЧХ коэффициента усиления и выходной мощности в планарной ЛБВ

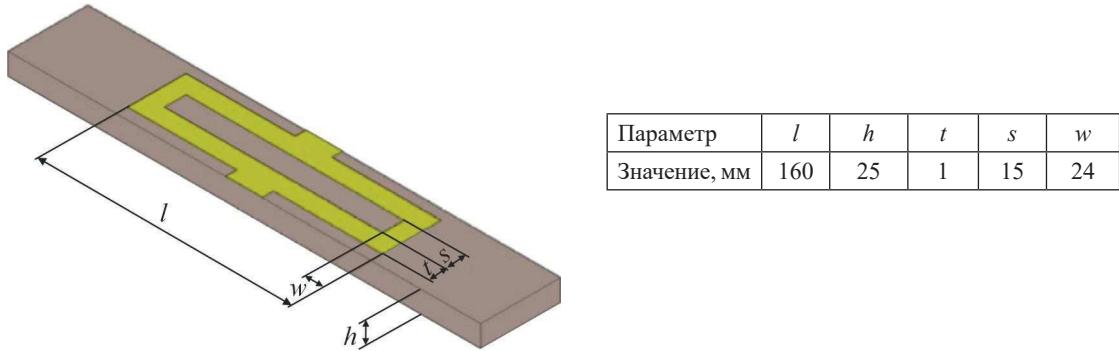


Рис. 9. Макет одного периода планарной ЗС с двойным меандром

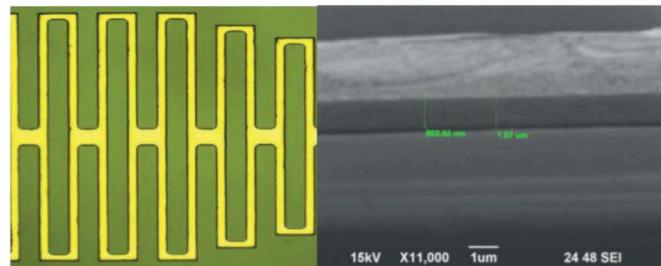


Рис. 10. Фотографии планарной ЗС:

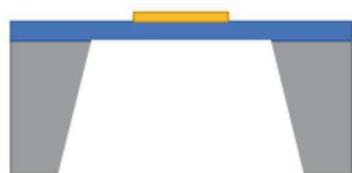
слева – вид сверху на оптическом микроскопе; справа – вид сбоку на электронном микроскопе

Основной проблемой при изготовлении планарных ЗС является обеспечение высокого качества поверхности, которое влияет на поверхностные потери в ЗС, особенно в *W*-диапазоне. В работах [10, 12–14] дана количественная оценка вносимых потерь в ЗС. Расчетные потери для ЗС (см. рис. 3) составили от 3,6 до 4,4 дБ, а для ЗС, включающей 50 периодов (см. рис. 9), – около 7 дБ.

Специалисты из Франкфуртского университета им. Гете представили проект технологического процесса изготовления планарной ЛБВ на 210 ГГц [15, 16]. Материалом подложки ЗС типа

«меандр» был выбран алмаз (рис. 11), исходя из уникальных механических и термических свойств, а также небольшого значения относительной диэлектрической проницаемости по сравнению с другими материалами, такими, как AlN.

Рис. 11. Модель конструкции ЗС (вид спереди):
серый цвет – кремний; синий цвет – алмаз; желтый цвет –
металлический проводник с топологией «меандр»



Период планарной ЗС составил 200 мкм, ширина – 250 мкм. Электродинамические характеристики ЗС типа «меандр» на алмазной подложке толщиной 10 мкм и шириной полоска 40 мкм представлены на рис. 12.

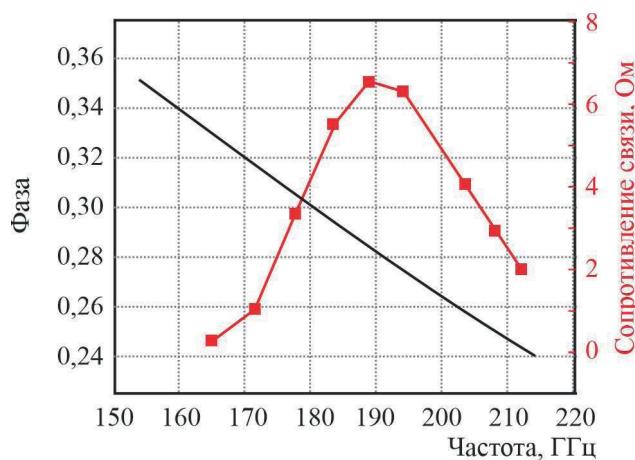


Рис. 12. Электродинамические характеристики планарной ЗС типа «меандр»

АЧХ коэффициента усиления ЛБВ с рабочей частотой 210 ГГц при рабочем напряжении 16 кВ, входной мощности 5 мВт, с использованием цилиндрического электронного пучка диаметром 150 мкм и током 40 мА представлена на рис. 13.

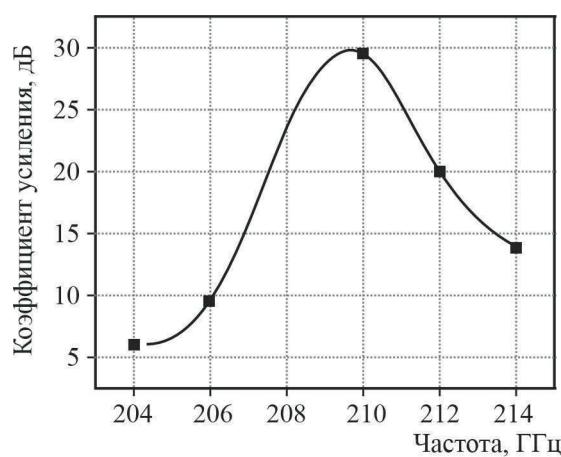


Рис. 13. Расчетный коэффициент усиления ЛБВ с планарной ЗС типа «меандр»

В рассмотренных конструкциях ЗС [10–16] решалась проблема увеличения сопротивления связи в рабочей полосе частот. Однако вопрос токооседания электронного потока на диэлектрическую подложку с последующей ее зарядкой в данных конструкциях остается нерешенным.

3. ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТИПА «МЕАНДР» НА ПОДВЕШЕННОЙ ПОДЛОЖКЕ ИЗ CVD-АЛМАЗА

Разработанная авторами [17, 18] ЗС планарного типа содержит волновод, в котором размещена диэлектрическая подложка с периодической системой проводников с топологией «меандра», вторая подложка с идентичной системой проводников располагается параллельно первой, причем между проводниками подложек образован пролетный канал вдоль продольной оси волновода (рис. 14).

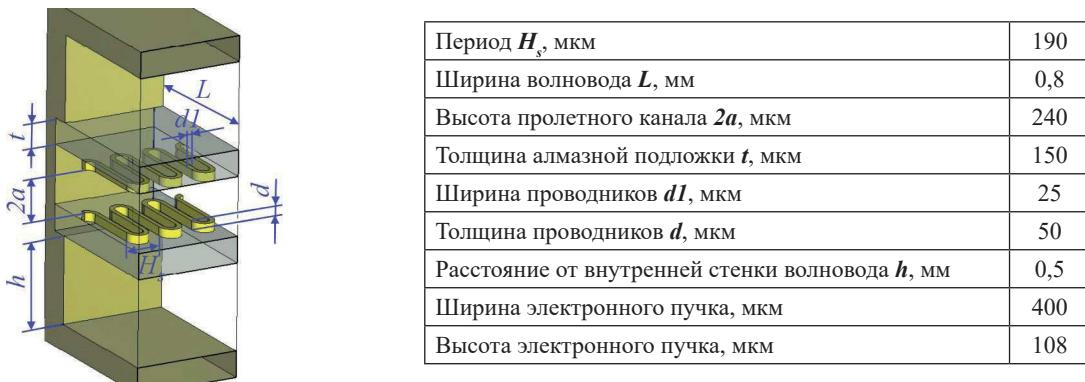


Рис. 14. Конструкция ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD-алмаза и ее геометрические параметры для W -диапазона

Ширина каждой подложки не превышает $\lambda/2$, где λ – длина волны, и закрепляется подложка на расстоянии h от внутренней стенки волновода. Величина h выбирается из условия $h \geq \lambda / (\epsilon \pi \sqrt{n_{2-1}})$, где $n = c/v_\phi$ – коэффициент замедления, c – скорость света, v_ϕ – фазовая скорость волны в системе [18]. Для обеспечения требуемого теплоотвода в качестве материала диэлектрических подложек предложено использовать CVD-алмаз.

В рассматриваемой ЗС предполагается использовать ленточный электронный поток с сечением 400×108 мкм. С учетом заданных размеров поперечного сечения пучка и технологических возможностей изготовления высота пролетного канала $2a$ была выбрана равной 240 мкм.

В результате численного моделирования установлено, что для предотвращения токооседания электронного потока на поверхность диэлектрика толщина проводника d должна быть не менее $p_0/17$, где p_0 – расстояние между соседними проводниками на подложке. Это обеспечивает отсутствие накопления заряда в подложке, появления паразитных электростатических полей и процессов вторичной эмиссии.

Для снижения вызываемой диэлектрической подложкой нагрузки на проводники, приводящей к уменьшению концентрации электрического поля в области пучка, и с учетом имеющихся технологических возможностей была выбрана минимально возможная толщина подложки $t = 150$ мкм.

На рис. 15 представлены: диаграмма Бриллюэна, АЧХ замедления и сопротивления связи планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD-алмаза с учетом всех техноло-

гических ограничений и требований к параметрам электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение – не более 15 кВ при плотности тока с катода 100 А/см²).

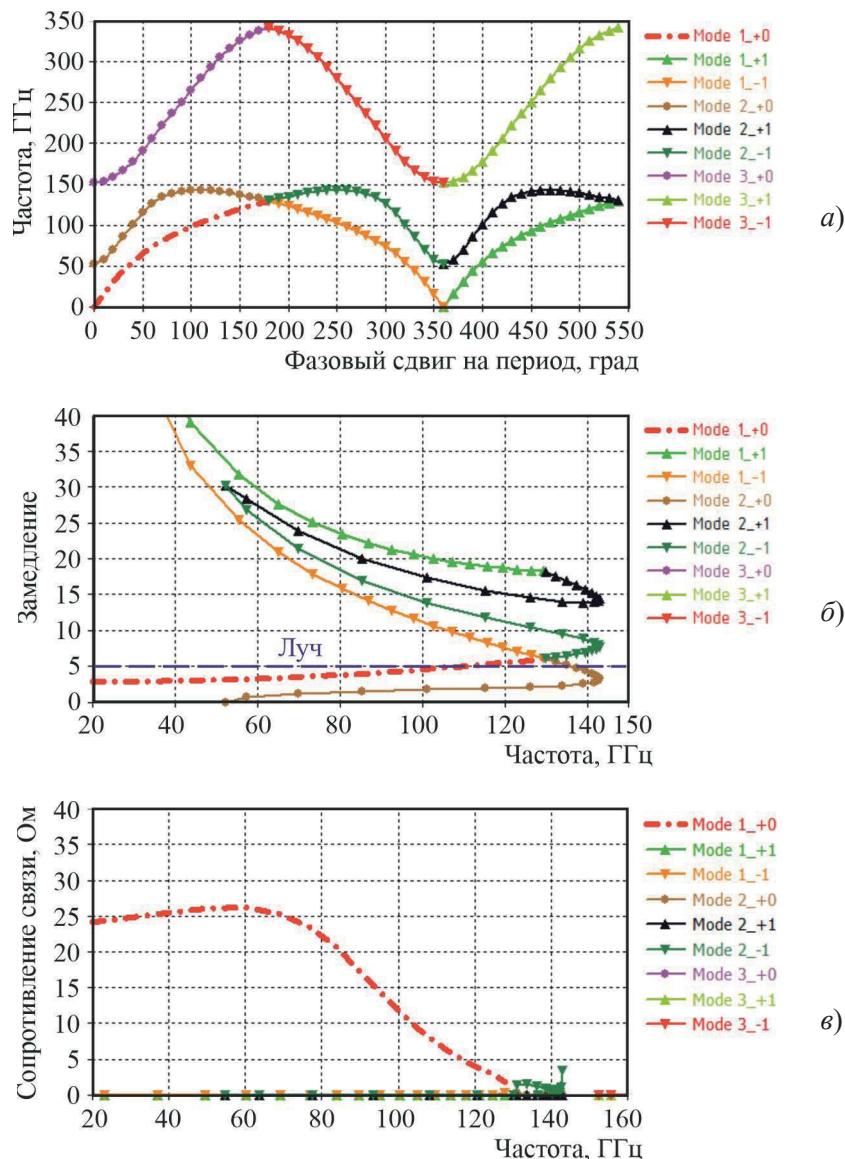


Рис. 15. Диаграмма Бриллюэна (а), АЧХ замедления (б) и сопротивления связи (в)
планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой

В диапазоне изменения фазового сдвига $0 \leq \phi \leq \pi$ синхронизм обеспечивается между электронным пучком и 0-й прямой пространственной гармоникой 1-й моды (см. рис. 15, б), которая распространяется в направлении движения электронного пучка при ускоряющем напряжении 15,6 кВ и имеет более высокое сопротивление связи (см. рис. 15, в) по сечению электронного пучка, чем для других пространственных гармоник, что исключает возникновение паразитных генераций.

В качестве примера применения планарной ЗС на подвешенной алмазной подложке была рассчитана односекционная «прозрачная» ЛБВ с заданным усилением не более 16 дБ. Резуль-

таты моделирования показали возможность достижения в мини-ЛБВ W -диапазона с планарной ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке рабочей полосы 3 % при выходной непрерывной мощности более 35 Вт, усилении 15 дБ и ускоряющем напряжении всего 15,6 кВ [19].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТИПА «МЕАНДР» НА ПОДВЕШЕННОЙ ПОДЛОЖКЕ ИЗ CVD-АЛМАЗА

Анализ электродинамических параметров ЗС (см. рис. 14) осуществлялся с помощью программного модуля [20], осуществляющего расчет дисперсионной характеристики и сопротивления связи в основной и высших полосах пропускания на любой пространственной гармонике с погрешностью не более 0,07 % по длине волны и 6,5 % по сопротивлению связи.

Учет потерь весьма важен в рассматриваемом диапазоне частот. При проводимости материала проводников $2,7 \cdot 10^7$ См/м и шероховатости поверхности $R_a = 320$ нм потери в ЗС составляют 40 дБ/м.

Исходя из требований к параметрам электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение – не более 15 кВ при плотности тока с катода 100 А/см²), были рассчитаны электродинамические характеристики планарной ЗС типа «меандр», представленные на рис. 16.

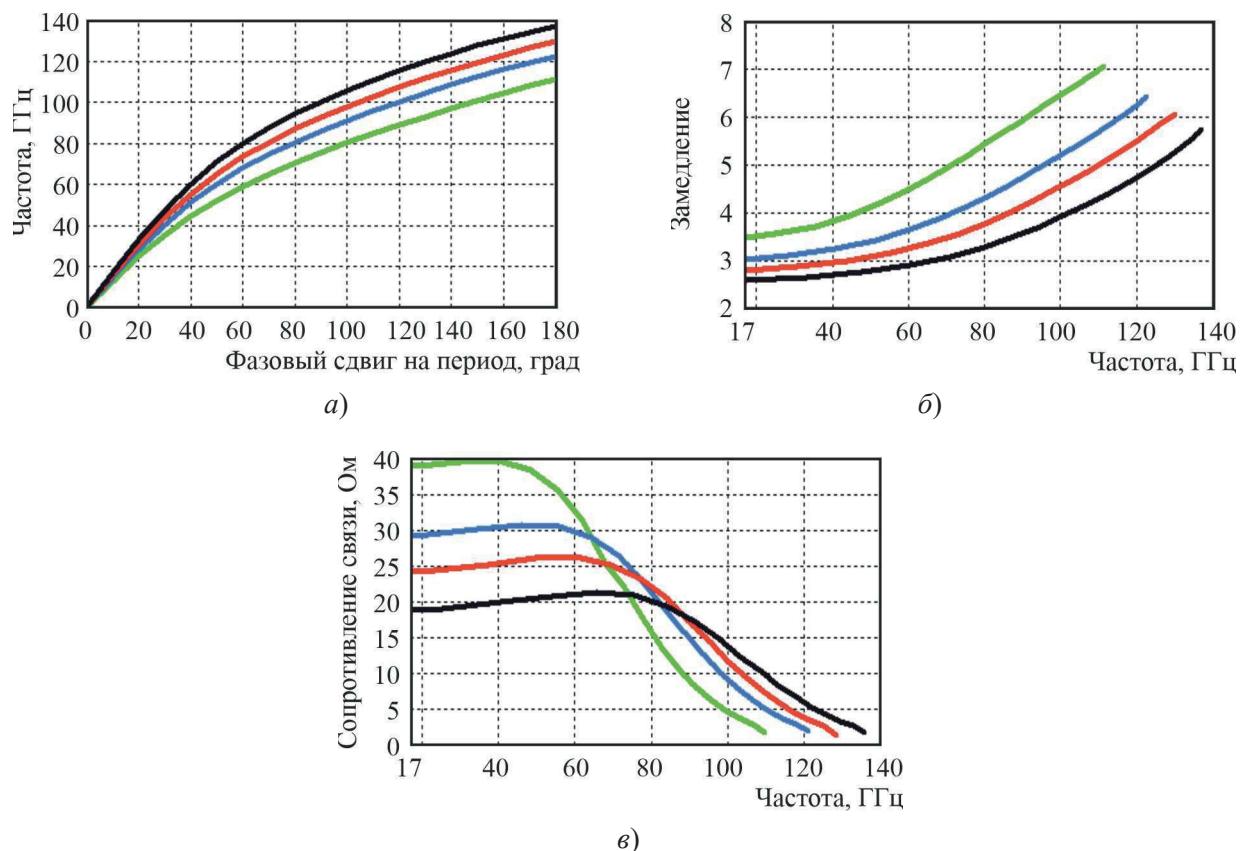


Рис. 16. Диаграмма Бриллюэна (а), АЧХ замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в):
зеленая кривая – $d = 6$ мкм; голубая – $d = 30$ мкм;
красная – $d = 50$ мкм; черная – $d = 80$ мкм

Анализ результатов, представленных на рис. 16, показал, что при увеличении толщины проводников d от 6 до 80 мкм полоса прозрачности расширялась с 147 до 156 % за счет смещения высокочастотной границы. Увеличение толщины проводников d приводило также к уменьшению замедления и, следовательно, к увеличению ускоряющего напряжения. Сопротивление связи в высокочастотной области значительно уменьшалось при увеличении толщины проводников d , однако в низкочастотной области наблюдалось высокое сопротивление связи с незначительным перепадом по частоте. Это связано с тем, что в низкочастотной части диапазона длина замедленной волны велика по сравнению с толщиной подложки t и большая часть энергии волны распространялась в вакууме, а при укорочении длины волны большая часть энергии поля находилась в диэлектрике.

Для увеличения протяженности в высокочастотную область участка с высоким сопротивлением связи и слабой зависимостью от частоты (см. рис. 16, в) исследовалось влияние отношения толщины проводников к толщине подложки d/t (рис. 17).

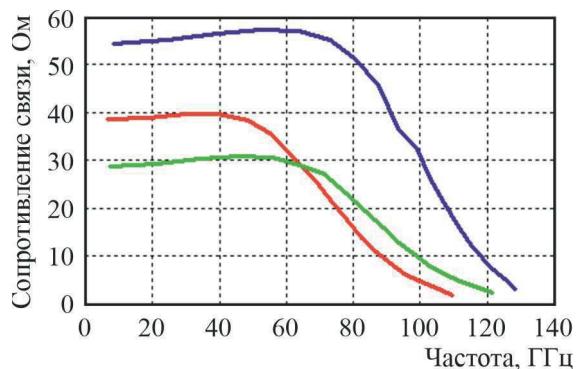


Рис. 17. АЧХ сопротивления связи в ЗС при толщине проводников d и толщине подложки t :
красная кривая – $d = 6$ мкм и $t = 150$ мкм ($d/t = 0,04$); синяя – $d = 6$ мкм и $t = 30$ мкм ($d/t = 0,2$);
зеленая – $d = 30$ мкм и $t = 150$ мкм ($d/t = 0,2$)

При соотношении $d/t = 0,2$ начало спада АЧХ сопротивления связи находилось на частоте ~70 ГГц, а при $d/t = 0,04$ частота начала спада кривой сопротивления связи сместилась в низкочастотную область (см. рис. 17).

Таким образом, частотная область излома кривой сопротивления связи зависела от отношения d/t , что дало возможность расширять участок с высоким сопротивлением связи и слабой крутизной в высокочастотную область путем увеличения величины d/t .

Исследование влияния периода ЗС на электродинамические характеристики ЗС

Как отмечалось выше, увеличение толщины проводников d приводило к уменьшению сопротивления связи и замедления (см. рис. 17), ухудшая тем самым электродинамические характеристики ЗС.

В результате исследования было установлено, что уменьшение периода ЗС H_s компенсировало недостатки, связанные с увеличением толщины проводников d (рис. 18).

Анализ результатов, представленных на рис. 18, показал, что при периоде ЗС 190 мкм и толщине проводников 50 и 80 мкм замедление уменьшалось, например, на частоте 100 ГГц с 4,5 до 3,8, соответственно ускоряющее напряжение изменялось с 13 до 18 кВ. Уменьшение периода ЗС до 170 мкм при толщине проводников 80 мкм компенсировало изменение сопротивления связи и замедления (на рис. 18 кривые для $d = 50$ мкм и $H_s = 190$ мкм практически совпадают).

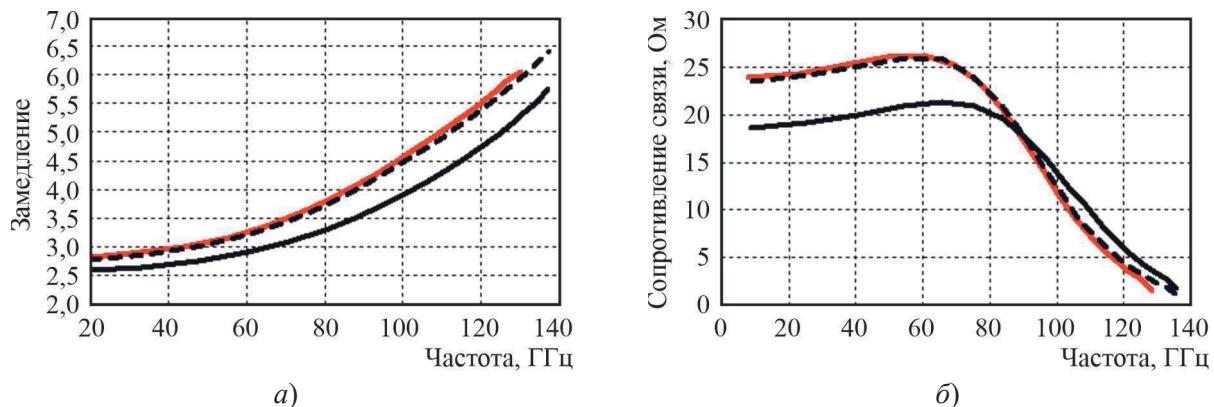


Рис. 18. АЧХ замедления (a) и сопротивления связи (б) ЗС

при толщине проводников d и периоде ЗС H_s :

красная кривая – $d = 50 \text{ мкм}$ и $H_s = 190 \text{ мкм}$; черная – $d = 80 \text{ мкм}$ и $H_s = 190 \text{ мкм}$
пунктирная – $d = 80 \text{ мкм}$ и $H_s = 170 \text{ мкм}$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены тенденции развития планарных ЗС для ЛБВ мм-диапазона длин волн. Показано, что продвижение в коротковолновую часть мм-диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных конструкций ЗС.

Представленный в статье обзор характеристик планарных ЗС для ЛБВ мм-диапазона по технологии фотолитографии предоставляет разработчикам выбор высокотехнологичных конструкций ЗС планарного типа для создания эффективных широкополосных ЛБВ.

Таким образом, можно сформулировать следующие основные выводы. Полупроводниковые технологии позволяют обеспечить высокую точность изготовления ЗС мм- и субмм-диапазонов длин волн. Однако при этом нужно учитывать ряд ограничений: необходимость поддерживать достаточную толщину проводников, трудности с транспортировкой ленточного пучка, необходимость ограничения ширины полости ЗС, что говорит о целесообразности перехода к многолучевым планарным ЗС, позволяющим наращивать выходную мощность при использовании цилиндрических пучков, проходящих в области максимального значения сопротивления связи.

ЛИТЕРАТУРА

- Technology, assembly and test of a W -band TWT for new 5G high-capacity networks / Frederic Andre [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – July 2020. – Vol. 67, No 7. – P. 2919 – 2924.
- Glyavin, M. Y. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and highpower THz technologies / M. Y. Glyavin, T. Idehara, S. P. Sabchevski // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2015. – Vol. 5, No 5. – P. 788 – 797.
- Dayton, J. A. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul / J. A. Dayton, C. L. Kory, G. T. Mearini // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2015). April 27–29, 2015, Beijing, China.

4. Мощная ЛБВ миллиметрового диапазона с прецизионной технологией изготовления согласующих элементов конструкции / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, А. И. Корчагин и др. // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 7 (10). – С. 73 – 82.
5. **Yubin Gong.** Shaomeng wang planar slow wave structure traveling wave tubes design, fabrication and experiment, IOP Publishing, Bristol, UK. – DOI 10.1088/978-0-7503-5452-3, ISBN 978-0-7503-5452-3, 2024.
6. **Силин, Р. А.** Периодические волноводы / Р. А. Силин. – М.: ФАЗИС, 2002.
7. **Scott, A. W.** Low cost S-band transmitter tube for phased array radars / A. W. Scott // Government Reports Announcements. – 1971. – Vol. 71, No 22. – P. 96.
8. Printed-circuit TWT's promis cost cuts // Electronics. – 1972. – Vol. 45, No 25. – P. 35, 36.
9. **Scott, A. W.** Next in tubes the printed circuit TWT / A. W. Scott // Electronic Design. – 1972. – Vol. 20, No 26. – P. 28, 30.
10. Research on a 3D Microstrip meander-line slow-wave structure traveling wave tube / Shangsong Xin [et al.] // Proceedings of the 22nd IVEC, 28–30 April, Virtual Event. – 2021. – P. 58 – 59.
11. Pillared meander line slow wave structure for *W*-band traveling wave tubes / Juan M. Socuéllamos [et al.] // Proceedings of the 22nd IVEC, 28–30 April, Virtual Event. – 2021. – P. 74 – 75.
12. Design and fabrication of D-band planar double microstrip meander line slow wave structure / Yang Xie [et al.] // Proceedings of the 22nd IVEC, 28–30 April, Virtual Event. – 2021. – P. 106 – 107.
13. Development of a low-voltage millimeter-band traveling-wave tube with a planar microstrip slow-wave structure on dielectric substrate / Nikita M. Ryskin, Andrey G. Rozhnev [et al.] // Proceedings of the 22nd IVEC, 28–30 April, Virtual Event. – 2021. – P. 70 – 71.
14. Design of a *W*-band *U*-shaped meander-line for traveling-wave tube / Jia Lu [et al.] // Proceedings of the 22nd IVEC, 28–30 April, Virtual Event. – 2021. – P. 247 – 248.
15. **Ulisse, G.** *W*-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure / G. Ulisse, V. Krozer // IEEE Electron Device Letters. – January, 2017. – Vol. 38, No 1. – P. 126 – 129.
16. **Ulisse, G.** Diamond substrate planar slow-wave structures for millimeter wave traveling wave tubes / G. Ulisse, V. Krozer // Proceedings of the 24nd IVEC, 26–28 April, Chengdu, China. – 2023. – P. 971 – 972.
17. **Галдецкий, А. В.** ЛБВ *W*-диапазона с планарной замедляющей системой на алмазном теплоотводе / А. В. Галдецкий, Е. А. Ракова // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 6–12 сентября 2015, Севастополь, Крым, Россия. – 2015. – Т. 1. – С. 176.
18. **Патент № 2653573 РФ.** Замедляющая система планарного типа: 11.05.2018, Бюл. № 14 / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова.
19. **Богомолова, Е. А.** Замедляющие системы с улучшенными электродинамическими параметрами и теплорассеивающей способностью для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона: дис....канд. техн. наук.: АО «НПП «Исток» им. Шокина». – Фрязино, 2021. – 117 с.
20. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619311 от 08.06.2021.** Модуль для расчета дисперсионной характеристики и сопротивления связи замедляющих систем в программе моделирования высокочастотных электромагнитных полей / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова.

Статья поступила 11 июля 2025 г.

УДК 621.385.624

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КЛИСТРОНОВ:
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Н. А. Голованов, А. А. Рулев

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

Представлен программный комплекс, основанный на интеграции генетического алгоритма многокритериальной оптимизации NSGA-II и ядра программы расчёта пространства взаимодействия клистронов AJDisk. Реализовано распараллеливание вычислений, обеспечивающее ускорение процесса оптимизации на многоядерном процессоре. По результатам работы комплекса формируется фронт Парето, демонстрирующий компромисс между максимальным КПД и длиной прибора. На основе расчетного оптимизированного варианта был изготовлен сверхмощный клистрон S-диапазона с ускоряющим напряжением 250 кВ и током пучка 225 А, который продемонстрировал удовлетворительное совпадение расчетной и измеренной величин КПД (47,8 и 44 % соответственно) при заданных жёстких ограничениях на длину прибора. Расхождение с экспериментальными данными составляет менее 5 %.

КС: клистрон, пространство взаимодействия, релятивистский электронный поток, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм NSGA-II, фронт Парето

**KLYSTRON DESIGN: MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION
OF INTERACTION SPACE PARAMETERS
USING A GENETIC ALGORITHM**

N. A. Golovanov, A. A. Rulev

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

This paper presents a software package based on the integration of the NSGA-II multi-objective genetic algorithm and the computation core of AJDisk, a program for calculating the interaction space of klystrons. Computational parallelization has been implemented, enabling accelerated optimization on a multi-core processor. The output of the complex is a Pareto front, which demonstrates the trade-off between maximum efficiency and the device length. Based on a calculated optimized design, a high-power S-band klystron was manufactured with an accelerating voltage of 250 kV and a beam current of 225 A. The device demonstrated satisfactory agreement between the calculated and measured efficiency values of 47.8 and 44 %, respectively, under stringent constraints on the device length. The discrepancy with experimental data is less than 5 %.

Keywords: klystron, interaction space, relativistic electron beam, multi-objective optimization, NSGA-II genetic algorithm, Pareto front

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные клистроны являются ключевыми элементами таких современных установок, как ускорители заряженных частиц, системы СВЧ-нагрева плазмы, термоядерного синтеза и специализированные радиолокационные комплексы [1, 2]. Эффективность таких установок напрямую зависит от параметров клистронов, и прежде всего от их выходной мощности, электронного КПД и полосы пропускания, которые определяются пространством взаимодействия.

Проектирование пространства взаимодействия клистронов представляет собой сложную много-параметрическую задачу. Необходимо определить оптимальные геометрические параметры резонаторов

наторов, пролётных труб и нагруженные добротности резонаторов, обеспечивающие достижение требуемых выходных характеристик прибора. Целевыми функциями оптимизации являются: максимальный электронный КПД, минимальная длина прибора, условие отсутствие возвратных электронов в области зазора выходного резонатора.

Для решения задач оптимизации клистронов традиционно применяются методы как локального и глобального поиска в известных коммерческих программных продуктах, так и ручной подбор параметров на основе инженерного опыта [3–5]. В последнее время для проектирования электровакуумных СВЧ-приборов предпринимаются попытки применения метаэвристических алгоритмов, таких, как методы роя частиц (МРЧ) и генетические алгоритмы (ГА) [6–8]. Однако существующие реализации не всегда учитывают в полной мере релятивистские эффекты и эффект возвратных электронов, критически важные для мощных приборов.

Таким образом, существует потребность в создании специализированного программного инструмента, который бы объединял физическое моделирование динамики релятивистского пучка с современными методами многокритериальной оптимизации, предназначенного для задач проектирования многорезонаторных клистронов.

В данной работе предложена методика интеграции расчётного ядра одномерной программы моделирования динамики релятивистского электронного потока в клистроне с учётом эффекта возвратных электронов AJDisk и алгоритма многокритериальной оптимизации NSGA-II [9, 10]. В программе реализована разработанная система штрафных функций и ограничений, адекватно отражающая физические и конструктивные ограничения задачи, такие, как предельные напряжения на зазорах резонаторов и габариты пролётных труб. Программа позволяет строить фронт Парето для конфликтующих целевых функций и находить компромиссные решения в процессе проектирования клистронов. Комплекс реализован с поддержкой массового параллелизма.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Расчёт в разработанном комплексе реализован по двухуровневой схеме. На нижнем уровне производится моделирование физических процессов в клистроне с помощью внешнего расчётного ядра. На верхнем – многокритериальный генетический алгоритм управляет пространством параметров, итеративно запуская расчёты и оценивая полученные решения.

Физическое моделирование клистрона основано на реализованной в AJDisk самосогласованной нелинейной одномерной модели взаимодействия электронного потока, представленного в форме дисков или колец, с полями резонаторов, представленными гауссовой аппроксимацией. Основу модели составляет система уравнений движения электронов в пролётных каналах и зазорах резонаторов, а также уравнений расчёта пространственного заряда дисков и полей зазоров резонаторов в следующей форме [11, 12]:

$$\begin{cases} \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{q}{\gamma^3 m} (E_{cav} + E_{spch}), \\ E_{cav} = |U_n| f(z) \cos(2\pi ft + \theta), \\ E_{spch} = -\frac{Q_{disk}}{2\pi\epsilon_0 b^2} \sum_{k=0}^{N_{disk}} \sum_{i=0}^{\infty} 4 \left[\frac{J_1(\mu_i \frac{b}{a})}{\mu_i J_1(\mu_i)} \right]^2 e^{\left(\frac{-\mu_i |z-z_0|}{\beta a} \right)} \text{sign}(z-z_0), \end{cases} \quad (1)$$

где γ – релятивистский фактор Лоренца; E_{cav} – электрическое поле зазоров резонаторов; E_{spch} – поле пространственного заряда со стороны других дисков; $f(z)$ – гауссова аппроксимация формы напряженности электрического поля; a – радиус пролётного канала; b – радиус потока; μ_i – i -й ноль функции Бесселя J_0 ; β – постоянная распространения.

Расчёт наведённого тока и напряжения в резонаторе, а также мощности электронно-волнового взаимодействия и выходных параметров клистрона проводится по методу, описанному в работах [11, 12]. Эффект возвратных электронов моделируется путём отслеживания частиц, изменивших направление движения на противоположное, и учёта их вклада в пространственный заряд и энергетический баланс.

Интеграция разработанного программного комплекса с ядром программы AJDisk реализована по схеме «вызовы внешнего исполняемого файла – возврат результата». Программа-оптимизатор автоматически генерирует набор входных файлов для программы AJDisk с текущими наборами варьируемых параметров клистрона: $X_i = (L_1, L_2, \dots, f_1, f_2, \dots, U_0, I_0, P_{bx})$. Далее вызывается исполняющий модуль AJDisk, который производит расчёт и записывает результаты в выходной файл. Программа анализирует этот файл, извлекая значения целевых функций $F(X_i) = (\eta_e, L_\Sigma, \dots)$, которые затем передаются алгоритму оптимизации. Задача оптимизации была сформулирована в следующем виде: найти вектор управляемых параметров X , доставляющий Парето-оптимальное решение для вектора целевых функций $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X))^T$, при наличии ограничений: $g_j(X) \leq 0, j = 1, \dots, m$ – и граничных условий: $X_i^{low} \leq X_i \leq X_i^{up}$. В работе в качестве целевых функций рассматривались $f_1(X) = \eta_e(X)$ – электронный КПД и $f_2(X) = L_\Sigma(X)$ – длина прибора. Для решения сформулированной задачи был выбран алгоритм NSGA-II вследствие его эффективности для многоэкстремальных задач и способности строить равномерно распределённый фронт Парето. Алгоритм был реализован с использованием пакета Optimization Toolbox среды MATLAB.

Работа генетического алгоритма NSGA-II с физическим ядром была организована следующим образом. Вначале происходит процесс кодирования особи. Каждая особь в популяции представляет собой вектор вещественных чисел X , непосредственно соответствующих варьируемым параметрам клистрона. Затем для каждой особи X_i запускается процесс с расчётным ядром. Возвращаемые значения η_e, L_Σ и др. преобразуются в вектор целей $F(X_i)$. Ограничения, такие, как максимальное напряжение на зазоре, максимальная длина пролётных труб, наличие возвратных электронов, реализованы с помощью механизма штрафных функций. Решения, нарушающие ограничения, получают худшие значения ранга и расстояния до соседних популяций, что эффективно исключает их из числа перспективных. Размер популяции установлен на уровне 30 особей, что является компромиссом между разнообразием и вычислительными затратами на одну итерацию, однако пользователь может менять это значение. Использованы одноточечный кроссовер, в котором параметры родителей комбинируются для создания новых наборов, и аддитивная мутация.

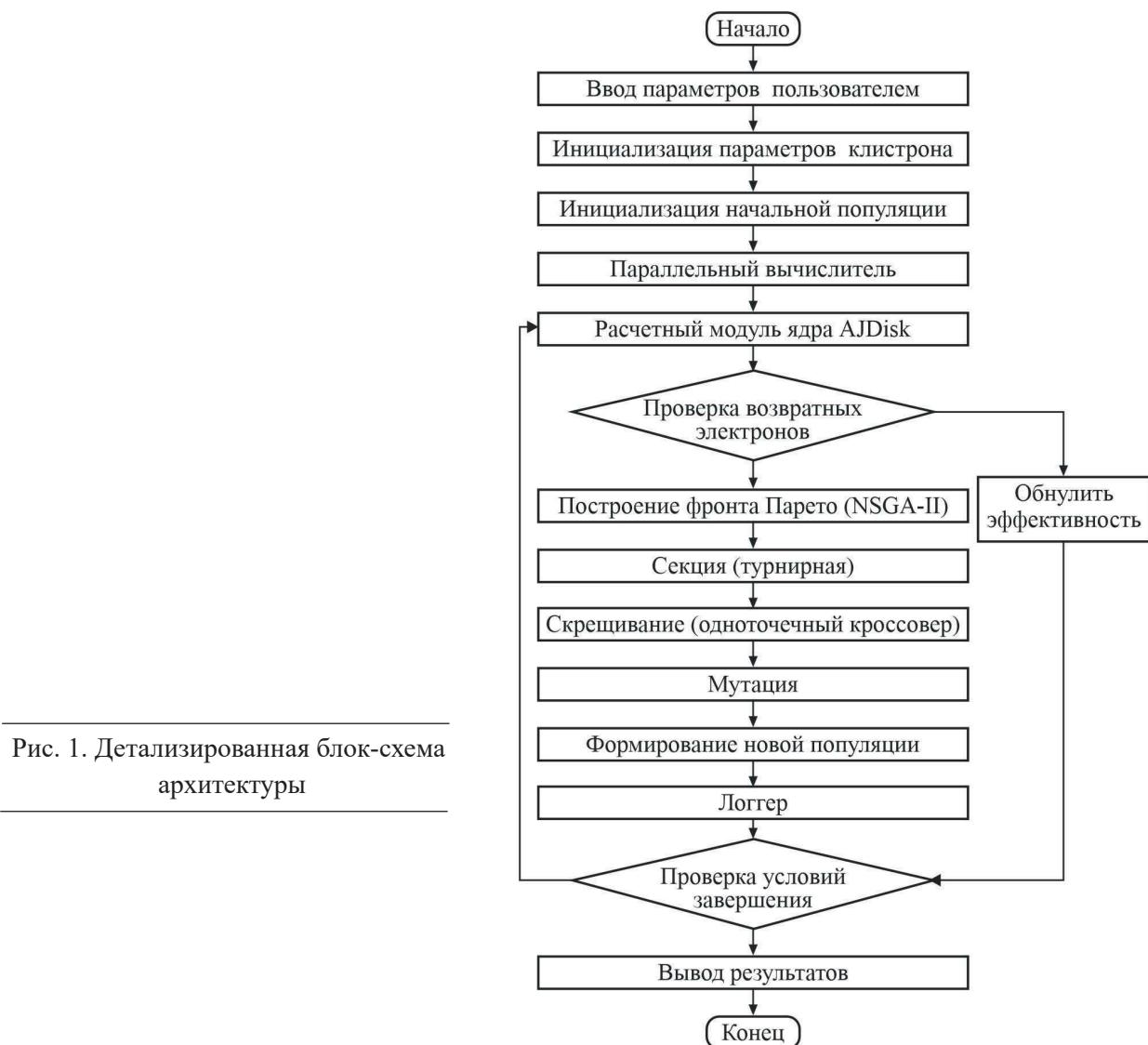
Генетический алгоритм, используемый в задаче оптимизации, идеально подходит для распараллеливания, так как оценки приспособленности каждой особи являются независимыми задачами. Реализация с помощью пакета Parallel Computing Toolbox среды MATLAB позволила распределять выполнение множества вызовов AJDisk по ядрам центрального процессора, тем самым ускорить расчётное время.

3. АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Разработанный программный комплекс представляет собой приложение с графическим интерфейсом пользователя, реализованное на платформе MATLAB с использованием инструмента App Designer. Выбор данной платформы обусловлен её мощными встроенными возможностями для численных расчётов, оптимизации и параллельных вычислений, что позволило сосредоточиться на реализации предметной логики, а не на разработке низкоуровневых библиотек.

Помимо оптимизации, разработанная программа позволяет проводить расчёт клистрона на рабочей частоте или в полосе частот, а также строить фронт Парето. По результатам расчёта дисковой модели электронного потока проводится построение зависимостей выходной от входной мощности, усиления в полосе частот, относительных скоростей, фазовых характеристик группировки дисков, а также относительных амплитуд гармоник тока вдоль пространства взаимодействия клистрона.

Архитектура комплекса построена по модульному принципу, что обеспечивает простоту сопровождения, тестирования и дальнейшего развития (рис. 1).



Центральным элементом является менеджер оптимизации, который координирует работу всех модулей. Ключевым исполнительным модулем является расчётный модуль, отвечающий за интеграцию с расчётым ядром программы AJDisk. Его работа построена следующим образом. Принимает на вход вектор параметров от менеджера оптимизации. Генерирует текстовый файл в строго определённом формате, совместимом с AJDisk. Вызывает консольную команду для запуска исполняемого файла с аргументом сгенерированного ранее текстового файла. Ожидает завершения расчёта и считывает выходной файл. Анализирует результаты, извлекая численные значения целевых функций и проверяя флаги ошибок. Возвращает вектор $F(X)$ менеджеру. Модуль ограничений реализует механизм штрафных функций. Если расчётный модуль вернул флаг ошибки или значение, нарушающее ограничение, этому решению вручается «штрафная» приспособленность, например КПД, близкий к нулю, что приводит к его исключению из дальнейшей эволюции. Модуль протоколирования отвечает за запись всех действий, а также входных и выходных параметров для каждой особи в каждом поколении. Все данные записываются в структурированный текстовый лог-файл, что обеспечивает полную воспроизводимость любого расчёта и возможность посттестового анализа. Модуль визуализации в реальном времени строит график фронта Парето в координатах выбранных целевых функций. По выбору пользователя он может отображать фазовые и скоростные характеристики, спектры тока и АЧХ для любой особи из текущей или прошлых популяций.

Функциональные возможности программы структурированы по этапам работы. На первоначальном этапе задаются и сохраняются конфигурации будущей оптимизации. Затем следует этап валидации введённых пользователем данных и их проверка на корректность. После этого наступает этап многокритериальной оптимизации с полным циклом по алгоритму NSGA-II, при этом автоматически создается набор расчётов файлов с распараллеливанием и распределением особей по ядрам центрального процессора. Для предотвращения аварийного завершения расчёта AJDisk проводится корректная обработка сбоев без падения всей программы. На этапе постобработки осуществляется анализ результатов, сортировка и фильтрация решений на фронте Парето, экспорт оптимальных конфигураций параметров для дальнейшего анализа.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка корректности работы оптимизационного алгоритма потребовала проведения комплекса процедур верификации. Для этого в представленной программе-оптимизаторе были определены оптимальные параметры пространства взаимодействия пятирезонаторного сверхмощного однолучевого клистрона S -диапазона с расчётыми ускоряющим напряжением $U_0 = 250$ кВ и током пучка $I_0 = 225$ А [13]. Оптимизация клистрона проводилась по двенадцати параметрам. Было проведено десять тысяч расчётов. Временные затраты с учётом распараллеливания на восьми ядрах персонального компьютера составили около 40 мин.

Верификация направлена на проверку того, что результаты соответствуют результатам эксперимента и используемая физическая модель адекватно описывает реальные процессы в клистроне. На фронте Парето была выбрана точка, соответствующая требуемой длине пространства взаимодействия (рис. 2).

Для выбранной точки частоты резонаторов и длины пролётных труб использовались при изготовлении макета клистрона. Испытания проводились на стенде, включающем источник высоковольтного питания, соленоид для создания фокусирующего магнитного поля, измеритель мощности СВЧ, векторный анализатор цепей для снятия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Были измерены выходная мощность и КПД в номинальном режиме, а также снята АЧХ. Результат сравнения рассчитанных и экспериментальных данных для зависимостей КПД от приведённого к расчётному U_0 ускоряющему напряжению с указанием области рабочих напряжений представлен рис. 3 и в таблице.

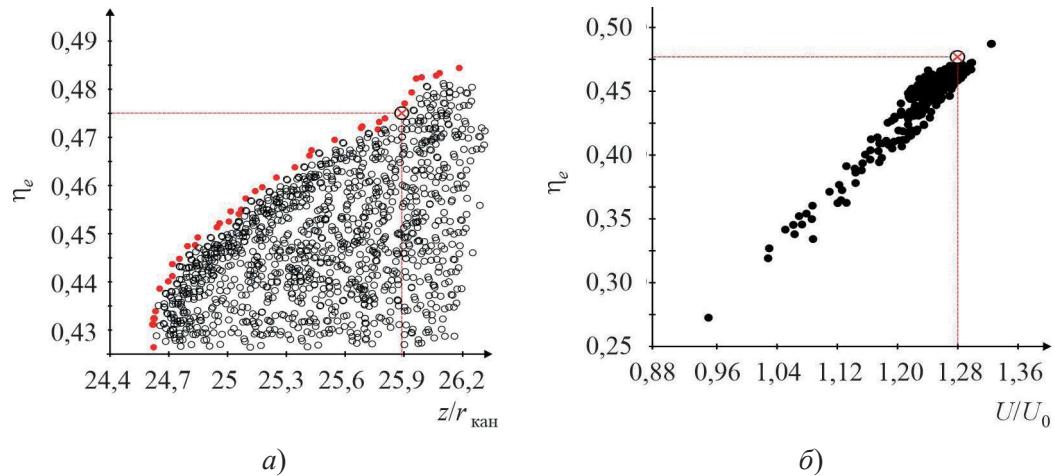
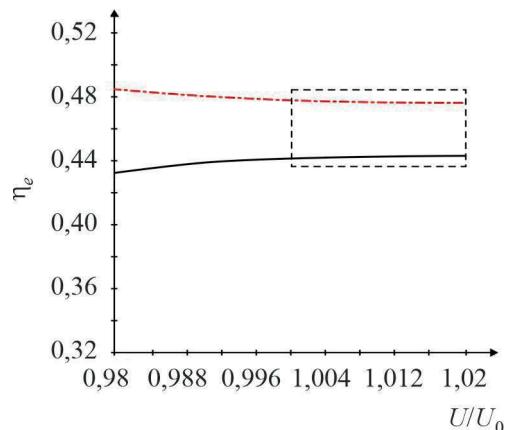


Рис. 2. Фронт Парето, полученный при оптимизации пространства взаимодействия клистрона, и выбранная на нем точка:

a – зависимость КПД η_e от длины пространства взаимодействия z , приведенной к радиусу канала $r_{\text{кан}}$; *б* – зависимость КПД η_e от напряжения на зазоре выходного резонатора U , приведенного к ускоряющему напряжению U_0

Рис. 3. Сравнение зависимостей электронного КПД от относительного ускоряющего напряжения:

сплошная линия – эксперимент; штрихпунктир – расчёт в разработанной программе; пунктир – область рабочих напряжений клистрона



Сравнение расчётов пространства взаимодействия в программе-оптимизаторе и экспериментального макета сверхмощного клистрона

Результат	Ток пучка I_0 , А	Ускоряющее напряжение U_0 , кВ	Входная мощность $P_{\text{вх}}$, кВт	КПД	Выходная мощность $P_{\text{вых}}$, МВт
Расчёт	225	250	1600	47,8	26,9
Эксперимент	226	255	1586	44	25,3

Учитывая, что в программе используется ядро приближенной одномерной дисковой модели AJDisk, сравнение расчёта с экспериментом показывает хорошее соответствие результатов. Так, расхождение результатов расчёта с экспериментом по значению КПД составило менее 5 %. Несмотря на указанные различия результатов, их величина находится в пределах допустимого для инженерных расчётов подобного уровня сложности и подтверждает адекватность выбранной математической модели для задач оптимизации. Высокий расчётный КПД обусловлен выбором оптимального набора параметров, который обеспечил эффективный процесс группирования электронного потока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемая в представленной программе методика многокритериальной оптимизации электровакуумных приборов СВЧ позволяет на эскизном этапе в автоматическом режиме получать набор оптимальных решений, сокращая время и трудозатраты на проектирование кластронов. Учёт ограничений, исключающий из рассмотрения физически нереализуемые решения, вместе с распараллеливанием вычислений делают процесс оптимизации практически осуществимым. Адекватность используемой математической модели и корректность разработанного комплекса подтверждаются минимальным (менее 5 %) расхождением между расчётом и экспериментом по КПД для сверхмощного кластрона, что приемлемо для расчётов в рамках одномерной математической модели.

Использованный при создании программного комплекса подход имеет ряд ограничений. Поскольку при описании взаимодействия электронного потока с полями резонаторов используется одномерная модель, то нет возможности учесть пространственное распределение поля и поперечное движение электронов, что может быть значимо для многолучевых конфигураций или резонаторов сложной формы. Полученные в программе результаты являются оптимальными только в пределах заданных ограничений на варьируемые параметры.

На представленный программный комплекс получено свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ № 2025615269 от 31.01.2025.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов, Л. М. Мощные и сверхмощные СВЧ-источники: от кластронов до нового класса приборов / Л. М. Борисов, Г. П. Щелкунов // Электроника НТБ. – 2012. – № 4. – С. 58 – 64.
2. Перспективы развития многолучевых кластронов / И. А. Фрейдович, А. К. Балабанов, П. И. Акимов [и др.] // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2014. – С. 25 – 31.
3. Пролетный кластрон с высоким КПД. Некоторые вопросы теории и эксперимента / В. А. Кочетова, В. И. Кучугурный, С. В. Лебединский [и др.] // РиЭ. – 1981. – Т. XXVI, № 1. – С. 139 – 145.
4. Оптимальный кластрон / Д. А. Комаров, А. Н. Юнаков, А. В. Мамонтов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2025. – Вып. 1 (565). – С. 73 – 80.
5. Байков, А. Ю. Моделирование условий достижения максимального КПД в кластронах дециметрового диапазона / А. Ю. Байков, О. А. Грушина, М. Н. Стриханов // ЖТФ. – 2014. – Т. 84. – С. 113 – 119.
6. Пантелеев, А. В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума / А. В. Пантелеев. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – 160 с.

7. Казакова, Е. М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц / Е. М. Казакова // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 39, № 2. – С. 150 – 174.
8. Simulation of the second and third harmonic cavity relativistic klystron amplifier with a genetic algorithm in S-band / L. Sun, H. Huang, S. Li [et. al.] // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC). – 2023. – P. 823 – 824.
9. Sheet beam klystron simulation using AJDISK / A. Jensen, G. Caryotakis, G. Scheitrum [et. al.] // IEEE Vacuum Electronics. – April 25–27, 2006. – P. 489 – 490.
10. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA II / K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap [et. al.] // In Proc. of the Parallel Problem Solving from Nature VI. – 2000. – 849 – 858.
11. Tallerico, P. J. Design considerations for the high-power multicavity klystron / P. J. Tallerico // IEEE Trans. Electron Devices. – June 1971. – Vol. ED-18. – P. 374 – 382.
12. Kageyama, T. A large-signal analysis of broad-band klystrons with design applications / T. Kageyama, Y. Morizumi, E. Watanabe // IEEE Trans. Electron Devices. – Jan. 1977. – Vol. ED-24. – P. 3 – 12.
13. Опыт моделирования сверхмощного клистрона с неоднородным постоянным фокусирующим магнитным полем / А. Н. Юнаков, К. Г. Симонов, Д. А. Комаров, Н. А. Голованов // Сборник статей XIV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2025. – С. 173 – 176.

Статья поступила 2 сентября 2025 г.

===== НОВЫЕ КНИГИ =====

Инженерная вакуумная техника: учебное пособие / Е.А. Деулин, М.С. Басманов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 296 с.

Изложены основные положения физики вакуума, описание и принципы работы элементов вакуумного оборудования (вакуумных насосов, манометров, фланцев, электрических и механических вводов в вакуум и др.), работающих в высоком и сверхвысоком вакууме. Приведено описание лабораторных работ по практическому освоению вакуумной техники. Для студентов и инженеров, связанных с вакуумной техникой.

621.372.85

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ВЫВОДОВ СВЧ-ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Е. В. Медянкова, А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, А. Н. Савин

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

Рассмотрены перспективные оригинальные конструкции выводов СВЧ-энергии, позволяющие улучшить электрические и энергетические параметры электровакуумных приборов (ЭВП). Приведены результаты исследования электродинамических характеристик предложенных конструкций выводов СВЧ-энергии. Даны рекомендации по применению их в различных по уровню выходной мощности ЭВП.

КС: вывод СВЧ-энергии, ширина рабочей полосы частот, электродинамические характеристики

PROMISING DESIGNS OF BROADBAND MICROWAVE ENERGY OUTPUTS FOR ELECTROVACUUM DEVICES

E. V. Medyankova, A. V. Galdetsky, E. A. Bogomolova, A. N. Savin

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

The promising original designs of microwave energy outputs have been considered which makes it possible to improve the electric and energy parameters of electrovacuum devices (EVDs). The results of studying the electrodynamic characteristics of the proposed designs of microwave energy outputs are presented. Recommendations are given on using EVDs with different output power levels.

Keywords: microwave energy output, operating frequency bandwidth, electrodynamic characteristics

1. ВВЕДЕНИЕ

ЭВП играют ключевую роль в генерации и усилении СВЧ-энергии. Несмотря на развитие твердотельной электроники, они сохраняют свои позиции в приложениях, требующих высокой мощности и устойчивости к воздействию внешних факторов [1–3].

Одним из важнейших элементов ЭВП является вакуумно-плотный вывод СВЧ-энергии, обеспечивающий эффективную передачу генерируемой энергии в нагрузку. Разработка перспективных конструкций выводов энергии является актуальной задачей, направленной на улучшение характеристик ЭВП и расширение области их применения.

Основными характеристиками вакуумно-плотных выводов являются рабочий диапазон частот, связанные с передачей больших уровней мощности электрическая и механическая прочности, термостойкость. Существующие конструкции широкополосных выводов, как правило, основаны на окнах бандочного типа, представляющих собой отрезок круглого волновода с поперечной диэлектрической перегородкой и соосно подсоединенными к торцам стандартными прямоугольными волноводами (рис. 1). Они получили широкое распространение благодаря простоте и технологичности конструкции, широкополосности, относительной компактности [4–7].

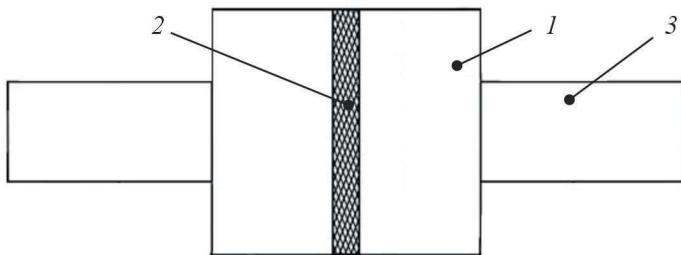


Рис. 1. Базовая конструкция баночного окна:

1 – отрезок круглого волновода; 2 – диэлектрическая перегородка; 3 – прямоугольные волноводы

Наиболее часто в данных конструкциях вывода энергии для мощных ЭВП используют типы волн TE_{11} , TM_{11} круглого волновода или их комбинацию [7]. Однако такие технические решения имеют ограничения по полосе пропускания, мощности и габаритам.

В данной работе представлены некоторые конструкции вакуумно-плотных выводов энергии, позволяющие преодолеть вышеуказанные ограничения. Предложенный обзор не претендует на полноту освещения всех имеющихся конструкций выводов СВЧ-энергии, поскольку основывается в основном на работах авторов и созданных ими охраноспособных результатах интеллектуальной деятельности.

2. КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНО-ПЛОТНЫХ ВЫВОДОВ СВЧ-ЭНЕРГИИ МОЩНЫХ ЭВП

Конструкция вакуумно-плотного баночного окна на смешанной mode ($TE_{11} + TM_{11}$)

Традиционные баночные выводы энергии с рабочим типом волны TE_{11} в круглом волноводе позволяют обеспечить в широкой полосе частот пропускание значительных уровней импульсных и непрерывных СВЧ-мощностей, т. к. сильный нагрев керамического диска за счёт диэлектрических потерь происходит в большой области его поверхности, что позволяет эффективно отводить тепло на стенки круглого волновода. При этом длина всего отрезка круглого волновода (в основном определяющая продольные габаритные размеры баночного вывода) составляет примерно половину длины волны типа TE_{11} в нём.

Однако, как показано в [8, 9], для обеспечения максимальной беспаразитной рабочей полосы частот диаметр керамического диска (при использовании керамики с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9 \dots 10$) получается, как правило, меньше диагонали поперечного сечения используемого в мощных приборах СВЧ прямоугольного волновода, что технологически неудобно.

Также в таких баночных окнах достаточно велика тангенциальная составляющая электрического поля на поверхности керамического диска, в месте его соединения с круглым волноводом. Это соединение обычно осуществляется пайкой, что приводит к значительному снижению пробивной напряженности электрического поля в области спая из-за технологических особенностей.

В работе [10] для решения указанных проблем предложено использовать для передачи СВЧ-энергии в баночном выводе комбинацию из двух распространяющихся типов волн (TE_{11} и TM_{11}) полого круглого волновода, что при подобранных определённым образом размерах вывода должно приводить к снижению (вплоть до ноля) тангенциальной составляющей электрического поля на краю керамического диска (в области спая) и соответственно увеличению максимальной передаваемой мощности. Однако это достигается за счет значительного увеличения габаритов.

В разработанной конструкции баночного окна вывода СВЧ-энергии [11], представленной на рис. 2, предложено использовать комбинацию из двух типов волн: TE_{11} и TM_{11} , где тип волны TE_{11} является распространяющимся, а тип волны TM_{11} – затухающим. Разработанная на основе данного принципа конструкция вывода энергии [11] имеет существенно меньшие габариты по сравнению с [10].

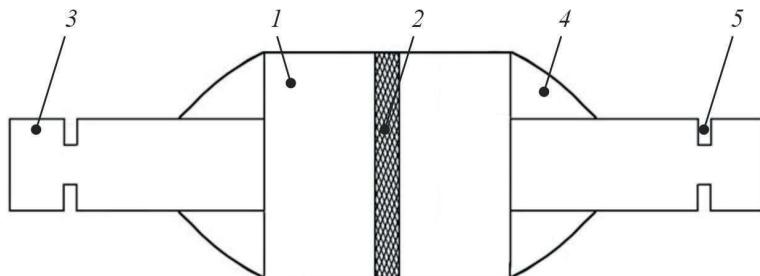


Рис. 2. Конструкция баночного окна на смешанной моде (TE_{11} и TM_{11}):

1 – отрезок круглого волновода; 2 – диэлектрическая перегородка; 3 – прямоугольные волноводы; согласующие элементы – усеченные конусы 4 и индуктивные диафрагмы 5

Конструкция представляет собой отрезок круглого волновода, в поперечной плоскости которого равноудаленно от его торцов расположена диэлектрический диск, вакуумно-плотно спаянный со стенкой отрезка круглого волновода, а также первый и второй отрезки прямоугольных волноводов, расположенные соосно с отрезком круглого волновода и присоединенные к нему с противоположных торцов. Кроме того, баночное окно содержит дополнительные согласующие элементы, выполненные в виде усеченных конусов и индуктивных диафрагм, расположенных во входном и выходном прямоугольных волноводах.

Дополнительное введение согласующих элементов в виде усечённых конусов на входе и выходе баночного окна позволяет расширить рабочую полосу частот. Индуктивные согласующие элементы в виде индуктивных диафрагм позволяют практически полностью убрать отражения в рабочей полосе частот.

Предложенная конструкция (см. рис.2) имеет возможность настройки устройства в процессе его изготовления [12, 13]. Параметры диэлектрического диска и размеры баночного окна подбираются таким образом, чтобы минимизировать диэлектрические потери в диске. При этом тангенциальные компоненты напряжённости электрического поля на краю (в области спая) уменьшаются в 1,5...2 раза по сравнению с традиционными баночными выводами энергии СВЧ, работающими на типе TE_{11} , а в центре поверхности диэлектрического диска тангенциальная компонента напряжённости электрического поля остается неизменной. В этом случае резонансная частота волны типа TM_{11} круглого волновода с диэлектрическим диском располагается на 3,9 % выше рабочей частоты, что обеспечивает надежную работу узла.

Технические решения относительно конструкции, изготовления и настройки баночного окна охраняются патентами РФ на изобретение [11, 13].

Конструкция вакуумно-плотного баночного окна на смешанной моде ($TE_{11} + TM_{11}$) с волноводным резонатором

Дальнейшие исследования возможности получения более широкой полосы рабочих частот привели к конструктивному решению, в котором хотя бы в одном из отрезков прямоугольных волноводов размещен волноводный резонатор (рис. 3).

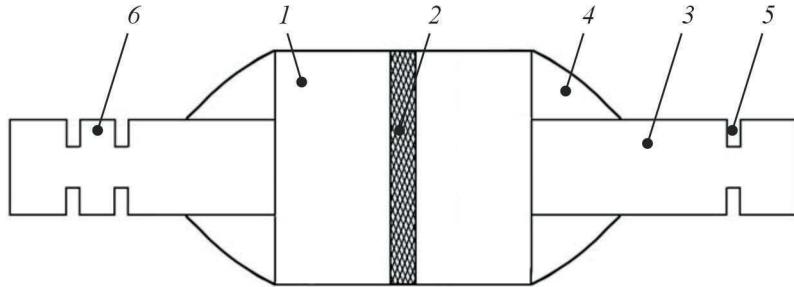


Рис. 3. Конструкция баночного окна на смешанной моде (TE_{11} и TM_{11}) с волноводным резонатором:

1 – отрезок круглого волновода; 2 – диэлектрическая перегородка; 3 – прямоугольные волноводы; согласующие элементы – усеченные конусы 4 и индуктивные диафрагмы 5; 6 – волноводный резонатор

Отрезки прямоугольного волновода связаны с волноводным резонатором индуктивными диафрагмами. Оптимальный размер щелей связи рассчитывается методами численного моделирования для обеспечения минимальных потерь энергии сигнала и подавления внеполосных и побочных колебаний в рабочей полосе частот. Расширенный рабочий диапазон устройства определяется длиной секции резонатора и размером щели связи.

Дополнительные резонаторы вместе с баночным окном образуют фильтровую систему, полоса частот которой определяется числом звеньев.

Техническое решение относительно этой конструкции баночного окна охраняется патентом РФ на изобретение [14].

Конструкция вакуумно-плотного окна вывода СВЧ-энергии

В лазерной технике широко применяется конструкция вакуумно-плотного окна вывода энергии с диэлектрической пластиной, установленной под углом Брюстера (рис. 4).

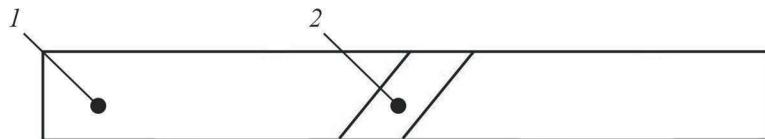


Рис. 4. Базовая конструкция вакуумно-плотного окна вывода энергии с диэлектрической пластиной, установленной под углом Брюстера:

1 – отрезок прямоугольного волновода; 2 – диэлектрическая пластина

Исследование возможности расширения рабочей полосы брюстеровского окна привело к модернизации конструкции [15] – в прямоугольном волноводе размещены дополнительные индуктивные или емкостные диафрагмы (рис. 5).

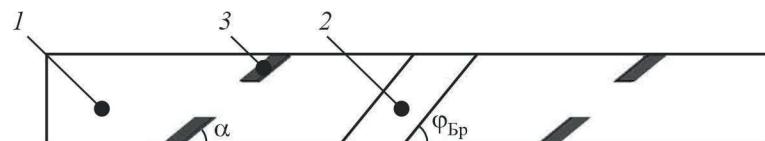


Рис. 5. Модернизация конструкции брюстеровского окна:

1 – отрезок прямоугольного волновода; 2 – диэлектрическая пластина; 3 – диафрагма

Емкостная диафрагма сформирована пластинами, расположенными под углом $\alpha = 90^\circ - \varphi_{\text{бр}}$ к широкой стенке волновода, что позволяет уменьшить отражение электромагнитной волны от диэлектрической пластины. Емкостной зазор между пластинами образует элемент связи, что приводит к расширению полосы частот. Такой элемент связи технологичен в изготовлении.

Для обеспечения максимального прохождения электромагнитной волны через диэлектрическую пластину ее электрическая толщина должна быть равна или кратна половине длины волны в диэлектрике. Использование индуктивных диафрагм дает преимущество по большей электропрочности окна.

Использование прямоугольного волновода стандартного сечения облегчает задачу получения сильной связи с резонаторными системами прибора, а в ряде случаев и задачу конструирования фокусирующей магнитной системы ЭВП СВЧ.

На разработанную конструкцию вывода СВЧ-энергии подана заявка на изобретение № 2025112924 с приоритетом от 16.05.2025.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДСТАВЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫВОДОВ СВЧ-ЭНЕРГИИ

Оценка электродинамических характеристик перспективных конструкций широкополосных выводов СВЧ-энергии осуществлялась с помощью математического 3D-моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов в установившемся (стационарном) режиме. С целью выявления критических областей с точки зрения возникновения высокочастотных пробоев и перегревов, приводящих к нарушению работы устройства, исследовались распределения электромагнитных полей.

Электродинамические характеристики вакуумно-плотного баночного окна на смешанной mode ($TE_{11} + TM_{11}$)

Частотные зависимости КСВН входа широкополосного вывода СВЧ-энергии на смешанной mode ($TE_{11} + TM_{11}$) приведены на рис. 6.

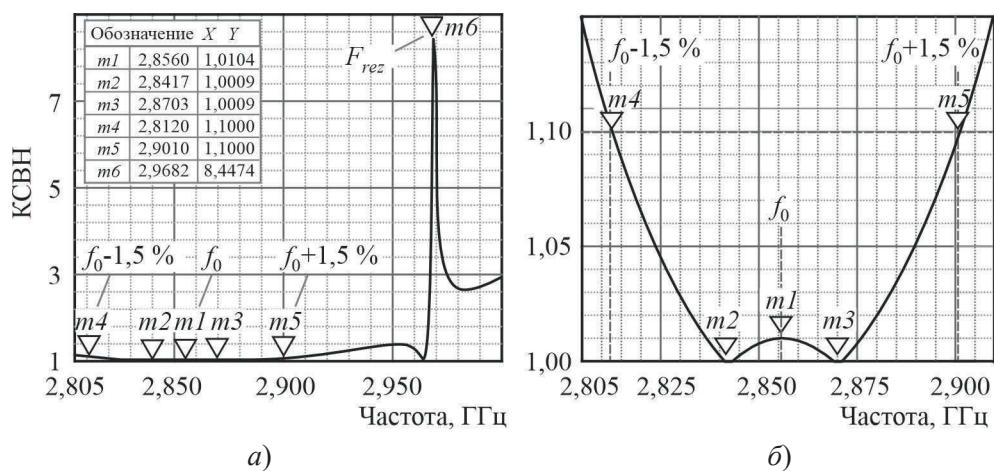


Рис. 6. Зависимости КСВН входа баночного окна вывода энергии СВЧ
в широкой (а) и рабочей (б) полосах частот

Маркер $m1$ указывает на рабочую частоту $f_0 = 2,856$ ГГц. Маркеры $m2$ и $m3$ определяют 1%-ную полосу частот симметрично относительно рабочей частоты. Маркеры $m4$ и $m5$ – рабочую полосу частот по уровню КСВН не более 1,1.

Пик КСВН на частоте $F_{rez} = 2,9682$ ГГц (маркер $m6$ на рис. 6, а) соответствует паразитной резонансной частоте волны типа TM_{11} круглого волновода с диэлектрическим диском. Располагается он на 3,9 % выше рабочей частоты $f_0 = 2,856$ ГГц, что, по сравнению с классической конструкцией [6], не является критичным для сверхмощных кристаллонов, имеющих, как правило, полосу усиливаемых частот $\leq 1,5\%$.

Как видно из графика (см. рис. 6, б), КСВН входа баночного окна на рабочей частоте f_0 и на границах полосы частот (1 %) имеет величину менее 1,01. Рабочая полоса частот по уровню КСВН не более 1,1 составляет 3 %, что больше в 3 раза относительно [6].

Для данной конструкции баночного окна значение F_{rez} на 3,9 % выше f_0 , обеспечивает минимум диэлектрических потерь в диске и близкую к минимуму максимальную напряжённость электрического поля во всём окне. При этом мощность диэлектрических потерь в керамическом диске уменьшилась в 1,8 раза по сравнению с прототипом. Частотные зависимости указанных величин в 3%-ной рабочей полосе при входной мощности 20 МВт приведены на рис. 7.

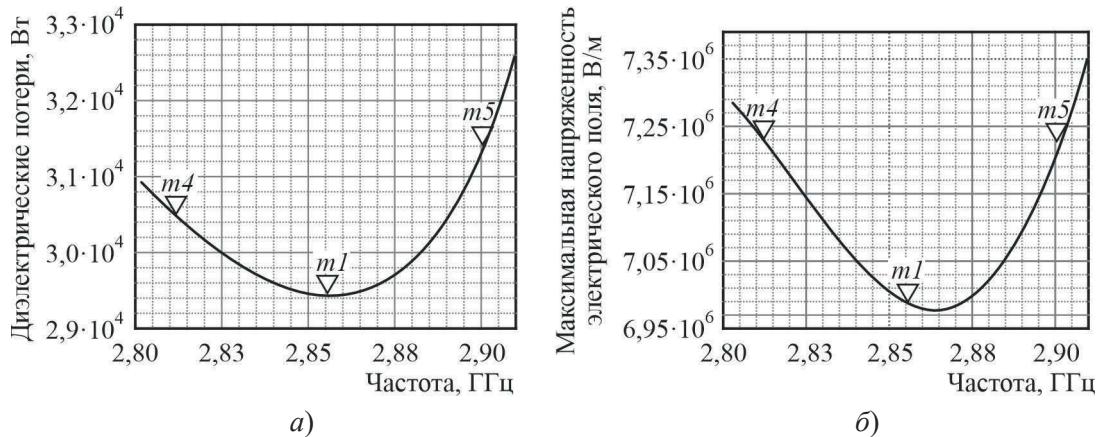


Рис.7. Частотные зависимости в рабочей полосе мощности диэлектрических потерь в керамическом диске (а) и максимальной напряжённости электрического поля (б) в баночном окне вывода энергии СВЧ

Данная конструкция баночного окна вывода энергии СВЧ в 3%-ной рабочей полосе частот позволяет пропускать мощность до 50 МВт [15, 16].

Электродинамические характеристики вакуумно-плотного баночного окна на смешанной mode ($TE_{11} + TM_{11}$) с волноводным резонатором

Волноводный резонатор определяет форму АЧХ в полосе пропускания и ширину рабочей полосы устройства, исключая внеполосную передачу побочных гармоник между входным и выходным прямоугольными волноводами.

Частотные зависимости КСВН входа баночного окна вывода энергии СВЧ приведены на рис. 8, рабочая полоса частот определена по уровню КСВН не более 1,1 (серая линия для конструкции без резонатора, черная линия – для конструкции с волноводным резонатором).

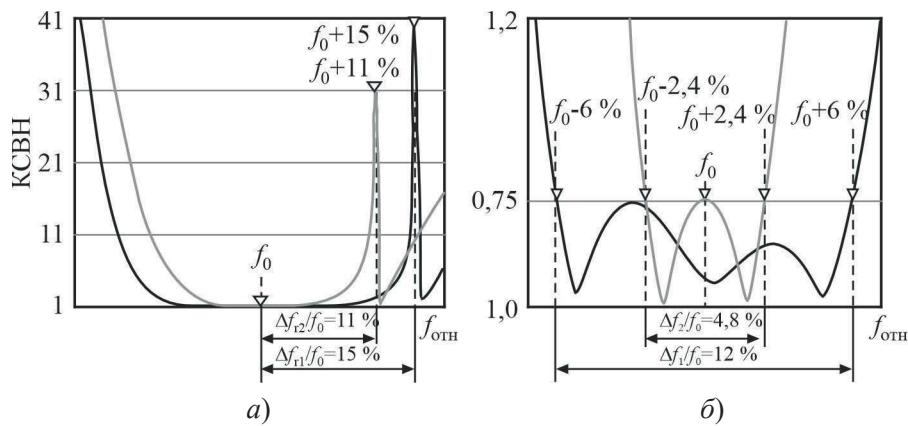


Рис. 8. Зависимости КСВН входа баночного окна вывода энергии СВЧ в широкой (а) и рабочей (б) полосах частот

Пик КСВН на рис. 8, а (черная линия) соответствует паразитной резонансной частоте волны типа TM_{11} круглого волновода с диэлектрическим диском. Анализ графика (см. рис. 8, б, черная линия) КСВН ввода и/или вывода СВЧ-энергии позволяет увидеть увеличение рабочей полосы частот с 4,8 до 12 % при введении в конструкцию волноводного резонатора.

Электродинамические характеристики вакуумно-плотного окна вывода СВЧ-энергии

Частотные зависимости КСВН входа окна вывода энергии СВЧ приведены на рис. 9, рабочая полоса частот определена по уровню КСВН не более 1,1. Введение в конструкцию дополнительных емкостных диафрагм позволяет расширить рабочую полосу частот устройства до 14 %, по сравнению с полосой 9,5 % классической конструкции, а также сдвинуть вверх паразитную резонансную частоту.

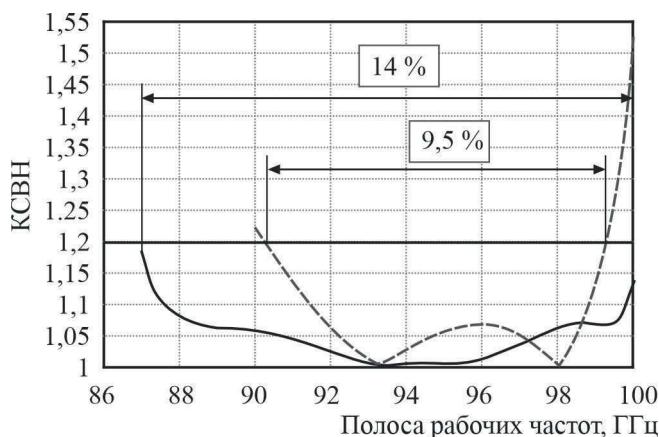


Рис. 9. Зависимости КСВН вакуумно-плотного окна ввода и/или вывода СВЧ-энергии в рабочей полосе частот:
сплошная черная линия – брюстеровское окно с металлическими гребенками;
пунктирная серая линия – брюстеровское окно

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор некоторых перспективных конструкций вакуумно-плотных окон вывода СВЧ-энергии, обеспечивающих улучшенные электродинамические характеристики как по рабочей полосе частот, так и по уровню передаваемой мощности.

Для мощных ЭВП (уровень выходной мощности – более 20 МВт) подходят конструкции окон баночного типа на смещенной моде, у которых паразитная резонансная частота волны TM_{11} круглого волновода с керамическим диском находится в области высоких частот (значительно выше рабочей полосы частот); максимальное электрическое поле расположено в области конусных переходов и является незначительным. При этом керамический диск находится в минимуме электрического поля всего окна, что значительно снижает диэлектрические потери, приводящие к нагреву диска, и соответственно вероятность пробоев в нём. Максимальный поверхностный ток протекает по торцевым поверхностям согласующих индуктивных диафрагм, хорошо отводящих тепло. В области спая керамического диска магнитные поля и соответственно поверхностные токи имеют незначительные величины.

Для ЭВП средней мощности миллиметрового диапазона использование конструкции окна с брюсторовским углом позволяет получить более широкую полосу частот, при этом используется волновод стандартного сечения. Толщина диэлектрической пластины выбирается оптимальной для получения требуемых электродинамических характеристик и надёжного металлокерамического соединения. Однако в данных конструкциях отсутствуют элементы для компенсации влияния на АЧХ технологических отклонений свойств керамики и размеров элементов окна. Максимальные электрические поля располагаются в области спая боковых поверхностей керамической пластины и волновода и являются значительными, что повышает вероятность пробоев при передаче больших мощностей. В области спая керамической пластины магнитные поля и соответственно поверхностные токи имеют значительные величины, что также ограничивает использование данного окна при больших мощностях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faillon, G. J. THOMSON high peak power klystrons / G. J. Faillon // PS Klystron Modulator Technical Meeting. October 7th and 8th 1991. – Cern. – P. 239.
2. CHAPTER 5. X-band RF power sources // ISG Progress Report. – April, 2000. – P. 150 – 175.
3. / M. Yu. Glyavin [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol.100, No 1. – P. 015101. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>.
4. // ISG Progress Report. – April, 2000.
5. Волноводные окна баночного типа для широкополосных ЭВП СВЧ / В. М. Белугин, М. А. Мартыненко, Б. В. Прокофьев, М. И. Ярмоленко // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. 30 мая – 02 июня 2016. – https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2016/oral/03_6.pdf.
6. Сазонов, В. П. Выходные устройства мощных СВЧ электровакуумных приборов / В. П. Сазонов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 11. – С. 47 – 72.
7. Prokofiev, B. V. A simple pillbox-type mixed-mode window for high power microwave devices / B. V. Prokofiev, M. A. Martynenko // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 24–26 April 2017. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/8289511>.

8. **Курилов, Г. В.** О резонансных частотах видов колебаний в окнах выводов энергии «баночного» типа / Г. В. Курилов, В. П. Сазонов, Н. В. Антохина // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1970. – Вып. 9. – С. 36 – 44.
9. **Буянов, О. П.** Экспериментальная разработка вывода энергии СВЧ-прибора / О. П. Буянов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1969. – Вып. 4. – С. 171 – 173.
10. **Kazakov, S. Yu.** A new traveling-wave mixed-mode RF window with a low electric field in ceramic-metal brazing area / S. Yu. Kazakov // KEK preprint 98-120. – 1998. – Р. 1 – 4.
11. **Патент № 2802497 РФ.** Баночное окно вывода энергии СВЧ: бюл. № 25, 2023 / А. Б. Галдецкий, А. Н. Савин [и др.].
12. Способ изготовления и настройки баночного окна на смешанной моде ($TE_{11}+TM_{11}$) для ввода/вывода СВЧ-энергии / Е. В. Медянкова, Е. А. Богомолова, А. Н. Савин, Н. А. Голованов // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»: сб. докл. Санкт-Петербург. 27 мая – 31 июня 2024 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. – С. 405 – 408.
13. **Патент № 2822140 РФ.** Способ изготовления и настройки баночного окна ввода/вывода энергии СВЧ-прибора: бюл. № 19, 2024 / Е. А. Богомолова, А. Н. Савин, Е. В. Медянкова.
14. **Патент № 2839312 РФ.** Баночное окно вывода энергии СВЧ: бюл. № 13, 2025 / А. Б. Галдецкий, Е. А. Богомолова, А. Н. Савин, Е. В. Медянкова.
15. Electrodynamic characteristics of promising energy outputs of *W*-band high-power vacuum microwave devices / Evgenia A. Bogomolova [et al.] // Proceedings of the 2023 Conference of Russian Young Research in Electrical and Electronic Engineering (2023 El-ConRus), 24–27 January 2023, Russia. – Р. 910 – 912.
16. **Медянкова, Е. В.** Электродинамические характеристики и тепловой режим баночного окна вывода энергии ($TE_{11}+TM_{11}$) / Е. В. Медянкова, Е. А. Богомолова, А. Н. Савин // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»: сб. докл. Санкт-Петербург. 29 мая – 2 июня 2023 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – С. 523 – 527.

Статья поступила 15 июля 2025 г.

УДК 621.385.032

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДОМ КАТОДОВ М-ТИПА В ПРОЦЕССЕ НАРАБОТКИ

Т. М. Крачковская

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализа исследованы морфология, химический состав и толщина эмиссионной пленки металлопористых катодов М-типа (покрытие Os–Ir–Al), модифицированных полиздralльными наночастицами фуллероидного типа, тороидальной формы – астраленами в составе тугоплавкой матрицы и графеноподобной структурой – сульфоаддуктом нанокластеров углерода (углероном) в составе активного вещества, а также аналогичных катодов без модификации после разного времени наработки. Показано, что у катодов, модифицированных углероном и/или астраленами, скорость деградации эмиссионной поверхности в несколько раз ниже в зависимости от температуры испытаний, что позволяет значительно продлить срок службы катода.

КС: металлопористый катод М-типа, осмирование, долговечность, наноуглерод, астрален, углерон

STUDYING THE DEGRADATION OF THE EMISSION SURFACE OF M-TYPE CATHODES MODIFIED WITH NANOCARBON DURING THE OPERATING TIME PROCESS

Т. М. Krachkovskaya

JSC «RPE «Almaz», Saratov

Methods of scanning electron microscopy, X-ray structural analysis and X-ray fluorescence analysis were used to study the morphology, chemical composition and thickness of the emission film of metal-porous M-type cathodes (Os–Ir–Al coating), modified with polyhedral fulleroid-type toroidal nanoparticles – astralens in a refractory matrix and graphene-like structure – carbon nanocluster sulfoaddition (ugleron) in the active substance and similar cathodes without modification after different operating times. It has been shown that the degradation rate of the emission surface is several times lower in cathodes modified with ugleron and/or astralens, depending on the test temperature, which significantly extends the service life of the cathode.

Keywords: metal-porous M-type cathode, osmium-coating, durability, nano-carbon, astralen, ugleron

1. ВВЕДЕНИЕ

Серийно применяемыми источниками электронов в СВЧ-приборах являются в настоящее время металлопористые катоды (МПК) М-типа, имеющие на поверхности пленку металлов, относящихся к группе *d*-элементов, – прежде всего осмия, а также рутения, иридия или их сплавов [1–3]. Увеличение эмиссионных свойств катодов М-типа по сравнению с непокрытыми МПК (катод В-типа) в литературе объясняют разными факторами. В работах [1, 2] увеличение эмиссионной способности авторы связывают с уменьшением работы выхода таких катодов. Авторы [1] считают, что в осмированных МПК атомы осмия растворяются в кристаллитах BaO и формируют на по-

верхности кристаллитов дополнительные донорные поверхностные состояния, что приводит к искривлению энергетических зон оксида вниз и соответственно снижению работы выхода катодного материала. В свою очередь, в работе [3] повышение эмиссионной способности авторы связывают с увеличением эмитирующей площади катода за счет развитой пирамидальной структуры осмиевой пленки, которая приводит к появлению термополевой эмиссии с заостренных вершин пирамид. Кроме того, в литературе [2, 4] также указывается на снижение скорости испарения МПК М-типа по сравнению с катодами В-типа, что приводит к увеличению эмиссионной долговечности катодов. Значения скорости испарения $\text{Ba}+\text{BaO}$ в относительных единицах при температуре 1418 К составляют для катодов В-типа (с пористостью 20 % и пропиткой алюминатом $5\text{BaO}\cdot3\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3$) – 8,6, для катода М-типа (Os–Ru-пленка на катоде В-типа) – 0,8, катода М-типа через 6000 ч – 0,18.

В ряде работ [2, 3, 5–7] также исследуется динамика изменения морфологии и химического состава поверхности МПК М-типа на начальных стадиях прогрева катода, по мере активирования, а также в процессе длительной работы. Авторы [6] отмечают, что на начальных стадиях прогрева катода на поверхности образуется монолитная однокристальная осмиевая кора, имеющая сетку разломов с характерным размером 5…10 мкм и субструктуру зерен с характерным размером 2 мкм. По мере активирования цельность коры возрастает и у нормально активного МПК может иметь ограниченное число пор. Диффузионная подпитка эмитирующей поверхности барием осуществляется через разломы коры и межзеренные границы. С наработкой в осмиевой коре количество пор увеличивается, и они образуют развитую структуру. Долговечность осмированных МПК, так же как и МПК В-типа, авторы [6, 8] связывают с уменьшением скорости выхода на поверхность бария в результате процессов обеднения барием и кальцием приповерхностного слоя МПК глубиной 100…200 мкм при работе катода в практически интересной области температур и считают, что морфологические изменения осмиевой коры не ограничивают долговечность МПК. Однако, наряду с обеднением приповерхностного слоя, другие авторы [5, 7, 9] указывают также и на изменение химического состава осмивого покрытия с образованием сплава Os+W разного соотношения, который влияет на эмиссионные свойства и зависит от рабочей температуры катода. Кроме того, авторами [7] отмечается, что сохранение характерной столбчатой структуры эмиссионной пленки в процессе работы катода является фактором, подавляющим или замедляющим взаимную диффузию между вольфрамовой подложкой и пленкой осмий-рутений, что повышает срок службы катодов.

В работах [10, 11] сообщалось о повышении эмиссионной долговечности катодов М-типа при добавлении в состав активного вещества и вольфрамовой губки наноуглеродных частиц. В приведенных исследованиях было использовано два вида слоистых наноуглеродных частиц: полиэдральные наночастицы фуллероидного типа, тороидальной формы – астралены [12] и графеноподобная структура – сульфоаддукт нанокластеров углерода (углерон) [13]. В качестве причин, объясняющих данный эффект, авторы [10] указывают на снижение скорости испарения активного вещества с присадкой углерона и уменьшение скорости взаимной диффузии пленки Os–Ir–Al с вольфрамовой губкой с присадкой астраленов. При сравнении химического состава поверхностей катода после длительной наработки при высокой температуре и катода с отсутствием наработки было выяснено, что процентное содержание компонентов на эмитирующей поверхности уменьшилось в среднем с 74 до 42 % (осмия) и с 22 до 12 % (иридия) соответственно, а вольфрама увеличилось с 3 до 43 %. Причиной изменения процентного содержания компонентов на эмитирующей поверхности МПК являются процессы их химического взаимодействия, диффузии и

испарения. Учитывая время испытаний катода, можно сделать вывод: процесс деградации его поверхности происходил достаточно медленно, что обеспечило увеличение эмиссионной долговечности катода в составе лампы бегущей волны (ЛБВ) до $\sim 3 \cdot 10^6$ ч [11]. Однако сравнение динамики изменения морфологии и химического состава эмиссионной поверхности с катодами без модификации наноуглеродом не было проведено.

Цель работы – исследовать морфологические особенности и закономерности изменения химического состава эмиссионных поверхностей МПК с пленкой Os–Ir–Al (М-типа), модифицированных слоистыми наноуглеродными структурами: астраленами и углероном, при различной наработке t и сравнить их с поверхностями аналогичных МПК без модификации.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытаниям на долговечность в номинальном и форсированном по температуре режимах подвергались катоды в количестве 11 шт. в составе вакуумных макетов (диоды, катодно-сеточные узлы, ЛБВ). Температура катодов при испытаниях составляла 1120...1180 °С. Наряду с типовыми катодами из вольфрамовой губки, пропитанной алюминатом бария-кальция (3:0,5:1) и алюмосиликатом бария-кальция (3:0,5:1:0,5), испытаниям также подвергались катоды из вольфрамовой губки, пропитанной тем же алюминатом или алюмосиликатом с присадкой 0,2 % углерона, и катод из вольфрамовой губки с присадкой 0,5 % астраленов, пропитанной тем же алюминатом. Катоды имели на эмиссионной поверхности композиционную Os–Ir–Al-пленку толщиной 0,3...0,9 мкм, нанесенную методом ионно-плазменного напыления с предварительным ионным травлением.

В табл. 1 представлены конструктивные параметры катодов № 1...11 и время их наработки в номинальном D_p и форсированном D_ϕ режимах.

Таблица 1
Параметры исследованных катодов

Номер катода	Состав активного вещества	Губка катода	Толщина пленки Os–Ir–Al, мкм	D_p , ч	D_ϕ , ч
1	$3\text{BaO}:0,5\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$	W	0,4 – 0,43	10	0
2				64160	4010
3		W с астраленами		424214	314
4	$3\text{BaO}:0,5\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:0,5\text{SiO}_2$	W	0,3 – 0,5	5760	800
5				0	0
6			0,4 – 0,6	750	–
7				1688	400
8				300	–
9	$3\text{BaO}:0,5\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ с углероном	W	0,4 – 0,43	143584	8974
10		W с астраленами	0,6 – 0,9	1958400	7650

Окончание табл. 1

Номер катода	Состав активного вещества	Губка катода	Толщина пленки Os–Ir–Al, мкм	D_p , ч	D_ϕ , ч
11	3BaO:0,5CaO:Al ₂ O ₃ :0,5SiO ₂ с углероном	W	0,3 – 0,5	9880	1300

Перед постановкой в макет поверхность катода имеет среднюю шероховатость ~ 440 нм и развитую зернистую столбчатую структуру с высотой вершин от 1,155...2,021 мкм (рис. 1), данные получены с помощью атомно-силового микроскопа (ACM) NTEGRA Spectra (NT-MDT, Россия).

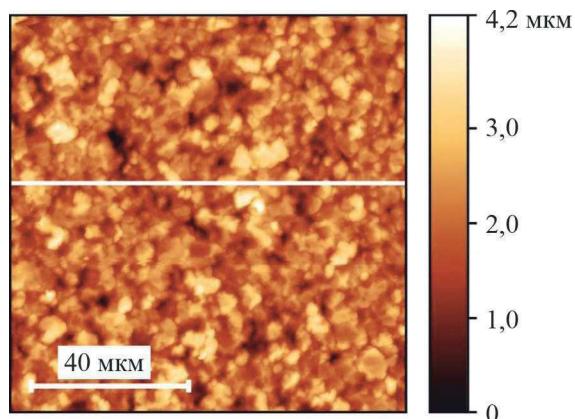


Рис. 1. ACM-изображение поверхности катода с пленкой Os–Ir–Al до активировки

После окончания испытаний катодов был проведен анализ морфологии и химического состава эмитирующей поверхности. Критериями окончания испытаний были: 1) разница между рабочей и характеристической температурой катода менее 50 °C; 2) падение тока катода в рабочей точке более 10 %.

Морфология и химический состав поверхностей катодов исследовались на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA2 LMU с приставкой для рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 при ускоряющем напряжении 30 кВ. Толщина пленок h определена на рентгенофлуоресцентном анализаторе (РФА) BOWMAN. Зависимость поверхностной концентрации основных компонентов эмиссионной поверхности катодов, определённой на СЭМ, от толщины нанесенной композиционной пленки h , определённой с помощью РФА до активировки (кратковременного прогрева катода до температуры ~ 1200 °C), представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что с увеличением толщины пленки поверхностная концентрация осмия и иридия на эмиссионной поверхности возрастает, а процент определения вольфрамовой подложки снижается. После термической активировки запускается процесс взаимной диффузии, в ходе которого на поверхности образуется сплав компонентов пленки с вольфрамом [14, 15]. В связи с этим получить зависимость в количественном виде, подобную той, что представлена на рис. 2, не представляется возможным из-за наличия вольфрама как в подложке, так и в составе пленки, однако можно оценить тенденцию изменения толщины пленки в процессе наработки t .

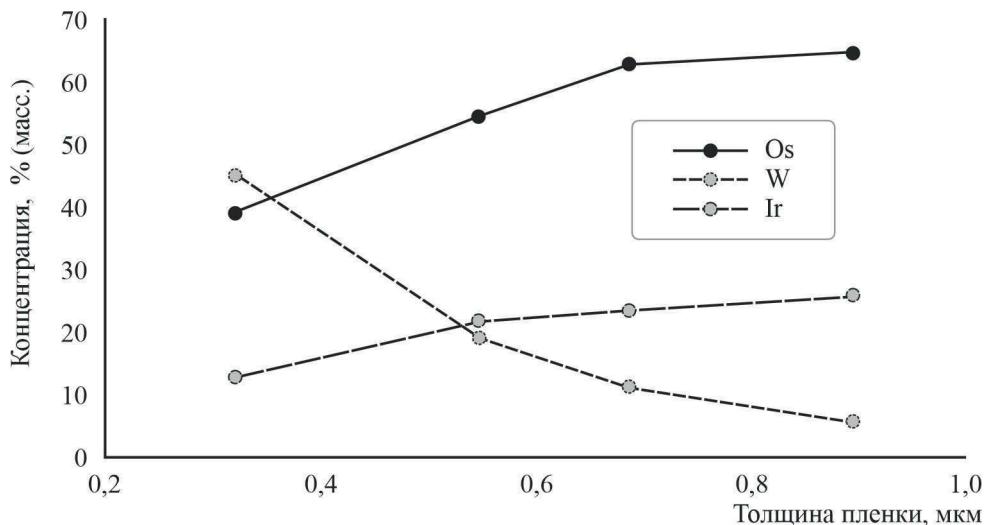


Рис. 2. Зависимость концентрации компонентов пленки и подложки от толщины пленки

На рис. 3 представлены изображения эмиссионных поверхностей исследуемых катодов после наработки.

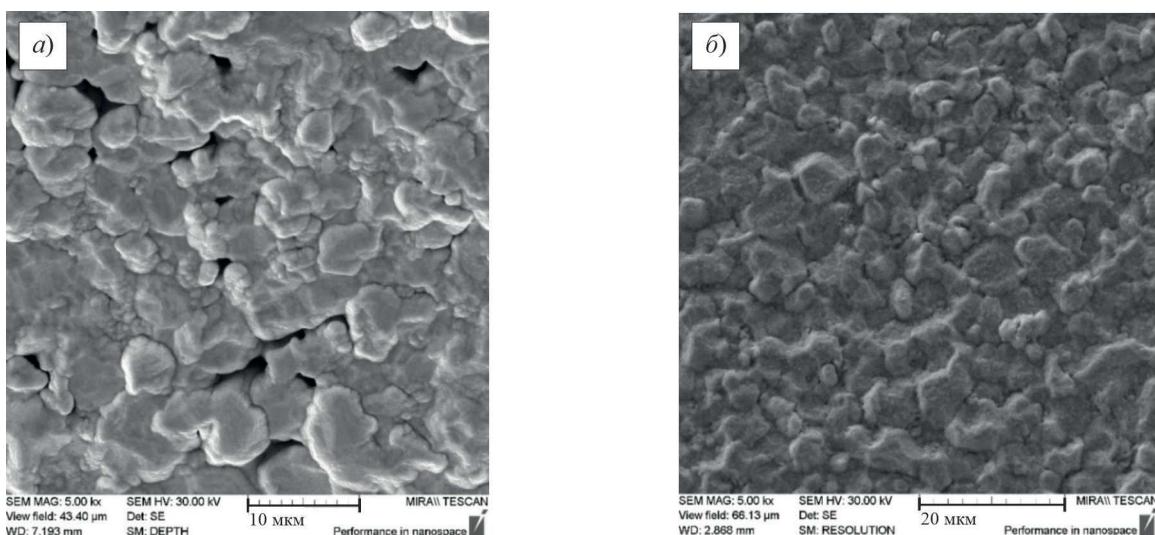


Рис. 3. СЭМ-изображения эмиссионных поверхностей катодов (см. также с. 42, 43):
 а – катод № 5; б – № 1

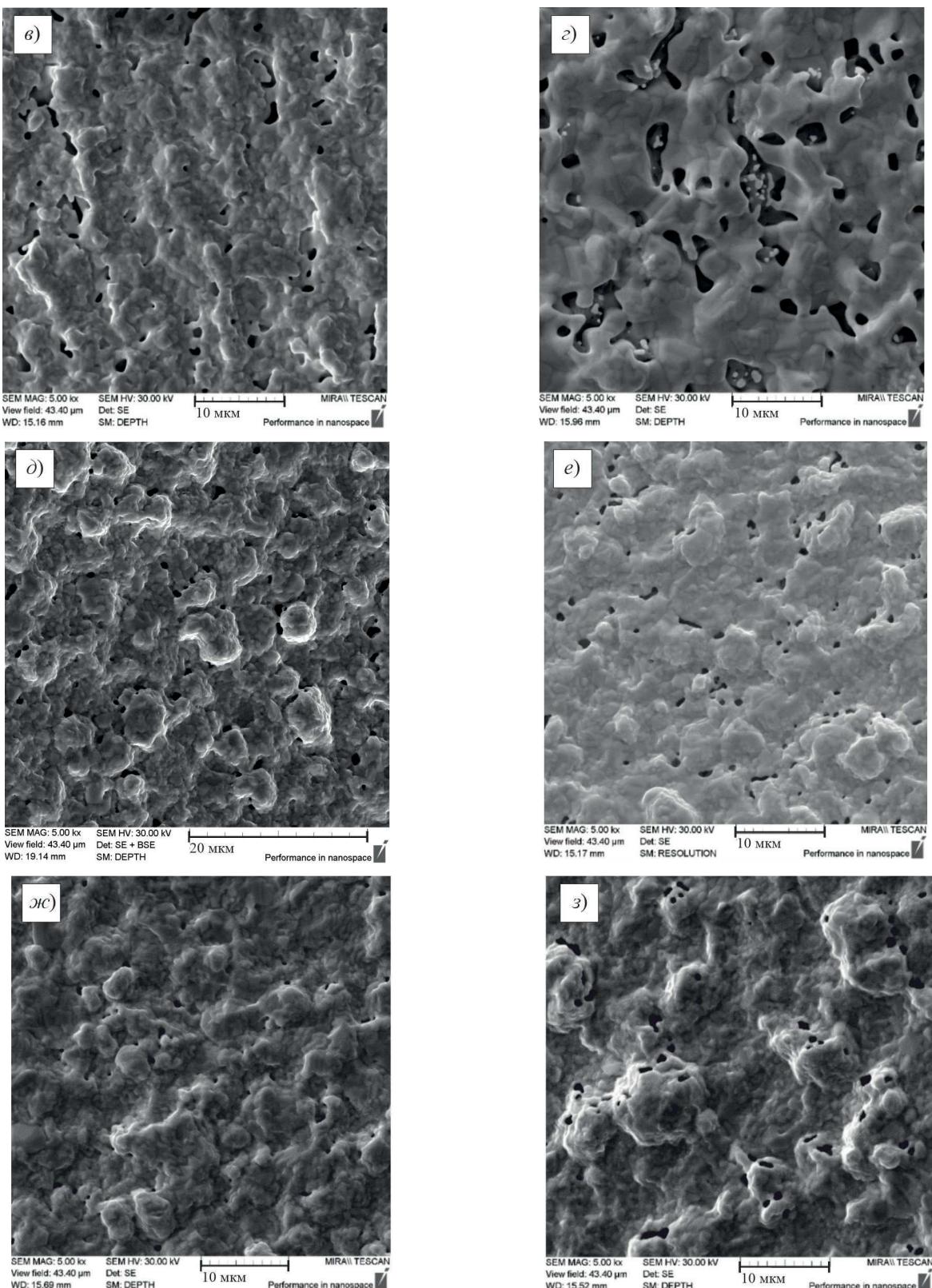


Рис. 3. СЭМ-изображения эмиссионных поверхностей катодов (см. также с. 43):

8 – № 3; 2 – № 7; 4 – № 4; e – № 11; жс – № 8; 3 – № 6

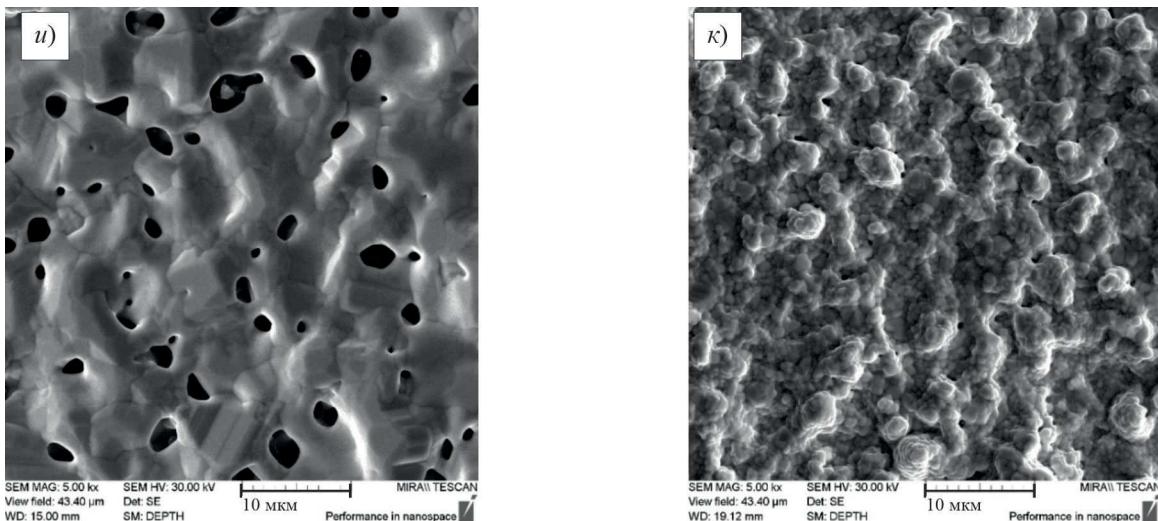


Рис. 3. СЭМ-изображения эмиссионных поверхностей катодов:

u – № 9; *k* – № 10

Из рис. 3 следует: 1) анализ катодов № 5 (рис. 3, *a*) и № 1 (рис. 3, *b*) показывает, что незначительная наработка (10 ч) практически не изменяет морфологию эмиссионной поверхности с толщиной пленки в диапазоне 0,3...0,5 мкм, обе поверхности имеют ярко выраженный рельеф с наличием столбчатых структур шириной ~2...5 мкм, образованных более мелкими зернами (~0,1...2 мкм), и небольшое количество случайных пор размером ~0,5...5 мкм, расположенных на некоторых участках поверхности; 2) анализ катодов № 3 (рис. 3, *c*) и № 7 (рис. 3, *e*) с соизмеримой толщиной исходного покрытия показывает, что при близкой наработке (314 и 400 ч) при температуре 1180 °C поверхность катода № 3, модифицированного астраленами, имеет более выраженную столбчатую структуру и гораздо меньшее число пор размером ~0,5...5 мкм, тогда как поверхность катода № 7 (без модификации) является более гладкой и уже не имеет столбчатых структур, при этом на ней располагается большое количество равномерно расположенных пор размером ~10...20 мкм; 3) сравнение поверхностей с одинаковой толщиной исходного покрытия: катода № 4, модифицированного углероном (рис. 3, *d*), и катода № 11 (без модификации, с наработкой в 1,6 раза меньше, чем у катода № 4) (рис. 3, *e*) – показало, что они выглядят примерно одинаково, на них еще присутствуют столбчатые структуры и уже появилось значительное число пор размером ~0,5...8 мкм; 4) анализ катодов с одинаковой толщиной исходного покрытия, без модификации: № 8 (рис. 3, *ж*) и № 6 (рис. 3, *з*), работающих при одинаковой температуре 1120 °C, показывает, что обе поверхности еще имеют столбчатые структуры, однако у катода № 6 больше пор на поверхности, чем у катода № 8, что объясняется в 2,5 раза большей наработкой; 5) анализ катода № 9, модифицированного углероном (рис. 3, *u*), показал, что при наработке ~9000 ч при температуре 1180 °C на эмиссионной поверхности уже отсутствуют столбики, она стала более гладкой и на ней появились поры размером ~0,8...5,5 мкм; в сравнении с катодом № 7, без модификации, с соизмеримой толщиной исходного покрытия и работавшим при той же температуре ~400 ч, установлено, что деградация эмиссионной поверхности для модифицированного катода № 9 происходит значительно медленнее; 6) анализ катода № 10, модифицированного астраленами и углероном (рис. 3, *k*), показал, что его поверхность после наработки ~8000 ч при температуре 1140 °C имеет выраженную столбчатую структуру и незначительное число пор размером

~0,2...1 мкм, однако его исходная толщина пленки была выше, чем для остальных катодов, поэтому прямое сравнение с катодом без модификации не проводилось.

Далее был исследован химический состав эмиссионных поверхностей катодов (табл. 2).

Таблица 2

**Химический состав эмиссионных поверхностей катодов, % (масс.),
после наработки t при испытательной температуре T**

Номер катода	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{ ч}$	$h, \text{ мкм}$	W	Os	Ir	Al	O	Ba
3	1180	314	0,3	55,06	31,72	12,62	—	0,61	—
7		400	0,082	81,52	10,45	3,81	0,58	2,35	1,24
2		4010	—	72,91	19,17	7,15	—	0,77	—
9		8974	0,278	73,8	18,69	6,91	0,48	0,6	—
1	1160	10	—	37,34	43,17	16,11	1,01	2,37	—
4		800	0,366	46,17	35,82	14,89	0,68	1,22	0,65
11		1300	0,414	45,92	37,92	14,65	0,56	0,54	0,4
10	1140	7650	0,833	37,87	44,36	16,92	—	0,85	—
8	1120	300	0,562	39,29	43,83	15,64	—	0,88	0,36
6		750	0,301	50,03	34,44	13,57	—	1,32	0,71
5	0	0	0,687	12,6	62,42	23,7	0,69	0,59	—

Из табл. 2 следует, что сравнительные особенности деградации поверхностей модифицированных и типовых катодов подтвердились и при рентгеноспектральном анализе: 1) для катодов № 3 и 7 с соизмеримой толщиной исходного покрытия при близкой наработке (314 и 400 ч) при одинаковой температуре (1180°C) поверхностная концентрация компонентов покрытия (Os+Ir) и качественная толщина пленки для модифицированного астраленами катода выше, относительно катода без модификации, а концентрация вольфрамовой подложки соответственно ниже; 2) для катодов № 2 и 9 с идентичной толщиной исходного покрытия при наработке катода № 9, модифицированного углероном, в ~2,2 раза больше, чем у катода № 2, при одинаковой температуре (1180°C) поверхностная концентрация компонентов покрытия (Os+Ir) и вольфрамовой подложки примерно одинакова; 3) для катода № 4, модифицированного углероном, и типового катода № 11, имеющих одинаковую толщину исходного покрытия, содержание компонентов на поверхности примерно одинаково, хотя катод № 4 имеет наработку в 1,6 раза выше.

На рис. 4 представлено картирование (интенсивность характеристического рентгеновского излучения осмия, иридия и вольфрама на одном и том же участке) эмиссионных поверхностей катодов № 3, 9 и 10 по основным химическим элементам: Os, Ir и W.

Из рис. 4 видно, что на эмиссионных поверхностях катодов № 3, 9 и 10 исследованные элементы распределены равномерно. На поверхности катода № 10 по сравнению с поверхностью катодов № 9 и 3 контраст компонентов покрытия (Os, Ir) выше из-за большего процентного содержания, в свою очередь, на поверхности катода № 3 контраст обоих компонентов выше по сравнению с поверхностью катода № 9. Кроме того, видно, что на всех поверхностях с разным содержанием определяется вольфрам, что наглядно демонстрирует процесс взаимной диффузии вольфрамовой подложки с компонентами пленки Os, Ir.

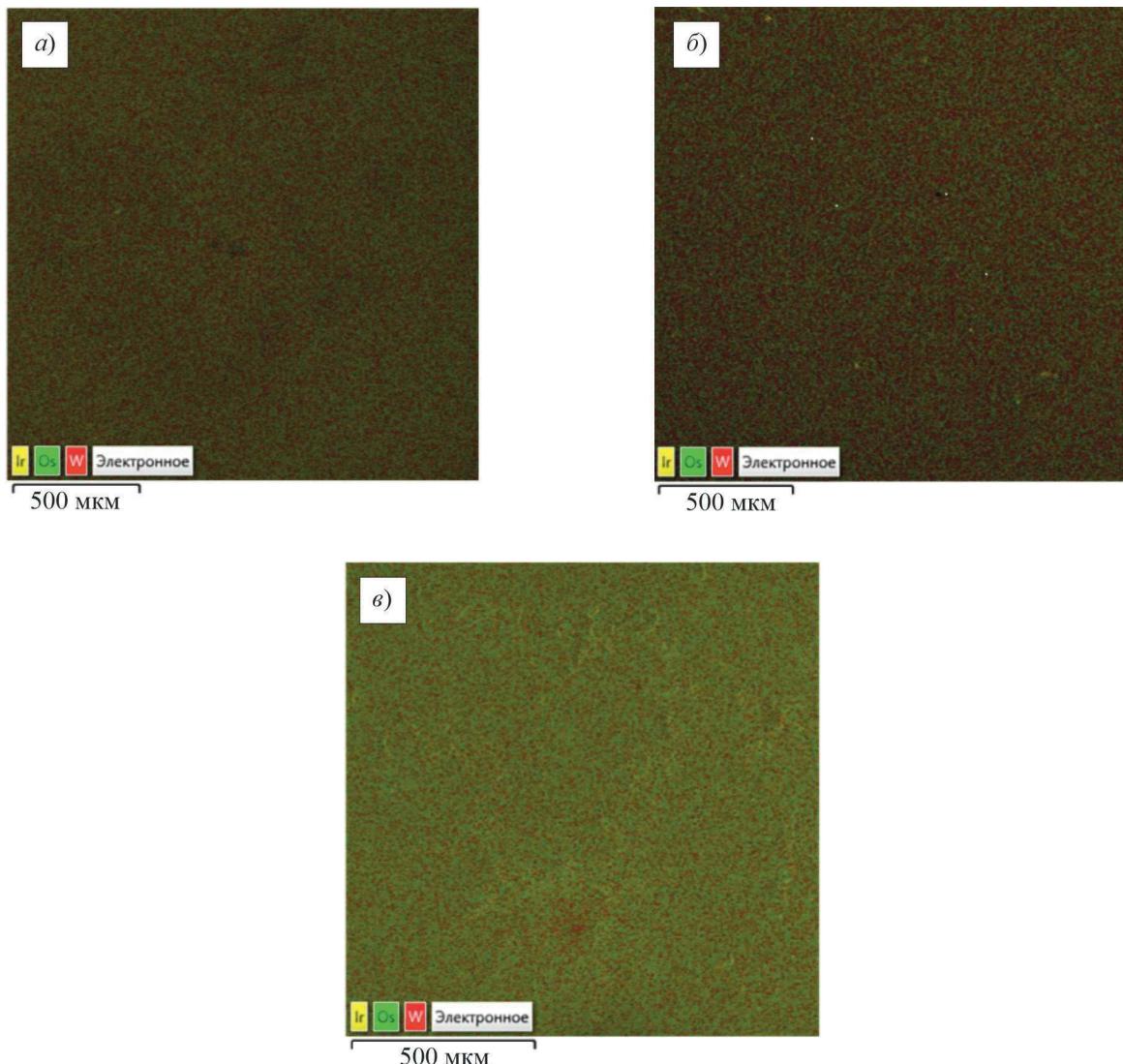


Рис. 4. Картирование эмиссионной поверхности:

а – катод № 3; б – катод № 9; в – катод № 10

Из анализа эмиссионных поверхностей катодов (см. рис. 3 и 4) и данных табл. 1 и 2 следует, что в процессе наработки химический состав и морфология эмиссионной поверхности МПК с пленкой Os–Ir–Al изменяется. Во-первых, повышается количество вольфрама и одновременно снижается количество осмия и иридия, аналогичный процесс уже наблюдался авторами [15] для катода М-типа с пленкой Os–Ru. Эта тенденция приводит к изменению химического соотношения вольфрамовой подложки и элементов покрытия на поверхности катода, в том числе к образованию интерметаллического сплава Os–W (σ -фаза), и при длительной наработке к качественному уменьшению толщины эмиссионной пленки металлов платиновой группы, согласно рис. 1.

Во-вторых, поверхность сглаживается и уменьшается количество столбиков из зерен, что, очевидно, приводит к уменьшению площади эмиссии, более активной взаимной диффузии вольфрама с компонентами покрытия и, как следствие, снижению эмиссионных свойств катода [3, 7].

В-третьих, на поверхности появляется большое количество равномерно распределенных пор величиной от единиц до десятков микрометров в зависимости от температуры испытаний и времени работы катода, как и указано в работе [6].

В-четвертых, для катодов, модифицированных углероном и/или астраленами, относительно катодов без модификации отмечается замедление скорости поверхностной деградации поверхности как по морфологическим особенностям, так и по поверхностной концентрации компонентов покрытия и подложки.

Кроме того, все отмеченные закономерности зависят от температуры испытаний, и чем она выше, тем процесс деградации поверхности интенсивнее. Аналогичная тенденция отмечается и для покрытия Os–Ru у авторов работ [15, 16].

Согласно модели, представленной на рис. 5, авторы [15] приводят уравнение диффузии, определяющее концентрацию вольфрама в пленке сплава (OsRuW) во времени:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x} &= 0 \quad (x = 0); \\ C &= 1 \quad (x = -d); \\ C &= C_0 \quad (-d < x \leq 0, t = 0), \end{aligned} \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии вольфрама в поверхностном покрытии; C – концентрация вольфрама в точке x от поверхности и в момент времени t ; d – толщина пленки; C_0 – начальная концентрация вольфрама в покрытии (после активировки).



Рис. 5. Одномерная модель диффузии вольфрама
в поверхностном покрытии [15]

Из общего решения уравнения диффузии (1) при граничных условиях (2) поверхностная концентрация вольфрама зависит от коэффициента диффузии и времени наработки по уравнению:

$$C(x=0) = 1 - (C_0 - 1) f(\tau),$$

где

$$f(\tau) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{16\tau^2}\right),$$

$$\tau = \frac{d}{\sqrt{4Dt}}. \quad (3)$$

Приведенная зависимость (3) показывает, что коэффициент диффузии вольфрама в поверхностную пленку металлов влияет на химический состав сплава во времени, и чем диффузия

меньше, тем долговечность катодов М-типа выше. Приведенные уравнения справедливы и для пленки состава Os–Ir–Al, т. к. с наработкой наблюдаются процессы, аналогичные составу пленки Os–Ru, следовательно, долговечность катодов, модифицированных наноуглеродом, будет выше за счет снижения скорости диффузии вольфрама в пленку Os–Ir–Al.

В табл. 3 представлен химический состав пор на эмиссионных поверхностях катодов № 3 и 9.

Таблица 3

**Химический состав пор на эмиссионных поверхностях катодов,
% (масс.), при увеличении 5000x**

Номер катода	W	Os	Ir	Al	O
3	60,17	20,72	8,39	0,44	0,36
9	87,72	6,45	2,51	0,24	0,1

Из табл. 2 и 3 следует, что в холодном состоянии на поверхности поработавших (наработка выше 300 ч при температуре 1180 °C) катодов, в том числе и в порах, практически отсутствует барий, что подтверждает выводы других авторов об обеднении приповерхностного слоя бария в процессе наработки [6, 8].

Далее был проведен анализ морфологии и химического состава (табл. 4) противолежащих исследованным катодам № 1, 3, 2, 9 молибденовых анодов из диодов.

Таблица 4

Химический состав поверхности анодов, % (масс.)

Номер макета	t, ч	Ba	O	Co	Ca	Mo
1	10	40,8	31,98		1,91	9,97
2	314	47,59	18,63	11,5	5,86	1,05
3	4010	26,73	21,55	–	–	22,39
4	8974	14,40	14,87	6,46	1,77	52,12

Из табл. 4 следует, что в процессе наработки состав поверхности анодов изменяется. Во-первых, до определенной наработки (~314 ч) при температуре 1180 °C повышается количество бария, кислорода, кобальта (из припоя катода) и одновременно снижается количество определяемого элемента подложки – молибдена, тогда как через значительное количество наработки (свыше 4000 ч) уже наблюдается снижение количества тех же элементов испарения с катода за счет отслоения пленки из продуктов напыления с катода и эффекта перепыления бария на катод, известного из исследований [2]. Во-вторых, в исследованном диапазоне наработки ни при каких значениях не происходит перепыление осмия с поверхности катода, очевидно, из-за его высоких температур плавления ~ 2700...3500 °C.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье исследования динамики изменения морфологии и химического состава эмиссионной поверхности типовых и модифицированных слоистыми наноуглеродными частицами катодов М-типа показали, что в процессе наработки катодов столбчатые структуры сглаживаются, а количество и размер пор увеличивается, поверхностная концентрация вольфрамовой подложки увеличивается и одновременно уменьшается концентрация осмия и иридия. Это приводит к качественному уменьшению толщины полноценной эмиссионной пленки металлов платиновой группы и изменению соотношения содержания вольфрамовой подложки и элементов покрытия. Кроме того, для катодов, модифицированных углероном и/или астраленами, процессы деградации поверхности катода как по морфологическим особенностям, так и по поверхностной концентрации компонентов покрытия и подложки значительно замедляются, в том числе за счет снижения коэффициента диффузии вольфрама в поверхностную пленку металлов, что способствует более длительному сохранению оптимального химического состава и морфологии на эмиссионной поверхности катода и, как следствие, повышению срока службы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физический механизм работы осмированных катодов СВЧ-приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, С. О. Москаленко [и др.] // Перспективные материалы. – 2021. – № 1. – С.22 – 34. – DOI: 10.30791/1028-978X-2021-1-22-34.
2. **Козлов, В. И.** Эмиссионные свойства и долговечность металлпористых катодов для СВЧ-приборов: Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ / В. И. Козлов. – Вып. 8 (541). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1983. – 54 с.
3. Влияние структуры поверхности металлпористых катодов на их эмиссионные свойства / Б. Ч. Дюбуа, А. Г. Михальченков, О. В. Поливникова, М. П. Темирязева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып.1 (504). – С. 25 – 34.
4. Life test studies on dispenser cathode with dual-layer porous tungsten / M. C. Zhang, Y. W. Liu, S. J. Yu [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61. – P. 2983 – 2988. – DOI: 10.1109/TED.2014.2323258.
5. **Gaertner, G.** Modern developments in vacuum electron sources / Georg Gaertner, Wolfram Knapp, Richard G. Forbes // Topics in Applied Physics. – 2020. – Springer. – P. 597. – DOI:10.1007/978-3-030-47291-7.
6. **Дружинин, А. В.** Исследование металлпористых катодов методами растровой электронной микроскопии / А. В. Дружинин, В. А. Куликов, В. Б. Митюхляев // Изв. Ак. наук СССР. – 1984. – Т. 48, № 12. – С. 2454 – 2458.
7. Effects of substrate bias on microstructure of osmium-ruthenium coatings for porous tungsten dispenser cathodes / Wen-Chung Li, Scott Roberts, Associate Member and T. John Balk // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, No 5. – P. 805 – 811. – DOI:10.1109/TED.2009.2015628.
8. **Смирнов, В. А.** Восстановление эмиссии металлпористых катодов электровакуумных приборов СВЧ / В. А. Смирнов, А. В. Коннов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2024. – Вып. 2 (562). – С. 23 – 28.
9. Некоторые способы повышения долговечности металлпористых катодов с пленкой осмия / В. И. Козлов, В. А. Осипов, А. А. Андреев, В. В. Соболев // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1975. – Вып. 12. – С. 78 – 83.
10. Металлпористые катоды, модифицированные наноуглеродом, с высокой долговечностью для применения в приборах СВЧ / Т. М. Крачковская, Л. А. Мельников, О. Е. Глухова [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, вып. 13. – С. 51 – 54. – DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49593.18315.

11. Крачковская, Т. М. Испытания на долговечность металлопористых катодов, модифицированных наноуглеродом, в составе ЛБВ / Т. М. Крачковская, П. Д. Шалаев // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. статей X Всероссийской конференции. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. – С. 241 – 243.
12. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A. I. Shames, E. A. Katz, A. M. Panich [et al.] // Diamond & Related Materials. – 2009. – Vol. 18. – P. 505 – 510. – DOI:10.1016/j.diamond.2008.10.056.
13. Патент № 2478117 РФ. Сульфоаддукт нанокластеров углерода и способ его получения : № 2010105074/04: заявл. 08.02.2010: опубл. 27.03.2013, бул. № 9 / А. Н. Пономарев, М. Е. Юдович, А. А. Козеев.
14. Falce, L. R. A study of the inter-diffusion of tungsten and osmium-ruthenium in M-cathodes and the effects on performance and life / L. R. Falce // In Proc. 5th IEEE Int. Vac. Electron. Conf., Palo Alto, CA. – 2004. – P. 356 – 357.
15. Mita, Nagahisa. Degradation of coated impregnated cathode's surface coating / Mita Nagahisa // IEEE Transactions on Electron Devices. –1991. – Vol. 38, No II. – P. 2554 – 2557.
16. Mita, Nagahisa. Degradation factors of a coated impregnated cathode / Mita Nagahisa // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1992. – Vol. 39, No 9. – P. 2172 – 2175.

Статья поступила 16 августа 2025 г.

===== НОВЫЕ КНИГИ =====

Технологические процессы лазерной сварки, резки и размерной обработки
/ А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца.
– Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – 376 с. : ил.

В монографии рассмотрены технологические процессы лазерной сварки сталей, цветных металлов и других материалов малой, средней и большой толщины и возникающие дефекты. Представлены технологические режимы сварки, механизмы формирования и получаемые механические свойства сварных соединений.

Приведены общие сведения о процессе лазерной резки металлов и неметаллов, физических механизмах лазерной резки, способах резки импульсным и непрерывным излучением в струе кислорода, воздуха, инертных газов и воды в режиме плавления и испарения, технологии скрайбирования и термораскалывания хрупких материалов.

Представлены процессы лазерной размерной обработки, в частности технологические процессы лазерного нанесения изображений на металлические и неметаллические материалы для маркирования, а также способы и режимы пробивки отверстий в металлах и неметаллах.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.375.4.029.64

ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД «ФИКСИРОВАННОЙ НАГРУЗКИ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

В. А. Пчелин, Д. С. Гринберг, С. И. Кужненкова, М. А. Басманов

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

Цепь согласования (ЦС) транзистора с линией передачи определяет важнейшие параметры усилителя: выходную мощность, усиление, КПД, полосу рабочих частот, габариты. Проектирование ЦС составляет сложную задачу. Предложен метод «фиксированной нагрузки», позволяющий оперативно создать оптимальную ЦС.

KC: усилитель, СВЧ-транзистор, согласующая цепь, проектирование, метод «фиксированной нагрузки»

AN OPERATIONAL «FIXED LOAD» METHOD TO DETERMINE THE OPTIMAL MATCHING CIRCUITS FOR HIGH-POWER MICROWAVE TRANSISTORS

V. A. Pchelin, D. S. Grinberg, S. I. Kuzhnenkova, M. A. Basmanov

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

The matching circuit (MC) of the transistor with the transmission line determines the most important parameters of the amplifier: output power, gain, efficiency, operating frequency band, dimensions. MC designing is a complex task. The «fixed load» method is presented to create an optical MC quickly.

Keywords: amplifier, microwave transistor, matching circuit, designing, «fixed load» method

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод был создан в процессе разработки усилителя S-диапазона частот с выходной мощностью не менее 9 Вт с применением только отечественной комплектации. Учитывая, что лучшие, на то время, отечественные транзисторы «Пират-40» производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» (ЗП976 В-5) обеспечивали мощность 1,8 Вт, для получения требуемой в усилителе мощности необходимо было просуммировать мощность по крайней мере 8-ми таких транзисторов. Задача осложнялась заданными габаритами усилителя. Результаты применения метода «фиксированной нагрузки» были представлены на научно-технической конференции в Санкт-Петербурге [1] и на НТС предприятия. При обсуждении были получены справедливые замечания сотрудников АО «НПП «Исток» им. Шокина» А. В. Галдецкого и Е. М. Шипило. В связи с этим, считаем необходимым привести здесь уточненное описание данного метода.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В L - и S -диапазонах частот согласование транзисторов с линией передачи с помощью традиционных микрополосковых цепей с распределёнными элементами не представляется возможным в усилителях с ограниченными габаритами из-за больших размеров топологии. С целью уменьшения габаритов цепи согласования (ЦС) следует применить согласование на сосредоточенных элементах (чип-конденсаторах и индуктивностях), при этом в расчёте учитываются реактивности элементов монтажа ЦС (соединительных перемычек, заземляющих отверстий и т. п.). Метод «фиксированной нагрузки» позволяет оперативно определить схему согласования полевого GaAs СВЧ-транзистора. При расчёте, из-за ограниченных размеров каскадов, должны быть сведены к минимуму размеры настроенных элементов в ЦС СВЧ-транзисторов с линией.

Традиционный способ проектирование усилителя мощности основывается на использовании нелинейной модели применяемого мощного СВЧ-транзистора. Нелинейная модель разрабатывается на основе результатов измерений сопротивлений истока, стока, затвора, ВАХ и S -параметров транзистора. Затем данные вставляются в пакет моделирования, например, «Materka – Kasprzak» и рассчитывается оптимальная цепь согласования [2]. Процесс трудоёмкий, требует сложной, дорогостоящей аппаратуры и длительного времени расчёта. При расчёте ЦС корпусированного транзистора должны учитываться паразитные элементы корпуса, неоднородности в виде появляющихся при монтаже зазоров или индуктивности соединительных проволочек, сильно влияющие на полосу рабочих частот. Всё это значительно усложняет расчёт ЦС.

В других случаях для определения характеристик мощного транзистора применяется измеритель X -параметров, использующий метод оптимизации нагрузки (*load-pull*) [3]. Он требует наличия дорогостоящей аппаратуры и большого времени расчёта.

Нами предложен метод, названный как метод «фиксированной нагрузки», позволяющий оперативно определить ЦС, при которой транзистор отдает максимальную мощность.

Преимущества метода заключаются в следующем:

- простота реализации;
- отсутствие необходимости в применении сложного и дорогостоящего оборудования;
- существенное снижение времени расчета ЦС затвора и стока транзистора, работающего в режиме большого сигнала.

Однако метод не лишен недостатков:

- значение реального коэффициента передачи транзистора, работающего в режиме большого сигнала, определяется экспериментально;
- метод применим для транзисторов с небольшой шириной затвора. Многосекционные мощные транзисторы типа «Принц» с шириной затвора более 1,5 мм (производства АО «НПП «Исток» им. Шокина»), склонны к неустойчивой работе при измерениях данным методом.

Суть метода «фиксированной нагрузки» заключается в следующем.

На первом этапе в 50-омной МПЛ с помощью индивидуальной фольги толщиной 50 мкм вблизи затвора и стока полевого корпусированного транзистора или кристалла «вручную» подбираются согласующие элементы микрополосковой топологии с приблизительно правильными геометрическими формами, при которых обеспечивается максимальный уровень выходной мощности, соответствующий ТУ на транзистор. Пример топологии показан на рис. 1.

Фольга обладает хорошей адгезией к поликору. Это позволяет формировать топологию, при которой транзистор, рассчитанный на применение в заданном диапазоне частот, способен обес-

печивать необходимую мощность на центральной частоте заданного диапазона. Топологический рисунок, конечно же, совершенно не оптимальный и может значительно превышать допустимые размеры ЦС. Полученная топология является «фиксированной нагрузкой» и вносится в широко применяемую САПР AWR для расчёта СВЧ-цепей, при этом затвор и сток транзистора представляются эквивалентными схемами, изображёнными на рис. 2. Важно отметить, что формирование топологии не требует расчёта паразитных элементов корпуса или монтажа кристалла, а также нелинейных свойств транзистора, работающего в режиме большого сигнала. Другими словами, топология «отобразила» транзистор со всеми его паразитными элементами корпуса и неизвестным «поведением» при работе в режиме большого сигнала, и это основное обстоятельство, облегчающее дальнейший расчёт ЦС. При этом КСВН затворной и стоковой цепей могут быть не минимальными.

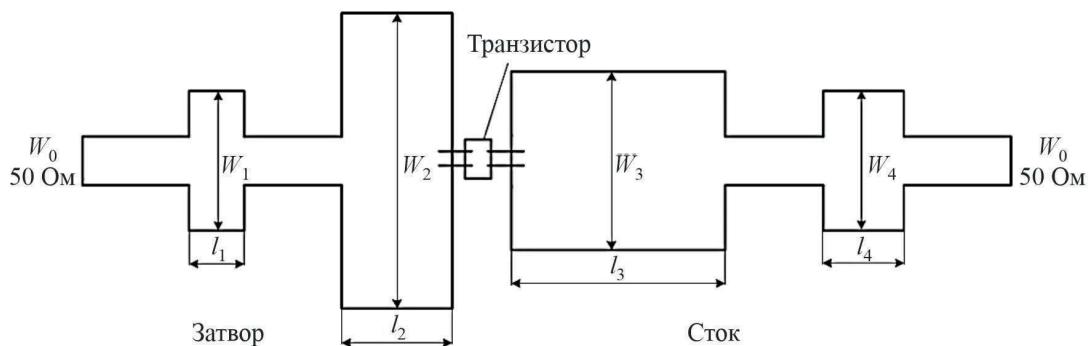


Рис. 1. Топология согласования транзистора

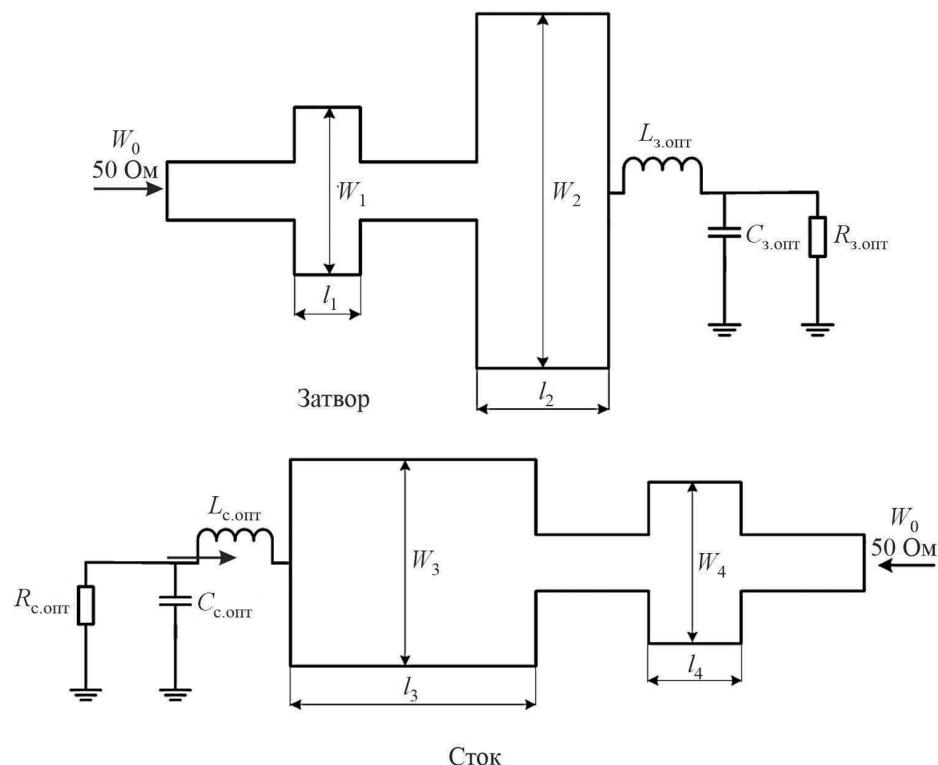


Рис. 2. Топология для расчета значений импедансов затвора и стока

На втором этапе представляем импедансы затвора и стока в виде эквивалентных схем R_s, C_s, L_s и R_c, C_c, L_c . С помощью той же САПР проводится их оптимизация на минимальный КСВН с целью определения значений R_s, C_s, L_s затвора и R_c, C_c, L_c стока. Условием согласования МПЛ-топологии с эквивалентной RLC -цепью является равенство активных сопротивлений и реактивных, но с противоположным знаком. Таким образом, определяются значения параметров импедансов транзистора, при которых коэффициент отражения со стороны нагрузки будет минимальным на центральной частоте.

На третьем этапе с помощью программы AWR при известных нагрузочных характеристиках проводится синтез оптимальных согласующих цепей на сосредоточенных и распределённых элементах, которые заменяют эту громоздкую МПЛ, обеспечивающую минимальный коэффициент отражения затвора и стока транзистора в рабочей полосе частот. В расчёте учитываются паразитные эффекты от конденсаторов, индуктивностей, заземляющих отверстий в плате. В результате расчёта определяются оптимальная топология МПЛ, количество, номиналы и месторасположения чип-конденсаторов. На рис. 3 показана расчётная синтезированная ЦС для полевых GaAs бескорпусных транзисторов ЗП976В с $P_{\text{вых}} = 1,8$ Вт производства АО «НПП «Исток» им. Шокина».

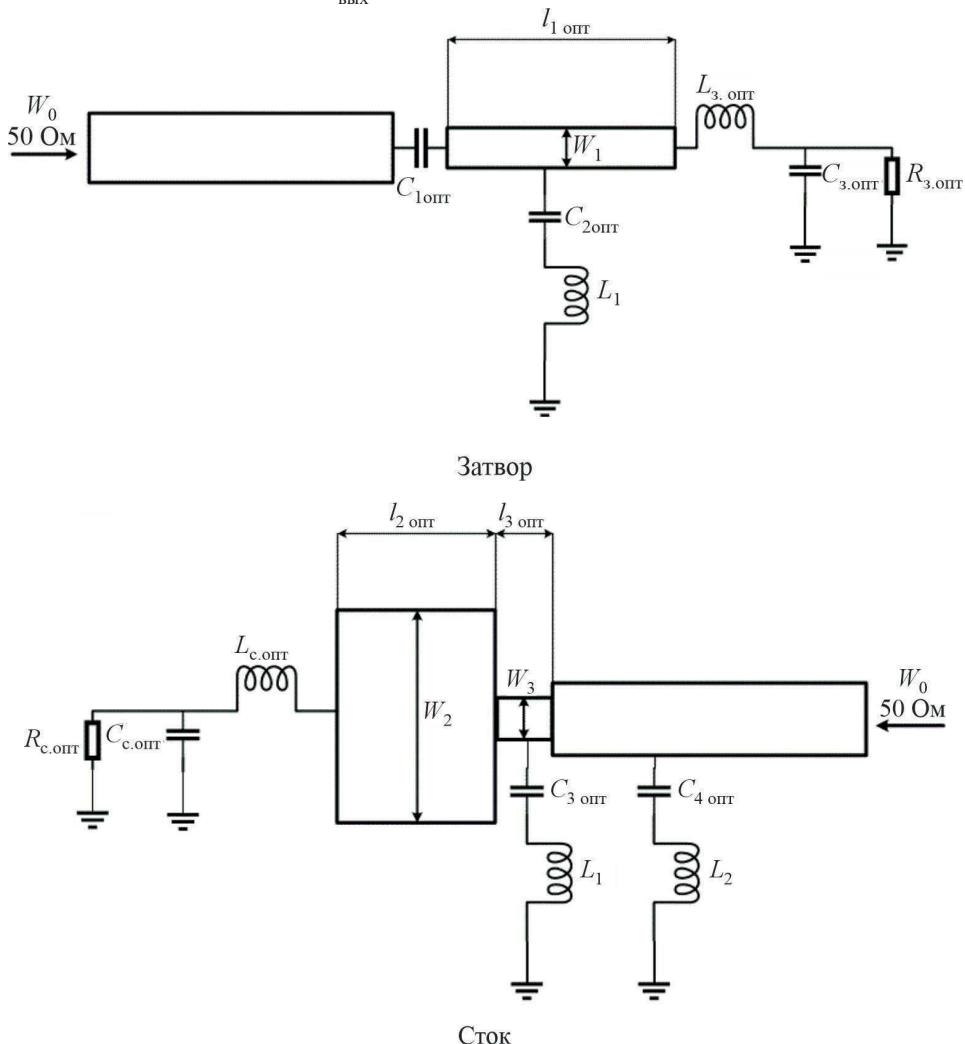


Рис. 3. Синтезированные согласующие схемы на сосредоточенных элементах

На рис. 4 представлен опытный образец синтезированной схемы для вышеупомянутых кристаллов с суммированием мощности четырёх транзисторов. Каскад обеспечивает выходную мощность 5,6...6 Вт на частотах 3,9...4,2 ГГц. Размеры ЦС в поперечном направлении практически не превосходят ширину кристалла и не требуют дополнительной настройки, что позволяет разместить каскады в требуемых размерах.

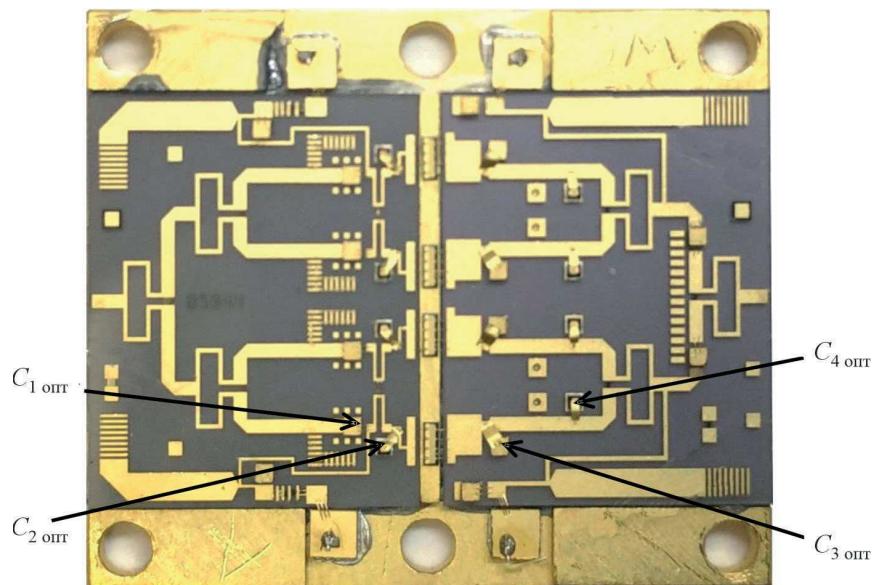


Рис. 4. Топология опытного образца усилительного каскада

На рис. 5 приведена АЧХ четырёх каскадов при входной мощности $P_{\text{вх}} = 1$ Вт. В усилителе для достижения требуемого уровня выходной мощности суммируется $P_{\text{вых}}$ двух таких каскадов. Ограничение по частоте связано с влиянием паразитных эффектов от индуктивностей монтажа соединений, ёмкостных связей между компонентами, а также от заземляющих отверстий в диэлектрической подложке.

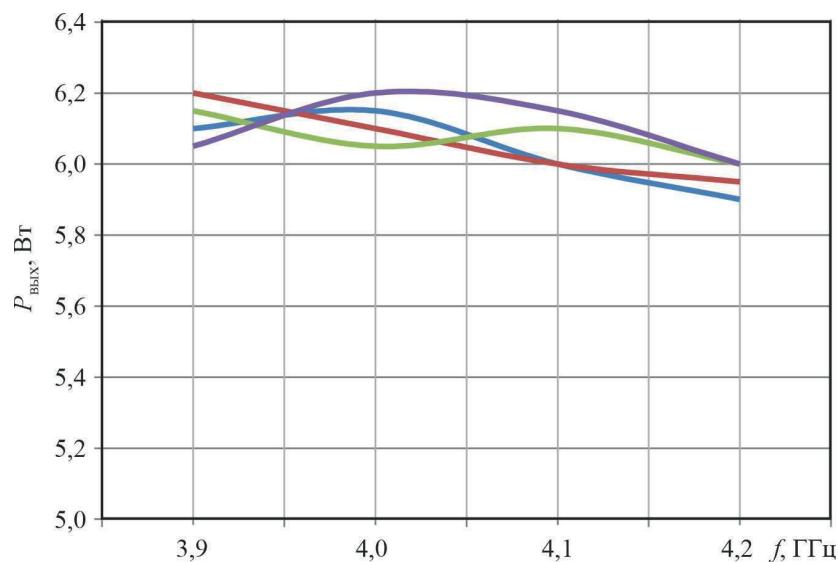


Рис. 5. АЧХ усилительных каскадов ($P_{\text{вх}} = 1$ Вт)

Как было отмечено выше, применение данного метода для многосекционных транзисторов с большой шириной затвора (более 1,5 мм) типа «Принц» производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» затруднительно. В таких случаях рекомендуется обследование специально изготовленной одной секции транзистора, создание для неё ЦС и оптимизация. Затем выполняется суммирование мощности с применением этой ЦС для каждой секции. Представленный метод успешно использовался при разработке усилителей мощности с октавными полосами частот 1...2 ГГц и 2...4 ГГц.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод «фиксированной нагрузки», позволяющий оперативно определять ЦС мощных СВЧ-транзисторов. Метод не требует сложной измерительной аппаратуры. В измерительный стенд входят: генератор СВЧ-сигналов, измеритель коэффициента передачи и отражений, ваттметр.

Авторы выражают благодарность А. А. Лисицыну, А. О. Кручинину, А. Ю. Игнатушко за полезные замечания в процессе написания рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пчелин, В. А. Расчётно-экспериментальная методика согласования мощного СВЧ-транзистора / В. А. Пчелин // 5-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника». – С.-Петербург: ЛЭТИ, 2016. – С. 234 – 237.
2. Коррекция нелинейных моделей мощных полевых транзисторов по их измерениям в тестовой плате / А. А. Капралова, И. П. Корчагин, Л. В. Манченко [и др.]. // 21 конференция «КРЫМКО», Севастополь, 2011 г. – С. 261 – 262.
3. Сечи, Ф. Мир радиоэлектроники. Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти; перевод В. О. Султанова; под ред. д.т.н. А. А. Борисова. – М.: Техносфера, 2016. – С. 101 – 105.

Статья поступила 14 июля 2025 г.

УДК 621.382.3

**МОРФОЛОГИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕЛЕГИРОВАННЫХ GaN/AlGaN-ТРАНЗИСТОРОВ
В РАСШИРЕНОМ ДИАПАЗОНЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ**

В. Г. Усыченко, А. С. Чернова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Изучается влияние электрической поляризации диэлектрических доменов, находящихся в нелегированном слое AlGaN-транзисторов, на стабильность и форму квазистатических вольт-амперных характеристик в диапазоне напряжений и токов, меняющихся в пределах четырех порядков величин; обнаружены диэлектрические гистерезисы тока стока. При затворных напряжениях, приближающихся к пороговому значению, выявлена область локального насыщения токов стока, характерная и для легированных полевых транзисторов. На выходную мощность и энергетическую эффективность транзистора обнаруженные явления практически не влияют.

КС: нелегированный AlGaN/GaN HEMT, вольт-амперная характеристика, локальное насыщение токов, поляризация доменов

**MORPHOLOGY OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS
OF UNDOPED GaN/AlGaN TRANSISTORS
IN AN EXTENDED RANGE OF VOLTAGES AND CURRENTS**

V. G. Usychenko, A. S. Chernova

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

The effect of electric polarization of dielectric domains in the undoped layer of AlGaN-transistors on the stability and shape of quasi-static current-voltage characteristics in the range of voltages and currents varying within four orders of magnitude is studied; dielectric hysteresis of the drain current is detected. At gate voltages approaching the threshold value a region of local saturation of drain currents was identified which is also characteristic of doped field-effect transistors. The output power and energy efficiency of the transistor are almost unaffected by the detected phenomena.

Keywords: undoped AlGaN/GaN HEMT, current-voltage characteristic, local saturation of currents, domain polarization

1. ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства легированных и нелегированных гетероструктур, используемых в AlGaN/GaN-транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT), изучаются уже 25 лет [1], но интерес к ним не пропадает.

Нам предстояло исследовать влияние электронной радиации на физические и эксплуатационные параметры нелегированных GaN/AlGaN-транзисторов [1–3]. Известно [4–6], что по мере накопления радиационной дозы у полупроводниковых приборов сначала происходят изменения в области малых токов, затем возрастает интенсивность низкочастотных шумов, ускоряется деградация ВАХ, и в итоге прибор выходит из строя. Поэтому нас в первую очередь интересовало поведение именно малых токов.

С целью фиксирования исходных состояний транзисторов были измерены токи стока в диапазоне от 10^{-5} А до 1 А. Ожидали увидеть выходные ВАХ, типичные для полевых транзисторов, включая НЕМТ. Обычно с увеличением напряжения на стоке ток стока сначала растет, затем замедляется, плавно переходя в область насыщения. Но при квазистатических измерениях обнаружили область локального насыщения токов стока и другие «аномалии», которые были не случайными, а закономерными. В теоретических моделях [7–11] они не обсуждаются. Описанию этих «аномалий» посвящена статья.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были использованы типовые GaN/AlGaN СВЧ-транзисторы [12] с высокой подвижностью электронов, повышенными мощностью и крутизной тока, работающие в диапазоне частот $f \leq 6$ ГГц. При напряжении сток-исток $U_d = 28$ В выходная мощность достигала 14 Вт, коэффициент усиления в линейном режиме – 15 дБ, коэффициент полезного действия – 65 %. Длина канала $L_{sd} = 4,8$ мкм, длина затвора $L_g = 0,5$ мкм, его ширина $W = 10 \times 350$ мкм. Типовое расстояние от истока до края затвора $L_{sg} = 1,55$ мкм. Толщина слоя AlGaN составляла 24 нм. При производстве транзисторов слой AlGaN не легировали.

Исследовали пять экземпляров. У транзисторов № 1...3 пороговое напряжение затвора U_t , при котором канал можно считать перекрытым, было практически одинаковым и составляло приблизительно -3,2 В; у транзисторов № 4 и 5 $U_t \approx -4,2$ В.

3. ВЫХОДНЫЕ ВАХ

При измерении ВАХ напряжения на затвор и сток транзистора подавали от источников питания Rigol DP811a и R&S HMP2030 соответственно. Для контроля напряжений и токов в цепи стока использовали индикатор на дисплее HMP2030. Контроль напряжения в цепи затвора осуществляли с помощью внешнего мультиметра В7-38М. Напряжение на затворе выставляли вручную на лицевой панели DP811, а для периодического пошагового изменения стокового напряжения и измерения тока стока использовали программное обеспечение HMP Explorer, предназначенное для управления источником питания HMP2030. Периодичность переключений установили равной 1,5 с. В интересах сохранности транзисторов ток стока ограничивали напряжением стока U_d таким образом, чтобы рассеиваемая мощность $P_d = U_d I_d$ не превышала 1,8 Вт. При измерении ВАХ напряжение стока в основном повышали.

Согласно паспортным данным приборов, абсолютные погрешности измерения затворного и стокового напряжений составляли $\pm 0,0002 U_g$ и $\pm (0,001 U_d + 2 \text{ мВ})$ соответственно. Относительная погрешность установки и измерения токов стока более 500 мА была равна $\pm (0,002 I_d + 2 \text{ мА})$, в диапазоне токов менее 500 мА составляла $\pm (0,002 I_d + 0,5 \text{ мА})$.

При измерениях заметили, что по мере уменьшения затворного напряжения и снижения тока стока время его установления возрастает и при $U_g \approx U_t$ достигает десятков секунд; возникают трудности с установлением значения U_t . Обнаружены диэлектрические гистерезисы. В этой области использовали более точный мультиметр Agilent U3401A и оперировали «вручную». По окончании основных переходных процессов измеряли квазистатические ВАХ.

На рис. 1, *a* в двойном логарифмическом масштабе представлено семейство выходных ВАХ транзистора № 1, измеренных при различных затворных напряжениях и пошаговом увеличении напряжения стока. Видно, что при $U_g \geq -3$ В токи I_d (U_g, U_d) плавно изгибаются, подчиняясь

общим правилам, но при $U_g < -3$ В ведут себя неупорядоченно. В этой области зафиксированы диэлектрические гистерезисы [13]. Петля одного из них, измеренная при $U_g = -3,1$ В и пошаговом переключении напряжения U_d через каждые 20 с, представлена на рис. 1, б). По сути, это тоже BAX, но из области неупорядоченных токов, измеренная при изменении U_d не в одном направлении, а от больших значений к малым и обратно.

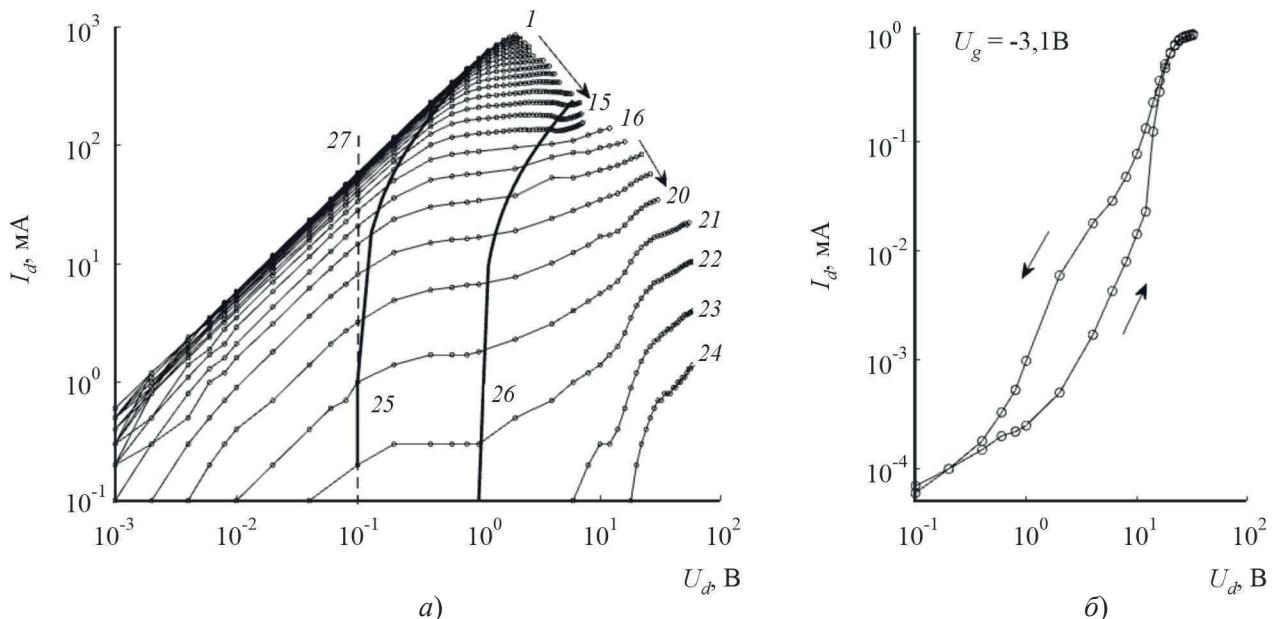


Рис. 1. Семейство BAX транзистора № 1 в двойном логарифмическом масштабе при изменении напряжения на затворе U_g с шагом 0,1 В (а) и диэлектрический гистерезис, измеренный при $U_g = -3,1$ В и пошаговом переключении напряжения стока через каждые 20 с от больших значений U_d к малым и обратно (б):

$I - U_d = -0,9$ В; 15 – $-2,3$ В; 16 – $-2,4$ В; 20 – $-2,8$ В; 21 – $-2,9$ В; 22 – $-3,0$ В; 23 – $-3,1$ В; 24 – $-3,2$ В;
25 и 26 – левая и правая границы области локального насыщения токов стока; 27 – граница линейного режима

В области токов $I_d \leq 1$ мА и напряжений $U_d \leq 0,1$ В повышен разброс экспериментальных точек. Принимая во внимание погрешность измерений, полагаем линии токов прямыми. На рис. 1 эти прямые параллельны, наклонены к оси абсцисс под одинаковым углом и меняются пропорционально U_d . Так ведут себя токи резисторов, сопротивление которых $R(U_g) = U_d / I_d$ зависит только от напряжения U_g на затворе. Например, верхняя BAX, измеренная при $U_g = -0,9$ В, линейна и при $U_d \leq 0,1$ В имеет такое же сопротивление $R = 2$ Ом, как и любая другая BAX, измеренная при $-3 \leq U_g \leq -0,9$ В. Оно равно полному сопротивлению между истоком и стоком, которое включает в себя сопротивление канала под затвором при смещении $U_g = -0,9$ В, сопротивление остальной части канала, сопротивление контактов и областей, соединяющих канал с истоком и стоком. Область линейных токов заканчивается на границе 25 при напряжении $U_d = 0,1$ В.

При дальнейшем увеличении U_d линии тока стока изгибаются вниз, переходя в область локального насыщения, которая заканчивается на границе 26. После пересечения правой границы линии токов изгибаются вверх и токи растут тем круче, чем ближе затворное напряжение

ние ВАХ к порогу U_t . Границы 25 и 26 при возрастании напряжения U_g склоняются вправо, постепенно исчезая при $U_g > -2$ В.

Трансформация ВАХ, измеренных при $U_g \approx U_t$, вызвана инерционностью перестройки диэлектрических доменов. При измерениях не в замедленном, а в ускоренном режиме они оказываются более гладкими. На рис. 2 изображены семейства ВАХ, измеренные в области малых токов в автоматическом режиме при пошаговом переключении напряжения стока через каждые 1,5 с от малых напряжений к большим и обратно. Слева приведены ВАХ нелегированного транзистора (№ 5), справа – ВАХ легированного GaAs НЕМТ ЗП398.

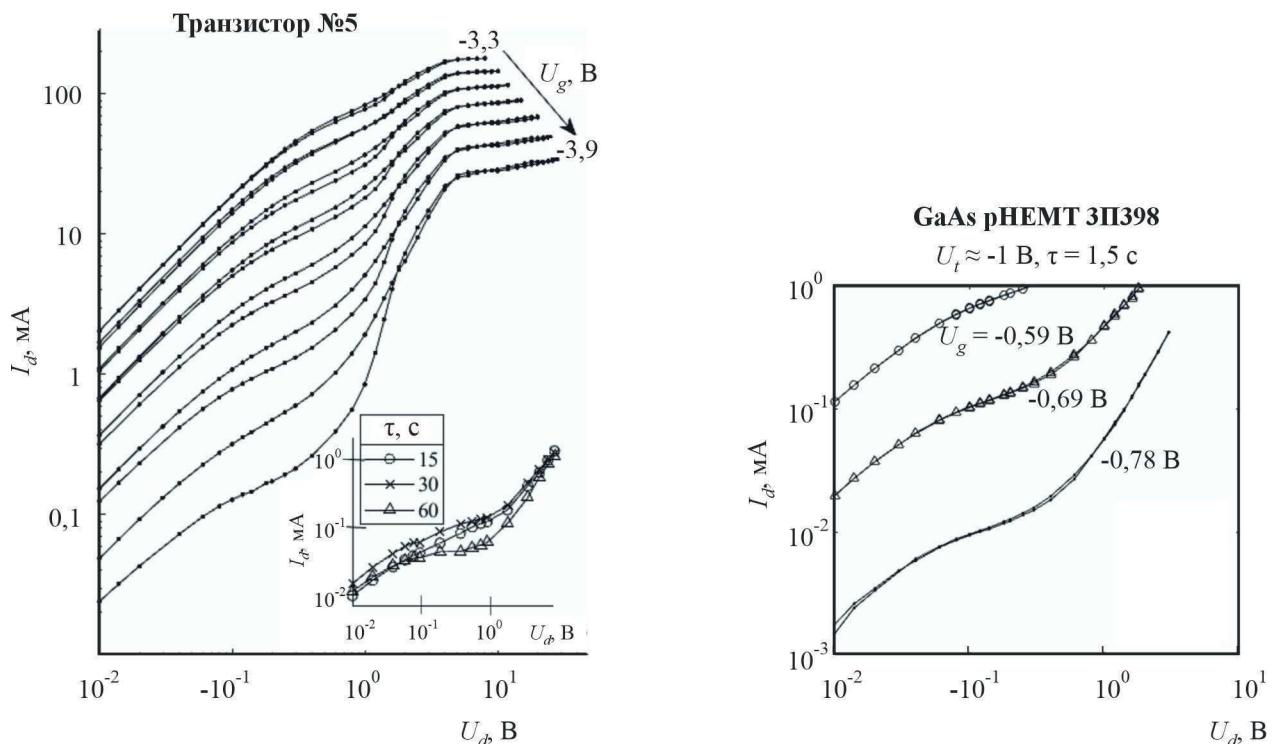


Рис. 2. Примеры ВАХ транзисторов, измеренных пошагово с интервалом $t = 1,5$ с

ВАХ транзистора № 5, измеренные при изменении напряжения стока от малых значений до больших и обратно, идут по разным траекториям, зазор между которыми расширяется по мере снижения затворного напряжения. Если же измерять ВАХ начиная с больших значений U_d и обратно, то чем меньше напряжение затвора, тем шире петля гистерезиса и больше неповторимость измерений.

ВАХ легированного транзистора повторимы и одинаковы при измерениях в любом направлении. Область насыщения выражена не столь рельефно, как на рисунке слева, и границы режима локального насыщения другие: $U_d = 0,05 \dots 0,5$ В. Эксперименты показали, что слабо выраженное локальное насыщение токов стока, обычно незаметное у ВАХ в линейном масштабе, характерно для СВЧ полевых транзисторов.

Нелегированный слой AlGaN является поляризованным диэлектриком, вектор спонтанной и пьезоэлектрической поляризации кристаллической решетки которого ориентирован перпендикулярно каналу. Слой AlGaN, как и слой GaN, имеет [14, 15] сложную структуру: наряду с разнообразными дефектами он содержит диэлектрические домены, размером порядка нанометра,

каждый из которых поляризован по-своему. При подключении к затвору и стоку источников напряжения формируется внешнее электрическое поле, под воздействием которого домены ориентируются в направлении, противоположном полю. В условиях сухого трения переориентация запаздывает по времени, что проявляется [13] в виде нестабильности тока и диэлектрических гистерезисов, подобных изображеному на рис. 1, б. Время запаздывания зависит от свойств диэлектрика и размера доменов и может достигать секунд, минут и более [13, 16].

При достижении равновесия векторы поляризации доменов направлены против вектора внешнего поля, сумма двух полей меньше внешнего поля и воздействие на ток снижается. Поэтому чем больше интервал времени между точками отсчета, тем ближе домены к новому равновесию, тем ближе ток к своему предельно малому и неустойчивому значению. Особенно заметно это отражается на форме ВАХ, измеряемых в области малых токов. В качестве примера на вставке рис. 2 приведена область локального насыщения транзистора № 3, измеренная в режиме $U_g \approx U_t$ при трех возрастающих вдвое интервалах. При $\tau = 15$ с крутизна изгиба ВАХ сопоставима с нижней ВАХ полевого транзистора ЗП398, а при $\tau = 60$ с она сравнима с ВАХ транзистора № 1, измеренной при $U_g = -3$ В (см. рис. 1).

Гистерезисы могут измеряться при вариации как стокового, так и затворного напряжений. При неизменном напряжении $U_g \approx U_t$ и вариации U_d петля гистерезиса широка (см. рис. 1); при неизменном U_d и вариации U_g ширина петли в десятки раз уже и соизмерима с погрешностью измерений. Причина различий в том, что в первом случае домены перестраиваются от части поперек вектору поляризации кристаллической решетки слоя AlGaN, в направлении которого практически нет поляризованных доменов; во втором случае они выстраиваются вдоль вектора поляризации кристалла, в направлении которого их вклад мало заметен.

4. ПРОХОДНЫЕ ВАХ

Рассечем рис. 1 вертикальными прямыми, пересекающими ось абсцисс при различных напряжениях U_d . Зависимости точек пересечения этих прямых с кривыми тока стока описывают проходные ВАХ транзистора $I_d(U_g, U_d) = I_d(U_g)|_{U_d}$, которые на рис. 3 представлены в полулогарифмическом масштабе. Все ВАХ стремятся к насыщению при $U_g \rightarrow 0$. У транзисторов № 2 и 3 ВАХ аналогичны; у транзисторов № 4 и 5 они смещены влево из-за повышенного порогового потенциала $U_t \approx -4,2$ В. Отметим также, что диэлектрические домены слабее влияют на форму проходных ВАХ, что в определенной мере связано с различиями между гистерезисами.

Ток ВАХ пропорционален проводимости канала. Видно, что с увеличением стокового напряжения, начиная с $U_d \geq 0,1$ В, зависимости $I_d(U_g)|_{U_d}$ смещаются вправо, «наползая» на нижележащие зависимости. Но при $U_d \leq 0,1$ В это явление выражено слабо. Например, отношение ординат токов $I_d(U_g)$, измеренных при $U_d = 0,02$ В и при $U_d = 0,01$ В, остается практически постоянным и равным 2 во всем диапазоне измеренных напряжений U_g .

Гораздо лучше это видно на вставке рис. 3, где представлены зависимости локальной крутизны $K_{U_d}(U_g, U_d) = \partial I_d(U_g, U_d)/\partial U_g|_{U_d}$ транзистора при различных напряжениях стока. Видно, что экстремумы крутизны, измеренные при $U_d \leq 0,1$ В, находятся на одной штрихпунктирной прямой, проходящей через $U_g = -2,5$ В. Но, начиная с $U_d > 0,1$ В, все экстремумы смещаются вправо тем заметнее, чем больше U_d . Пометим «шапочкой» верхнее предельное напряжение: $\hat{U}_d = 0,1$ В, проходную ВАХ которого обозначим $\hat{I}_d(U_g)|_{\hat{U}_d}$. Чтобы перейти к любой другой ВАХ $I_d(U_g)|_{U_d}$,

измеренной при $U_d \leq \hat{U}_d$, достаточно сместить предельную ВАХ вниз по оси ординат пропорционально U_d / \hat{U}_d . Таким образом, все подобные ВАХ описываются функцией $I_d(U_g)|_{U_d} = \hat{I}_d(U_g)U_d / \hat{U}_d$. Каковы ее особенности?

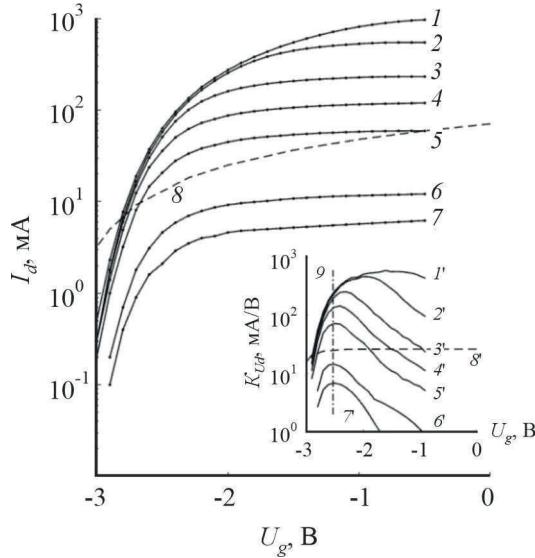


Рис.3. Проходные ВАХ транзистора № 1 при различных напряжениях стока U_d . На вставке зависимости ($1' \dots 7'$) локальной крутизны тока от напряжения U_g при тех же U_d : $1, 1' - U_d = 2$ В; $2, 2' - 1$ В; $3, 3' - 0,4$ В; $4, 4' - 0,2$ В; $5, 5' - 0,1$ В; $6, 6' - 0,02$ В; $7, 7' - 0,01$ В; 8 – зависимость, рассчитанная по формуле (3); $8'$ – локальная крутизна зависимости 8 ; 9 – вертикаль, проходящая через экстремумы локальной крутизны трех нижних кривых $5' \dots 7'$, приведенных на вставке

В общем случае ток стока описывается формулой [17]

$$I_d = W|q|n_s v, \quad (1)$$

где W – ширина затвора; q – заряд электрона; n_s – плотность двумерных электронов в канале; $v = v(E)$ – их дрейфовая скорость, зависящая от электрического поля E , в котором они находятся. При затворных напряжениях $U_g \approx 0$ сопротивление канала, контактов и подводящих путей составляет менее 2 Ом (см. разд. 3). Но при напряжениях $U_g \approx U_t$ сопротивление канала под затвором намного больше сопротивления контактов и подводящих путей. При этом напряжение U_d полностью приложено к области канала под затвором, длину которой, согласно модели полевого транзистора Шокли [17], положим равной длине L_g затвора. Образующееся таким образом поле $E_{ds} = U_d / L_g$ будет определять дрейфовую скорость электронов $v = v(E) = \mu E_{ds} = \mu U_d / L_g$, где μ – их эффективная подвижность. Формула (1) принимает вид

$$I_d(U_g, U_d) = W|q|n_s(U_g, U_d)\mu U_d / L_g = A\mu n_s(U_g, U_d)U_d,$$

где $A = W|q|/L_g$. Переходя к проходным ВАХ, измеренным при $U_d \leq \hat{U}_d$, получим

$$I_d(U_g)|_{U_d} = \hat{I}_d(U_g)U_d / \hat{U}_d = A\mu n_s(U_g)U_d / \hat{U}_d. \quad (2)$$

Таким образом, в области линейно растущих токов стока имеется под область значений $U_d \leq 0,1$ В,

в которой ток стока и плотность электронов $n_s(U_g)$ с точностью до множителя U_d/\hat{U}_d зависят только от напряжения на затворе, т. е. $I_d(U_g) \propto n_s(U_g)$. На рис. 1 граница этой подобласти (граница линейного режима) обозначена штриховой прямой 27, исходящей из абсциссы $U_d = 0,1$ В.

Зная подвижность электронов, можно по любой, измеренной при $U_d \leq 0,1$ В зависимости тока $I_d(U_g) = A\mu n_s(U_g)U_d/\hat{U}_d$ найти плотность электронов в канале под затвором

$$n_s(U_g) = I_d(U_g)/\mu AU_d$$

Можно найти максимальную плотность $n_s(0)$, достигаемую при $U_g = 0$. Например, из рис. 3 выберем ВАХ 5, измеренную при $\hat{U}_d = 0,1$ В. Вблизи $U_g = 0$ ток стока $I_d(U_g = 0) \approx 0,05$ А, множитель $A\hat{U}_d = 1,12 \cdot 10^{-16}$ Кл·В, плотность электронов $n_s(0) = 4,46 \cdot 10^{14}/\mu$. Если принять [18] подвижность $\mu \approx 450$ см²·В⁻¹·с⁻¹, то получим $n_s(0) \approx 1 \cdot 10^{12}$ см⁻².

У легированных полевых транзисторов, включая транзисторы с высокой подвижностью электронов, при малых напряжениях ($U_d < 0,1$ В) также существует линейный режим, в котором плотность электронов зависит только от напряжения на затворе и обычно описывается зависимостью [19]

$$n_s(U_g) = C_g \eta kT/q^2 \ln[1 + \exp(q(U_g - U_t)/\eta kT)]. \quad (3)$$

Здесь C_g – плотность емкости между затвором и серединой канала, Ф/м²; $\eta = 3,8 \dots 5,2$ – коэффициент идеальности затворного барьера Шоттки; kT – тепловая энергия решетки; ток стока удовлетворяет пропорциональности $I_d(U_g) \propto \ln[1 + \exp(q(U_g - U_t)/\eta kT)]$.

На рис. 3 штриховой кривой 8 изображена рассчитанная по этой формуле (при $\eta = 4,5$; $kT = 4,14 \cdot 10^{-21}$ Дж; $U_t = -3$ В) зависимость тока стока, которая наложена на зависимость 5 для облегчения их сопоставления друг с другом; на вставке штриховой кривой 8' приведена зависимость локальной крутизны этого тока. Из рисунка и вставки видно, что в линейном режиме у исследуемого транзистора максимум крутизны достигается при $U_g = -2,5$ В и ток быстро насыщается при $(U_t - U_g)/U_t \approx 0,38$. У легированного образца крутизна почти на порядок меньше и ток растет без насыщения. Можно предположить, что в линейном режиме механизм управления током стока у транзисторов с нелегированным слоем AlGaN реализуется не посредством барьера Шоттки, а иначе. При отсутствии доноров барьер с типичными параметрами барьера Шоттки не образуется и электрическое поле, созданное приложенным к затвору напряжением, воздействует на электроны канала непосредственно через слой диэлектрика AlGaN.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфология квазистатических ВАХ нелегированных GaN/AlGaN полевых транзисторов в области малых токов существенно зависит от концентрации диэлектрических доменов, находящихся в слое AlGaN, от времени их релаксации к устойчивому состоянию, а также от соотношения между временем релаксации и скоростью снятия отсчетов при измерении ВАХ. Диэлектрические домены, обладая собственными векторами поляризации, после переключения напряжения и изменения направления электрического поля медленно и хаотично переориентируются в кристалле диэлектрика, влияя на плотность электронов в канале. Это приводит к нестабильности токов, особенно малых токов, что слабо влияет на выходную мощность и КПД транзистора, работающего в режиме усиления СВЧ-колебаний. Вместе с тем флюктуации векторов поляризации доменов могут привести к появлению избыточных низкочастотных шумов при работе транзистора в режиме СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures / O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart [et al.] // Journal Applied Physcis. – 2000. – Vol. 87, No 1. – P. 334 – 344.
2. **Ковалев, А. Н.** Транзисторы на основе полупроводниковых гетероструктур: монография / А. Н. Ковалев. – М.: МИСИС, 2011. – 364 с.
3. **Yakovlev, G.** Active and buffer layers of GaN HEMT: ECV profiling and 2DEG calculation / G. Yakovlev, V. Zubkov, A. Solomnikova // Materials Research Innovations. – 2020. – Vol. 24, No 7. – P. 1 – 8.
4. Влияние облучения электронами с энергией 0,9 МэВ на вольт-амперные характеристики и низкочастотные шумы 4H-SiC *p-i-n*-диодов / В. А. Добров, В. В. Козловский, А. В. Мещеряков [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 4. – С. 555 – 561.
5. **Fleetwood, D. M.** Total-ionizing-dose effects, border traps, and 1/f noise in emerging MOS technologies / D. M. Fleetwood // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2020. – Vol. 67, No 7. – P. 1216 – 1240.
6. **Колковский, Ю. В.** Радиационная стойкость GaN СВЧ-гетеротранзисторов / Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2023. – Т. 268, № 1. – С. 4 – 11.
7. Compact model of drain current for GaN HEMTs based on 2-DEG charge linearization / N. Karumuri, G. Dutta, N. DasGupta [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63, No 11. – P. 4226 – 4232.
8. On the modeling of high power FET transistors / I. Angelov, M. Thorsell, M. Gavel [et al.] // Proc. 11th European Microwave Integrated Circuits Conference, London, UK, 2016. – P. 245 – 248.
9. Neural network-based hybrid physical model for GaN HEMTs / Haorui Luo, Xu Yan, Jing-yuan Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022. – Vol. 70, No 11. – P. 4816 – 4826.
10. **Shelton, C.** High accuracy angelov model for GaN HEMTs with trapping effects for switch-mode power amplifiers / C. Shelton, A. Eroglu // Proc. IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. – DOI:10.1109/RFM56185.2022.10065155.
11. A nonlinear GaN HEMT modeling with the gm2 and gm3 validation / Heng Fang, Yang Chen, Wen-Jie Sun [et al.] // IEEE 16th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT), Nangjing, China, 2022. – DOI:10.1109/ICSICT55466.2022.9963163.
12. <http://www.svetlana-rost.ru/content/site1/pages/transistors/SVC0902> (дата обращения: 18.11.2024).
13. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики. Т. 3, Электричество / Д. В. Сивухин. – М.: МФТИ, 2004. – 652 с.
14. Низкочастотный шум в эпитаксиальных слоях нитрида галлия с разной степенью упорядоченности мозаичной структуры / Н. М. Шмидт, М. Е. Левинштейн, В. В. Лундин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 9. – С. 1036 – 1038.
15. Unipolar vertical transport in GaN/AlGaN/GaN heterostructures / D. N. Nath, Z. C. Yang, C. Lee [et al.] // Applied Physics Letters. – 2013. – Vol. 103, No 2. – P.022102.
16. ε и $\operatorname{tg} \delta$ при облучении / Н. С. Костюков, А. А. Лукичев, М. И. Муминов [и др.]. – М.: Наука, 2002. – С. 326.
17. **Шур, М.** Современные приборы на основе арсенида галлия / М. Шур; пер. с англ. под ред. М. Е. Левинштейна, В. Е. Челнокова. – М.: Мир, 1991. – С. 632.
18. Рассеяние электронов в гетероструктурах AlGaN/GaN с двумерным электронным газом / Д. Ю. Протасов, Т. В. Малин, А. В. Тихонов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып.1. – С. 36 – 47.
19. Low frequency noise in InAlAs/InGaAs modulation doped field effect transistors with 50-nm gate length / M. E. Levenshtein, S. L. Rumyantsev, R. Tauk [et al.] // Journal of applied physics. – 2007. – Vol. 102, No 6. – P. 064506.

Статья поступила 5 февраля 2025 г.,
после переработки – 10 июля 2025 г.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.3.049.77.029.64

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ РАДИОКОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ

К. Б. Джуринский, А. В. Андросов

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

Приведены объёмы мировых рынков радиочастотных соединителей и миниатюрных проходных помехоподавляющих фильтров. Показано, что эти объёмы сравнимы с затратами на оборону ряда зарубежных стран. Проанализированы основные направления развития радиочастотных соединителей: миниатюризация, продвижение в мм-диапазон частот, повышение допустимой пропускаемой мощности и др. Рассмотрены помехоподавляющие фильтры, выпускаемые зарубежными и отечественными (ОАО «Кулон», АО «НИИ «Гириконд» и АО «НПП «Исток» им. Шокина») компаниями. Показаны основные достижения в области радиокомпонентов за рубежом и в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

КС: радиокомпоненты, радиочастотные соединители, помехоподавляющие фильтры, фильтры низких частот, КСВН, потери

THE MAIN DIRECTIONS OF THE DEVELOPMENT OF COAXIAL RADIO COMPONENTS OF MICROWAVE MICROELECTRONICS

К. В. Dzhurinsky, A. V. Androsov

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

The volume of global markets for RF connectors and miniature pass-through interference-suppressing filters is given. It is shown that the volume of radio frequency connectors is comparable to the defense costs of a number of foreign countries. The main directions of development of radio frequency connectors are analyzed: miniaturization, advancement in the mm-band of frequencies, increase in permissible transmitted power, etc. Interference-suppressing filters produced by foreign and domestic companies of JSC «Kulon», JSC Scientific Research Institute «Girikond» and JSC «RPC «Istok» named after Shokin» have been considered. The main achievements in the field of radio components both abroad and in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» are shown.

Keywords: radio components, RF connectors, interference-suppressing filters, low-pass filters, VSWR, losses

1. ВВЕДЕНИЕ

В состав элементной базы коаксиальных радиокомпонентов микроэлектроники СВЧ входят соединители и адAPTERы, помехоподавляющие фильтры, СВЧ- и низкочастотные вводы (выводы). Но основное значение придаётся радиочастотным соединителям и помехоподавляющим фильтрам. Радиочастотные соединители необходимы в широком спектре областей применения: от телекоммуникаций и радиовещания до аэрокосмической и оборонной отраслей. В настоящее

время разработаны радиочастотные соединители более 75 типов. Эффективная фильтрация электромагнитных помех (ЭМП) необходима практически для каждого современного электронного устройства. Общепризнано, что основным средством подавления ЭМП и развязывания по высокой частоте цепей питания и управляющих сигналов является фильтр низких частот (EMI-фильтр), который пропускает низкочастотный сигнал и блокирует нежелательные высокочастотные помехи.

2. РАДИОЧАСТОТНЫЕ СОЕДИНТЕЛИ

Мировой рынок радиочастотных коаксиальных соединителей в 2023 году оценивался в 7,55 млрд долларов США, и ожидается, что он будет расти на 6,55 % в год в период с 2024 по 2030 год, достигнув ~11,77 млрд долларов (рис.1) [1]. Много это или мало? По данным работы [2], «в 2023 году мировой объём рынка РЭА СВЧ составлял около 150 млрд долларов, а стоимость СВЧ ЭКБ, с применением которой была изготовлена СВЧ РЭА, составляет порядка 10,6 млрд долларов».

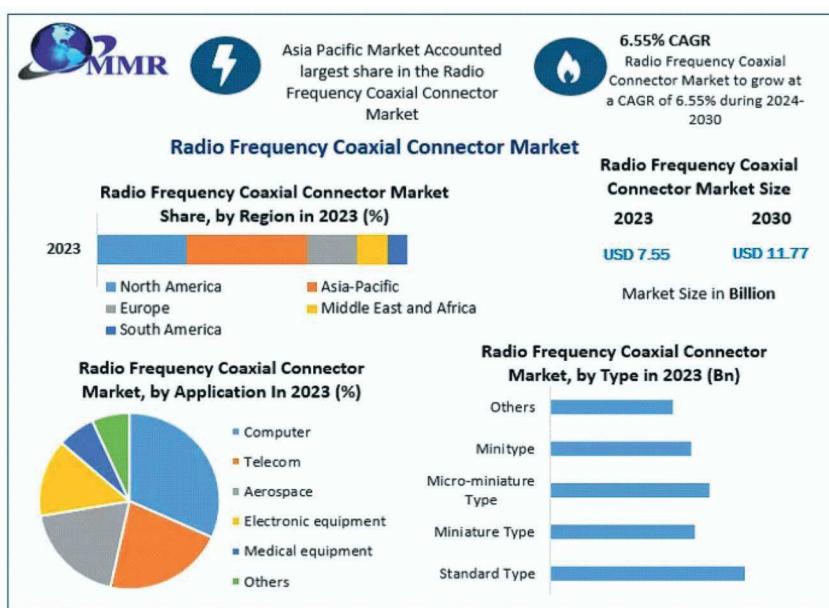


Рис.1. Прогноз рынка радиочастотных соединителей на 2024 – 2030 годы

Заметим также, что объём рынка радиочастотных соединителей больше, чем затраты на оборону Ирана, Бельгии и некоторых других стран.

По прогнозам, Азиатско-Тихоокеанский регион: Китай, Тайвань, Южная Корея, Индия и Япония – станет ведущим регионом на мировом рынке. Ключевыми компаниями на мировом рынке радиочастотных коаксиальных соединителей являются: Molex, Samtec, SMK, Amphe-nol и Pasternack (США), Rosenberger (Германия, США), Telegartner (Германия), Huber+Suhner (Швейцария), JAE и I-Pex (Япония), Foxconn (Тайвань), Mechanc и Talent (Китай).

Стратегические возможности роста рынка радиочастотных соединителей обуславливают:

1. Быстрое развитие технологий мобильной связи и растущая потребность в широкополосной передаче данных в сфере телекоммуникаций. Внедрение технологии 5G увеличивает спрос на усовершенствованные коаксиальные соединители, способные работать на более высоких частотах и с более высокими параметрами.

2. Растущее применение соединителей в аэрокосмической, военной, автомобильной, медицинской электронике.

3. Стремительное развитие Интернета вещей (IoT) и беспроводных решений. По прогнозам, к 2026 году рынок Интернета вещей достигнет 1,1 триллиона долларов, что создаст значительные возможности для производителей радиочастотных соединителей и фильтров электромагнитных помех.

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ СОЕДИНТЕЛЕЙ

3.1. Миниатюризация

Тенденция к миниатюризации существует практически во всех отраслях. В медицине это магнитно-резонансная томография, имплантируемые устройства, носимые мониторы состояния здоровья, диагностическое оборудование. Развёртывание сетей 5G также требует применения всё более миниатюрных радиочастотных соединителей для передачи данных на высоких частотах и с высокой скоростью. Взамен традиционных соединителей 7/16, разработанных в 1949 году Георгом Спиннером для антенных систем и базовых станций, уже созданы более миниатюрные соединители: 4/3-10, 2,2-5, NEX10 и 1.5-3.5 (рис. 2) [3].



Рис. 2. Соединители 7/16, 4/3-10, 2,2-5, NEX10 и 1.5-3.5

По прогнозам Международного союза электросвязи, к 2025 году во всём мире будет более 1,5 миллиарда абонентов 5G и 21 % всех сотовых соединений в мире будут 5G-соединениями. В связи с этим потребуются миниатюрные соединители для портативных и мобильных устройств и соединители с более высокой мощностью и низким уровнем пассивной интеграции для базовых станций, а также для межсетевых соединений с высокой пропускной способностью в мм-диапазоне частот.

Особое значение миниатюризация имеет для микроэлектроники СВЧ, применяемой в системах связи, радиолокации и военной технике. В современной войне солдаты должны быть оснащены всё более сложными устройствами электронной техники. И им приходится таскать на себе то, что называется «портативной» электроникой, которая скоро будет весить столько же, сколько они сами. И радиокомпоненты составляют заметную долю в этом (рис. 3) [4].

В настоящее время за рубежом разработаны в диапазоне частот 0...100 ГГц миниатюрные и микроминиатюрные соединители многих типов. Созданы несколько серий микроминиатюрных соединителей I-PEX в диапазоне частот 0...8 ГГц (рис. 4) [5].



Рис.3. Солдат НАТО



Рис. 4. Соединители I-PEХ

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» впервые в нашей стране была разработана серия из восьми миниатюрных защелкиваемых соединителей типа SMP. Также разработаны и серийно выпускаются миниатюрные и микроминиатюрные СВЧ- и НЧ-вводы многих типов.

3.2. Продвижение в мм-диапазон длин волн

Казалось бы, поскольку в мм-диапазоне длин волн и компоненты, и системы становятся всё меньше и меньше, возможности для использования кабелей и соединителей также должны сокращаться. Однако даже при таком высоком уровне интеграции в различных местах схемы по-прежнему будут требоваться межсоединения и измерение параметров компонентов.

Интерес к мм-волнам простирается далеко за пределы частоты 110 ГГц и достигает несколько сотен гигагерц. Возможно ли создать коаксиальный соединитель, способный работать на ещё более высоких частотах, чем 110 ГГц? Судя по всему, да, о чём свидетельствует создание компанией Anritsu, США, соединителя 0,8 мм для работы в диапазоне частот 0...145 ГГц с максимальными значениями КСВН (1,67) и потерь (0,70 дБ). Известно, что эта компания продолжает работу по созданию ещё более миниатюрных соединителей: 0,6 мм (предельная частота 220 ГГц) и 0,4 мм (332 ГГц) [6]. Трудно представить, что такие соединители могут быть изготовлены, не говоря уже о том, чтобы ими могли бы пользоваться.

Для беспроводных систем нового поколения необходимы соединители с увеличенной пропускной способностью в диапазоне частот 0...30 ГГц. Соединители Е-диапазона (0...90 ГГц) необходимы для автомобильных радаров, систем спутниковой связи, векторных анализаторов цепей [6].

3.3. Повышение допустимой пропускаемой мощности

С ростом частоты допустимая пропускаемая мощность соединителя уменьшается. Так, например, допустимая средняя мощность применяемого соединителя SMA равна 500 Вт на частоте 600 МГц и лишь 80 Вт на частоте 18 ГГц. Есть и второе ограничение для повышения

допустимой мощности: чем миниатюрнее соединитель, а значит, чем меньше размеры его коаксиальной линии, тем меньше и пропускаемая мощность.

В соединителях с более высокой мощностью необходимо учитывать выделяемую тепловую энергию и возможность пробоя. По мере того как соединители становятся меньше и располагаются ближе друг к другу, количество выделяемого тепла на единицу площади увеличивается. В результате рассеивание тепла становится серьёзной проблемой.

3.4. Соединители специального назначения

К ним, прежде всего, относятся соединители космического применения. Развитие радиолокационных средств космического базирования потребовало создания элементной базы с минимальными размерами и массой, обеспечивающей возможность надежной длительной работы без пробоев в вакууме при высоком уровне СВЧ-мощности. Пробой в соединителях может происходить в результате ионизационного или мультипакторного высокочастотных разрядов при воздействии СВЧ- поля в замкнутых воздушных полостях (зазорах) между проводниками коаксиальной линии соединителей [7].

Одним из самых эффективных способов предупреждения пробоев является создание вентиляционных каналов, соединяющих устройство с вакуумным пространством космоса. На нашем предприятии в результате совместной работы с ОКБ МЭИ и Ижевским радиозаводом накоплен некоторый опыт создания и производства соединителей средней мощности типа 3,5 мм с воздушной коаксиальной линией. Ещё больше необходимы соединители повышенной мощности типа TNC с улучшенными параметрами.

Специальные кабельные соединители необходимы для гибридного кабеля, состоящего из оптического волокна и медного провода. Используя оптическое волокно для передачи сигналов данных и медный провод для передачи мощности, гибридные кабели могут передавать мощность на большие расстояния с высокой скоростью.

Нельзя пройти мимо недавней разработки самого миниатюрного в мире резьбового соединителя APC-0,47 (вилка и розетка) с предельной частотой 110 ГГц канадской компании DUT Electronics [8]. В этом соединителе отсутствует привычное для нас соединение штырь – цанга, роль коаксиальной линии играет полужесткий кабель 0,047". Соединение с печатной платой происходит вертикально (встык) через так называемый «*interposer*» (промежуточную прокладку) с контактными выступами из упругого органического электропроводящего материала (рис. 5). Допустимое количество соединений с печатной платой – более 100000. В диапазоне частот 0...99 ГГц максимальный КСВН соединителя составляет 1,83, потери – 0,95 дБ.

Если считать, что инновация – это создание или получение ценности новыми и необычными способами, то соединитель APC-0,47 несомненно является инновационным решением.

Большой интерес представляют также соединители и кабели для квантовых компьютеров. Современные квантовые компьютеры внешне напоминают люстры и функционируют при определенной температуре (рис. 6) [9]. Коаксиальные кабельные сборки необходимы для передачи кубитам высокочастотных сигналов с целью изменения их состояния и выполнения операций. Внутри криогенной камеры квантового компьютера для герметичной установки между секциями необходимы соединители и кабели, способные работать в вакууме при экстремально низких температурах. Еще одним требованием является компактность соединения, чтобы максимально приблизить точки доступа сигналов к процессору. В квантовых компьютерах используют толь-

ко немагнитные компоненты в ключевых областях тракта передачи сигнала, чтобы исключить помехи от внешних магнитных полей.

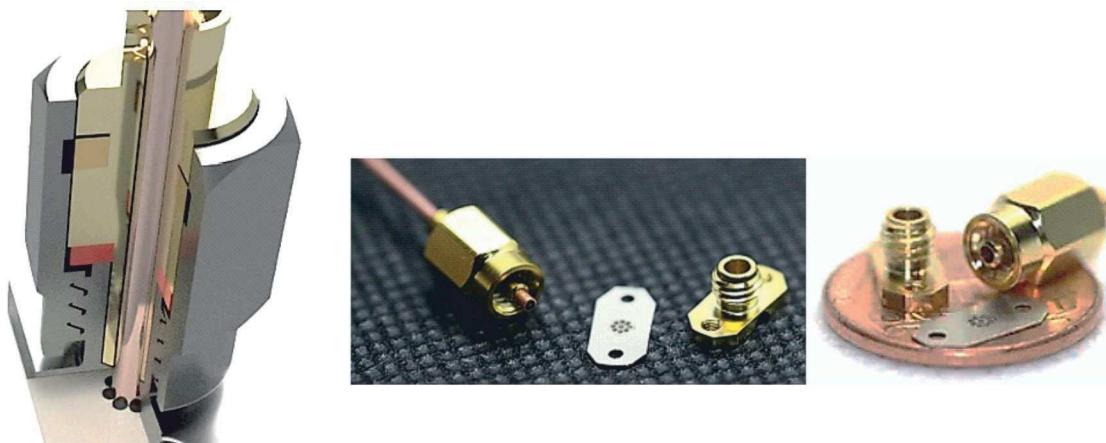


Рис. 5. Соединитель APC-0,47

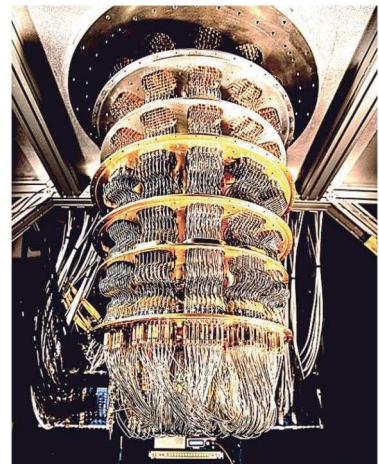


Рис. 6. Внешний вид квантового компьютера

3.5. Применение новых материалов и покрытий для изготовления соединителей

Для изготовления корпусов соединителей во всем мире используют нержавеющую сталь, латунь и сплав 29 НК (для спаев со стеклом, если необходима герметичность), а для пружинящих контактов – термообработанную бериллиевую бронзу. Основная проблема заключается в отсутствии необходимых диэлектрических материалов. В нашей стране нет производства капилляров из стекла C37-2 с диэлектрической проницаемости 4,0…4,1, аналога стекла Corning 7070, без которого создание герметичных соединителей мм-диапазона (с частотой более 40 ГГц) невозможно.

Для соединителей повышенной мощности необходимы полимеры, типа зарубежного Fluoroloy H, с теплопроводностью 1,21 Вт/(м·К) (в 5 раз большей, чем у фторопласта). И наконец, для изготовления диэлектрических шайб соединителей мм-диапазона необходимы полимеры – аналоги зарубежных полимеров Ultem 1000, PEEK, Noryl.

Соединители для медицины (например, для МРТ, эндоскопов и датчиков) должны быть изготовлены из немагнитных материалов с магнитной проницаемостью 1,0005, традиционное гальваническое никелевое покрытие в них заменяют на немагнитное покрытие никель-фосфор.

Ещё одним перспективным направлением для радиочастотных соединителей является применение полимеров. Благодаря низкой плотности и хорошим свойствам, соединители из электропроводящего полимера вызывают всё больший интерес.

3.6. Повышение скорости соединения и рассоединения

Повышенный спрос на соединители байонетные, нажимные-поворотные, защелкивающиеся, устойчивые к вибрации и натяжению кабеля не ослабевает, особенно в связи с появлением миниатюрных соединителей. Например, соединители QMA и QN были разработаны для замены соединителей SMA и N и уже несколько лет доступны на рынке.

3.7. Соединители для поверхностного монтажа на печатные платы

Для поверхностного монтажа применяют большое число миниатюрных и микроминиатюрных соединителей. Соединители типа SMP освоили в производстве отечественные компании, однако многие микроминиатюрные соединители с диапазоном рабочих частот 0... 8 ГГц: MMS, U.HL Hirose, I-PEX и др. – ещё предстоит разработать и выпускать.

4. ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

В 2023 году объем мирового рынка миниатюрных проходных фильтров EMI/RFI оценивался примерно в 1,2 млрд долларов США, а к 2032 году, по прогнозам, достигнет 2,1 млрд долларов США, демонстрируя стабильный среднегодовой темп роста около 6,3 % [10].

Рост рынка поддерживается растущим спросом на фильтры в аэрокосмической, оборонной, медицинской, автомобильной и других отраслях. Этому способствует также рост систем беспроводной связи и устройства Интернета вещей, которым необходимы надёжные решения для защиты от электромагнитных помех.

Различают две большие группы миниатюрных помехоподавляющих фильтров: проходные, монтируемые в корпуса изделий, и чип-фильтры для поверхностного монтажа на печатные платы. Зарубежные фильтры показаны на рис. 7, а серийные отечественные фильтры – на рис. 8, 9 [3].

Миниатюрные фильтры предприятий «Кулон» и «Гириконд» по основным параметрам не уступают зарубежным аналогам. Однако все миниатюрные отечественные фильтры и подавляющее большинство зарубежных фильтров герметизированы эпоксидным компаундом. Такие фильтры не имеют требуемой для микроэлектроники СВЧ высокой герметичности ($10^{-11}\text{м}^3\cdot\text{Па}/\text{с}$) и не обеспечивают необходимой температуры нагрева при пайке в корпуса изделий.

НПП «Исток» – единственное предприятие в нашей стране, которое разработало серию L-C-фильтров, герметизированных металлокерамическим спаем для обеспечения требуемой герметичности [3].

В этих фильтрах (см. рис. 9) применены миниатюрные трубчатые конденсаторы из керамического материала Т-10000 с диэлектрической проницаемостью 10000...12000, обеспечивающие электрическую ёмкость фильтров 1500...10000 пФ. От величины электрической ёмкости зависит вносимое затухание – основной параметр помехоподавляющих фильтров.

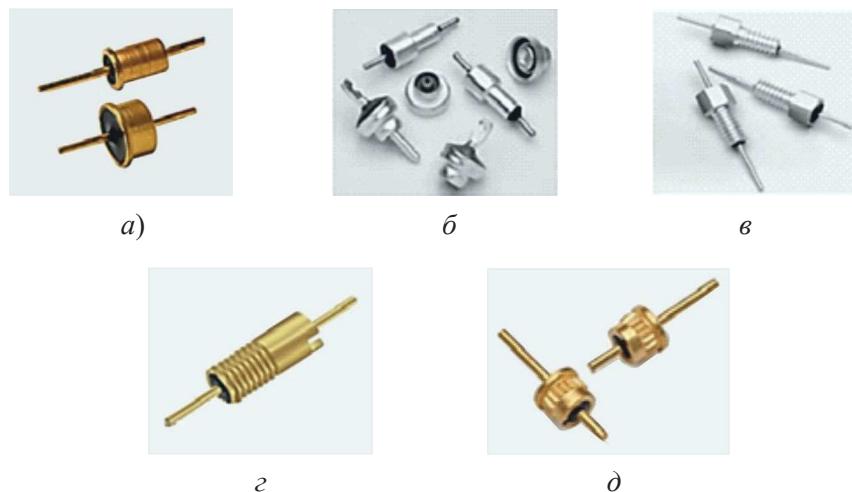


Рис. 7. Зарубежные миниатюрные фильтры:

а – безрезьбовые, герметизированные металлостеклянным спаем; *б* – безрезьбовые, герметизированные эпоксидным компаундом; *в* – резьбовые, герметизированные эпоксидным компаундом; *г* – резьбовые, без шестигранной головки; *д* – для прессовой посадки



Рис. 8. Миниатюрные фильтры АО «НИИ «Гириконд» и ОАО «Кулон»



Рис. 9. Миниатюрные герметичные фильтры АО «НПП «Исток» им. Шокина»

За рубежом во всех миниатюрных фильтрах независимо от электрической ёмкости применяют многослойные дисковые конденсаторы с ёмкостью от единиц пикофарад до нескольких десятков нанофарад. Минимальный наружный диаметр зарубежного дискового конденсатора равен $(1,27 \pm 0,25)$ мм, наружный диаметр самого миниатюрного отечественного дискового конденсатора – $(4,0 \pm 0,5)$ мм (рис.10) [3].

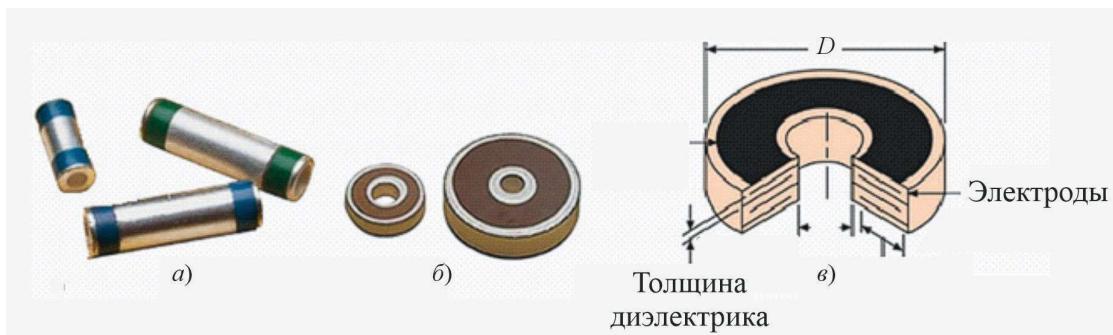


Рис. 10. Внешний вид трубчатых (а), дисковых (б) конденсаторов и конструкция многослойного дискового конденсатора (в)

5. ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИОКОМПОНЕНТОВ ЗА РУБЕЖОМ И В АО «НПП «ИСТОК» ИМ. ШОКИНА»

Основные достижения в области радиокомпонентов за последние 10 лет за рубежом и в АО «НПП «Исток» им. Шокина» показаны в таблице.

Зарубежные достижения в области радиокомпонентов	Достижения АО «НПП «Исток» им. Шокина»
Соединители E (0...90 ГГц) и W (0...110 ГГц) диапазонов частот	Нет
Соединители для базовых станций 5G-поколения	Нет
Герметичные адаптеры в диапазоне частот 0...40 ГГц	Разработаны 3 типа. Защищены патентами
Вертикальные соединители для монтажа на печатные платы без пайки	Нет
Соединители SMP повышенной вибростойкости	Нет
Адаптеры SMA быстрого подключения – «хранители» приборных соединителей	Разработаны 2 типа. Защищены патентом. Получены 829 заявок на изготовление. Выпуска ешё нет
Миниатюрные помехоподавляющие фильтры на основе дисковых многослойных конденсаторов	Нет, хотя на предприятии имеется технология многослойной керамики
Миниатюрные герметичные фильтры без органических компаундов (за рубежом нет)	Разработаны и серийно выпускаются миниатюрные герметичные фильтры 15 типов, не имеющие отечественных аналогов
Миниатюрные фильтры для компактной установки	Нет

6. ВЫВОДЫ

1. Развитие элементной базы радиокомпонентов должно стать одним из приоритетных направлений развития АО «НПП «Исток» им. Шокина», так как без этого невозможно реализовать большинство программ по микроэлектронике СВЧ.

2. АО «НПП «Исток» им. Шокина» долгое время занимал лидирующие позиции в нашей стране в создании новых радиокомпонентов с параметрами, не уступающими зарубежным аналогам. В дальнейшем эти позиции в значительной мере были утрачены. Больших успехов добились предприятия «Микран», «Атлант», «Иркутский релейный завод», «Амитрон», которые вложили необходимые средства в проведение ОКР по воспроизведению зарубежных радиочастотных соединителей многих типов и наладили их серийное производство.

3. В настоящее время проводить НИР и ОКР на нашем предприятии стало практически трудной задачей, так как всё полностью подчинено поставкам радиокомпонентов, требуется слишком много времени на большое количество бюрократических согласований на открытие работы и отчётность.

Автор благодарит А. В. Андросова за содействие в публикации данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radio frequency coaxial connector market – global industry analysis and forecast (2024 – 2030). – <https://www.maximizemarketresearch.com>.
2. Российский форум «Микроэлектроника 2024» // Электроника НТБ. – 2025. – № 1. – С. 41.
3. **Джуринский, К. Б.** Радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / К. Б. Джуринский. – М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2024. – 380 с.
4. For next generation soldiers. shunlongwei.com.
5. What are I-PEX MHF Connectors? – everythingsRF.everythingrf.com.
6. **Кищинский, А. А.** Твердотельные усилители СВЧ-диапазона. Новые радиочастотные соединители / А. А. Кищинский, К. Б. Джуринский. – М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2022. – 432 с.
7. **Джуринский, К. Б.** Радиочастотные соединители, адаптеры и кабельные сборки / К. Б. Джуринский. – М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. – 400 с.
8. **Джуринский, К. Б.** Миниатюрные вертикальные резьбовые соединители с предельной частотой 110 ГГц для соединения с печатными платами сто тысяч раз / К. Б. Джуринский, В. И. Алексеенков, В. А. Стёпушкин // Современная электроника. – 2025. – № 4. – С. 52 – 56.
9. **Джуринский, К. Б.** О квантовых компьютерах, радиочастотных кабелях и соединителях / К. Б. Джуринский // Электроника НТБ. – 2025. – № 5 и 6 (в печати).
10. EMI Feedthrough Filters Market Report – Dataintelo. – <https://dataintelo.com>.

Статья поступила 11 июля 2025 г.

УДК 621.396.62/61

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРУЖИННЫХ КОНТАКТОВ
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-СИГНАЛОВ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИИ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ**

**М. С. Карапасев, Н. А. Коротаев, Р. А. Тлюстангелов, Е. Н. Воронцов,
С. Ю. Будзинский, С. А. Щёголев, Д. С. Кинденов, Г. В. Быковский,
Д. Н. Полозов, А. В. Адиатулин**

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

Статья посвящена исследованию возможности изготовления пружинного СВЧ-соединителя для использования его в составе приемопередающего модуля (ППМ) и контактирующего устройства контроля электрических параметров данного типа ППМ. Описан импортный функциональный аналог разрабатываемого СВЧ-соединителя, проведен анализ существующих СВЧ-соединителей и пружинных контактов, разработана конструкция пружинного контакта и СВЧ-соединителя, разработана методика сборки пружинного контакта и СВЧ-соединителя в целом, проведены эксплуатационные испытания и сравнительный анализ характеристик разработанных СВЧ-соединителей.

КС: СВЧ-соединитель, пружинный контакт, приемопередающий модуль, контактирующее устройство

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF DOMESTIC SPRING CONTACTS
FOR TRANSMITTING MICROWAVE SIGNALS AS PART OF THE DESIGN
OF ADVANCED TRANSCEIVER MODULES**

**M. S. Karasev, N. A. Korotaev, R. A. Tlyustangelov, E. N. Vorontsov,
S. Yu. Budzinskiy, S. A. Shchegolev, D. S. Kindenov, G. V. Bykovskiy,
D. N. Polozov, A. V. Adiatulin**

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

The paper is devoted to studying the possibility of manufacturing a spring microwave connector for using it in the transceiver module and an electrical parameter control contacting device of this type of the transceiver module. An imported functional analogue of the developed microwave connector is described. The existing microwave connectors and the spring contacts are analyzed. The design of a spring contact and a microwave connector is developed. A method for assembling a spring contact and a microwave connector as a whole are developed. The operational tests and a comparative analysis of the characteristics of the developed microwave connectors are conducted.

Keywords: microwave connector, spring contact, transceiver module, contacting device

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в составе современных электронных устройств все чаще используются пружинные соединители для передачи как низкочастотных (НЧ), так и сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Конструкция таких пружинных соединителей может кардинально отличаться и зависеть от типа решаемой задачи.

В статьях [1–3] приведены конструкции приемопередающих модулей (ППМ), имеющих в своем составе СВЧ-соединители, применение которых позволяет снизить трудоемкость сборки модулей многоканальных приемопередающих (ММПП), обеспечить высокий уровень развязки каналов ММПП и надежное соединение ММПП и ППМ.

Однако у данного конструктивного решения есть ряд недостатков, связанных с необходимостью повышенной точности изготовления СВЧ-выводов с обратной стороны многослойной платы ППМ и плат ММПП, а также требованием минимальной неплоскости основания ППМ и места установки ППМ в ММПП.

Ключевой проблемой использованных в работах [1–3] СВЧ-соединителей является применение золотой проволоки, «путанки», для обеспечения передачи СВЧ-сигналов. Использование такой «путанки» при сжатии соединителя может приводить к давящему воздействию на многослойную плату LTCC и появлению трещин в конструкции ППМ. Также некачественное изготовление «путанки» может привести к короткому замыканию (КЗ) между соседними проводниками (рис. 1), что влияет на надежность работы канала ММПП.



Рис. 1. Области возникновения КЗ между проводниками СВЧ-соединителя

Анализ рынка соединителей показывает, что проблема с КЗ и отсутствием сжатия «путанки» может быть решена за счет использования пружинных контактов. На рис. 2 показан импортный аналог представленного в статьях [1–2] СВЧ-соединителя, а на рис. 3 – импортный контакт, обеспечивающий передачу СВЧ-сигналов.

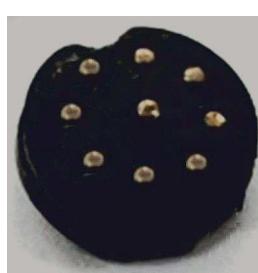


Рис. 2. Импортный аналог СВЧ-соединителя



Рис. 3. Импортный пружинный контакт

В настоящее время в связи с санкционными ограничениями импортные СВЧ-соединители поставить на территорию РФ стало невозможно, а применение СВЧ-соединителя с «путанкой» на контактном устройстве недопустимо в связи с проблемами, описанными выше.

Целью данной работы являлось исследование возможности изготовления отечественного пружинного СВЧ-соединителя для использования его в составе конструкции ППМ и контактирующего устройства контроля электрических параметров данного типа ППМ.

2. КОНСТРУКЦИЯ ПРУЖИННОГО КОНТАКТА И СВЧ-СОЕДИНИТЕЛЯ

Конструкция разрабатываемого отечественного СВЧ-соединителя должна соответствовать габаритным размерам импортного аналога и имеющегося соединителя, описанного в статьях [1–3], так как конструкция ППМ имеет определенную выборку в металлическом теплоотводящем основании (рис. 4). Области установки СВЧ-соединителя на рисунке обозначены красным цветом. Требуемые габаритные размеры СВЧ-соединителя приведены на рис. 5.



Рис. 4. Конструкция ППМ
и области установки СВЧ-соединителя

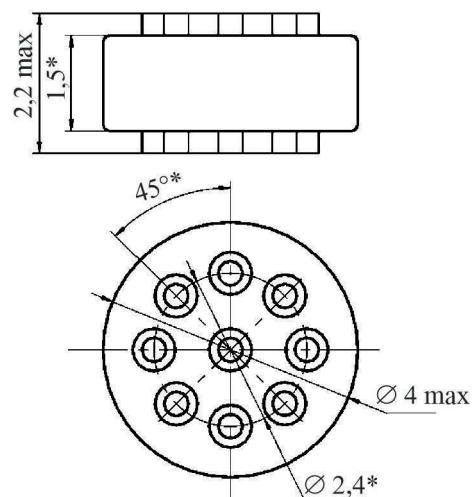


Рис. 5. Требуемые габаритные размеры
СВЧ-соединителя

Способ контактирования ППМ с ММПП и контактным устройством для измерения электрических параметров приведен на рис. 6.



Рис. 6. Способ контактирования ППМ с ММПП и контактным устройством
для измерения электрических параметров

Проанализировав принцип построения пружинных контактов компаний Horutech, Mill-Max, Wiselink, Yokowo, Pomagtor и C.C.P., были разработаны чертежи деталей, приведенные на рис. 7.

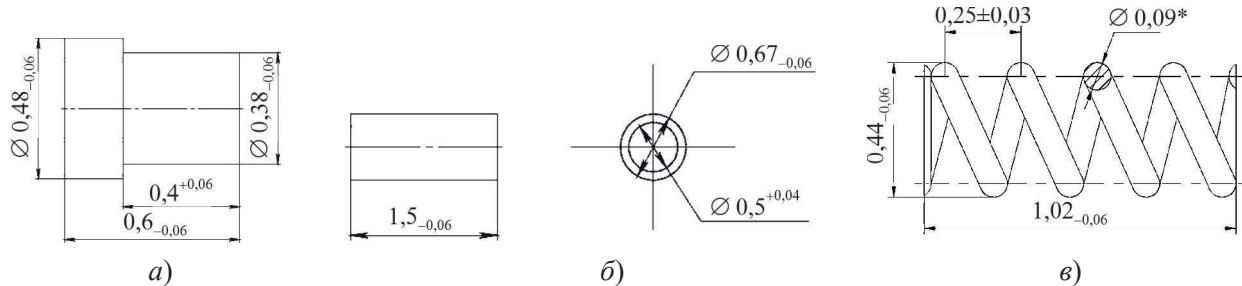


Рис. 7. Чертежи деталей разрабатываемого пружинного контакта:
 а – контакт; б – корпус; в – пружина

Детали были изготовлены (рис. 8) техническими специалистами АО «НПП «Исток» им. Шо-кина». Контакты и корпус выполнены из латуни, а пружина – из стали.



Рис. 8. Изготовленные детали
 разрабатываемого пружинного контакта

Для сборки пружинного контакта был разработан сборочный чертеж (рис. 9).

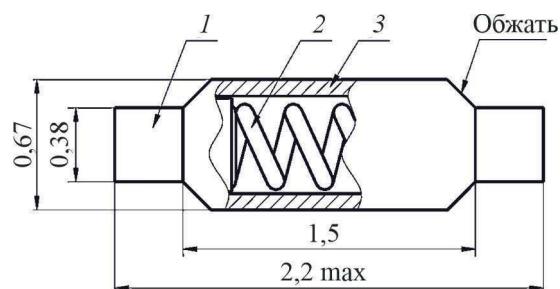


Рис. 9. Сборочный чертеж пружинного контакта:
 1 – контакт; 2 – пружина; 3 – корпус

Диэлектрик, являющийся основой для СВЧ-соединителя, выполнен из полимерного материала – полиэфиркетона.

Для сборки СВЧ-соединителя был разработан сборочный чертеж (рис. 10).

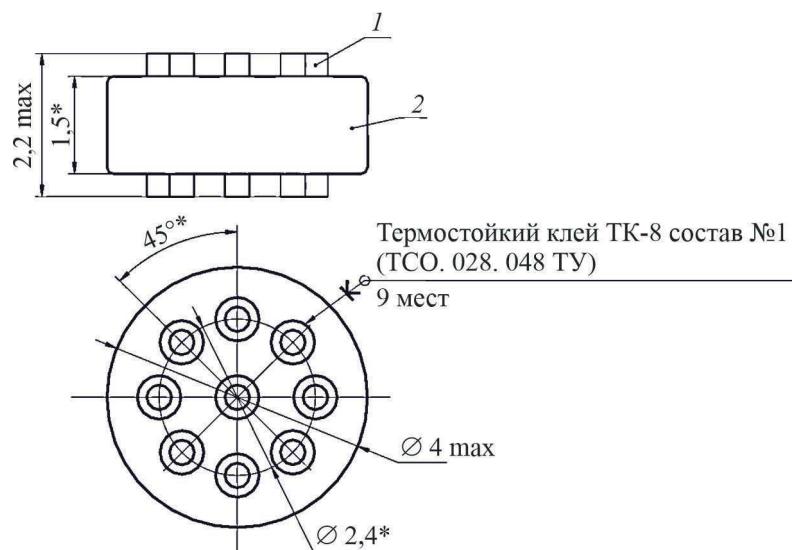


Рис. 10. Сборочный чертеж СВЧ-соединителя:
1 – пружинный контакт; 2 – основание из полиэфиркетона

3. МЕТОДИКА СБОРКИ ПРУЖИННОГО КОНТАКТА И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-СОЕДИНИТЕЛЯ

На основе сборочного чертежа (см. рис. 9) была разработана методика сборки пружинного контакта, приведенная ниже (рис. 11). Сборка производилась при помощи микродрели и пинцета.

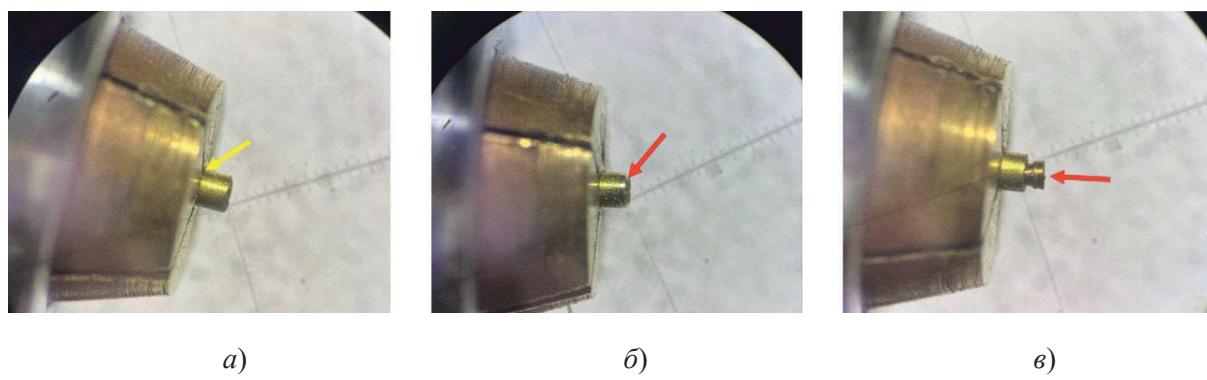


Рис.11. Методика сборки пружинного контакта (см. также с. 79):
а – закрепление корпуса в патрон; б – обжим края корпуса; в – закрепление корпуса в патрон обратной стороной и установка контакта № 1

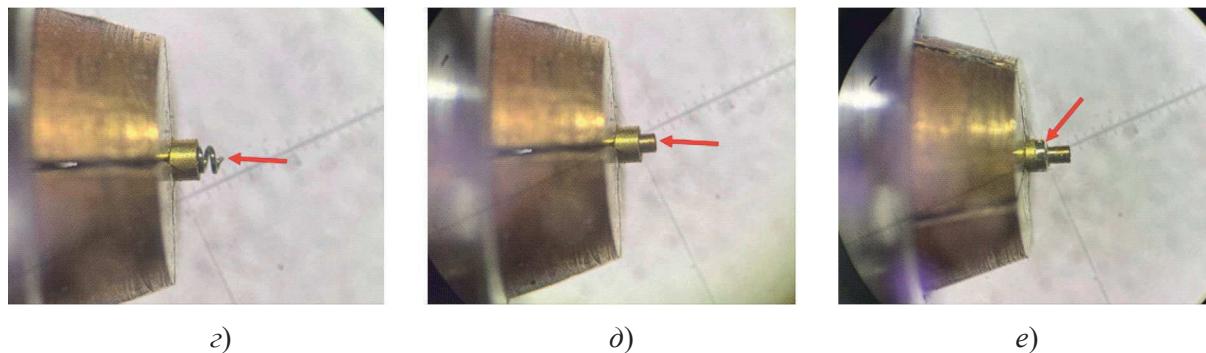


Рис.11. Методика сборки пружинного контакта:

ε – установка пружины в корпус; δ – установка контакта № 2; ε – обжим края корпуса с установленными внутрь деталями

Полученный в результате сборки пружинный контакт приведен на рис. 12.



Рис. 12. Пружинный контакт



Рис. 13. Собранный образец СВЧ-соединителя

После сборки СВЧ-соединитель был передан в эксплуатацию в составе контактного устройства для измерения электрических параметров ППМ, показанного на рис. 6.

Вид СВЧ-соединителя после 500 циклов (около 100 шт. ППМ) измерения электрических параметров ППМ показан на рис. 14.



Рис. 14. СВЧ-соединитель
после 500 циклов измерения электрических параметров ППМ

СВЧ-соединитель выдержал эксплуатационные испытания и используется в настоящее время. Полученные характеристики КСВН и прямых потерь разработанного СВЧ-соединителя показаны на рис. 15 и 16. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей Keysight Technologies N5242A при пропускаемой мощности минус 30 дБм.

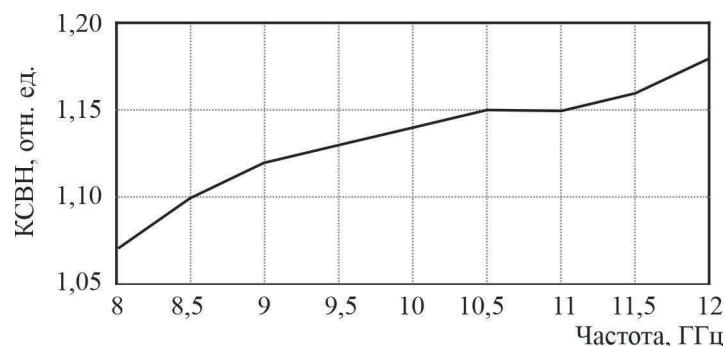


Рис.15. КСВН разработанного отечественного СВЧ-соединителя

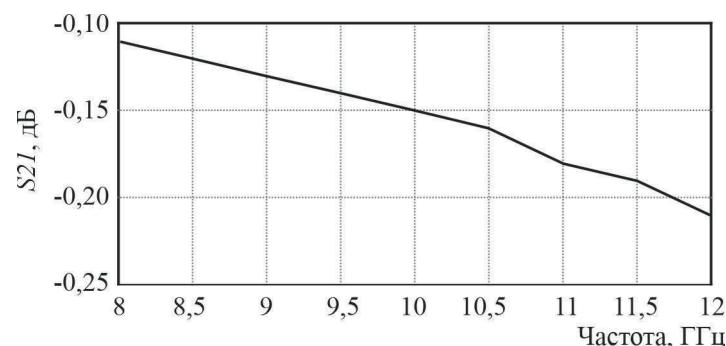


Рис. 16. Прямые потери сигнала
при прохождении через отечественный СВЧ-соединитель

Полученные характеристики КСВН и прямых потерь СВЧ-соединителя сравнимы с характеристиками СВЧ-соединителя, приведенного в статьях [1–3]. Однако разработанный СВЧ-соединитель не имеет недостатков, описанных во введении данной статьи.

4. СБОРКА СВЧ-СОЕДИНИТЕЛЯ НА БАЗЕ ПРУЖИННОГО КОНТАКТА ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ С.С.Р.

В процессе анализа производимых зарубежных пружинных контактов был выявлен пружинный контакт CS97175M2, близкий по габаритным размерам в части входящих в него деталей, а именно контакта и корпуса. Габаритный чертеж пружинного контакта, производимого компанией С.С.Р., представлен на рис. 17.

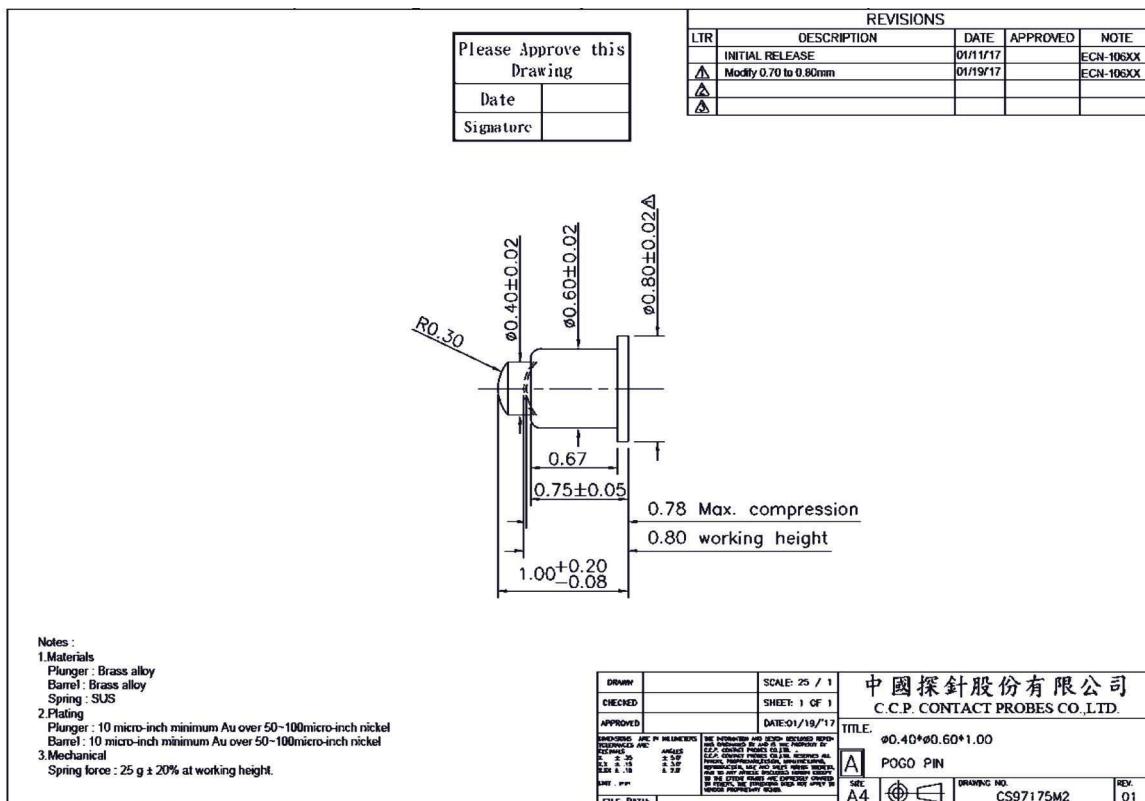


Рис. 17. Габаритный чертеж пружинного контакта, производимого компанией С.С.Р.

Полученные пружинные контакты CS97175M2 приведены на рис. 18.



Рис. 18. Полученные пружинные контакты, производимые компанией С.С.Р.

Выявлено, что при удалении выступов, показанных на рис. 19, появляется возможность сборки СВЧ-соединителя на базе пружинного соединителя CS97175M2.

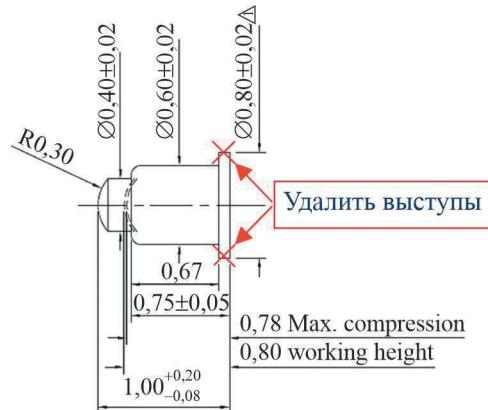


Рис. 19. Удаление выступов в детали корпуса пружинного соединителя

Эскиз сборочного чертежа СВЧ-соединителя, выполненного на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2, показан на рис. 20.

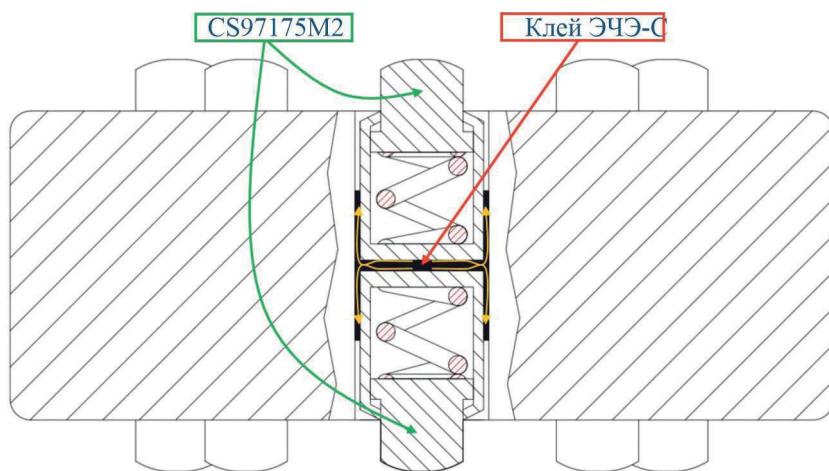


Рис. 20. Эскиз сборочного чертежа СВЧ-соединителя,
выполненного на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

Собранный СВЧ-соединитель на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2 показан на рис. 21.

Полученные характеристики КСВН и прямых потерь разработанного СВЧ-соединителя на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2 показаны на рис. 22 и 23.

Полученные характеристики КСВН и прямых потерь СВЧ-соединителя, изготовленного на базе пружинного контакта CS97175M2, сравнимы с характеристиками разработанного отечественного СВЧ-соединителя. Однако СВЧ-соединитель на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2 имеет более высокую эксплуатационную надежность. СВЧ-соединитель на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2 может быть использован только в крайних

случаях, так как невозможность поставки пружинного контакта CS97175M2 может привести к остановке производства ППМ, если СВЧ-соединитель будет разрушен в процессе эксплуатации.

Рис. 21. Собранный СВЧ-соединитель
на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

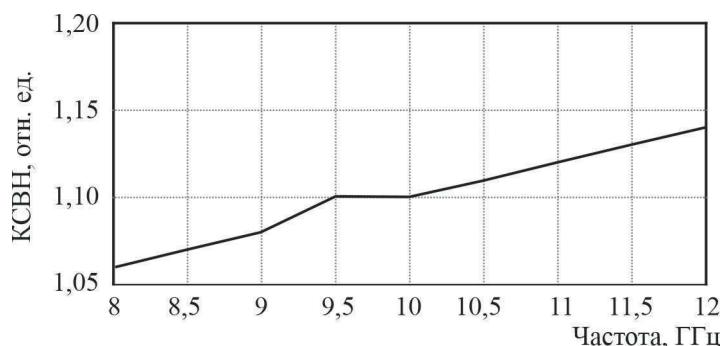


Рис. 22. КСВН разработанного СВЧ-соединителя
на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

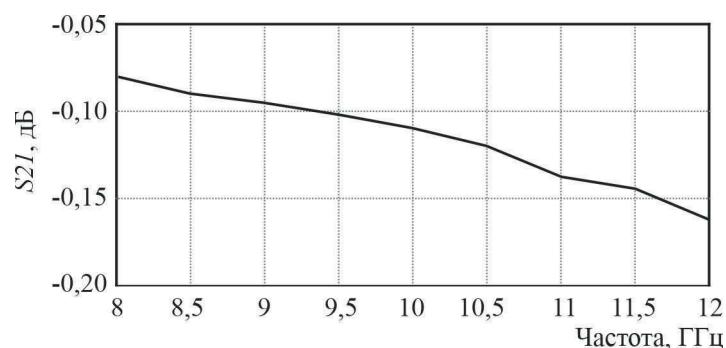


Рис. 23. Прямые потери сигнала при прохождении через СВЧ-соединитель
на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

5. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННЫХ СВЧ-СОЕДИНИТЕЛЕЙ

На рис. 24 и 25 показаны характеристики разработанных в процессе работы СВЧ-соединителей.

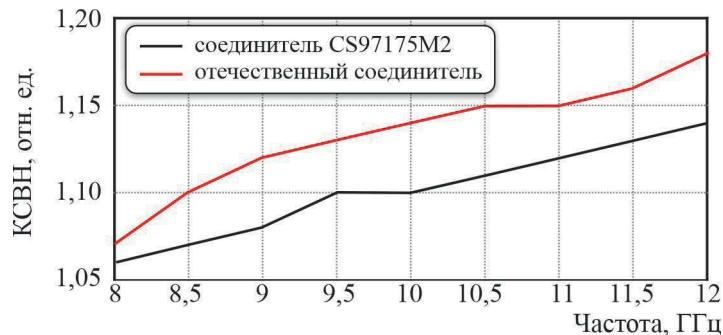


Рис. 24. КСВН разработанного отечественного СВЧ-соединителя и СВЧ-соединителя на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

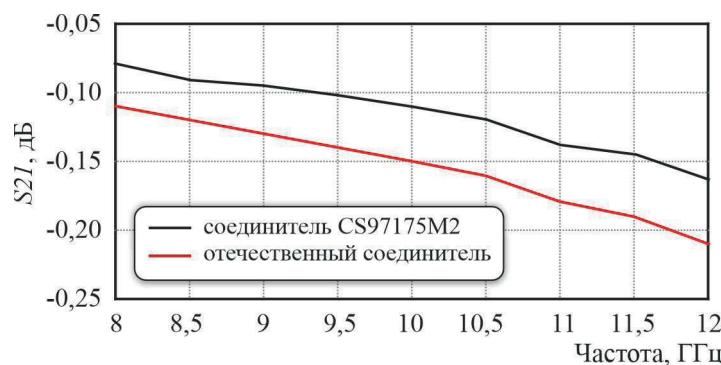


Рис. 25. Прямые потери разработанного отечественного СВЧ-соединителя и СВЧ-соединителя на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2

На рис. 26 показана усредненная (на основании измерений 10 шт. ППМ) АЧХ выходной импульсной мощности ППМ в зависимости от применяемого СВЧ-соединителя в составе конструкции.

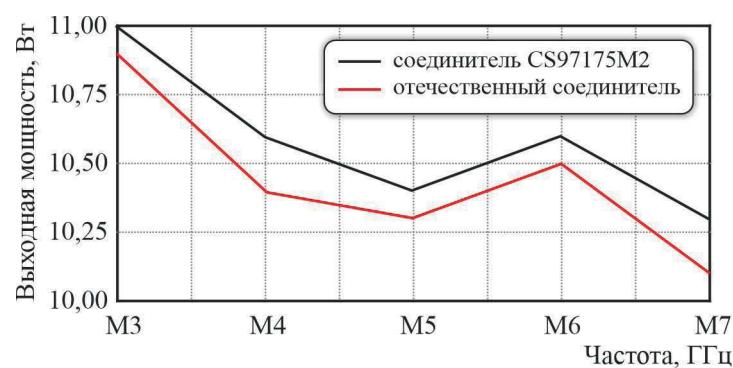


Рис. 26. Усредненная АЧХ выходной импульсной мощности ППМ в зависимости от применяемого СВЧ-соединителя в составе конструкции

Как выявлено выше, СВЧ-соединитель на базе доработанного пружинного контакта CS97175M2 имеет более высокое качество изготовления и, следовательно, имеет КСВН и прямые потери ниже, чем разработанный отечественный СВЧ-соединитель. Однако полученных значений КСВН и прямых потерь отечественного СВЧ-соединителя достаточно для использования его в составе конструкции ППМ и контактного устройства для измерения электрических параметров ППМ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования был разработан комплект эскизной документации по изготовлению отечественного СВЧ-соединителя и СВЧ-соединителя с импортным пружинным контактом CS97175M2. Разработана методика изготовления пружинных контактов и СВЧ-соединителей. Проведены измерения электрических параметров (КСВН и прямых потерь) изготовленных образцов СВЧ-соединителей. Полученные экспериментальные характеристики СВЧ-соединителей имеют значения на уровне СВЧ-соединителей, приведенных статьях [1–3], но в составе своих конструкций не имеют недостатков, описанных во введении данной работы.

Дальнейшие пути исследования будут направлены на интеграцию пружинных контактов в состав многослойной керамической платы ППМ для решения проблем, связанных с необходимостью повышенной точности изготовления СВЧ-проводников на нижнем слое многослойной керамической платы и обеспечением минимальных прямых потерь на выходе передающего канала ППМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карасев, М. С.** Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ-энергии и НЧ-сигналов управления и электропитания / М. С. Карасев, В. А. Жерновенков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3 (530). – С. 71 – 80.
2. **Карасев, М. С.** Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 37 – 44.
3. **Карасев, М. С.** Многофункциональный приемопередающий модуль X-диапазона частот / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3(542). – С. 51 – 54.

Статья поступила 8 августа 2025 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.762.222, 621.762.55, 621.318.12

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКА 30Х23К

А. С. Жуков¹, В. В. Бобырь¹, П. А. Кузнецов¹, Р. А. Валеев²,
И. М. Миляев³, Г. Ю. Лазаренко³

¹НИЦ «Курчатовский институт» – «ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург

²НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

³ИМЕТ РАН, г. Москва

Представлены результаты экспериментальных исследований для апробации селективного лазерного сплавления на прецизионном сплаве 30Х23КА. Распылением расплава с выбором оптимальных режимов были получены порошки прецизионного сплава, удовлетворяющие требованиям установок сплавления и обеспечивающие максимальный выход годного порошка. Подобрано значение энерговложения при сплавлении, позволившее из атомизированного порошка изготовить образцы с минимальной пористостью и требуемыми механическими свойствами. На основании полученных данных изготовлены аддитивные заготовки кольцевых магнитов, экспериментально уточнен режим их термомагнитной обработки. Характеристики изготовленных аддитивных изделий не уступают характеристикам литых аналогов. Структурные исследования показали полное отсутствие внутренних дефектов (раковин, засоров, трещин) и мелкозернистое строение, что существенно отличается от литых структур и положительно сказывается на уровне магнитных свойств.

КС: магнитотвердый сплав, селективное лазерное сплавление, металлические порошки, термомагнитная обработка

STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF THE MATERIAL OBTAINED BY SELECTIVE LASER FUSION OF 30X23K POWDER

А. С. Zhukov¹, V. V. Bobyr¹, P. A. Kuznetsov¹, R. A. Valeev²,
I. M. Milyaev³, G. Yu. Lazarenko³

¹SRC «Kurchatov Institute» – «CRI KM «Prometheus», St. Petersburg

²SRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow

³IMET, RAN, Moscow

The results of experimental studies for testing selective laser fusion on 30X23KA precision alloy are presented. By spraying a melt with a choice of optimal modes, precision alloy powders were obtained that meet the requirements of fusion plants and ensure maximum yield of usable powder. The value of the energy input during fusion was selected, which made it possible to produce samples with minimal porosity and required mechanical properties from atomized powder. Based on the data obtained additive blanks of ring magnets were made, and the mode of their thermomagnetic processing was experimentally refined. The characteristics of the manufactured additive products are not inferior to those of their cast counterparts. Structural studies have shown the complete absence of internal defects (voids, blockages, cracks) and a fine-grained structure, which differs significantly from cast structures and has a positive effect on the level of magnetic properties.

Keywords: hard magnetic alloy, selective laser fusion, metal powders, thermomagnetic processing

1. ВВЕДЕНИЕ

Конструкции магнитных навигационных систем постоянно усложняются. Детали из прецизионных сплавов играют существенную роль в таких устройствах, определяют точность и надежность всей системы. Применение для их создания аддитивных технологий позволяет сократить расходы на материалы за счет минимизации механообработки, оптимизировать производственный цикл, увеличить мощности и скорости производства.

В настоящее время постоянные магниты из литых магнитотвердых материалов изготавливаются методом литья по выплавляемым моделям. Однако при литье деталей сложной геометрии из прецизионных сплавов возникает ряд проблем: сложность изготовления деталей с высокой степенью точности, большое количество отходов при малосерийном производстве уникальных изделий. Пористость и литейные дефекты (раковины, трещины), засоры существенно снижают как механические, так и магнитные свойства. С развитием аддитивных технологий появилась возможность изготавливать такие изделия за один технологический цикл [1–3]. При этом селективное лазерное сплавление (СЛС) порошков металлов и сплавов является одним из наиболее распространенных аддитивных методов [4, 5].

В изделиях навигационной техники, работающих при высоких температурах и жестких условиях эксплуатации, использование сплавов с редкоземельными элементами, таких, как Nd–Fe–B и Sm–Co, становится невозможным, поэтому здесь широкую нишу занимают материалы систем Fe–Cr–Co, например 30Х23К, которые обладают хорошими магнитными свойствами и сохраняют их стабильность в широкой области температур. Хотя на сегодняшний день номенклатура выпускаемых для СЛС порошков, доступных к покупке, достаточно узка и в основном представлена сплавами на основе титана, нержавеющими сталями и жаропрочными сплавами, существует известный [6–8] метод получения порошковых материалов, основанный на распылении расплава потоком инертного газа. Поэтому возможно получение порошков магнитотвердого сплава 30Х23К, пригодных для СЛС. Кроме того, во многих работах [9–12] указано, что качество получаемого методом СЛС изделия зависит от качества применяемого металлического порошка.

Целью представленной работы является изготовление и исследование опытных аддитивных образцов бездефектных кольцевых магнитов из порошка магнитотвердого сплава 30Х23К.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Порошки магнитотвердого сплава 30Х23К отсутствуют в свободной продаже, поэтому они были изготовлены методом атомизации расплава на опытном производстве НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» с помощью установки HERMIGA 75/3VI с индукционным нагревом тигля (рис.1, в). На выходе были получены партии сферического порошка. Данный метод был выбран для изготовления порошка прецизионного сплава 30Х23К, поскольку получаемые характеристики (высокая сферичность, гранулометрический состав) качественно превосходят характеристики порошков, полученных другими известными методами [13]. Все процессы проводились в защитной газовой среде аргона. Исходные слитки (рис.1, а) для изготовления порошков были отлиты из лигатур также на опытном производстве в плавильной индукционной печи ППИ 0.06 (рис.1, б).

Гранулометрический состав получаемого порошка проверялся методом лазерной дифракции с использованием приближения Фраунгофера на установке Malvern Mastersizer 2000. Теку-

честь порошка определялась с помощью воронки Холла с диаметром отверстия 2,5 мм по ГОСТ 20899–98, насыпная плотность – по ГОСТ 19440–94, с использованием метода воронки.

Изготовление опытных образцов из металлических порошков проводилось методом СЛС при использовании установки с твердотельным лазером EOSINT M270 (рис.1, *г*).



а)



б)



в)



г)

Рис.1. Выплавленный слиток 30Х23К (*а*), печь плавильная индукционная ППИ 0.06 (*б*),
атомайзер HERMIGA 75/3VI (*в*) и установка СЛС EOSINT M270 (*г*)

Измерения плотности сплавленных образцов проводились методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018–74 на лабораторных весах Mettler Toledo XP204S. Пористость рассчитывалась как отношение плотности измеряемого образца к плотности литого образца марки 30Х23К, указанной в ГОСТ 24897–81.

Прочностные характеристики (предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление σ_b , относительное удлинение после разрыва δ , относительное сужение после разрыва ψ) исследуемого материала определялись на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 с максимальной нагрузкой 100 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84 при комнатной температуре. Испытания на ударный изгиб проводились с помощью маятникового копра «Metrocom» по методу Шарпи, согласно ГОСТ 9454-78.

Магнитные свойства определялись в ИМЕТ РАН с помощью гистерезисграфов ЭМ8 6 и МН-50. Там же проводился подбор режимов и осуществлялась термомагнитная обработка образцов.

Структурные исследования образцов выполняли стандартными методами металлографии с использованием светового (AxioObserver A1m) и сканирующего электронного (Tescan Vega 3) микроскопов. Для выявления структуры проводили травление шлифов сложным составом: 10 мл HNO_3 + 30 мл HCl + 10 мл H_2SO_4 .

3. ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При газовой атомизации расплава основными параметрами, оказывающими влияние на гранулометрический состав и форму получаемых порошков прецизионных сплавов, являются следующие: давление газа на форсунке, температура перегрева и время выдержки при этой температуре (как производные вязкости и поверхностного натяжения расплава), давление в камере с индукционной печью. Температурные параметры процесса устанавливались исходя из температуры плавления исследуемого материала 30Х23К – 1510 °C, а остальные параметры выбирались исходя из технологических возможностей установки. Было оценено влияние каждого параметра процесса распыления на выход годного для СЛС-порошка требуемого гранулометрического состава (меньше 80 мкм), результаты опробования приведены в табл. 1. Было наработано 5 опытных партий порошка, которые были подвергнуты ситовому рассеву для определения выхода годной фракции. Анализ полученных результатов показал, что изготовленные распылением расплава порошки магнитотвердого сплава 30Х23К представляют собой полидисперсные смеси, где гранулометрический состав формируется в момент распыления расплава и зависит от давления распыляющего газа на форсунке – с увеличением давления размер частиц уменьшается. По результатам исследования наилучшим определен режим: давление распыляющего газа на форсунке – 40 бар, время распыления – 128 с.

Таблица 1

Исследуемые технологические параметры процесса распыления расплава

Номер партии	$T_{\text{нр}}$, °C	O_2 , ppm	$P_{\text{кам}}$, бар	$P_{\text{расп}}$, бар	$T_{\text{расп}}$, °C	$t_{\text{расп}}$, с	$t_{\text{пергр}}$, мин	Выход фракции менее 80 мкм, %
1	1000	300	0,25	30	1610	105	10	60,1
2	1000	300	0,25	35	1610	80	10	65,2
3	1000	300	0,25	40	1610	145	10	67,2

Окончание табл. 1

Номер партии	$T_{\text{нр}}$, °C	O_2 , ppm	$P_{\text{кам}}$, бар	$P_{\text{расп}}$, бар	$T_{\text{расп}}$, °C	$t_{\text{расп}}$, с	$t_{\text{пергр}}$, мин	Выход фракции менее 80 мкм, %
4	1000	300	0,25	40	1610	128	10	70,1
5	1000	300	0,25	45	1610	160	10	68,9

* $T_{\text{нр}}$ – температура напуска газа в камеру с индукционной печью; O_2 – содержание кислорода в распыляющем газе; $P_{\text{кам}}$ – давление в камере с индукционной печью; $P_{\text{расп}}$ – давление распыляющего газа на форсунке; $T_{\text{расп}}$ – температура расплава, при которой проходил процесс распыления; $t_{\text{расп}}$ – время распыления; $t_{\text{пергр}}$ – время перегрева расплава.

На рис. 2, а представлено РЭМ-изображение порошка фракции менее 80 мкм, полученного атомизацией на выбранном режиме. Установлено, что порошок обладает околосферической формой. На поверхности порошка обнаружены мелкие частицы в виде сателлитов, что является закономерным для процесса газового распыления расплава. Химический состав полученного порошка указан в табл. 2 и полностью соответствует ГОСТ 24897-81.

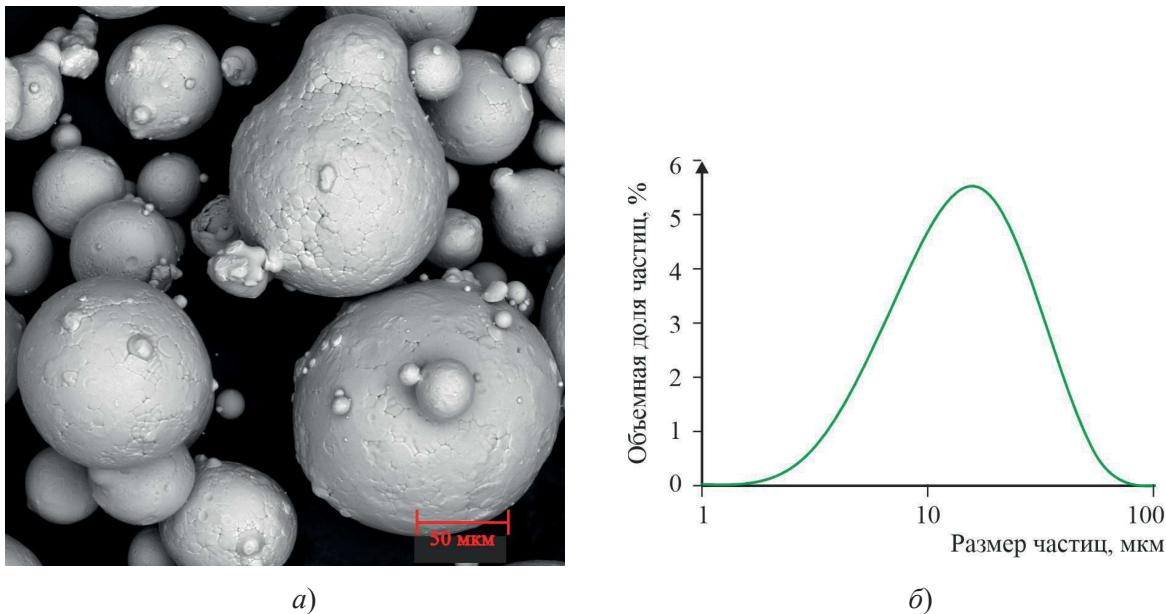


Рис. 2. РЭМ-изображение (а) и гранулометрический состав (б)
порошка 30Х23К

Распределение гранулометрического состава порошка представлено на рис. 2, б. Основные квантили распределения гранулометрического состава порошка, определяющие его качество, следующие: $d_{0,1} = 13,23$ мкм, $d_{0,5} = 47,58$ мкм, $d_{0,9} = 83,78$ мкм.

Из литературных данных известно [14], что форма частиц порошка оказывает влияние на насыпную плотность. Кроме того, текучесть порошка должна зависеть от плотности, гранулометрического состава, формы и состояния поверхности частиц. Поскольку для качественного сплавления необходимо обеспечить максимальную упаковку порошка в зоне воздействия лазера, эти характеристики представляются крайне важными. Текучесть навески 50 г порошка 30Х23К

составила 24,98 с, насыпная плотность – 4,63 г/см³, что полностью удовлетворяет требованиям к материалам для СЛС.

Таблица 2

Химический состав атомизированного порошка

Материал	Основные легирующие элементы, % (масс.)											
	Cr	Co	V	Ti	Ni	Cu	Mo	W	Nb	Mn	Si	Fe
Порошок	30,6	22,1	0,66	0,39	0,24	0,01	<0,01	0,07	0,05	0,62	0,42	Ост.
Норма по ГОСТу	29,0 – 32,0	21,5 – 23,5	0,4 – 1,0	0,3 – 0,8	Не установлено	0,3 – 0,8	Ост.					

Для анализа влияния технологических параметров работы установки СЛС на структуру и свойства дополнительно использовался параметр «энерговложение» (W , Дж/мм), вычисляемый как отношение мощности лазера, Вт, к скорости сканирования, мм/с [15]:

$$W = P/v. \quad (1)$$

Как показали эксперименты с другими ферромагнитными сплавами [16–18], подбор параметров энерговложения необходимо проводить в диапазоне 0,24...0,37 Дж/мм. Оптимальные технологические параметры работы установки в этом диапазоне определялись по пористости получаемых образцов, которая оценивалась через измерение плотности. Низкая пористость обеспечивает наилучшие механические и магнитные свойства. Полученная пористость образцов в зависимости от энерговложения представлена в табл. 3.

Таблица 3

Пористость образцов 30Х23К в зависимости от энерговложения

Энерговложение, Дж/мм	Плотность*, г/см ³				Пористость, %
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение	
0,2438	7,6435	7,6461	7,6450	7,6449	0,72
0,2786	7,6601	7,6694	7,6676	7,6657	0,45
0,3250	7,6674	7,6720	7,6747	7,6714	0,37
0,3083	7,6582	7,6555	7,6585	7,6574	0,55
0,3700	7,6748	7,6697	7,6621	7,6689	0,40

* Плотность, согласно ГОСТ 24897–81, для литого материала – от 7,65 до 7,7 г/см³.

Таким образом, показано, что все образцы достигают требуемой пористости менее 1 %, но в абсолютных величинах предпочтительным является режим построения 195 Вт – 600 мм/с (энерговложение – 0,325 Дж/мм).

Результаты измерений механических свойств аддитивных образцов 30Х23К показали, что их прочностные свойства оказываются намного выше, чем у сплава аналогичного химического состава, полученного традиционными металлургическими технологиями. Так, предел прочности составил 896 МПа вместо 245 МПа, относительное удлинение – 22,4 % вместо 1 %. И даже ударная вязкость аддитивного образца составила 172 Дж/см² в исходном состоянии и 1,8 Дж/см² после термообработки, при указанном в ГОСТ 24897–81 значении 0,98 Дж/см² для литого материала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для аддитивных материалов существует механизм упрочнения, который обусловлен не системой легирования, как предполагалось в некоторых ранних работах (например, [19]), а другим фактором, определяющим сопротивление деформации.

Твердость аддитивного сплава 30Х23К в состоянии после СЛС уже составила менее 30 HRC, что для литого сплава достигается только после проведения гомогенизационного отжига. Таким образом, косвенно можно сделать вывод, что сама технология СЛС позволила получить однородный твердый раствор для исследуемого сплава, а операцию гомогенизационного отжига при термической обработке можно исключить.

Для реализации процесса СЛС на кольцевых магнитах, в специальной среде моделирования SOLIDWORKS 2022 была выполнена 3D-модель (рис. 3, *a*) постоянного магнита по чертежам АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова», произведено его позиционирование на технологической платформе с прорисовкой поддержек в среде Materialise Magics 25.01. По разработанной 3D-модели изготовлены в размер заготовки постоянных магнитов (рис. 3, *б*). Полученные таким образом заготовки были подготовлены для проведения измерений магнитных свойств.

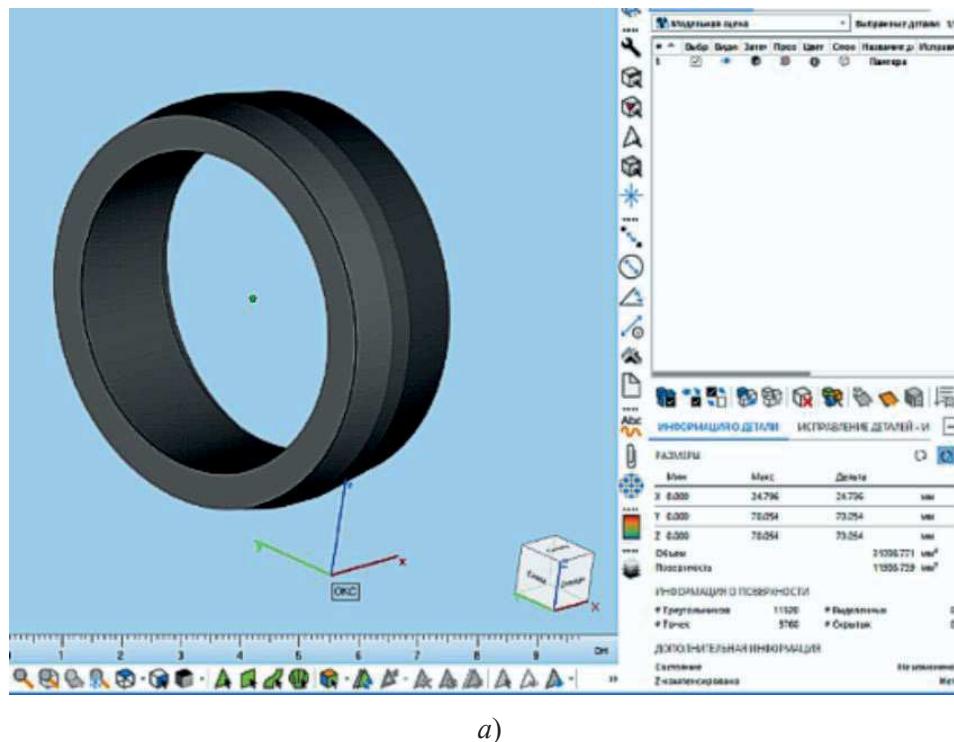


Рис. 3. 3D-модель постоянного магнита, серийно выпускаемого для АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова» (*а*), и СЛС-заготовки аддитивных магнитов (*б*) (см. также с. 93)



б)

Рис. 3. 3D-модель постоянного магнита, серийно выпускаемого для АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова» (а) и СЛС-заготовки аддитивных магнитов (б)

Для оценки основных магнитных свойств образцы подвергались термомагнитной обработке (ТМО), согласно ГОСТ 24897–81 (после проведения ТМО к обозначению сплава 30Х23К в конце добавляют символ *A*, обозначающий магнитную анизотропию). Было установлено, что указанный в ГОСТ 24897–81 режим ТМО недостаточно эффективен для аддитивных кольцевых магнитов ввиду их возможных структурных особенностей, поэтому были опробованы близкие режимы с изменением температуры и времени отпуска. Исходя из полученных данных, для кольцевых магнитов из аддитивного сплава 30Х23К необходимо использовать следующий режим ступенчатой термической обработки с приложением магнитного поля: 625 °С (40 мин), далее охлаждение до 580 °С со скоростью 20 °/ч, далее охлаждение до 500 °С со скоростью 8 °/ч.

Экспериментально подобранный режим ТМО позволил получить для аддитивного сплава 30Х23КА следующие свойства: остаточная магнитная индукция $B_r = 1,01$ Тл, коэрцитивная сила по индукции $H_{cb} = 66,2$ кА/м, максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max} = 30,0$ кДж/м³, что несколько превосходит магнитные свойства литых магнитов той же марки, указанные в ГОСТ 24897–81.

Повышенные значения коэрцитивной силы исследуемых СЛС кольцевых магнитов могут быть связаны с их мелкозернистым строением. Травление шлифов аддитивных образцов выявило структуру, свойственную аддитивным материалам: частично перекрывающиеся капли – полукруги, или микрованны, расплава, образованные послойным проплавлением частиц порошка, наносимого на выращиваемую поверхность, и последующей кристаллизацией расплава. Видны отличия от классической литейной структуры: зерно, действительно, оказывается на порядок меньше. Металлографические изображения микроструктуры СЛС-образцов 30Х23КА, построенных при энерговложении 0,325 Вт·с/мм и прошедших только ТМО, без предварительного гомогенизационного отжига, представлена на рис. 4, а. Исследования проводились на образцах, разрезанных вдоль и поперек образующей оси построения. Для сравнения на рис. 4, б приведены металлографические изображения микроструктуры СЛС-образцов 30Х23КА, прошедших ТМО и гомогенизационный отжиг при 1300 °С в течение 30 мин.

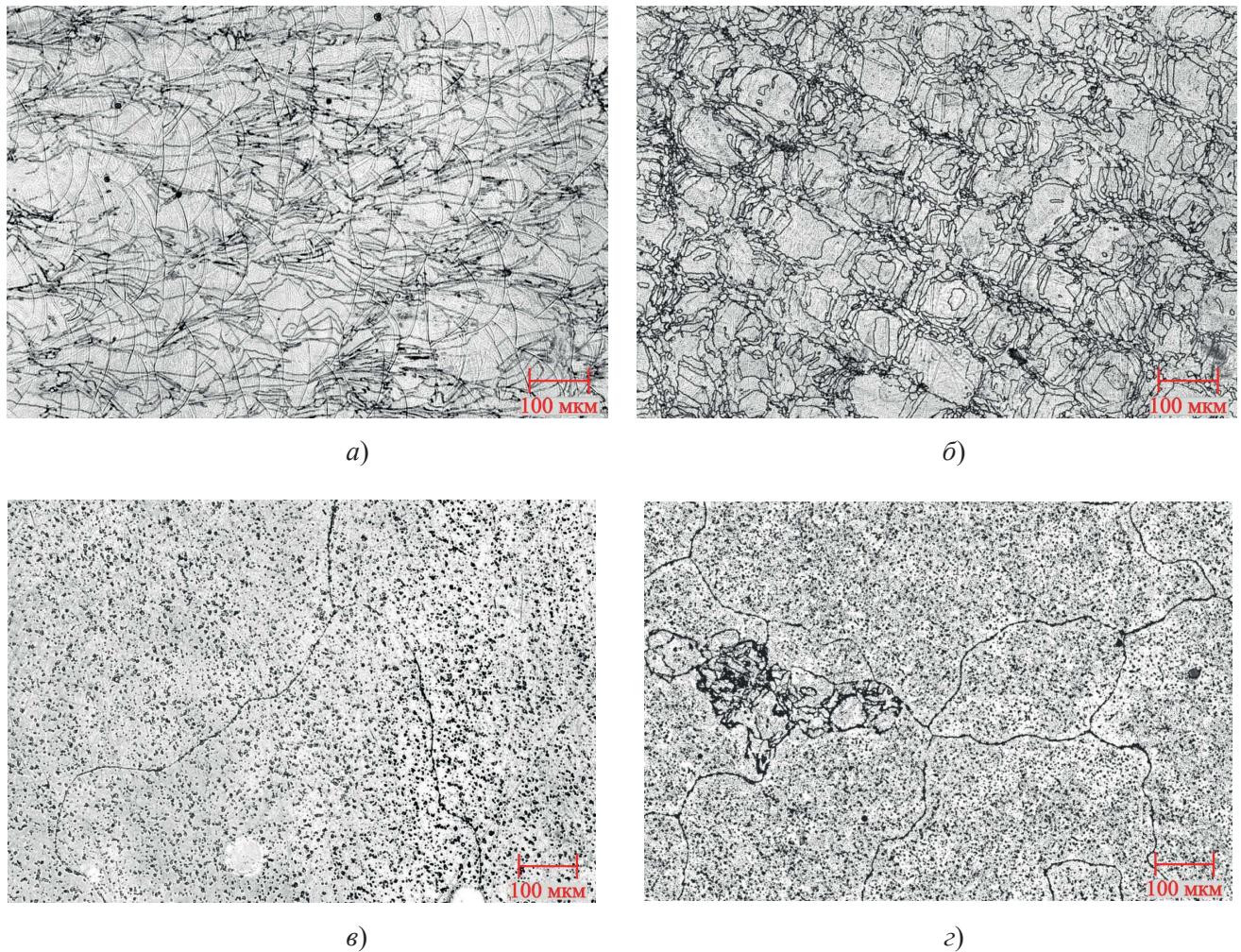


Рис. 4. Микроструктура СЛС-образцов 30Х23КА, прошедших только ТМО (а, б) и ТМО с предварительным гомогенизационным отжигом (в, г). Шлифы выполнены вдоль (а, в) и поперек (б, г) направления построения

Можно отметить, что структура образцов, прошедших гомогенизационный отжиг, претерпевает изменения: образуются крупные оксиды, присутствует сетка трещин. На основании структурных исследований подтвердилось предположение, что операцию гомогенизационного отжига для аддитивных образцов необходимо исключить.

Известно [20], что коэрцитивная сила по индукции обратно пропорциональна размеру зерна. EBSD-анализ (рис. 5) подтвердил мелкозернистую структуру СЛС-сплава 30Х23КА: средний эффективный диаметр окружности составил 1,4 мкм. Прямые полюсные фигуры (ППФ) демонстрируют плотность выходов выбранных кристаллографических направлений на поверхность виртуальной полусферы. ППФ слева направо построены для направлений, нормальных к плоскостям {100}, {110} и {111}. Приведенные ППФ отражают наличие преимущественных ориентировок, образующих текстуру. Острота текстуры оценивалась с помощью цветовой легенды с линейной шкалой.

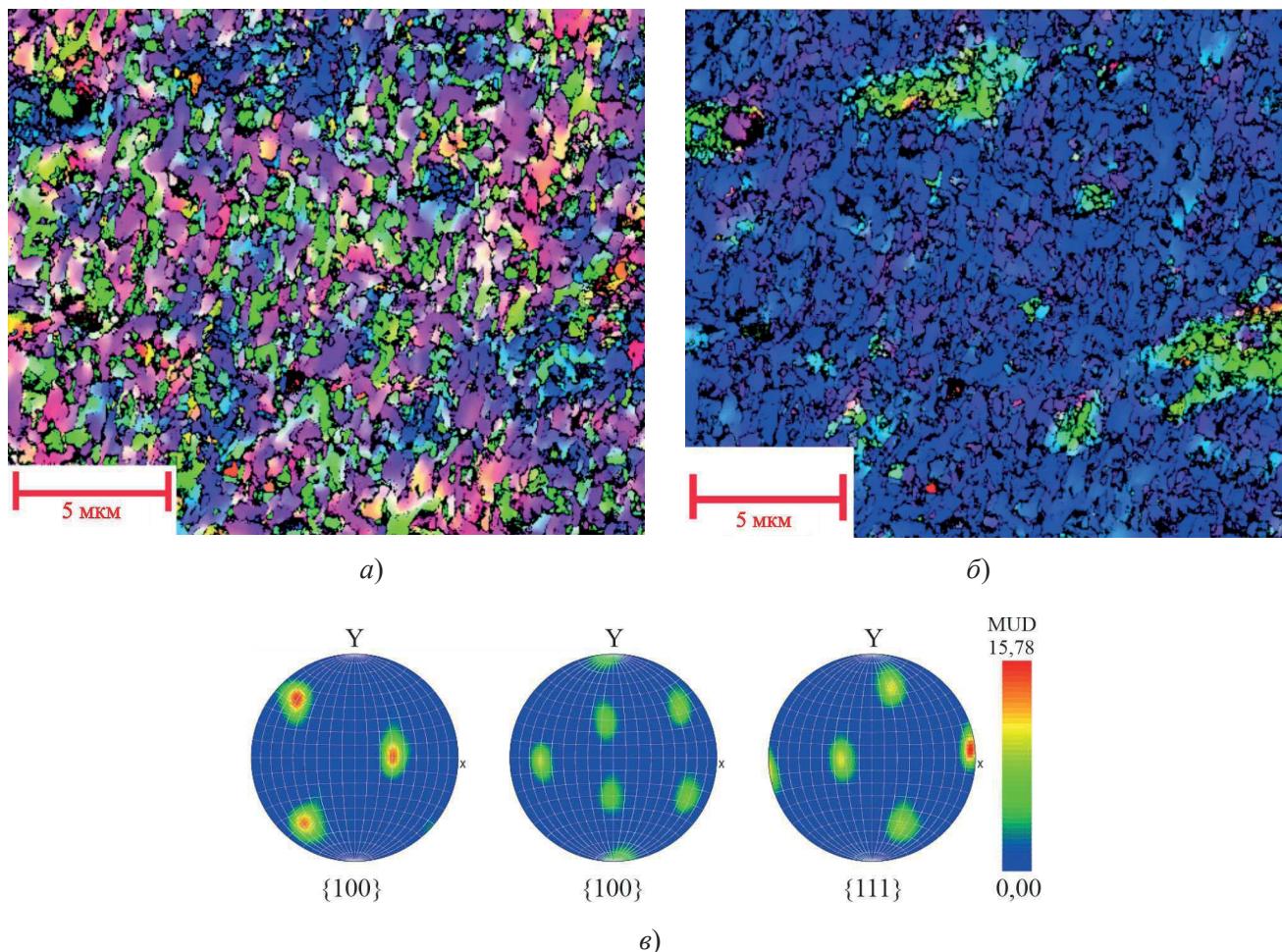


Рис. 5. Карта кристаллографических ориентаций относительно нормального к поверхности шлифа направления (а) и относительно направления, лежащего в плоскости шлифа (б), а также ППФ (в)

Таким образом, методом СЛС металлического порошка 30Х23К удалось изготовить магнит с удовлетворительными магнитными свойствами.

4. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подобраны параметры процесса распыления расплава на установке HERMIGA 75/3IV и получены сферические порошки магнитотвердого сплава 30Х23К с выходом фракции <80 мкм на уровне 70,1 %, по своему химическому составу, содержанию примесей, гранулометрическому составу, текучести полностью удовлетворяющие установленным для процесса СЛС требованиям.

2. Пористость аддитивного материала 30Х23К составила менее 1 % во всем диапазоне сплавления. По результатам исследований определен оптимальный режим СЛС порошка магнитотвердого сплава 30Х23К: энерговложение – 0,325 Дж/мм.

3. В структурах аддитивного материала основными составляющими обозначены частично перекрывающиеся капли – полукруги, образованные послойным проплавлением частиц порошка,

наносимого на выращиваемую поверхность, и последующей кристаллизацией расплава. Отмечено мелкозернистое строение СЛС-материала 30Х23К, которое положительно сказывается на его магнитных свойствах в части коэрцитивной силы.

4. Механические свойства СЛС-образцов из магнитотвердого сплава 30Х23К не ниже указанных в ГОСТ 24897–81 на материалы магнитотвердые деформируемые.

5. Экспериментально подобран режим ТМО, позволивший сохранить размер зерна сплава 30Х23КА, полученного СЛС, и достичь требуемого уровня магнитных свойств.

Работа выполнена при поддержке фонда научно-технического развития НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», шифр темы 3/940639. Экспериментальные исследования проводились на оборудовании Центра Коллективного Пользования (ЦКП) уникальным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Study of materials produced by powder metallurgy using classical and modern additive laser technology / J. Sedlak, D. Rican, M. Piska, L. Rozkosny // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 100. – P. 1232 – 1241.
2. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing / A. Hussein, L. Hao, C. Yan [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, issue 7. – P. 1019 – 1026.
3. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM) / D. Wang [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, issue 10. – P. 1734 – 1742.
4. Herderick, E. D. Additive manufacturing in the minerals, metals and materials community: past, present, and exciting future / E. D. Herderick // JOM. – 2016. – Vol. 68. – P. 721 – 723.
5. Шишковский, И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения / И. В. Шишковский. – СПб.: Питер, 2016. – 400 с.
6. Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
7. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1972. – 527 с.
8. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава / А. И. Рудской, К. Н. Волков, С. Ю. Кондратьев, Ю. А. Соколов. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2018. – 610 с.
9. Powders for powder bed fusion: a review / S. Vock [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 4. – P. 383 – 397.
10. Olakanmi, E. O. Selective laser sintering / melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: effect of processing conditions and powder properties / E. O. Olakanmi // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, issue 8. – P. 1387 – 1405.
11. Boisselier, D. Influence of powder characteristics in laser direct metal deposition of SS316L for metallic parts manufacturing / D. Boisselier, S. Sankaré // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 455 – 463.
12. Simchi, A. The role of particle size on the laser sintering of iron powder / A. Simchi // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – Vol. 35. – P. 937 – 948.
13. Получение порошков сплава 25Х15КА для синтеза постоянных магнитов методом селективного лазерного сплавления / И. С. Гавриков [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 8 (782). – С. 15 – 21.

14. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М.: Химия, 1982. – 339 с.
15. Zhukov, A. Effect of alloying on the 316L and 321 steels samples obtained by selective laser melting / A. Zhukov, A. Deev, P. Kuznetsov // Physics Procedia. – 2017. – Vol. 89. – P. 172 – 178.
16. Жуков, А. С. Изготовление изделий из ферромагнитных материалов на основе сплавов систем Fe–Cr–Ni (–Co) с помощью аддитивных технологий / А. С. Жуков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2023. – Вып. 3 (559). – С. 6 – 16.
17. Структура и магнитные свойства материала системы Fe–Cr–Co, изготовленного методом селективного лазерного плавления / Б. К. Барахтин [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2 (102). – С. 125 – 130.
18. Строение и магнитные параметры аддитивного сплава системы Fe–Cr–Co / А. С. Жуков, Д. С. Созинов, Э. А. Ушанова, И. С. Гавриков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 3 – 9.
19. Влияние химического состава порошкового сырья на прочность материала после селективного лазерного плавления / Б. К. Барахтин, А. С. Жуков, А. А. Деев, А. В. Вознюк // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – № 6 (756). – С. 48 – 52.
20. Стародубцев, Ю. Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002. – 379 с.

Статья поступила 11 июля 2025 г.

===== НОВЫЕ КНИГИ =====

Комплексные системы радиозондирования атмосферы: монография /
Э.А. Болелов, М.Б. Фридзон, Ю.М. Ермошенко. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 156 с.

Монография посвящена проблеме создания комплексных систем радиозондирования атмосферы, обоснованию их технического облика и синтезу алгоритмов комплексной обработки метеоинформации на основе методов марковской теории оценивания случайных процессов и полей. Анализ современных систем радиозондирования, проведенный в монографии, показал, что каждой из них присущ ряд принципиальных недостатков, устранить которые в рамках самой системы практически невозможно, а значит, невозможно обеспечить высокую точность и помехоустойчивость данных радиозондирования атмосферы. Авторами предложены два варианта структуры комплексной системы радиозондирования атмосферы, разработаны алгоритмы комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда и алгоритмы обработки метеоданных, поступающих по каналам телеметрии. Методами математического моделирования проведена оценка качества полученных алгоритмов.

УДК 621.371, 621.372

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

О. А. Дьяконова¹, Н. А. Федосеев¹, В. И. Васильев^{1,2}

¹ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

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

Описан автоматизированный комплекс для измерения комплексного коэффициента отражения от плоских образцов в условиях свободного пространства в диапазоне 2...400 ГГц с помощью квазиоптического рефлектометра. Приведены результаты расчета и измерения коэффициента отражения от поверочных образцов из различных типов материалов в диапазоне 20 ГГц. Проведено сравнение результатов измерения коэффициентов отражения от композиционных материалов, полученных на разных экспериментальных комплексах.

КС: векторный анализатор цепей, свободное пространство, комплексный коэффициент отражения, миллиметровые и сантиметровые волны

AUTOMATED MEASURING SYSTEM BASED ON REFLECTOMETERS IN THE CENTIMETER AND MILLIMETER RANGES

О. А. Dyakonova¹, Н. А. Fedoseev¹, В. И. Vasilyev^{1,2}

¹FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

²JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

An automated complex for measuring the complex reflection coefficient from flat samples in free space conditions in the 2...400 GHz range using a quasi-optical reflectometer is described. The results of calculation and measurement of the reflection coefficient from calibration samples of various types of materials in 20 GHz are presented. The results of measurement of the reflection coefficients from composite materials obtained on different experimental complexes are compared.

Keywords: vector network analyzer, free space, complex reflection coefficient, millimeter and centimeter waves

1. ВВЕДЕНИЕ

В технике измерения характеристик электрических цепей регулярно происходят изменения. В последнее время распространение получили векторные анализаторы цепей различных модификаций, обладающие широким спектром новых возможностей. Использование пространственно-частотной обработки сигналов в таких приборах позволяет существенно повысить точность измерений [1]. Исследование различных материалов в условиях, приближенных к свободному пространству, требует согласования прибора со свободным пространством. Для этой цели предлагается использовать рефлектометры, построенные по квазиоптической схеме на основе полых сверхразмерных металлодиэлектрических волноводов (МДВ) [2, 3].

При сравнении различных методов и средств измерения электродинамических характеристик от плоских образцов в условиях, приближенных к свободному пространству, выявлено преимущество использования установок на основе квазиоптического рефлектометра совместно с векторным анализатором цепей. В таких экспериментальных установках достигается наибольший динамический диапазон (до -70 дБ) при лучшей точности (0,3 дБ) [4].

Целью данной работы является создание единого автоматизированного измерительного комплекса на основе пяти типов квазиоптических рефлектометров (каждый на свой диапазон), позволяющих получать характеристики исследуемых образцов в реальном времени.

2. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для прецизионных измерений коэффициентов отражения и прохождения в свободном пространстве волнами сантиметрового и миллиметрового диапазонов плоских образцов из радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов должны выполняться два основных условия:

- фазовый фронт волны на исследуемом образце близок к плоскому;
- уровень паразитных отражений в измерительном тракте низок.

По разработанной и реализованной в ИРЭ РАН профессором Казанцевым Ю. Н. серии функциональных волноводных элементов [5, 6] на основе МДВ прямоугольного сечения с уникальными характеристиками были созданы рефлектометры, собранные по схеме интерферометра Майкельсона. Основными характеристиками рефлектометра являются: направленность, переходное ослабление и структура поля в рабочей зоне.

2.1. Функциональные волноводные элементы

Полые сверхразмерные МДВ позволили создать волноводные элементы, сочетающие в себе одновременно свойства лучевода и закрытой системы [7–9]. Ряд достоинств МДВ, таких, как простота структуры поля рабочей моды, ее малое затухание при условии увеличенной фильтрации высших (паразитных) мод, малая чувствительность к стыкам, малые потери в уголках, обеспечивают хорошие характеристики функциональных элементов [10]. Такие волноводы характеризуются малыми отражениями от открытого конца волновода. Последний факт особенно важен, так как обеспечивает возможность измерения очень малых (до -70 дБ) коэффициентов отражения от образцов материалов.

Ниже опишем основные элементы рефлектометра.

Возбудитель рабочей моды LM11 выполнен в виде плавного рупорного перехода от одномодового волновода к волноводу увеличенного сечения и симметричного скачка к прямоугольному волноводу класса «полый диэлектрический канал». Две металлические пластины, установленные на выходе, разделяют рупор на три канала: центральный и два боковых. Назначение скачка и пластин состоит в формировании поля моды LM11. При оптимальных значениях размеров возбудителя расчетные потери на преобразование в высшие моды составляют 0,13 дБ. Измеренные полные потери – 0,35 дБ.

Направленный делитель мощности представляет собой волноводный крест со слоем диэлектрика, расположенным в диагонали разветвления. Слой диэлектрика толщиной 0,75 мм выполнен из лавсана. Коэффициент связи с боковым каналом (по мощности) составляет 0,3. Коэффициент направленности лежит в пределах от -35 до -48 дБ для разных рабочих диапазонов. Две

противоположные стенки волноводного креста покрыты слоем диэлектрика, а две другие – слоем поглотителя.

Согласованная нагрузка – это отрезок полого волновода квадратного сечения из диэлектрика с потерями (гетинакс), в котором помещены поглощающий конус из композита на основе карбонильного железа для миллиметрового диапазона и решетки из резистивных пленок для сантиметрового диапазона. Коэффициент отражения от согласованной нагрузки – не хуже -50 дБ.

2.2. Структурные схемы комплекса

Комплекс на основе квазиоптических рефлектометров предназначен для измерений комплексного коэффициента отражения от плоских образцов различных материалов в диапазоне частот 2...400 ГГц.

На рис. 1 представлены структурные схемы в режимах измерения модуля и фазы коэффициента отражения соответственно. Здесь дана полная схема для одного из пяти поддиапазонов. Для остальных поддиапазонов эти схемы аналогичны. Для каждого поддиапазона используется соответствующий квазиоптический рефлектометр, подключенный к векторному анализатору цепей, связанному с единым компьютерным блоком через устройства связи.

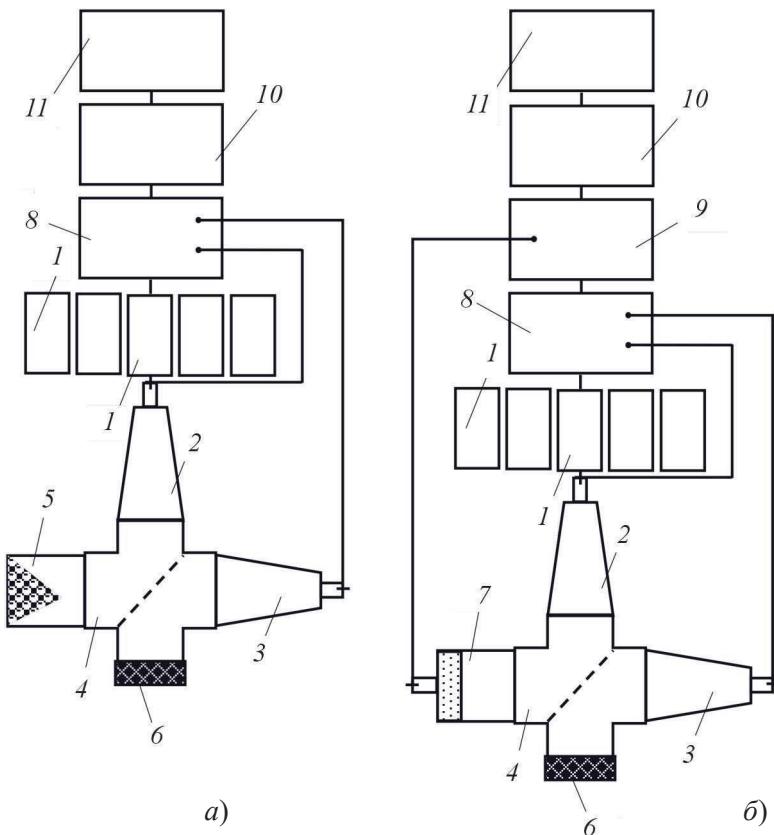


Рис.1. Структурная схема измерительной установки с квазиоптическим рефлектометром:
1 – рефлектометр; 2, 3 – возбудители рабочей моды; 4 – направленный делитель мощности;
5 – согласованная нагрузка; 6 – исследуемый образец; 7 – поршень; 8 – векторный анализатор
цепей; 9 – устройство управления шаговым двигателем; 10 – аналого-цифровой преобразо-
ватель (АЦП); 11 – компьютер

Рефлектометры (рис. 2 и 3), соответствующие им рабочие поддиапазоны, квадратные сечения базовых волноводов и диапазоны измеряемых значений R указаны в таблице.

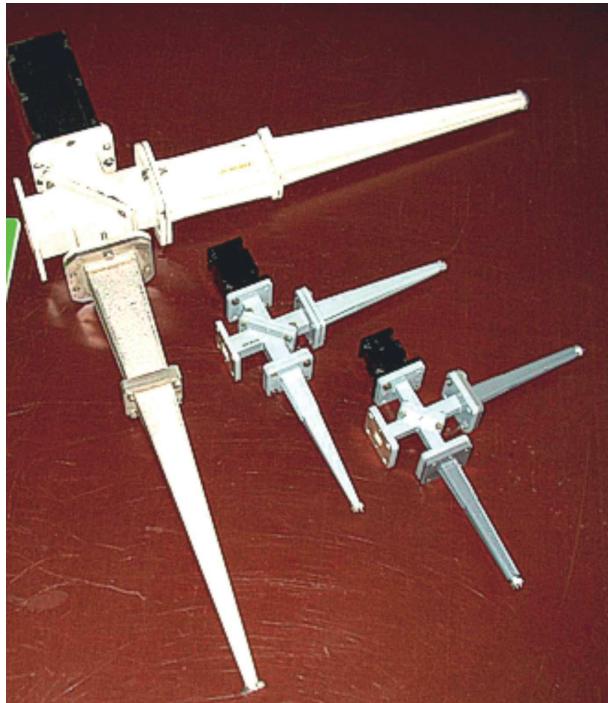
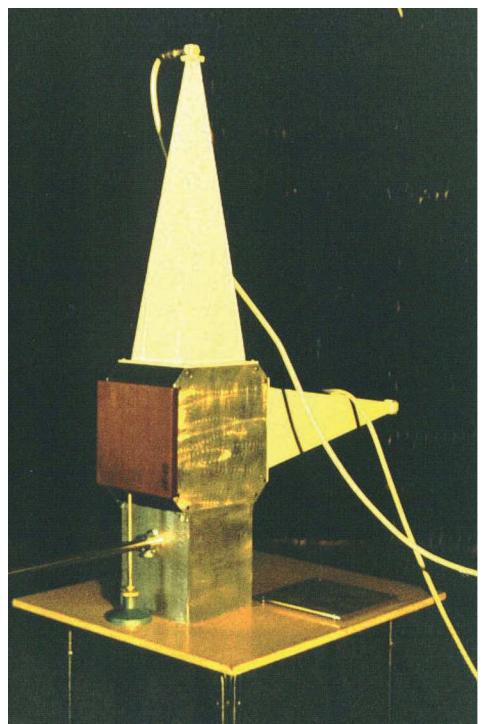


Рис. 2. Рефлектометры миллиметрового диапазона.
Слева направо частотные диапазоны: 37...120 ГГц; 120...160 ГГц; 250...400 ГГц

Рис. 3. Рефлектометр сантиметрового (7...18 ГГц) диапазона. Собран по схеме определения модуля коэффициента отражения. Образец на стойке помещен вплотную к выходной апертуре рефлектометра



Номер рефлектометра	Рабочий диапазон частот, ГГц	Сечение базового волновода, мм	Диапазон измеряемых значений R , дБ
1	2 – 18	350×350	0...-70
2	7 – 18	200×200	0...-70
3	37 – 120	40×40	0...-60
4	120 – 160	14×14	0...-60
5	250 – 400	10×10	0...-60

2.3. Методики измерения

Измерение модуля коэффициента отражения (см. схему на рис.1, *a*) проводится по методике, аналогичной известной рупорной методике измерения отражения от плоских образцов [11–13], включая калибровку и поверку. Исследуемый образец помещается вплотную к выходной апертуре рефлектометра. Базовым прибором является векторный анализатор цепей 8, обеспечивающий работу в требуемом диапазоне длин волн. Падающая СВЧ-мощность поступает на вход возбудителя 2. Вся энергия от возбудителя передается на направленный делитель мощности 4. При этом часть ее поглощается согласованной нагрузкой 5, а основная часть попадает на исследуемый образец 6. СВЧ-мощность, отраженная от образца, возвращается в МДВ-тракт, ответвляется направленным делителем 4 в измерительную секцию, где после преобразования возбудителем 3 сигнал, пропорциональный уровню отраженной мощности, принимается для дальнейшей компьютерной обработки.

По полученным результатам определяется модуль коэффициента отражения R , дБ, по формуле $R = 10\lg(P/P_k)$, где P и P_k – сигналы, отраженные от измеряемого образца и калибровочной пластины соответственно.

При измерении фазы ф коэффициента отражения (см. схему на рис.1, *б*) согласованная нагрузка заменяется короткозамыкающим подвижным поршнем. Поршень выполнен из диэлектрика с поглощением. В этом случае в измерительную секцию помимо сигнала, отраженного от образца, добавляется интерферирующий с ним сигнал, отраженный от короткозамыкающего поршня. К поршню прилагается съёмная металлическая калибровочная пластина (фаза коэффициента отражения пластины принята равной нулю). Вплотную к выходной апертуре направленного делителя мощности помещается калибровочная пластина, и перемещением поршня устанавливается минимум сигнала. Заменив калибровочную пластину образцом, перемещением поршня на величину Δl , мм, добиваемся нового минимума сигнала. По результатам измерения рассчитывается фаза ϕ , рад, коэффициента отражения по формуле $\phi = (4\pi\Delta l)/\lambda$, где λ – длина волны, мм.

Сущность метода измерения комплексного коэффициента отражения состоит в сравнении амплитуд и фаз двух отраженных сигналов: от калибровочной пластины и исследуемого образца, помещенных вплотную к выходному сечению волновода.

2.4. Автоматизация процесса измерения

Экспериментальные установки автоматизированы. Базовым прибором является векторный анализатор цепей, имеющий высокую степень автоматизации. Связь между компьютером и ап-

паратуры осуществляется через внешний АЦП. Прибор работает под управлением компьютера по методу дискретно-частотных сигналов. При использовании этого метода определяется отражение от исследуемого образца в частотной области, затем сигнал преобразуется во временную область с исключением переотражений до и после образца. После обратного преобразования в частотную область получаем частотную зависимость коэффициента отражения в реальном времени [14]. При измерении фазы коэффициента отражения движение поршня осуществляется с помощью шагового двигателя, подключенного через устройство сопряжения к компьютеру.

2.5. Измерение поверочного образца

Для проверки работы экспериментальных установок комплекса выполнены измерения поверочных образцов. В качестве примера приведем измеренные и расчетные частотные зависимости коэффициентов отражения R от поверочных образцов (рис. 4, 5) для рефлектометра № 2 (см. таблицу).

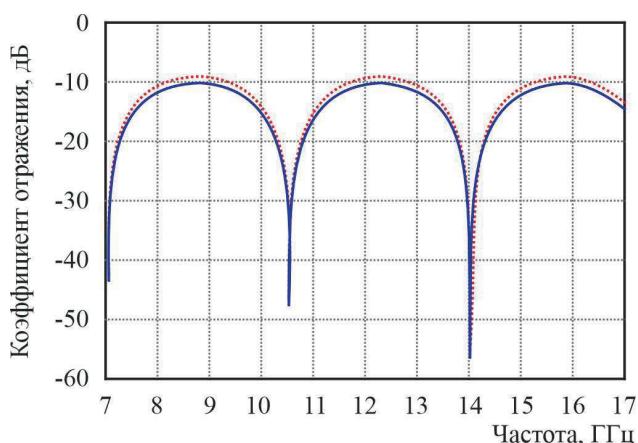


Рис. 4. Частотные спектры коэффициентов отражения R от поверочного образца из тефлона:
синяя кривая – расчет; красная кривая – эксперимент

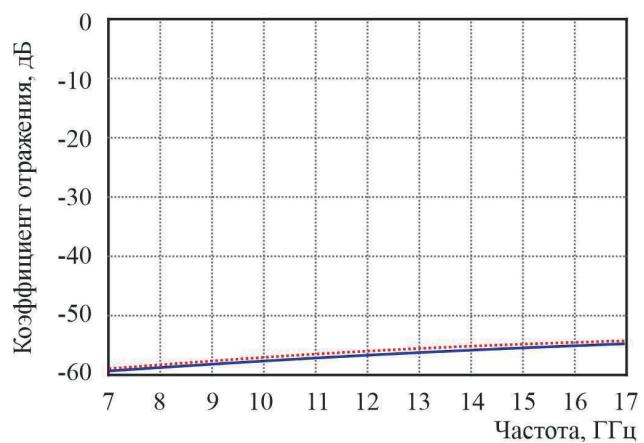


Рис. 5. Частотные спектры коэффициентов отражения R от поверочного образца из лавсана:
синяя кривая – расчет; красная кривая – эксперимент

Поверочные образцы представляют собой плоскопараллельную диэлектрическую пластину из тефлона толщиной 30 мм и лавсановую пленку толщиной 4,5 мкм. Модуль коэффициента отражения рассчитывался по формуле:

$$R(f) = 20 \lg \left| \frac{1 - \varepsilon}{2\sqrt{\varepsilon} \operatorname{ctn} \left(\frac{i2\pi fl\sqrt{\varepsilon}}{c} \right) + 1 + \varepsilon} \right|,$$

где l – толщина диэлектрика; $\varepsilon = \varepsilon_0(1 - i\tg\delta)$ – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость измеряемого материала; c – скорость света в воздухе; f – измеряемая частота. Для тефлона $\varepsilon_0 = 2,2$; $\tg\delta = 0,0001$. Для лавсана $\varepsilon_0 = 3,3$; $\tg\delta = 0,0001$.

Из приведенных графиков видно, что имеет место хорошее совпадение результатов измерения и расчета. Следует заметить, что для измерения тонких пластин необходима точность измерений коэффициента отражения до уровня -60 дБ.

Представленные кривые демонстрируют реальные возможности измерения коэффициента отражения в широком интервале значений.

2.6. Результаты измерения

На автоматизированном экспериментальном комплексе проведены измерения коэффициентов отражения R от образцов композиционных материалов по схеме рис. 1, а. В схеме с квазиоптическим рефлектометром измеряемым параметром является частотная зависимость коэффициента отражения от системы «образец – отражатель».

Объектами исследования являются следующие материалы:

- композиционный материал из парафина, наполненный опилками и включениями из алюминия (образец 1).
- композиционный материал из парафина, наполненный опилками и углеродистыми включениями (образец 2).

На рис. 6 и 7 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения от образцов 1 и 2 соответственно. На рисунках для сравнения даны частотные зависимости коэффициента отражения образцов, измеренные на представленном комплексе (синяя линия) и комплексе на основе скалярных анализаторов цепей [11] (красная линия).

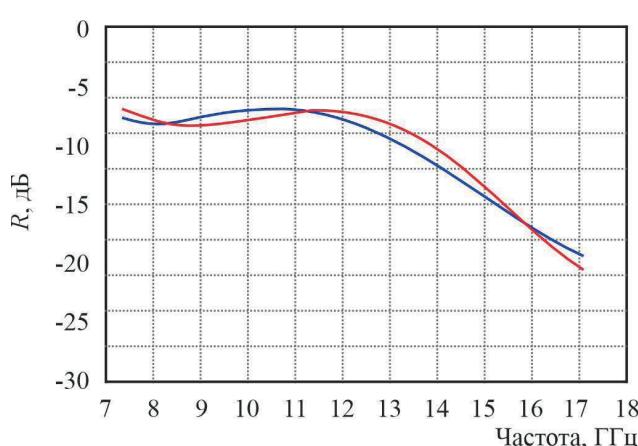


Рис. 6. Частотные спектры коэффициентов отражения от образца 1

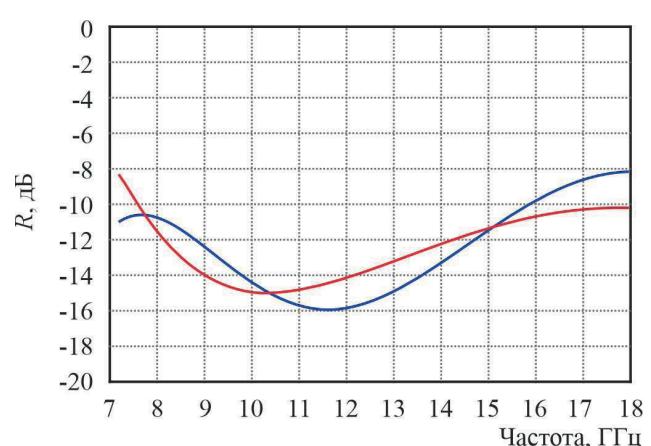


Рис. 7. Частотные спектры коэффициентов отражения от образца 2

Из приведенных графиков видно, что имеет место хорошее совпадение результатов измерения, полученных на разных экспериментальных комплексах.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе пяти квазиоптических рефлектометров миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн реализован автоматизированный измерительный комплекс. Базовым прибором является векторный анализатор цепей. Высокая точность обеспечивает возможность измерения очень малых (от -60 до -70 дБ, в зависимости от рабочего диапазона рефлектометров) коэффициентов отражения.

фициентов отражения от образцов различных материалов, включая радиопоглощающие материалы, резистивные пленки и структуры из периодических решеток.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №075-00395-25-00.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марпл, С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл ; пер. с англ. под редакцией И. С. Рыжака. – М.: Мир, 1990.
2. New method for the measurements of microwave and millimeter wave absorbing and radiotransparent materials / V. N. Apletalin, O. A. Dyakonova, Y. N. Kazantsev [et al.] // Proc. of the 3rd International Conference on Electromagnetic Structures, Torino, Italy. – 1993. – P. 253 – 257.
3. Reflectometer for small reflection coefficient measurements in millimeter and centimeter wave bands / V. N. Apletalin, O. A. Dyakonova, Y. N. Kazantsev [et al.] // Proc. of the 23rd European Microwave Conference, Madrid, Spain. – 1993. – P. 308 – 312.
4. **Патент № 2079144 РФ.** Устройство для измерения комплексного коэффициента отражения в квазиоптическом тракте : 1997 / В. Н. Аплеталин, С. А. Зубов, Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосиню.
5. Комплект функциональных элементов // Измерительная техника. – 1991. – № 7. – С. 72 – 73.
6. Комплект функциональных элементов // Измерительная техника. – 1991. – № 9. – С. 72 – 73.
7. **Казанцев, Ю. Н.** Электромагнитные волны в диэлектрических каналах прямоугольного сечения / Ю. Н. Казанцев // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, № 6. – С. 1140.
8. **Казанцев, Ю. Н.** Прямоугольные волноводы «полый диэлектрический канал» / Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, № 10. – С. 2060 – 2068.
9. **Казанцев, Ю. Н.** Широкие волноводы прямоугольного сечения с малыми потерями / Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 6. – С. 1063 – 1065.
10. Рефлектометр на МДВ как средство измерения малых отражений и электромагнитных свойств материалов / В. Н. Аплеталин, С. А. Зубов, Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосин // Proc. of International Conference on Spin-Electronics, Moscow. – 1995. – Р. 554 – 557.
11. Автоматизированный измерительный комплекс на основе комплекта скалярных анализаторов цепей / О. А. Дьяконова, Д. С. Каленов, Ю. Н. Казанцев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2016. – № 10. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/10/text.pdf>.
12. Методы и установки для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых волнах / В. Н. Аплеталин, О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосин // Измерительная техника. – 1991. – № 7. – С. 40 – 42.
13. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах / О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, С. В. Маречек [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 2. – С. 51 – 57.
14. **Хэррис, Ф. Дж.** Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье / Ф. Дж. Хэррис // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – № 1.

Статья поступила 16 августа 2025 г.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ
статей, опубликованных в течение 2025 г. в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника»

I. Медицинская электроника

1. Полников И.Г., Казаринов К.Д. – Особенности использования КВЧ-излучения при производстве фармакологических препаратов. – Вып. 2 (566). – С. 92 – 98.

II. Радиоэлектронные устройства

1. Адиатулин А.В., Карасев М.С., Щеголев С.А., Полозов Д.Н. – Четырехканальный блок приемопередатчика для перспективной РЛС. – Вып. 3 (567). – С. 57 – 60.
2. Гринев А.Ю., Поляков А.Д., Ильин Е.В. – Характеристики сканирования ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением. – Вып. 3 (567). – С. 61 – 68.
3. Джуринский К.Б., Андросов А.В. – Основные направления развития коаксиальных радиокомпонентов микроэлектроники СВЧ. – Вып. 4 (568). – С. 64 – 73.
4. Ильчук А.Р., Каргашин Ю.Д., Меркулов В.И., Чернов В.С. – Градиентный алгоритм траекторного управления при наведении управляемых ракет «воздух-воздух» по методу параллельного сближения. – Вып. 1 (565). – С. 6 – 13.
5. Карасев М.С., Коротаев Н.А., Тлюстянов Р.А., Воронцов Е.Н., Будзинский С.Ю., Щёголев С.А., Кинденов Д.С., Быковский Г.В., Полозов Д.Н., Адиатулин А.В. – Исследование и разработка отечественных пружинных контактов для передачи СВЧ-сигналов в составе конструкции перспективных приемопередающих модулей. – Вып. 4 (568). – С. 74 – 85.
6. Перегонов С.А., Кручинин А.О., Пчелин, В.А. – Способ линеаризации амплитудных характеристик усилителей мощности СВЧ-диапазона (дискуссионный вариант). – Вып. 2 (566). – С. 57 – 66.
7. Протасов В.И., Карасев М.С., Поисов Д.А. – Влияние амплитудных распределений АФАР на шумовые характеристики сквозного приемного канала. – Вып. 3 (567). – С. 50 – 56.
8. Щёголев С.А., Карасев М.С., Калита Д.В., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Адиатулин А.В., Кинденов Д.С. – Приемопередающий модуль X-диапазона на отечественной ЭКБ для серийного производства. – Вып. 1 (565). – С. 14 – 19.

III. Твердотельная электроника

1. Богданов С.А. – Влияние профилей легирования эпитаксиального слоя диода Шоттки на его параметры. – Вып. 2 (566). – С. 67 – 74.

2. Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Дудинов К.В., Фролов П.В., Сторин П.А. – Улучшение конструкции усилителя мощности СВЧ-диапазона. – Вып. 1 (565). – С. 50 – 60.
3. Карпов С.Н. – Математическая модель на основе метода Монте-Карло для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs HEMT. – Вып. 3 (567). – С. 15 – 39.
4. Пчелин В.А., Гринберг Д.С., Кужненкова С.И., Басманов М.А. – Оперативный метод «фиксированной нагрузки» для определения оптимальных согласующих цепей мощных СВЧ-транзисторов. – Вып. 4 (568). – С. 50 – 55.
5. Терешкин Е.В. – Оценка крутизны ВАХ полевых транзисторов на гетероструктурах с квантовыми ямами произвольной формы. – Вып. 3 (567). – С. 40 – 49.
6. Усыченко В.Г., Чернова А.С. – Морфология вольт-амперных характеристик нелегированных GaN/AlGaN-транзисторов в расширенном диапазоне напряжений и токов. – Вып. 4 (568). – С. 56 – 63.
7. Фадеев К.К., Савельев Е.И. – Анализ возможности применения копланарных полосковых линий в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах. – Вып. 3 (567). – С. 6 – 14.
8. Фадеев К.К., Савельев Е.И. – Особенности применения конденсаторов в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах. – Вып. 2 (566). – С. 75 – 85.
9. Фадеев К.К., Савельев Е.И. – Разработка ферритового циркулятора с высоким уровнем мощности в дециметровом диапазоне. – Вып. 1 (565). – С. 41 – 49.

IV. Технология и материаловедение

1. Борисов А.А., Клюев С.Б. – Влияние диэлектрической проницаемости материала подложки на характеристики делителя мощности на основе щелевых линий передач. – Вып. 3 (567). – С. 107 – 111.
2. Вашин С.А., Рубан Е.А., Шапоренков А.А. – Способ определения количественного и качественного состава газов, сорбированных внутривакуумной поверхностью отпаянных ЭВП. – Вып. 3 (567). – С. 117 – 122.
3. Вашин С.А., Рубан Е.А., Шапоренков А.А. – Улучшенная методика определения герметичности отпаянных ЭВП СВЧ с равными интервалами времени. – Вып. 3 (567). – С. 112 – 116.
4. Верченов В.С., Разин Д.А., Едунов Н.П., Сергеев К.Л., Шумкин С.С., Голубев С.Н., Ерещенко А.Е. – Оценка возможности получения диэлектрического зазора для сборок из постоянных магнитов Nd–Fe–B с повышенными требованиями к электропроводности и стойкости к внешним воздействующим факторам. – Вып. 3 (567). – С. 97 – 106.
5. Волкова Д.А., Севостьянов Н.А. – Исследование методик контроля параметров металлизационных паст, используемых при изготовлении изделий по технологии LTCC. – Вып. 2 (566). – С. 26 – 30.

6. Дьяконова О.А., Федосеев Н.А., Васильев В.И. – Автоматизированный измерительный комплекс на основе рефлектометров сантиметрового и миллиметрового диапазонов. – Вып. 4 (568). – С. 98 – 105.
7. Жабин Г.А., Логинов А.Б., Логинов Б.А. – Исследование шероховатости поверхности и эмиссионных свойств синтезированных покрытий $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$. – Вып. 3 (567). – С. 89 – 96.
8. Жабин Г.А., Шарапов Н.А., Есипова Т.М. – Особенности напыления, состав и структура поверхности тонкопленочных катодов. – Вып. 1 (565). – С. 30 – 40.
9. Жуков А.С., Бобырь В.В., Кузнецов П.А., Валеев Р.А., Миляев И.М., Лазаренко Г.Ю. – Структура и магнитные свойства материала, полученного селективным лазерным сплавлением порошка 30Х23К. – Вып. 4 (568). – С. 86 – 97.
10. Зубков Н.П., Мельников Н.М., Стрелецкий О.А. – Исследование и разработка эффективной технологии изготовления пироуглеродных поглотителей СВЧ-энергии для спиральных ЛБВ. – Вып. 2(566). – С. 46 – 56.
11. Иванова В.И., Ларионов М.И., Протченко А.И., Клинова А.И., Корнилов И.Д. – Исследование и получение термостабильных керамических материалов с высокой (свыше 80) диэлектрической проницаемостью. – Вып. 3 (567). – С. 69 – 74.
12. Ларионов М.И., Иванова В.И., Егоров С.В., Клинова А.И., Корнилов И.Д. – Применение многофакторного регрессионного анализа для оценки свойств ферритов. – Вып. 2 (566). – С. 20 – 25.
13. Ларионов М.И., Иванова В.И., Корнилов И.Д. – Оценка качества сырьевых материалов, используемых при синтезе ферритов. – Вып. 1 (565). – С. 20 – 29.
14. Рогачёв И.А. – Особенности формирования омических контактов в GaN МИС. – Вып. 3 (567). – С. 75 – 88.
15. Рогачёв И.А., Добров А.В., Котосонова А.В., Орехова О.А., Лукашин В.М., Курочки А.С., Лобанова А.В. – Особенности травления GaAs с регулируемым углом наклона профиля травления для НЕМТ на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. – Вып. 2 (566). – С. 6 – 19.
16. Соколов Д.А., Коломин В.М., Карасев Н.С., Юрсов А.Н., Смирнов А.В., Соколов А.Д. – Анализ этапов гидротермального синтеза стеклопластика кальция как компонента конденсаторной керамики с диэлектрической проницаемостью более 10000 для производства фильтров низких частот. – Вып. 2 (566). – С. 31 – 45.

V. Электровакуумные приборы

1. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А. – Особенности электродинамических характеристик планарных замедляющих систем миллиметрового диапазона длин волн. – Вып. 4 (568). – С. 7 – 19.

2. Голованов Н.А., Рулев А.А. – Проектирование клистронов: многокритериальная оптимизация параметров пространства взаимодействия с использованием генетического алгоритма. – Вып. 4 (568). – С. 20 – 27.
3. Комаров Д.А., Юнаков А.Н., Мамонтов А.В., Евсеев С.В., Моисеев Д.С. – Выходной кольцевой резонатор многолучевого клистрона с охватывающим пассивным звеном. – Вып. 1 (565). – С. 81 – 86.
4. Комаров Д.А., Юнаков А.Н., Мамонтов А.В., Евсеев С.В., Моисеев Д.С. – Оптимальный клистрон. – Вып. 1 (565). – С. 73 – 80.
5. Котов В.Е., Котляров Е.Ю., Быковский С.В. – О моделировании электронной нагрузки резонаторов циклотронных защитных устройств. – Вып. 2 (566). – С. 86 – 91.
6. Крачковская Т.М. – Исследование деградации эмиссионной поверхности модифицированных наноуглеродом катодов М-типа в процессе наработки. – Вып. 4 (568). – С. 37 – 49.
7. Медянкова Е.В., Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Савин А.Н. – Перспективные конструкции широкополосных выводов СВЧ-энергии для электровакуумных приборов. – Вып. 4 (568). – С. 28 – 36.
8. Мелешкевич П.М. – О токовой эрозии поверхности автоэмиссионных катодов. – Вып. 1 (565). – С. 61 – 72.
9. Тихонов Ю.С., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А., Акафьев Н.А. – Исследование двухзазорного многоканального резонатора с дополнительным элементом в виде КПРР и возможностью подавления высших мод. – Вып. 1 (565). – С. 87 – 95.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2025 г.

Цифры, стоящие рядом с фамилией автора, показывают: первая (римская) – номер раздела тематического указателя, в котором помещена статья, вторая (арабская) – порядковый номер статьи в соответствующем разделе.

- Адиатулин А.В.* II.1, 5, 8
Акафьева Н.А. V.9
Андросов А.В. II.3
Басманов М.А. III.4
Бобырь В.В. IV.9
Богданов С.А. III.1
Богомолова Е.А. V.1, 7
Борисов А.А. IV.1
Будзинский С.Ю. II.5
Быковский Г.В. II.5
Быковский С.В. V.5
Валеев Р.А. IV.9
Васильев В.И. IV.6
Вашин С.А. IV.2, 3
Верченов В.С. IV.4
Волкова Д.А. IV.5
Воронцов Е.Н. II.5
Галдецкий А.В. V.1, 7
Ганюшкина Н.В. III.2
Голованов Н.А. V.2
Голубев С.Н. IV.4
Гринберг Д.С. III.4
Гринев А.Ю. II.2
Далингер А.Г. II.8
Джуринский К.Б. II.3
Добров А.В. IV.15
Дудинов К.В. III.2
Дьяконова О.А. IV.6
Евсеев С.В. V.3, 4
Егоров С.В. IV.12
Едунов Н.П. IV.4
Ерещенко А.Е. IV.4
Есипова Т.М. IV.8
Жабин Г.А. IV.7, 8
Жуков А.С. IV.9
Зубков Н.П. IV.10
Иванова В.И. IV.11 – 13
Ильин Е.В. II.2
Ильчук А.Р. II.4
Иовдельский В.А. III.2
Казаринов К.Д. I.1
Калита Д.В. II.8
Карасев М.С. II.1, 5, 7, 8
Карасев Н.С. IV.16
Каргашин Ю.Д. II.4
Карпов С.Н. III.3
Кинденов Д.С. II.5, 8
Клинова А.И. IV.11, 12
Клюев С.Б. IV.1
Коломин В.М. IV.16
Комаров Д.А. V.3, 4
Корнилов И.Д. IV.11 – 13
Коротаев Н.А. II.5
Котляров Е.Ю. V.5
Котов В.Е. V.5
Котосонова А.В. IV.15
Крачковская Т.М. V.6
Кручинин А.О. II.6
Кужненкова С.И. III.4
Кузнецов П.А. IV.9
Курочка А.С. IV.15
Лазаренко Г.Ю. IV.9
Ларионов М.И. IV.11 – 13
Лобанова А.В. IV.15
Логинов А.Б. IV.7
Логинов Б.А. IV.7
Лукашин В.М. IV.15
Мамонтов А.В. V.3, 4

- Медянкова Е.В.* V.7
Мелешкевич П.М. V.8
Мельников Н.М. IV.10
Меркулов В.И. II.4
Миляев И.М. IV.9
Мирошиниченко А.Ю. V.9
Моисеев Д.С. V.3, 4
Орехова О.А. IV.15
Перегонов С.А. II.6
Поисов Д.А. II.7
Полников И.Г. I.1
Полозов Д.Н. II.1, 5
Поляков А.Д. II.2
Протасов В.И. II.7
Протченко А.И. IV.11
Пчелин В.А. II.6; III.4
Разин Д.А. IV.4
Рогачёв И.А. IV.14, 15
Рубан Е.А. IV.2, 3
Рулеv A.A. V.2
Савельев Е.И. III.7 – 9
Савин А.Н. V.7
Севостьянов Н.А. IV.5
Сергеев К.Л. IV.4
Смирнов А.В. IV.16
Соколов А.Д. IV.16
Соколов Д.А. IV.16
Сторин П.А. III.2
Стрелецкий О.А. IV.10
Терешкин Е.В. III.5
Тихонов Ю.С. V.9
Тлюстангелов Р.А. II.5
Усыченко В.Г. III.6
Фадеев К.К. III.7 – 9
Федосеев Н.А. IV.6
Фролов П.В. III.2
Царев В.А. V.9
Чернова А.С. III.6
Чернов В.С. II.4
Шапоренков А.А. IV.2, 3
Шарапов Н.А. IV.8
Шацкий С.В. II.8
Шумкин С.С. IV.4
Щёголев С.А. II.1, 5, 8
Юнаков А.Н. V.3, 4
Юрасов А.Н. IV.16
-

☰ НОВЫЕ КНИГИ ☰

Основы обработки цифровых сигналов в радиофизических приложениях: учебное пособие / П.А. Кондратович. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 164 с.

Рассматриваются фундаментальные теоретические и практические сведения, необходимые для овладения навыками спектрального анализа цифровых сигналов, понимания эффектов периодической дискретизации, квантования сигналов по уровню, особенностей архитектур аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, их показателей качества, усвоения принципов цифровой фильтрации, основ квадратурной обработки радиосигналов.

МЭМС: конструкции, технологии, приложения / А.И. Белоус, С.А. Чижик. – Москва: Техносфера, 2024. – 620 с.

В книге представлены систематизированные результаты детального анализа современного состояния и перспектив развития одного из наиболее стремительно развивающихся на стыке микромеханики и микроэлектроники научно-технических направлений – микроэлектромеханических систем (МЭМС). Книга ориентирована на достаточно широкую аудиторию – от студентов, аспирантов и преподавателей технических ВУЗов, специализирующихся в области микроэлектроники, до инженеров-разработчиков микросхем и электронных систем на их основе, инженеров-технологов серийных производств, сотрудников отраслевых исследовательских лабораторий и академических институтов, специалистов радиоэлектронной, автомобильной и космической техники. В семнадцати тематических главах последовательно, на конкретных примерах рассмотрены все основные этапы создания МЭМС.

**ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ
НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»**

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- информацию о финансировании статьи (грантовая поддержка).
- список литературы;

3. Краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), дату рождения (полностью), должность, ученую степень, послевузовское специальное образование (аспирант, соискатель, докторант, студент, магистрант), место работы, город, страна, домашний и электронный адрес, телефон;

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

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 фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDraw;
- 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 Р 7.0.100–2018 и дается общим списком в конце статьи.

10. К статье обязательно должны прилагаться сведения об авторах, в частности: полностью фамилия, имя и отчество, дата рождения, место работы и должность, ученая степень или ученое звание (если есть), статус обучающегося (студент, магистрант, аспирант).

11. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

12. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

13. 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.

14. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2026 г. (4 вып. в год). Цена подписки – 9600 руб., цена 1 номера – 2400 руб., включая НДС (20 %).

Сборник 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), квартиль 2.

Для оформления подписки необходимо оформить заказ, 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 по адресу: 141190, г.о. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а, пом-меш. 1, ком. 65, АО «НПП «Исток» им. Шокина», отдел сбыта; тел.: 8(495)465-88-67. Отчетные документы высылаются с каждым номером сборника.

ЗАКАЗ

Прошу принять заказ на подписку научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2026 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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.

Дата выхода в свет: 15.11.2025 г.

Отпечатано: Печатная компания ООО «ТипоГрафф»,
111397, г. Москва, вн. тер. г. муницип. округ Перово,
ул. Новогиреевская, д. 26, с. 3.

Усл. п. л. 14,0

Уч.-изд. л. 14,5

Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}

Тираж 500

10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина». Адрес редакции и издателя: Вокзальная ул., д. 2а, помещ. 1, ком. 65,
г.о. Фрязино, Московская обл., Российская Федерация,. 141190. Тел.: (495)465-86-12,
E-mail: lhotochkina@istokmw.ru; info@istokmw.ru

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2025, вып.4(568), с. 114

Подписной индекс 36292

