

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (537)

2018

(



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(537) 2018 Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

к.т.н. С.А. Зайцев (зам. главного редактора), к.т.н. С.В. Щербаков (зам. главного редактора), Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. А.В. Галдецкий, Б.Ф. Горбик, д.т.н. А.Д. Закурдаев, к.т.н. Н.П. Зубков, д.т.н. С.С. Зырин, к.т.н. А.С. Котов, д.т.н. П.В. Куприянов, к.т.н. В.Г. Лапин, д.т.н. М.И. Лопин, д.т.н. Н.А. Лябин, В.М. Малыщик, д.т.н., профессор П.П. Мальцев (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. П.М. Мелешкевич, д.т.н., профессор В.П. Мещанов (ОАО «ЦНИИИА»), к.т.н. А.Г. Михальченков, д.т.н. С.П. Морев (ФГУП «НПП «Торий»), О.А. Морозов (ЗАО «НПП «Магратеп»), д.ф.-м.н. А.И. Панас, д.ф.-м.н. А.Б. Пашковский, к.ф.-м.н. С.А. Плешанов, Е.Н. Покровский, к.т.н. О.В. Поливникова, к.т.н. А.В. Потапов, д.т.н., профессор Р.А. Силин., д.т.н. К.Г. Симонов, В.П. Стебунов (ответственный секретарь), д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»), д.т.н., профессор Н.Д. Урсуляк

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещения и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2018 г.



ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(537) 2018 Founded in 1950 r.

Editor-in-chief
D.T.Sc. A.A. Borisov

Editorial staff:

C.T.Sc. S.A. Zaitsev (deputy editor-in-chief), C.T.Sc. S.V. Scherbakov (deputy editor-in-chief), U.A. Budzinsky, C.Ph.M.Sc. A.V. Galdetsky, B.F. Gorbik, D.T.Sc. A.D. Zakurdaev, C.T.Sc. N.P. Zubkov, D.T.Sc. S.S. Zyrin, C.T.Sc. A.S. Kotov, D.T.Sc. P.V. Kupriyanov, C.T.Sc. V.G. Lapin, D.T.Sc. M.I. Lopin, D.T.Sc. N.A. Lyabin, V.M. Malyschik, D.T.Sc., professor P.P. Maltsev (IMWF SE RASc), C.T.Sc. P.M. Meleshkevich, D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»), C.T.Sc. A.G. Mikhalchenkov, D.T.Sc. S.P. Morev (FSUE «RPC «Torij»), O.A. Morozov (JSC «RPC «Magratep»), D.Ph.M.Sc. A.I. Panas, D.Ph.M.Sc. A.B. Pashkovsky, C.Ph.M.Sc. S.A. Pleshanov, E.N. Pokrovsky, C.T.Sc. O.V. Polivnikova, C.T.Sc. A.V. Potapov, D.T.Sc., professor R.A. Silin, V.P. Stebunov (executive secretary), D.T.Sc. M.M. Trifonov (JSC RPC «Istok-System»), D.T.Sc., professor N.D. Ursulyak

The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate $\Pi H \sim \Phi C \sim 77-24651$ date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

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



СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

Вилков Е.А., Максимов Н.А., Чигарев С.Г., Михайлов Г.М., Черных А.В., Панас А.И. — Резонансные эффекты спин-инжекционного излучения терагерцовых волн в наноразмерных магнитных переходах	6
Данилин Н.С., Димитров Д.М., Булаев И.Ю. — Повышение эффективности работы микропроцессоров в режиме реального времени с применением аппаратных акселераторов для построения высокоскоростной аппаратуры	13
<i>Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Сабиров И.Х., Волков С.А.</i> – Интеграция изделий фотоники и кремниевой микроэлектроники	17
<i>Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М.</i> – Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц	22
<i>Балыко А.К.</i> , <i>Мякиньков В.Ю.</i> , <i>Терешкин Е.В.</i> – Расчет автогенераторов СВЧ	44
<i>Лапин В.Г.</i> — Возможности и перспективы использования Г-образного затвора для изготовления полевых транзисторов СВЧ	52
Медицинская электроника	
Казаринов К.Д. — Исследование мембранотропной активности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн	62
Экономика	
Чекаданова М.В., Каштанов И. Н. – Практика формирования особых экономических зон технико-внедренческого типа как прообраза инновационных кластеров в сфере высоких технологий.	76
История	
Балыко А.К. – От идеи – к прибору	87



CONTENTS

Solid-state electronics

Vilkov E.A., Maksimov N.A., Chigarev S.G., Mikhailov G.M., Chernykh A.V., Panas A.I. – Resonance effects of terahertz waves spin-injection radiation in nanoscale magnetic	6
junctions	6
Danilin N.S., Dimitrov D.M., Bulaev I.U. – The increase of the operating efficiency of microprocessors in real time mode using hardware accelerators for building high-speed equipment.	13
Danilin N.S., Dimitrov D.M., Dimitrov M.D., Sabirov I.H., Volkov S.A. – The integration of photonic products and silicon microelectronics	17
Temnov A.M., Dudinov K.V., Emelyanov A.M. – SMD packages for sealing high-power MICs in the range up to 40 GHz	22
Balyko A.K., Myakinkov V.U., Tereshkin E.V. – Calculation of microwave active oscillators.	44
Lapin $V.G.$ – Possibilities and prospects of using Γ-shaped gate for manufacturing microwave field-effect transistors.	52
Medical electronics	
Kazarinov K.D. – Investigation of the membranetropic activity of electromagnetic field in a wide range of wavelengths	62
Economics	
Chekadanova M.V., Kashtanov I.N. – Practice of the formation of special economic zones of technical and implementation type as prototype of innovation clusters in the sphere of high technologies	76
History	
Daluko AV. From idea to davice	97

Balvko A.K. – Fr	om idea to	davica	۷′
Baivko A.K Fr	om idea to	device	ð

•

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.862

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ СПИН-ИНЖЕКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН В НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ

Е. А. Вилков, Н. А. Максимов, С. Г. Чигарев

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

Г. М. Михайлов, А. В. Черных

Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, г. Черноголовка

А. И. Панас

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

Обсуждаются причины и механизмы возникновения спин-инжекционного излучения в наноразмерных магнитных переходах. Анализируются экспериментальные данные вынужденного (стимулированного) излучения терагерцовых волн в резонансных структурах. Обсуждаются наблюдаемые нелинейные эффекты излучения на предмет сходства с турбулентными процессами в гидродинамике и динамическим хаосом в радиофизике.

КС: <u>магнитные переходы, терагерцовые (ТГц) волны, нелинейное взаимодействие, спин-инжекционное излучение, турбулентность</u>

RESONANCE EFFECTS OF TERAHERTZ WAVES SPIN-INJECTION RADIATION IN NANOSCALE MAGNETIC JUNCTIONS

E. A. Vilkov, N. A. Maksimov, S. G. Chigarev

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

G. M. Mikhailov, A. V. Chernykh

Institute of Microelectronics Technology Problems and High Purity Materials of Russian Academy of Sciences, Chernogolovka

A. I. Panas

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

The causes and mechanisms of spin-injection radiation in nanoscale magnetic junctions are discussed. The experimental data of THz wave's spin-injection stimulated (induced) radiation in resonance structures are analyzed. The observed nonlinear effects of the radiation are discussed for similarities to turbulent processes in hydrodynamics and dynamic chaos in radiophysics.

Keywords: <u>magnetic junctions, terahertz (THz) waves, nonlinear interaction, spin-injection radiation, turbulence</u>





1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание специалистов всё больше привлекает терагерцовый диапазон частот. Он расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами и, в силу своей слабой освоенности, иногда называется «терагерцовой дырой (или провалом)». Такая ситуация связана с небольшим выбором существующих источников и приёмников терагерцового излучения. К первым относятся ЛОВ, оротроны, гиротроны и лазеры. В то время как выбор приёмников и того меньше — это в основном болометры и ячейки Голея. Указанные приборы часто громоздки и неудобны для практических применений. И хотя специалисты считают, что «провал» сомкнулся к концу 90-х годов, эффективность существующих приборов в этом диапазоне остаётся невысокой.

С другой стороны, свойства сигналов терагерцового диапазона действительно привлекательны с точки зрения использования их на практике. Так, например, терагерцовое излучение не является ионизирующим, поэтому, в отличие от рентгеновского излучения, оно не наносит вреда организму. Высокая проникающая способность терагерцовых сигналов делает их весьма перспективными для систем безопасности и сканирования багажа и людей. Интересны предложения по использованию таких сигналов в спектроскопии и высокоскоростных системах связи.

Отмеченные обстоятельства делают актуальными исследования по поиску новых принципов построения источников терагерцового излучения, особенно в плане разработки компактных и технологичных в изготовлении устройств. Одно их них базируется на явлении, наблюдаемом уже на протяжении ряда лет и связанном с обнаруженным эффектом излучения сигналов в диапазоне частот 3...40 ТГц в магнитных переходах, сформированных из контактирующих слоёв ферромагнетиков и антиферромагнетиков, при протекании через них токов большой плотности [1]. В [2] было показано, что механизм наблюдаемого излучения может быть связан с инжекцией неравновесных спинов электронов протекающим через контактные слои током и созданием инверсной заселённости спиновых уровней энергии. Такая трактовка вызывает дискуссии среди специалистов, но, по мнению авторов указанной публикации, имеет право на существование. Интересные эффекты наблюдаются при помещении источника терагерцового излучения в резонатор с положительной обратной связью [3–4], что при определённых условиях (величина тока через переходы) приводит к резкому увеличению интенсивности генерации, подобно лазерам.

Направление исследований по спин-инжекционному излучению терагерцовых волн в магнитных переходах зародилось в России и по настоящее время не имеет аналогов в мире. С другой стороны, интерес к этим исследованиям существует, о чём свидетельствует публикационная активность ведущих научно-технических журналов. В данной ситуации любые результаты по этому направлению являются новыми и заслуживающими внимания, хотя некоторые выводы авторов как предыдущих работ [1–4], так и настоящей публикации могут казаться и не бесспорными.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффектов, обнаруженных в [3–4], с акцентом на анализ нелинейных (турбулентных) свойств генерации, имеющих место при больших токах инжекции. Однако, с учётом отмеченного выше, авторы данной статьи посчитали целесообразным в её начале поместить последние теоретические представления о причинах и механизмах возникновения рассматриваемого эффекта спин-инжекционного излучения терагерцовых волн, которые помогут читателям понять описываемые далее явления и, возможно, снимут некоторые дискуссионные вопросы.

7

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПИН-ИНЖЕКЦИОННОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДАХ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной структуры, в которой были получены первые результаты по спин-инжекционному излучению в магнитных переходах [1–5]. Излучение было зафиксировано в терагерцовом диапазоне при комнатной температуре и наблюдалось вблизи контакта двух ферромагнитных металлов, через которые протекал электрический ток. При прохождении тока через контакт один из контактирующих металлов (ферромагнитный стержень с тонким остриём I) инжектировал нескомпенсированные спины в тонкую ферромагнитную пленку (рабочая область II), после чего инжектированные носители заряда стекали в область III, выполняющую роль коллектора.

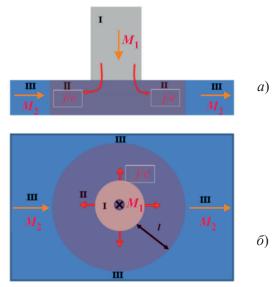


Рис. 1. Схема экспериментальной структуры:

a – вид сбоку; δ – вид сверху; I – стержень; II – инжекционная область плёнки (с неравновесной спиновой поляризацией); III – области плёнки вне инжекции

Изменение квазиуровней Ферми для средних заселенностей спиновых подзон в указанных выше областях, с обозначением радиационных переходов в области II, показано на рис. 2. В используемой модели электроны проводимости имеют изотропный параболический спектр энергий с некоторой эффективной массой. Учитывается воздействие на них обменного взаимодействия с *d*-электронами (*sd*-обмен), внешнего электромагнитного поля и внешней равновесной системы «термостата». Обменное взаимодействие *s*-электронов, определяющих проводимость ферромагнитного металла, с *d*-электронами, «локализованными» на атомах кристаллической решётки, зависит от спинового состояния *s*- и *d*-электронов, при этом считается, что спиновое состояние *d*-электронов связано с намагниченностью кристаллической решетки ферромагнетика. Такое взаимодействие описывается по механизму *sd*-обмена, изложенному в [6]. Вследствие этого взаимодействия, обменная энергия *s*-электронов зависит от направления их спинов относительно намагниченности кристаллической решетки ферромагнетика. Это достигается введением спиновой переменной в гамильтониан взаимодействия. При инжекции спинполяризованных электронов током, в условиях достаточно большой длины релаксации спинов *l*,



можно рассматривать их релаксацию по импульсу и средней энергии как достаточно быструю, в отличие от спиновой релаксации, когда спин-инжектированные электроны сохраняют какоето время своё спиновое состояние в инжекторе, в нашем случае — ферромагнитном стержне (см. рис. 2, область II). На участке с иной, чем в стержне, намагниченностью M_2 (см. рис. 1) инжектированные из стержня электроны с противоположными спинами образуют две квазиравновесные группы. Рассматривая для них средние заселенности по спиновым подзонам, можно ввести для инжектированных электронов квазистационарные уровни Ферми в каждой из подзон как добавку к равновесному значению Ферми уровня. Кроме того, нужно учесть условие электронейтральности так, чтобы общее число электронов в рабочей области оставалось постоянным. В результате возникает разница в положениях квазиуровней в спиновых подзонах и, таким образом, при инжекции спинов током в магнитном переходе может возникнуть отрицательная спиновая температура, предсказанная в [7]. Максимальную частоту излучения можно также представить в виде суммы величин $\Delta \varepsilon_{F^+}$ и $\Delta \varepsilon_{F^-}$ (см. область II на рис. 2), деленной на постоянную Планка [8]:

$$v \equiv \frac{\Delta \varepsilon_{F+} + \Delta \varepsilon_{F-}}{2 \pi \hbar} = \frac{\left| \varepsilon_{F+} - \varepsilon_{F0+} \right| + \left| \varepsilon_{F-} - \varepsilon_{F0-} \right|}{2 \pi \hbar}.$$
 (1)

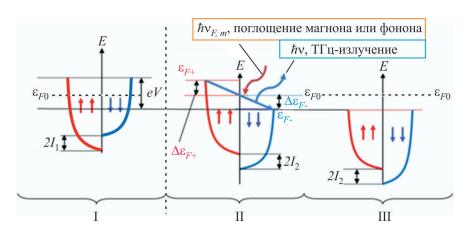


Рис. 2. Схема энергетических электронных зон и квазиуровней Ферми при $\Delta P < 0$ (заселяется инжекцией энергетическая подзона для минорных электронов) в стержне – область I, для неравновесных электронов в пленке – область II, для равновесных электронов в пленке – область III:

V — разность потенциалов между стержнем и пленкой; $I_{1,2}$ — обменная энергия в стержне и пленке; наклонная стрелка — непрямой межзонный переход электрона с переворотом спина между двумя неравновесными квазиуровнями Ферми ε_{F+} с поглощением третьей частицы; ε_{F0} — равновесное значение уровня Ферми в отсутствие прикладываемого напряжения

В соответствии с (1), в [8] показано, что для характерных параметров магнитного перехода диапазону частот спин-инжекционного излучения 5...40 ТГц, наблюдаемому в эксперименте, соответствуют плотности тока инжекции, примерно на два порядка меньшие, чем плотность тока диффузии. Исходя из оценки тока диффузии ($j_D \approx 10^{10}...10^{11} \,\mathrm{A/cm^2}$), необходимые плотности тока в магнитном переходе получаются порядка $j \approx 10^8...10^9 \,\mathrm{A/cm^2}$, что вполне достижимо



экспериментально, причём без теплового пробоя магнитного контакта. Более низкие частоты соответствуют меньшим плотностям тока. Однако при этом необходимо учитывать затухание электромагнитных волн, происходящее, главным образом, на свободных носителях материала магнитного контакта. Как показано в работе [9], для того чтобы преодолеть потери, вызванные затуханием, необходимо превысить некоторое пороговое значение плотности тока, оцениваемое величиной $j_{th} \approx 10^7...10^8~\text{A/cm}^2$. Это вполне соответствует данным эксперимента, в котором спин-инжекционное излучение появляется лишь начиная с некоторого порогового значения плотности тока.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ

В основе идеи введения положительной обратной связи лежит проверка гипотезы о создании инверсной заселённости спиновых уровней энергии у электронов при протекании токов через магнитные переходы. При этом используется подход, применяемый при построении лазеров: в структуру вводится резонатор, обеспечивающий многократный проход излучения через активную среду. Это, в свою очередь, приводит к появлению вынужденного (стимулированного) излучения, которое существенно увеличивает амплитуду излучаемой волны без изменения её частоты и фазы. Последнее свидетельствует о том, что вынужденное излучение когерентно с вынуждающим излучением.

На рис. 3 схематично представлена структура экспериментального макета источника терагерцовых волн [3]. Он состоит из наноразмерной плёнки 2 из антиферромагнетика FeMn (30...50 hm), к которой прижат металлический стержень 1, заострённый до диаметра 10...40 мкм.

Резонатор образован плёнкой 2 и немагнитным слоем 5 из титана (10...15 нм). Последний выполняет функцию полупрозрачного зеркала, имеющего в ТГц-диапазоне коэффициент прозрачности 0,3. В отличие от лазеров, у которых между зеркалами резонатора находится активная среда с инверсной населённостью энергетических уровней, в макете это пространство заполнено высокоомным кремнием 4 толщиной 0,5 мм, с коэффициентом преломления 2. Перечисленные характеристики делают резонатор низкодобротным, что является ещё одним принципиальным отличием макета от лазерных систем. Формирование излучения происходит в области 3. Нетрудно убедиться, что собственные частоты используемого в эксперименте резонатора отстоят друг от друга на 0,15 ТГц.

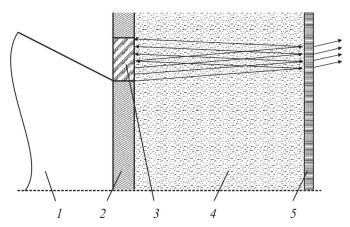


Рис. 3. Структура экспериментального макета

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

2(537).indd 10

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Основной задачей экспериментов являлись поиски ответов на следующие вопросы: может ли быть реализован в данной структуре лазерный эффект усиления излучения за счёт вынужденного воздействия и что будет происходить с выходным сигналом при больших токах инжекции? Положительный ответ на первый вопрос будет свидетельствовать о том, что кванты энергии, отражённые от титанового зеркала, также способны стимулировать перевороты спинов с излучением, увеличивая мощность излучённого сигнала, естественно, при условии, что в области 3 уже существует инверсная заселённость спинов. Второй вопрос связан с возможными нелинейными эффектами излучения.

На рис. 4 представлены спектральные характеристики излучения, зафиксированные в эксперименте. Первая из них (рис. 4, а) соответствует относительно небольшим токам инжекции (80 мА). В этом случае низкая добротность используемого резонатора в сочетании с нелинейными эффектами, связанными с преобразованием и излучением терагерцового сигнала, приводит к появлению в спектре ближайших гармоник основной моды излучения, расположенной в районе 10 ТГц. Отметим «размытость» спектральных составляющих по частоте, каждая из которых включает в себя более десятка собственных частот резонатора. Увеличение тока приводит к новым эффектам. Рис. 4, б демонстрирует спектр излучённого сигнала при токе инжекции 120 мА. Спектр становится более широкополосным, вовлекая в процесс излучения все больше собственных частот резонатора. Рост интенсивности генерируемого сигнала и формирование одной явно выраженной моды излучения напоминает эффект, наблюдаемый в лазерах при стимулированном излучении. Именно этот эффект позволил авторам [3, 4] осторожно назвать исследуемый объект терагерцовым квантовым генератором («твазером»). При дальнейшем увеличении тока система переходит в новое состояние. Так, спектр на рис. 4, 6 соответствует току 300 мА и напоминает спектры турбулентных процессов в гидродинамике и в системах с динамическим хаосом в радиофизике [10]. С другой стороны, удивительным является тот факт, что переход системы в «турбулентный» режим сопровождается значительным, практически на порядок, увеличением интенсивности излучения, что отличает его от указанных нелинейных явлений и делает актуальным продолжение исследований по этой проблематике в дальнейшем.

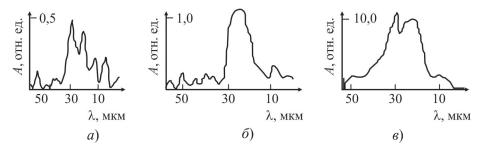


Рис. 4. Спектральные характеристики излученного сигнала

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ экспериментальных данных по исследованию излучения стимулированных (вынужденных) спин-инжекционных терагерцовых волн свидетельствует о том, что

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

13.07.2018 13:11:12





механизм наблюдаемого излучения действительно может быть связан с созданием инверсной заселённости (по аналогии с лазерами) спиновых уровней энергии электронов на границе контактов магнитных переходов. Ставить окончательную точку в дискуссии как о самом явлении излучения терагерцовых волн, так и о его возможных механизмах наверно рано, но приведённые в данной работе результаты могут представлять интерес для специалистов в этой области. Кроме того, как с научной, так и с практической точки зрения интерес представляют режимы излучения, наблюдаемые при больших токах инжекции и демонстрирующие динамику, похожую на нелинейную. Но здесь явно не хватает экспериментального материала и теоретических исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-07-03907а).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Гуляев, Ю. В.** Спин-инжекционное терагерцовое излучение в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов, А. И. Панас, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // Письма в ЖЭТФ. -2011.-T.93.-C.289-293.
- 2. **Гуляев, Ю. В.** Инжекция спинов током и терагерцовое излучение в ферромагнитных переходах / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов, А. И. Панас, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // Доклады Академии наук. -2011. -T. 438, № 1. -C. 41 43.
- 3. **Гуляев, Ю. В.** Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцовых волн в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев, Е. А. Вилков, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, Ф. В. Черных, С. Г. Чигарев // Письма в ЖЭТФ. -2014. Т. 99, № 9-10. С. 591-594.
- 4. **Гуляев, Ю. В.** Стимулированное терагерцовое излучение / Ю. В. Гуляев, Е. А. Вилков, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, Ф. В. Черных, С. Г. Чигарев // Радиотехника и электроника. -2015. Т. 60, № 9. С. 963 966.
- 5. **Gulyaev, Y. V.** Observation of the spin-injection terahertz emission in planar ferromagnetic two-layer structures / Y. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, I. V. Malikov, G. M. Mikhailov, S. G. Chigarev and E. M. Epshtein // Journal of Communications Technology and Electronics. 2012. Vol. 57, issue 3. P. 329 334.
- 6. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 томах. Т. 6 Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.
- 7. **Gulyaev, Yu. V.** Spin-injection by current in metal-metal magnetic junctions / Yu. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, E. M. Epshtein, R. J. Elliott // Journal of Communications Technology and Electronics. 2003. Vol. 48, No 9. P. 942 956.
- 8. **Вилков, Е. А.** Перестройка частоты спин-инжекционного излучения в магнитном контактном переходе / Е. А. Вилков, Г. М. Михайлов, С. Г. Чигарев, Ю. В. Гуляев, В. Н. Коренивский, С. А. Никитов, А. Н. Славин // Радиотехника и электроника. -2016. Т. 61, № 9. С. 844 851.
 - 9. Kadigrobov, A. / A. Kadigrobov, R. I. Shekhter, M. Jonson // Fisika Nizkikh Temperatur. 2005. Vol. 31. P. 463.
- 10. **Дмитриев, А. С.** Генерация хаоса / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Н. А. Максимов, А. И. Панас. М.: Техносфера, 2012. 432 с.

Статья поступила 20 апреля 2018 г.







ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТНЫХ АКСЕЛЕРАТОРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ АППАРАТУРЫ

Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Ю. Булаев

ЗАО «Космос Комплект», г. Москва

Предложен подход к повышению эффективности работы микропроцессоров в режиме реального времени с применением аппаратных акселераторов (АПА) и определены такие характеристики подхода, как преимущества, особенности программного обеспечения и системные интерфейсы. Приведены результаты эксперимента компании ЗАО «Космос Комплект» по созданию АПА на базе микропроцессоров ARM Cortex M0 и ARM v7.

КС: метод, эффективность работы, микропроцессор, режим реального времени, аппаратный акселератор, высокоскоростная аппаратура

THE INCREASE OF THE OPERATING EFFICIENCY OF MICROPROCESSORS IN REAL TIME MODE USING HARDWARE ACCELERATORS FOR BUILDING HIGH-SPEED EQUIPMENT

N. S. Danilin, D. M. Dimitrov, I. U. Bulaev

CJSC «Cosmos Complect», Moscow

The approach to the increase of operating efficiency of microprocessors in real time mode using hardware accelerators (HWA) has been proposed and such approach characteristics as advantages, software peculiarities and system interfaces were defined. The results of the experiment made by ZAO «Cosmos Complect» company on creating HWAs based on microprocessors ARM Cortex M0 and ARM v7 are shown.

Keywords: <u>method, operating efficiency, microprocessor, real time mode, hardware accelerator, high-speed equipment</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы, работающие в режиме реального времени, повсеместно используют микропроцессоры и соответствующие операционные системы [1]. Необходимо отметить при этом, что проектирование и реализация такого класса систем (особенно бортовых систем) связаны с рядом таких специфических требовании, как, например, время ответа при возникновении события, радиационная стойкость, массогабаритные ограничения, ограничения по потребляемой энергии, сложность методик и программ испытаний, ограничения по бюджету проекта и др. [2].

Широко распространенной практикой в технических решениях систем реального времени с применением микропроцессоров является имплементация ядра некоторой операционной





системы в микропроцессорном модуле. Большой недостаток этого подхода состоит в разбросе времени обработки заявок, поступающих в результате событий в реальной среде [3]. Разница между минимальными и максимальными временами ответа системы большая, поэтому проектирование традиционно проводится по принципу выбора «самого неблагоприятного случая», т. е. в качестве определяющего принимаем требуемое минимальное время ответа. Отсюда и постоянное стремление к поиску более мощных и дорогих микропроцессоров со специфическими характеристиками.

Цель настоящей работы — предложить подход к повышению эффективности работы микропроцессоров в режиме реального времени с применением аппаратных акселераторов (АПА) и определить такие характеристики подхода, как преимущества, особенности программного обеспечения и системные интерфейсы.

2. ПРИНЦИП АППАРАТНОЙ АКСЕЛЕРАЦИИ

На рис. 1 представлены обобщенные структурные схемы построения микропроцессорной системы реального времени без и с применением АПА.

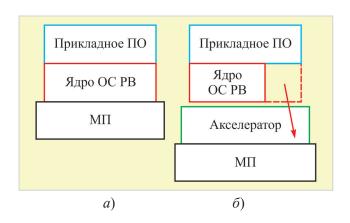


Рис. 1. Обобщенные структурные схемы микропроцессорной системы без (a) и с применением (б) АПА: ПО – программное обеспечение; ОС РВ – операционная система реального времени; МП – микропроцессор

АПА предназначен для сокращения разницы во времени ответа системы при «самом благоприятном» и «самом неблагоприятном» случае за счет существенного снижения времени администрирования заявок со стороны ОС РВ. Такие действия по администрированию обработки в реальном времени, как распределение задач, обработка очередей, будут выполняться АПА вне МП, и тем самым МП будет занят «чистой» обработкой текущего задания, без прерываний со стороны административных подпрограмм [4]. На рис. 1, σ показано, что часть ядра ОС РВ перешла к АПА и при этом является не программным кодом, а аппаратной реализацией.

АПА является проблемно ориентированным аппаратным решением, так как требования к нему и соответствующие ограничения зависят от конкретного приложения системы реального времени.





3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПА

К основным характеристикам АПА относятся:

- 1) эффективность: оптимизация многозадачного режима; скорость обработки заявок в реальном времени возрастает на несколько порядков; время ответа системы реального времени сокращается на несколько порядков; выполнение «замедляющих» административных функции ОС РВ имплементируется в АПА;
- **2) мобильность:** нет специальных требований к памяти; нет специальных требований к формату инструкций; нет специальных требований к МП, кроме наличия одной линии прерывания и шины данных;
- **3) программное обеспечение для систем реального времени (СРВ):** упрощение программирования СРВ за счет того, что часть ядра ОС РВ не занимает память МП; упрощение timing-анализа СРВ; упрощение анализа обменных взаимодействий между модулями СРВ; нет необходимости использовать обработчик прерываний в классическом виде.

На рис. 2 представлена архитектурная схема модуля МП + АПА. Число МП при такой архитектуре может быть от 1 до 3. Каждый модуль МП содержит такие конвенциональные блоки, как центральный процессор (ЦП), ввод/вывод (В/В) и ОЗУ. Шинный арбитр управляет обменными взаимодействиями на шине. Процессор, память, шина и шинный арбитр являются стандартными компонентами, которые широко применяются в практике разработки СРВ. Интерфейс к АПА состоит из набора регистров, часть которых может быть использована несколькими ЦП в случае применения двух или трех МП или отельными ЦП. Регистры общего назначения используются для задания поведения СРВ. ЦП «общается» с АПА при помощи набора регистров для управления, статуса и обслуживания запросов на прерывание [5].

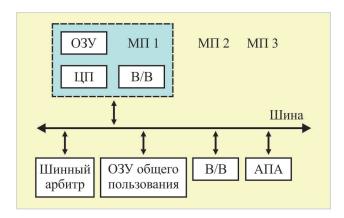


Рис. 2. Архитектурная схема МП + АПА

Наличие памяти общего пользования связано с предоставлением возможности перемещения задач между МП. В этом случае в ней сохраняются данные в виде стековых структур, а также блоки с управляющей информации по отдельным задачам. Программы и данные, которые относятся к конкретному ЦП, сохраняются в ОЗУ данного МП.

АПА работает синхронно с ЦП, и поэтому необходим простой коммуникационный протокол. Этот протокол может использовать, к примеру, time – out, обеспечивающий быстрое обнаружение сбоев при выполнении протокола.



АПА использует прерывание, чтобы сообщить ЦП о необходимости перехода к другой задаче. Такая заявка подтверждается ЦП, и статус текущей задачи сохраняется в блоке с управляющей информацией (БУИ). Следующая задача запускается АПА и ее статус загружается из соответствующего БУИ из регистров АПА.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компания ЗАО «Космос Комплект» провела экспериментальную работу по созданию АПА на базе радиационно стойкого микромодуля с МП ARM Cortex M0. В качестве целевого процессора был использован компьютерный модуль формата PC104 с МП ARM v7. Особый интерес представляло применение самого компактного ядра ОС PB Zephir 1.8 для МП x86, ARM v7 и др. Это было обусловлено двумя причинами: наличие исходных кодов ядра и его мощное применение в решениях «интернет вещей» (IoT). К этой ОС PB прилагается мощный набор драйверов ввода/вывода: GPIO. SPI, I2C, ADC, USB, Bluetooth, IEEE 802.15.4, IPv4/6 и др.

Результаты работы по ускорению ответов СРВ для управления «умной камеры» с функциями сканирования и распознавания объектов показали 22-кратное увеличение производительности целевого процессора и сокращение времени ответа системы в 8 раз.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Данилин, Н. С.** Система искусственного интеллекта на борту космических аппаратов / Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2016. Вып. 3 (530). С. 88 91.
- 2. Данилин, Н. С. Микроминиатюризация электронной компонентной базы на основе микросистем в корпусе СВЧ-диапазона для малых спутников / Н. С. Данилин, А. Ю. Потюпкин, С. А. Волков, И. Ю. Булаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 3 (534). С. 28 33.
- 3. **Sindhavani, M.** RTOS acceleration techniques review and challenges / M. Sindhavani, T. Oliver. NTU, Singapore, 2002.
 - 4. Sakamura, K. TRON project / K. Sakamura. Springer Verlag, 2003.
 - 5. Adomat, J. RTU96 functional specification / J. Adomat, J. Frunas, I. Starner. IMU, Sweden, 1998.

Статья поступила 28 апреля 2018 г.







ИНТЕГРАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ФОТОНИКИ И КРЕМНИЕВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, М. Д. Димитров, И. X. Сабиров, С. А. Волков

ЗАО «Космос Комплект», г. Москва

Разработка и выпуск гибридных микросборок (гибридных систем в корпусе — ГСвК) являются одним из базовых направлений в системной микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры. В работе рассмотрены некоторые вопросы интеграции фотоники и кремниевой микроэлектроники ввиду ее особой актуальности для широкого класса задач. Приводится пример реализации микромодуля с лазерным диодом на LTCC-подложке.

КС: <u>интеграция, изделия фотоники и кремниевой микроэлектроники, микромодуль с лазерным диодом на LTCC-подложке</u>

THE INTEGRATION OF PHOTONIC PRODUCTS AND SILICON MICROELECTRONICS

N. S. Danilin, D. M. Dimitrov, M. D. Dimitrov, I. H. Sabirov, S. A. Volkov

CJSC «Cosmos Complect», Moscow

The development and production of hybrid microassemblies (hybrid systems in a package) is one of the basic directions in the system microminiaturization of radio electronic equipment. Some aspects of integration of photonics and silicon microelectronics are considered in the paper in view of its particular relevance for a wide class of problems. The realization of a micromodule with a laser diode on LTCC-substrate is given as an example.

Keywords: <u>integration</u>, <u>photonic products and silicon microelectronics</u>, <u>micromodule with a laser diode on LTCC substrate</u>.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ В ИНТЕГРАЦИИ

С 1970-х годов, в соответствии с законом Мура, примерно каждые два года повышалась функциональность искусственных спутников (ИС) за счет роста числа транзисторов на единицу площади. Так, например, процессор Xeon (СБИС) компании Intel, созданный на базе технологии 65 нм с восемью металлическими слоями, содержит 1,3 млрд транзисторов.

Типичные проводные соединения между СБИС и ИС являются «узким» местом, т. к. внутрисхемная скорость обменных взаимодействий на порядки превышает возможности полосы пропускания проводной инфраструктуры. Это относится ко всем современным информационно-коммуникационным структурам, как на уровне ТЭЗ, так и на уровне блоков. Эффективным современным решением для устранения «узкого» места является применение оптических ИС (ОИС). ОИС объединяют в одном корпусе лазерный диод, ключи/модуляторы, волноводы и





фотодетекторы. Концепция ОИС была реализована в 1980-х годах, а с 2005 г. стали широко применяться фотонные ИС (ФИС) – следующее поколение ОИС.

Современные технологии прозводства полупроводниковых ИС не позволяют эффективно реализовать источники когерентного излучения на кремнии. В то же время это возможно в гетерогенных полупроводниковых структурах, например: GaN, GaAs, InP и др. [1].

Поскольку кремниевая электроника еще достаточно долго будет определяющей технологией при создании микросхем для сбора, хранения и обработки информации, а гетерогенные полупроводниковые структуры и микросхемы на их основе будут, безусловно, доминировать при разработке современных коммуникационных решений, то интеграция этих двух технологий является исключительно перспективной. При этом следует учесть, что в области гетерогенной электроники отечественные научные исследования и технологии не являются отстающими.

2. ГИБРИДНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ФОТОНИКИ И КРЕМНИЕВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

На основе современных кремниевых технологических процессов производится широкая гамма микроэлектронных структур: усилители, преобразователи, мультиплексоры, процессоры и т. д. Они применяются в разном конструктивном исполнении – как корпусированные микросхемы или как кристаллы (в случае гибридной системы в корпусе, ГСвК). Далее входят в состав ТЭЗ, блоков и т. д. с точки зрения уровней традиционной конструктивной иерархии.

Технологии производства гетерогенных полупроводниковых структур достаточно эффективно позволяют реализовать лазерные и светоизлучающие диоды, детекторы излучения и разные сенсоры коммуникационного назначения. При этом ФИС, как правило, включают три основных компонента (источник излучения, волновод и детектор). ФИС также можно применять как в виде кристалла, так и в виде корпусированной микросхемы [2].

Интеграция ФИС требует дополнительно (в зависимости от конкретной задачи) включения таких оптических компонентов, как фильтры и линзы. Особое значение при этом имеет точность сборки и настройки оптических трактов, которая может быть в пределах ± 100 мкм.

С учетом требований к применению ЭРИ в бортовой аппаратуре, к настоящему моменту наиболее перспективной является гибридная интеграция с применением подложек из низкотемпературной многослойной керамики LTCC [3, 4].

При разработке ГСвК с применением фотонных блоков всегда возникает вопрос о выборе, расположении и интеграции когерентного источника света. Далее приводится результат работы компании ЗАО «Космос Комплект» по созданию LTCC-модуля с лазерным диодом и оптоволоконным выводом в качестве коммуникационного порта для микроконтроллера ARM М0 в части интеграции фотонного блока.

На подложке монтажная площадка для лазерного диода с габаритными размерами $0,15\times9$ мм расположена под «аркой» диаметром 150 или 200 мкм для обеспечения монтажа оптоволокна $62,5\times125$ или 200×230 мкм.

При проведении работы было необходимо прежде всего установить эффективность системы «лазер — оптоволокно» с точки зрения точности их стыковки. С этой целью было проведено моделирование на ASAP (advanced system analysis program) при следующих условиях: площадь излучения лазерного диода — 100×1 мкм; параметры оптоволокна — 62,5/125 мкм; цифровая апертура NA = 0,22. Координатная система, использованная при этом, представлена на рис. 1.

18





При моделировании использована многомодовая модель лазера с гауссовским распределением угловой интенсивности по осям Y и X. Модель стыковки при использовании сферической фокусировочной линзы показана на рис. 2.

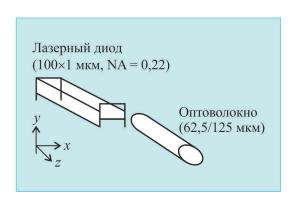


Рис. 1. Координатная система при моделировании стыковки

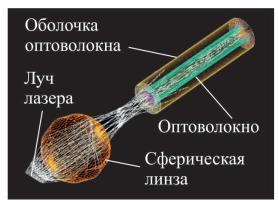


Рис. 2. Модель стыковки при использовании сферической фокусировочной линзы

В окончательном варианте конструкции не была использована сферическая линза из-за чисто экономических соображений. Номинальная эффективность стыковки, полученная при моделировании для двух вариантов: с областью излучения 100×1 мкм и волокном 62,5/125 мкм и с областью излучения 210×1 мкм и волокном 200/220 мкм, оказалась 0,37. Анализ эффективности стыковки в обоих случаях был проведен в два этапа. На первом этапе проанализированы вариации параметров стыковки (таблица).

Изменяемый параметр	Единица измерения	Значение	Эффективность стыковки	Влияние, %
Поворот лазера по $X(\min)$	град	-1,500	0,369	-3,2
Поворот лазера по $X(\max)$	град	1,500	0,380	2,4
Поворот лазера по <i>Y</i> (min)	град	-1,500	0,387	4,3
Поворот лазера по Y (max)	град	1,500	0,356	-4,0
Смещение по $X(\min)$	MM	-0,015	0,371	0
Смещение по X (max)	MM	0,015	0,371	0
Смещение по <i>Y</i> (min)	MM	-0,006	0,357	-3,8
Смещение по У (тах)	MM	0,006	0,356	-3,9
NA (min)	_	-0,015	0,353	-4,8
NA (max)	_	0,015	0,387	4,4
D стекла	MM	-0,003	0,350	-5,5
<i>D</i> стекла	MM	0,003	0,389	4,8
Осевое смещение волокна по X (min)	MM	-0,006	0,371	0
Осевое смещение волокна по $X(\max)$	MM	0,006	0,371	0

Окончание таблицы

Изменяемый параметр	Единица измерения	Значение	Эффективность стыковки	Влияние,
Осевое смещение волокна по $Y(\min)$	MM	-0,024	0,153	-58,8
Осевое смещение волокна по $Y(\max)$	MM	0,024	0,153	-58,8
Наклон волокна по $X(\min)$	град	-0,019	0,371	0
Наклон волокна по $X(\max)$	град	0,019	0,371	0
Наклон волокна по $Y(\min)$	град	-0,027	0,371	0
Наклон волокна по $Y(\max)$	град	0,027	0,371	0

На втором этапе методом Монте-Карло было получено распределение оптимальной эффективности стыковки при мелкосерийном выпуске таких модулей (рис. 3).

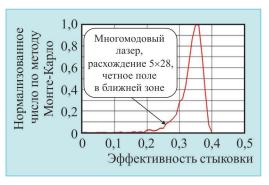


Рис. 3. Распределение оптимальной эффективности стыковки при мелкосерийном выпуске

Модуль был реализован на шестислойной LTCC-подложке размерами 10×15 мм с позолоченной металлизацией. Лазерный кристалл размерами $1000\times200\times117$ мкм был смонтирован по технологии flip-chip на подложке с применением In—Pb-припоя. Бондирование проводилось с применением золотого провода диаметром D=25 мкм.

Многомодовое волокно 62,5/125 мкм и NA = 0,275 было установлено под микроскопом на UV эпоксидном клее.

Герметизированное пилотное изделие использует корпус из ковара. Предварительно корпус был электрогальванизирован никелем.

Общий вид изделия показан на рис. 4.

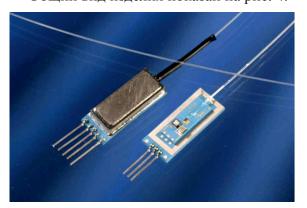


Рис. 4. Общий вид изделия





3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция фотонных и микроэлектронных схем уже широко применяется в технических решениях как для индустриальной, так и для аппаратуры специального назначения, выпускаемой на мировом рынке.

Проведенные ЗАО «Космос Комплект» исследования установили, что разработка и выпуск микромодулей с встроенной фотонной инфраструктурой соответствуют возможностям наличной отечественной технологической среды.

Предварительные испытания пилотных образцов показали, что оптоэлектронные компоненты изделия могут соответствовать стандартным требованиям для аппаратуры специального назначения класса «military».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Koch, T.** Semiconductor photonic integrated circuits / T. Koch, U. Koreu // IEEE J. Quantum Electron. 1999. Vol. 27, No 3.
- 2. **Kaiser, R.** Optoelectronic/photonic integrated circuits on InP between technological feasibility and commercial success / R. Kaiser, H. Heidrich // IEICE Trans. Electron. 2002. Vol. E85-C, No 4.
- 3. **Jokerst**, **N.** The heteregenous integration of optical interconnection into microsystems / N. Jokerst, M. Booke, S. Cho // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 2003. Vol. 9, No 2.
- 4. **Hunzinker, W.** Passive self-aligned low-cost packaging of semiconductor laser arrays on Si motherboard / W. Hunzinker, W. Vogt, H. Melichor // IEEE Photon. Tech. Lett. 2009. Vol. 7, No 11.

Статья поступила 28 апреля 2018 г.

— НОВЫЕ КНИГИ

ИОВДАЛЬСКИЙ В. А. **Гибридные интегральные схемы СВЧ-диапазона:** учеб. пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2018. – 144 с.: ил.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ-диапазона, разработке направлений конструкторско-технологического развития для дальнейшего формирования иерархической системы направлений развития техники ГИС СВЧ. Проведен анализ развития конструкторско-технологических решений ГИС, сформированы соответствующие концепции развития.

Пособие предназначено для студентов Московского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.







КОРПУСА SMD ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ МОЩНЫХ МИС ДИАПАЗОНА ДО 40 ГГц

А. М. Темнов, К. В. Дудинов, А. М. Емельянов

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

Изготовлены и исследованы корпуса SMD для герметизации мощных МИС СВЧ, работающих в диапазоне частот до 40 ГГц. Корпуса предназначены для поверхностного монтажа на печатную плату. Корпуса содержат основание и объемную крышку, изготовленные из ПАП. Разработана технология изготовления основания и объемной крышки из ПАП групповым способом на основе планарной технологии и прецизионной литографии. Теоретически и экспериментально исследованы параметры корпуса SMD в диапазоне до 40 ГГц. Показано, что параметры корпуса SMD удовлетворяют требованиям ОКР.

КС: корпус SMD, диапазон до 40 ГГи, алмазное основание, объемная алмазная крышка

SMD PACKAGES FOR SEALING HIGH-POWER MICS IN THE RANGE UP TO 40 GHz

A. M. Temnov, K. V. Dudinov, A. M. Emelyanov

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

The SMD packages were designed and tested to seal high-power microwave MICs, operating in the frequency range up to 40 GHz. The packages are designed for surface mounting on a printed circuit board. The packages contain a diamond base and a volumetric diamond lid made of polycrystalline diamond film. The technology of manufacturing the base and the volumetric cover of the polycrystalline diamond film by a combined method based on planar technology and precision lithography has been developed. The parameters of the SMD package in the range up to 40 GHz are theoretically and experimentally investigated. It is shown that SMD package parameters meet the design project requirements.

Keywords: SMD package, range up to 40 GHz, diamond base, volumetric diamond lid

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время АО «НПП «Исток» им. Шокина» разрабатывает и выпускает электронные компоненты, в частности твердотельные транзисторы и МИС СВЧ. Разрабатываемые МИС — это малошумящие, широкополосные и мощные усилители на арсениде галлия, работающие в диапазоне до 40 ГГц и выше.

Конструктивно они выполняются в виде кристалла (чипа) и в металлокерамическом корпусе из алюмооксидной керамики (Al_2O_3) для монтажа в модуль СВЧ.

По уровню выходной мощности транзисторы и МИС разделяются на три группы:

- 1) маломощные транзисторы и МИС ($P_{\text{вых}} \le 0,1$ Вт);
- 2) средней мощности транзисторы и МИС $(0,1 \le P_{_{\text{вых}}} \le 1 \text{ Bt});$
- 3) мощные транзисторы и МИС ($P_{\text{вых}} \ge 1 \text{ Bt}$).





Основная масса зарубежных СВЧ-компонентов выполняется в корпусе SMD (surface mount device — планарно-монтируемый компонент) для поверхностного монтажа. СВЧ-компоненты в корпусе SMD устанавливаются на печатную плату с помощью пайки, и это конструктивное решение наиболее продвинуто во всем мире. Отечественные предприятия также осваивают технологию поверхностного монтажа СВЧ-компонентов в корпусе SMD на печатные платы, используя зарубежные МИС СВЧ в корпусе SMD.

На АО «НПП «Исток» им. Шокина» начались работы по созданию аналогов зарубежных МИС СВЧ в корпусе SMD.

2. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЗАРУБЕЖНЫХ МИС СВЧ В КОРПУСАХ SMD

Темновым А. М. проведен анализ параметров зарубежных МИС СВЧ в корпусах SMD для типичных зарубежных СВЧ-компонентов поверхностного монтажа. Исследованы конструкции и материалы корпусов SMD, блок-схемы и электрические схемы МИС СВЧ, технологии их изготовления и платы для тестирования СВЧ-компонентов в корпусе SMD.

Компонент MGA-62563 [1]. Это малошумящий усилитель диапазона частот 0,1...5,0 ГГц, с коэффициентом шума 0,9 дБ и выходной мощностью 17,8 дБ·мВт. Выполнен по схеме (рис. 1) с параллельной обратной связью на одном GaAs полевом псевдоморфном транзисторе с нормально закрытым каналом Е-рНЕМТ FET по технологии MMIC (monolitic microwave IC – МИС СВЧ). Корпус SOT-363 металлопластмассовый, размерами 2,2×1,3 мм, с шестью металлическими выводами, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT (surface mounted technology – технология монтажа на поверхность). Производитель MGA-62563 – фирма Agilent, США.

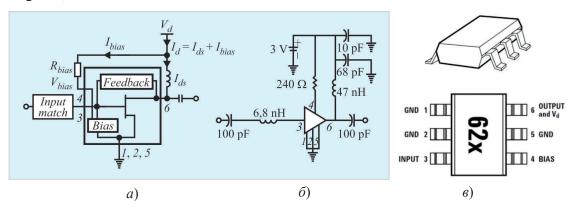


Рис. 1. Блок-схема компонента MGA-62563 в металлопластмассовом корпусе с планарными металлическими выводами (a); электрическая схема усилителя на компоненте MGA-62563 (δ); корпус SMD металлопластмассовый, состоит из металлической рамки с выводами и герметизируется термореактивной смолой (ϵ)

На поверхность печатной платы компонент MGA-62563 и пассивные компоненты схемы: резисторы R, конденсаторы C и индуктивности L, необходимые для работы компонента, монтируются пайкой.

Компонент НМС479МР86 [2]. Малошумящий усилитель диапазона частот 0...5,0 ГГц, с коэффициентом шума 4...4,8 дБ и выходной мощностью 12...18 дБ·мВт. Изготовлен по схеме

2(537).indd 23



Дарлингтона с параллельной обратной связью, показанной на рис. 2. Схема выполнена на гетеробиполярных транзисторах на кремнии (SiGe heterojunction bipolar transistor, HBT) по технологии MMIC. Корпус MICRO-Р диаметром 2 мм имеет четыре металлических вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель HMC479MP86 – фирма Hittite, США.

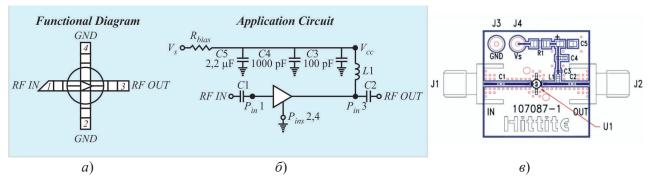


Рис. 2. Блок-схема компонента HMC479MP86 (SiGe HBT gain block MMIC amplifier) в керамическом корпусе с планарными металлическими выводами (a); электрическая схема усилителя на компоненте HMC479MP86 (δ); тестовая печатная плата с разъемами SMA (evaluation printed circuit board, PCB) (ϵ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент HMC479MP86, пассивные компоненты: резисторы R, конденсаторы C и индуктивности L, необходимые для его работы, и два низкочастотных (НЧ) разъема для подачи питания.

Компонент HMC507LP5 [3]. Это генератор, управляемый напряжением (VCO - ГУН), диапазона частот 6,65...7,65 ГГц, с выходной мощностью 11 дБ·мВт, делителем частоты на 2 на выходе. Схема выполнена на гетеробиполярных транзисторах на арсениде галлия (GaAs–InGaP HBT) по технологии MMIC (рис. 3). Керамический корпус SMD размерами 5×5 мм имеет 32 вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель HMC507LP5 — фирма Hittite, США.

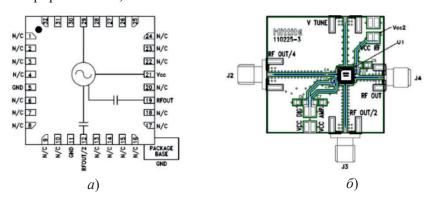


Рис. 3. Блок-схема компонента HMC507LP5 (MMIC VCO w / half frequency output) в керамическом корпусе с планарными выводами (a) и тестовая печатная плата с разъемами SMA (δ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент HMC507LP5 и конденсаторы C, необходимые для его работы.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

24



Компонент HMC490LP5 [4]. Малошумящий усилитель диапазона частот 12...16 ГГц, с коэффициентом шума 2,5 дБ и выходной мощностью 25 дБ·мВт, выполнен на полевых транзисторах на арсениде галлия (GaAs pHEMT) по технологии MMIC (рис. 4). Керамический корпус SMD размерами 5×5 мм имеет 32 вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель HMC490LP5 — фирма Hittite, США.

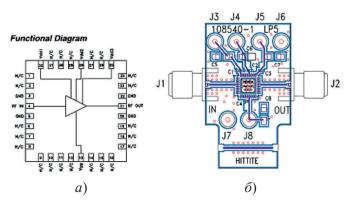


Рис. 4. Блок-схема компонента HMC490LP5 (GaAs PHEMT MMIC low noise amplifier) в керамическом корпусе с планарными выводами (a) и тестовая печатная плата с разъемами SMA (δ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент $\,$ HMC490LP5 и конденсаторы $\,$ $\,$ $\,$ необходимые для его работы.

Компонент HMC608LC4 [5]. Трехкаскадный усилитель средней мощности, диапазона частот 9,5...11,5 ГГц, с коэффициентом шума 6 дБ и выходной мощностью 27 дБ·мВт, выполнен на полевых транзисторах на арсениде галлия (GaAs pHEMT) по технологии MMIC (рис. 5). Керамический корпус SMD размерами 4×4 мм имеет 24 вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель HMC608LC4 — фирма Hittite, США.

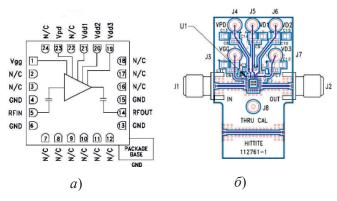


Рис. 5. Блок-схема компонента HMC608LC4 (GaAs pHEMT medium power amplifier) в керамическом корпусе с планарными выводами (a) и оценочная (тестовая) печатная плата с разъемами SMA (δ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент HMC608LC4 и конденсаторы C, необходимые для его работы.

Компонент TGA2513-SM [6]. Малошумящий усилитель диапазона частот 2...20 ГГц, с регулировкой усиления, коэффициентом шума 3 дБ, усилением 17 дБ и выходной мощностью

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

2(537).indd 25

25

16 дБ·мВт, выполнен на полевых транзисторах на арсениде галлия (GaAs pHEMT) по технологии MMIC (рис. 6). Керамический корпус SMD размерами 4×4 мм имеет 12 выводов, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель TGA2513-SM − фирма TriQuint, США.

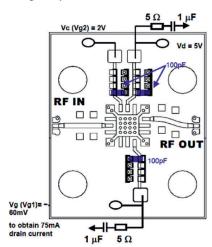


Рис. 6. Тестовая печатная плата с контактами для копланарных СВЧ-зондов

Плата предназначена для тестирования компонента TGA2513-SM (GaAs pHEMT, LNA with automatic gain control) в керамическом корпусе с планарными выводами. Компонент TGA2513-SM и конденсаторы C, необходимые для его работы, припаяны на поверхность печатной платы.

Компонент HMC517LC4 [7]. Это трехкаскадный малошумящий усилитель диапазона частот 17...26 ГГц, с коэффициентом шума 2,5 дБ и выходной мощностью 19 дБ⋅мВт, выполнен на полевых транзисторах на арсениде галлия (GaAs pHEMT) по технологии MMIC (рис. 7). Корпус SMD размерами 4×4 мм имеет 24 вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель HMC608LC4 — фирма Hittite, США.

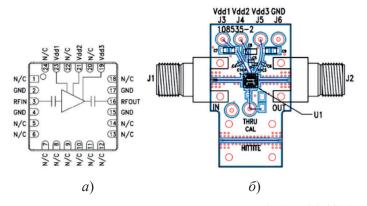


Рис. 7. Блок схема компонента HMC517LC4 (GaAs pHEMT MMIC low noise amplifier) в керамическом корпусе с планарными выводами (a) и тестовая печатная плата с разъемами SMA (δ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент HMC517LC4 и конденсаторы C, необходимые для его работы.

Компонент СНА2069-FAA [8]. Трехкаскадный малошумящий усилитель диапазона частот 16...32 ГГц, с коэффициентом шума 2,5 дБ и усилением 22 дБ, выполнен на полевых транзисторах

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

26

2(537).indd 26



на арсениде галлия (GaAs pHEMT) по технологии MMIC (рис. 8). Корпус SMD размерами 6×6 мм имеет 24 вывода, монтируется на поверхность платы с помощью технологии SMT. Производитель CHA2069-FAA – фирма United Monolithic Semiconductors, Франция.

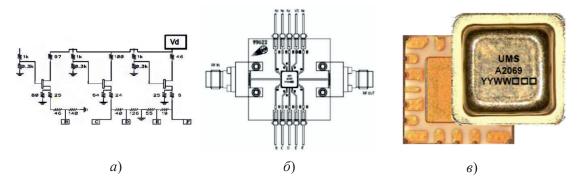


Рис. 8. Блок-схема компонента СНА2069-FAA в керамическом корпусе с планарными выводами (a); тестовая печатная плата с разъемами SMA (δ); корпус компонента СНА2069-FAA (ϵ)

На поверхность печатной платы припаяны компонент CHA2069-FAA и конденсаторы C, необходимые для его работы.

Известны корпуса SMD для поверхностного монтажа, которые изготавливает китайская корпорация СЕТС. Ниже (рис. 9) приведены типичные конструкции корпусов SMD на плату корпорации СЕТС [9].

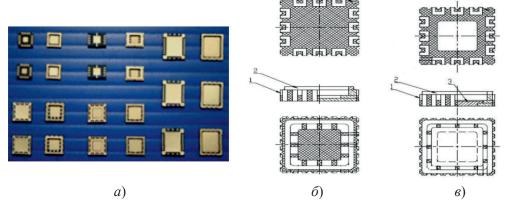


Рис. 9. Разновидности корпусов SMD на керамическом основании корпорации СЕТС (a); конструкция корпуса SMD на керамическом основании I с крышкой 2 (δ); конструкция корпуса SMD на керамическом основании I с крышкой 2 и металлической вставкой 3

Анализ зарубежных СВЧ-компонентов в корпусах SMD показывает, что в основном это маломощные однофункциональные МИС СВЧ (усилители, генераторы, управляемые напряжением, смесители и преобразователи частоты и др.), выполненные на арсениде галлия и содержащие ограниченное количество диодов и транзисторов. Они имеют: диапазон рабочих частот до $32\ \Gamma\Gamma$ ц, планарные выводы в виде отрезков копланарной линии (КЛ), керамический корпус из алюмооксидной керамики с габаритными размерами, соответствующими ряду 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 мм; шаг между выводами корпуса равен 500 мкм. Кроме того, МИС СВЧ

в корпусе SMD не являются законченным конечным продуктом и требуют для включения дополнительные компоненты (R, L, C), которые необходимо размещать на печатной плате.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОРПУСОВ SMD

Исследованы существующие отечественные корпуса SMD производства OOO «МПП ТЭЗ» размерами 4×4 и 5×5 мм с шагом между выводами 500 мкм [10]. Ниже приведены их конструкции (рис. 10).

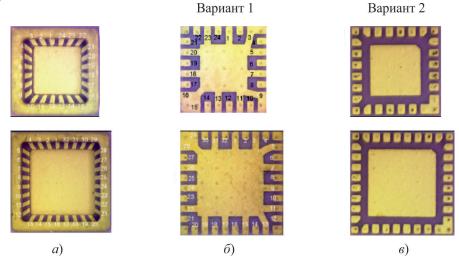


Рис. 10. Конструкции корпуса SMD размерами 4×4 и 5×5 мм: a – вид с внутренней стороны; δ , δ – вид с наружной стороны

Герметичный корпус состоит из многослойного (5 слоев) керамического основания, содержащего контактные площадки и выводы с внутренней и внешней стороны основания, металлического ободка с внутренней стороны основания и металлической крышки, прилегающей герметично к металлическому ободку.

Все выводы корпуса SMD сделаны в виде отрезков КЛ.

Корпус обеспечивает вакуумную плотность, радиогерметичность и возможность использования его для поверхностного монтажа МИС СВЧ с большим количеством выводов.

Для измерения потерь в выводах внутрь корпуса SMD монтировалась МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом, изготовленная на плате арсенида галлия толщиной 100 мкм, которая соединялась с контактными площадками корпуса. На рис. 11 приведена конструкция корпусов SMD размерами 4×4 и 5×5 мм с платами арсенида галлия длиной 2000 и 3000 мкм соответственно.

Для измерения потерь в диапазоне частот до 40 ГГц использовался векторный анализатор цепей № 5244А, позволяющий измерять S-параметры четырехполюсников и оснащенный зондовой станцией с копланарными зондами.

Потери в одном выводе корпуса SMD оценивались по изменению параметра прямой передачи S_{21} следующим образом: сначала суммарные потери корпуса SMD с линией МПЛ, затем потери в линии МПЛ, после этого из суммарных потерь вычитались потери в линии МПЛ и полученная разность делилась на 2.

На рис. 12 представлены результаты измерений потерь корпусов SMD размерами 4×4 и 5×5 мм соответственно.

Видно, что потери корпуса SMD имеют резонанс в области частот 20...25 ГГц (вариант 1)

2(537).indd 28

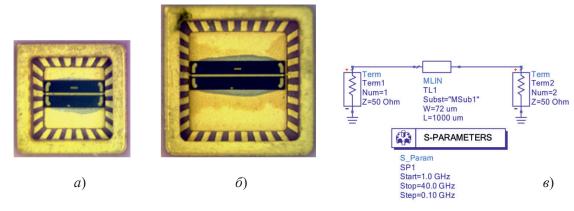
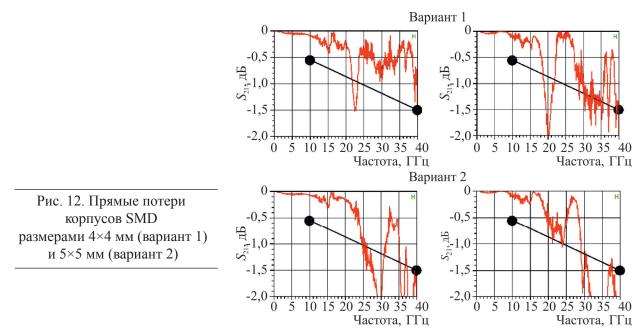


Рис. 11. Конструкции корпусов SMD размерами 4×4 мм с линией МПЛ длиной 2000 мкм (a) и размерами 5×5 мм с линией МПЛ длиной 3000 мкм (δ); электрическая схема экспериментальных измерений S-параметров корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц (в)



и 25...28 ГГц (вариант 2), где потери резко возрастают. Повышенные потери связаны с повышенными паразитными элементами (емкостями и индуктивностями) выводов корпуса.

Недостатки зарубежных и отечественных корпусов SMD из алюмооксидной керамики:

- 1. Ограниченный (для зарубежных $-32 \Gamma \Gamma \mu$, отечественных $-25 \Gamma \Gamma \mu$) диапазон рабочих частот, связанный с большой (9,6) относительной диэлектрической проницаемостью алюмооксидной керамики и соответственно большой емкостью контактных площадок выводов.
- 2. Ограниченная рассеиваемая мощность, связанная с низкой (40 Вт/(м·К)) теплопроводностью алюмооксидной керамики.
 - 3. Пригодны для герметизации только маломощных МИС СВЧ.

4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА SMD НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Разрабатываемые маломощные и мощные МИС СВЧ работают в диапазоне до 40 ГГц, поэтому ставится задача создания корпуса SMD со следующими параметрами:

2(537).indd 29



29

Диапазон рабочих частот	до 40 ГГц
КСВН СВЧ-входов:	
на частоте 10 ГГц.	не более 1,5
на частоте 40 ГГц	1,8
Потери/затухание СВЧ-входов:	
на частоте 10 ГГц.	не более 0,6 дБ
на частоте 40 ГГц	1,5 дБ
Развязка/переходное затухание между СВЧ-входами	не менее 40 дБ

Проведенный анализ конструкций зарубежных и отечественных корпусов для герметизации МИС СВЧ показывает, что недостатки, присущие отечественным и зарубежным корпусам SMD, не позволяют решить актуальную практическую задачу повышения рабочей частоты корпуса SMD до 40 ГГц и герметизации мощных МИС СВЧ, поэтому появилась необходимость в поиске новых конструктивно-технологических решений для корпуса SMD.

Темновым А. М. предложена базовая конструкция корпуса SMD нового поколения, в которой основание и крышка выполнены из поликристаллической алмазной пленки (ПАП), имеющей относительную диэлектрическую проницаемость 5,7 и теплопроводность $1000~\mathrm{Bt/(m\cdot K)}$.

Ниже (рис. 13) показана базовая конструкция корпуса SMD нового поколения [11].

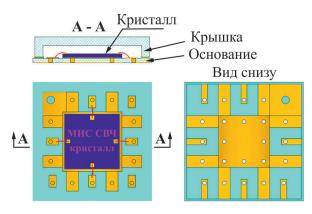


Рис. 13. Конструкция корпуса SMD размерами 3×3 мм на основе алмазного основания и объемной алмазной крышки

Корпус состоит из диэлектрического алмазного основания, содержащего контактные площадки и выводы с внутренней и внешней стороны основания. Герметизация корпуса осуществляется посредством крышки объемной формы, герметично соединенной с диэлектрическим алмазным основанием клеем. Внешние и соответствующие им внутренние металлизированные контактные площадки и выводы, расположенные на алмазном основании, соединены между собой электрически кратчайшим путем посредством вакуумно-плотных, полнотелых, металлизированных отверстий, которые заполнены металлом, имеющим высокую электропроводность и теплопроводность.

При этом:

• внешние и соответствующие им внутренние «земляные» металлизированные контактные площадки расположены в центральной части основания и электрически соединены между собой;





- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы расположены по периферии на внешней и внутренней стороне керамического основания между центральными контактными площадками и периметром;
- внешние и соответствующие им внутренние металлизированные выводы корпуса SMD выполнены в виде отрезков КЛ;
- «заземляющие» выводы КЛ на внешней и внутренней стороне основания электрически соединены с соответствующими внешними и внутренними «земляными» металлизированными контактными площадками.

На внутреннюю центральную металлизированную «земляную» контактную площадку устанавливается кристалл МИС СВЧ, имеющий планарные выводы, которые расположены по периферии кристалла. Соединение выводов кристалла с выводами корпуса осуществляется золотой проволокой.

Корпус обеспечивает вакуумную плотность и возможность использования его для поверхностного монтажа МИС СВЧ с большим количеством выводов. Конструкция корпуса самосогласована в диапазоне температур, т. к. содержит основание и крышку, выполненные из одного материала – ПАП.

На рис. 14 приведены конструкции оснований корпусов SMD с габаритными размерами, соответствующими ряду 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 мм, и шагом между выводами корпуса 500 мкм.

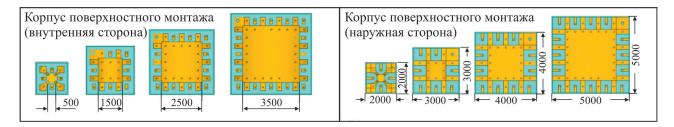


Рис. 14. Конструкции оснований корпусов SMD

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА SMD НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Корпус SMD размещается планарно на поверхности печатной платы, выполненной из материала, имеющего малые потери на CBЧ. Для исследования потерь использована программа ADS, которая позволяет проводить 3D-моделирование многослойной структуры, соответствующей корпусу SMD, помещенному на печатную плату.

Для сравнения потерь расчет проводился также для платы из алюмооксидной керамики ${\rm Al_2O_3}$. На рис. 15 приведены конструкции многослойных структур.

Многослойная конструкция содержит печатную плату толщиной 100 мкм из углеводородной керамики Ro4350B с металлическим слоем (cond) и отверстием (hole), на которой размещаются плата корпуса SMD с металлическими слоями (be) и (in) и отверстием (vh) и крышка.

Выше было показано, что потери в корпусе SMD являются разностью измеренных суммарных потерь корпуса SMD с линией МПЛ и измеренных потерь в линии МПЛ. На рис. 16 приведены схема исследования КСВН и потерь в выводе корпуса SMD в диапазоне частот до 40 $\Gamma\Gamma$ ц и конструкция вывода корпуса с архитектурой 3D.





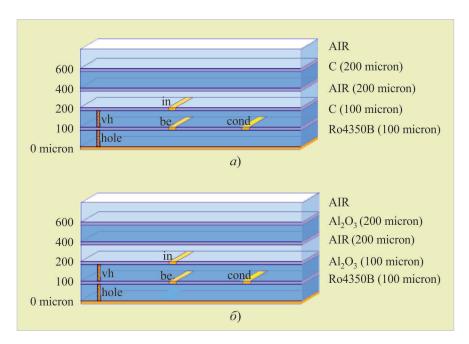


Рис. 15. Многослойные конструкции, содержащие алмазную плату на поверхности печатной платы и алмазную крышку (a), алюмооксидную плату на поверхности печатной платы и алюмооксидную крышку (δ)

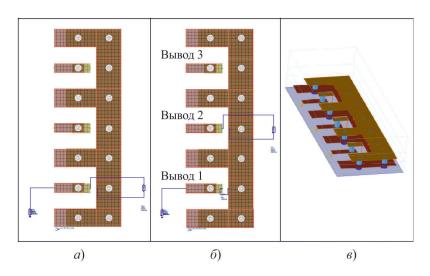


Рис. 16. Электрическая схема теоретических исследований КСВН и потерь (a), а также развязки (b) выводов корпуса SMD в диапазоне 0...40 ГГц; конструкция с архитектурой 3D выводов корпуса SMD с крышкой (b)

Исследование проводилось автором при различной ширине наружного вывода W_n и фиксированной ширине W внутреннего вывода, а также для двух толщин основания корпуса H, 100 и 150 мкм.



Ниже (рис. 17, 18) представлены результаты теоретического расчета значения КСВН и потерь в выводах корпуса SMD с основанием из алмаза и алюмооксидной керамики при различных $W_{\scriptscriptstyle n}$ и H.

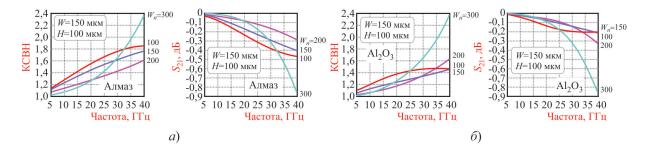


Рис. 17. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD в диапазоне $0...40~\Gamma\Gamma$ ц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при разной ширине наружного вывода W_n , толщине основания $H=100~\mathrm{mkm}$ и ширине внутреннего вывода $W=150~\mathrm{mkm}$

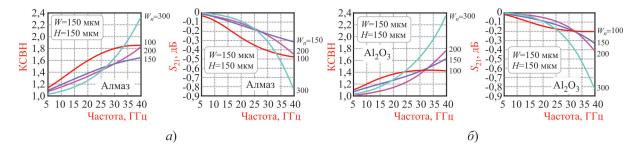


Рис. 18. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD в диапазоне 0...40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при разной ширине наружного вывода W_n , толщине основания H=150 мкм и ширине внутреннего вывода W=150 мкм

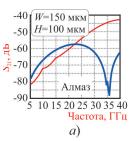
Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD с основанием из алмаза и Al_2O_3 на частоте $40~\Gamma\Gamma$ ц удовлетворяют заданным требованиям, приведенным выше, при $W_n \le 200~{\rm Mkm}$, $H=100...150~{\rm mkm}$ и $W=150~{\rm mkm}$.

Исследование развязки между СВЧ-выводами корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц проводилось при $W_n = 150$ мкм и W = 150 мкм, а также для H = 100 и 150 мкм. При этом развязка рассчитывалась между соседним (I-2) и последующим (I-3) выводами.

На рис. 19, 20 представлены результаты теоретического расчета значений развязки между СВЧвыводами корпуса SMD с основанием из алмаза и алюмооксидной керамики при различной *H*.

Переходное затухание между СВЧ-выводами 1-2 и 1-3 корпуса SMD в диапазоне до 40 ГГц зависит как от материала основания, так и от его толщины. При этом уровень развязки между выводами 1-2 и 1-3 для оснований из разного материала и разной толщины удовлетворяет заданным требованиям, приведенным выше.





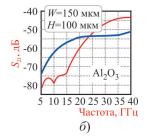
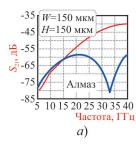


Рис. 19. Теоретически рассчитанные значения развязки между СВЧ-выводами *1-2* (красная) и *1-3* (синяя) корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n=150$, W=150 мкм, H=100 мкм



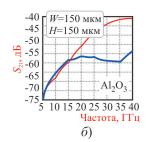


Рис. 20. Теоретически рассчитанные значения развязки между СВЧ-выводами *1-2* (красная) и *1-3* (синяя) корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n=150$, W=150 мкм, H=150 мкм

Герметичный корпус SMD с основанием из алмаза толщиной 100 мкм и крышкой из алмаза обеспечивает при ширине внутренних и внешних выводов 150 мкм следующие СВЧ-параметры:

Диапазон рабочих частот	до 40 ГГц
КСВН СВЧ-входов:	
на частоте 10 ГГц	не более 1,2
на частоте 40 ГГц	1,6
Потери/затухание СВЧ-входов:	
на частоте 10 ГГц	не более 0,1 дБ
на частоте 40 ГГц	0,3 дБ
Развязка/переходное затухание на частоте 40 ГГц:	
между выводами 1-2	42 дБ
между выводами <i>1-3</i>	60 дБ
Теплопроводность алмазного основания корпуса	1000 Вт/(м⋅К)

Таким образом, герметичный корпус SMD с основанием из алмаза толщиной 100...150 мкм и профильной крышкой из алмаза удовлетворяет вышеприведенным требованиям.

Аналогичных параметров корпуса SMD возможно достичь, если использовать алюмооксидную керамику.

Благодаря высокой теплопроводности алмазного основания (1000 Bт/(м·K), что более чем в 2 раза больше, чем у меди, и в 50 раз больше, чем у алюмооксидной керамики), возможно использовать корпус SMD для герметизации мощных транзисторов и МИС СВЧ.



6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА SMD

Для сравнения с базовой конструкцией исследована конструкция корпуса, по внешнему виду похожая на конструкцию корпусов SMD ряда зарубежных фирм.

Ниже (рис. 21) приведена конструкция корпуса SMD традиционного вида.

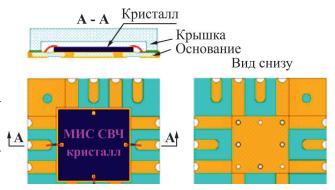


Рис. 21. Конструкция корпуса SMD на основе алмазной платы и алмазной крышки

Отличительной особенность этой конструкции является расположение отверстий по периметру алмазного основания.

Исследование параметров корпуса проводилось при фиксированной ширине внутреннего вывода W и различной ширине наружного вывода W_n , а также для двух толщин оснований корпуса: H=100 и 150 мкм.

Далее (рис. 22...25) представлены результаты теоретического расчета значений КСВН и потерь в выводах корпуса SMD, выполненного из алмаза и алюмооксидной керамики, при W = 150 мкм, различной ширине наружного вывода W_{π} и различной толщине основания H.

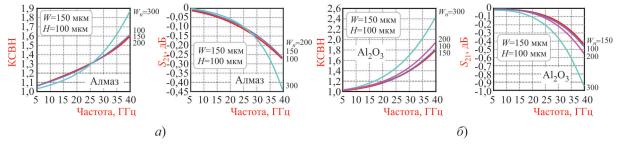


Рис. 22. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводах корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц, выполненного из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) , при W=150 мкм, H=100 мкм и различной W

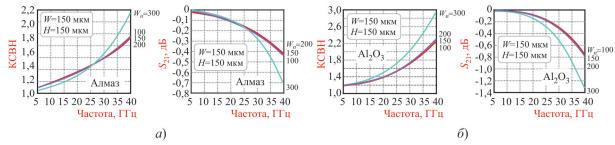
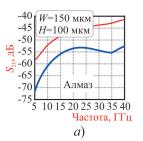


Рис. 23. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводах корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц, выполненного из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ), при W=150 мкм, H=150 мкм и различной W_n





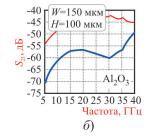
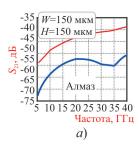


Рис. 24. Теоретически рассчитанные значения переходного затухания между СВЧ-выводами 1-2 (красная) и 1-3 (синяя) корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n=150$ мкм, W=150 мкм, H=100 мкм



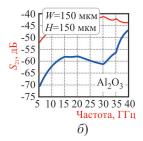


Рис. 25. Теоретически рассчитанные значения переходного затухания между СВЧ-выводами 1-2 (красная) и 1-3 (синяя) корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n=150$ мкм, W=150 мкм, H=150 мкм

Корпус SMD традиционной конструкции с основанием из алмаза толщиной 100...150 мкм и профильной крышкой из алмаза удовлетворяет вышеприведенным требованиям.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОГЕРМЕТИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА SMD

Наряду с базовой и традиционной конструкциями корпусов предложена и исследована конструкция корпуса SMD, обеспечивающего радиогерметичность (рис. 26).

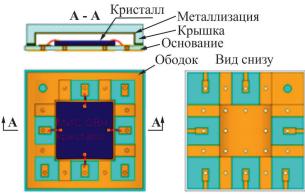


Рис. 26. Радиогерметичная конструкция корпуса SMD на основе алмазного основания и металлизированной алмазной крышки



Герметичный корпус состоит из диэлектрического алмазного основания, содержащего контактные площадки и выводы с внутренней и внешней стороны, и металлического ободка по периметру на внутренней стороне основания. Герметизация корпуса осуществляется посредством металлизированной крышки объемной формы, герметично соединенной с металлическим ободком пайкой.

Отличительной особенность этой конструкции является металлический ободок по периметру алмазного основания и металлизированная с внутренней стороны объемная крышка.

Исследование параметров корпуса проводилось по методике, описанной выше, с использованием программы ADS, позволяющей проводить 3D-моделирование многослойной структуры, соответствующей корпусу SMD.

Исследование проводилось при различной ширине наружного вывода W_n и фиксированной ширине W внутреннего вывода, а также для толщины основания корпуса 100 и 150 мкм.

Ниже (рис. 27, 28) представлены результаты теоретического расчета значений КСВН и потерь в выводах корпуса SMD с основанием из алмаза и алюмооксидной керамики при различных ширине наружного вывода W_n и толщине основания H.

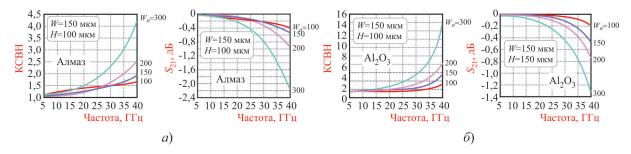


Рис. 27. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при H=100 мкм, W=150 мкм и различной W_n

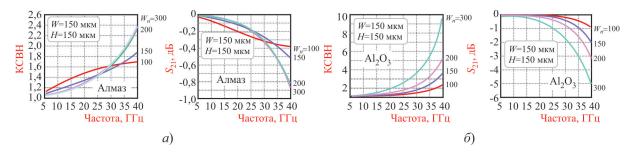


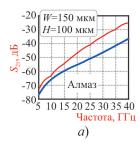
Рис. 28. Теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD в диапазоне частот до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при H=150 мкм, W=150 мкм и различной W_{\perp}

Видно, что теоретически рассчитанные значения КСВН и потерь в выводе корпуса SMD с основанием из алмаза на частоте до 40 ГГц удовлетворяют вышеперечисленным требованиям при ширине $W_{_{\parallel}}=100$ мкм.

Исследование развязки проводилось при $W_n=100$ мкм и W=150 мкм, а также для H=100 и 150 мкм. При этом развязка рассчитывалась между выводами I-2 и I-3. На рис. 29, 30 представлены результаты теоретического расчета значений развязки между СВЧ-выводами кор-



пуса SMD с основанием из алмаза и алюмооксидной керамики при различной толщине основания H.



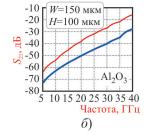
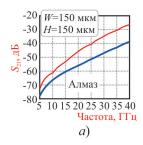


Рис. 29. Теоретически рассчитанные значения развязки между СВЧ-выводами 1-2 (красный) и 1-3 (синий) корпуса SMD в диапазоне до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n=100$ мкм, W=150 мкм и H=100 мкм



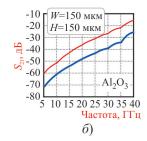


Рис. 30. Теоретически рассчитанные значения развязки между СВЧ-выводами 1-2 (красный) и 1-3 (синий) корпуса SMD в диапазоне до 40 ГГц с основанием из алмаза (a) и алюмооксидной керамики (δ) при $W_n = 100$ мкм, W = 150 мкм и H = 150 мкм

Таким образом, герметичный корпус SMD с основанием из алмаза толщиной 100...150 мкм и металлизированной профильной крышкой из алмаза удовлетворяет вышеприведенным требованиям.

8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ SMD НА ПАП

Базовая конструкция корпуса SMD нового поколения содержит диэлектрическое основание и объемную диэлектрическую крышку из алмаза.

Для их изготовления потребовалась разработка двух отдельных технологических процессов.

Базовый технологический процесс изготовления основания корпуса SMD разработан с использованием опыта изготовления плат ГМИС СВЧ на ПАП [12].

ПАП выращиваются организациями ИФП РАН и ООО «ТВИНН» с помощью CVD-процесса на поверхности жертвенной пластины монокристаллического кремния и в виде гетеропластины ПАП-Si и поставляются на АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В структуре ПАП-Si пленка ПАП очень напряжена из-за разных температурных коэффициентов линейного расширения кремния и алмаза. Поэтому если стравить кремний сразу, то в про-





цессе отделения в ПАП появляются трещины, по которым она разделяется на несколько бесформенных кусков, имеющих малую площадь.

8.1. Технологический процесс разделения ПАП-Si

Темновым А. М. предложен следующий технологический процесс разделения ПАП-Si и отделения целой ПАП (рис. 31).

ПАП-Si

1. Изготовление паза в ПАП-Si на глубину 500 мкм

2. Шлифовка ПАП до толщины 100...150 мкм

3. Отделение ПАП от кремния

Поставляемая алмазная пленка на кремнии

Рис. 31. Поставляемая пластина ПАП-Si и технологический процесс отделения целой пленки ПАП

- 1. С помощью лазерного фрезерования с ростовой стороны ПАП-Si делается паз глубиной 500 мкм на расстоянии 1 мм по периметру пластины.
- 2. Термохимическая шлифовка [13, 14] обратной (ростовой) стороны ПАП в водородной печи при температуре $1000\,^{\circ}$ C, при этом ПАП шлифуется и утоняется одновременно до толщины $100...150\,$ мкм с точностью $\pm 3\,$ мкм.
 - 3. Проводится аккуратное травление кремния и отделение целой ПАП.

За счет паза диаметр отделенной пластины ПАП с 50 и 57 мм уменьшается до 48 и 55 мм соответственно.

Далее (рис. 32) показаны этапы практического отделения от ПАП-Si целой ПАП.

Шлифованная на ПАП-Si алмазная пленка после отделения имеет правильную геометрию и малый прогиб и пригодна для группового изготовления ГМИС СВЧ и корпусов SMD.

Если отделить ПАП без шлифовки (рис. 32, ϵ), то она имеет правильную геометрию, но большой прогиб, и поэтому после шлифовки ПАП имеет неправильную геометрию (рис. 32, δ).

После операции отмывки ПАП направляются на технологические операции изготовления основания корпуса SMD.

8.2. Технологический процесс изготовления основания на ПАП

Технологический процесс изготовления основания корпуса SMD на ПАП групповым способом включает три основных этапа:

- 1. Плазмохимическое формирование отверстий в ПАП.
- 2. Металлизацию отверстий, заполнение отверстий Cu с обеспечением планарности лицевой и обратной стороны $\Pi A\Pi$.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

3. Изготовление пассивных элементов на лицевой и обратной стороне основания.





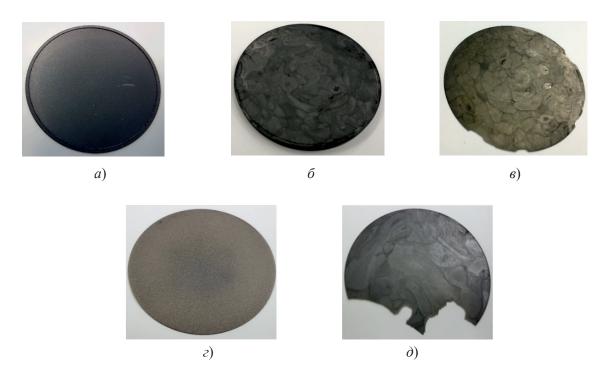


Рис. 32. Этапы практического отделения от ПАП-Si целой ПАП: a – ПАП-Si, паз глубиной 500 мкм с ростовой стороны пластины; δ – ПАП-Si с ростовой стороны после шлифовки и утонения; ϵ – ПАП с ростовой стороны после отделения; ϵ – ПАП с ростовой стороны после отделения без шлифовки; ϵ – ПАП с ростовой стороны после шлифовки

На рис. 33 приведен внешний вид оснований корпусов SMD, изготовленных групповым способом на основе планарной технологии и прецизионной литографии на пластине ПАП. На одной пластине изготовлены основания для базовой и радиогерметичной конструкций.

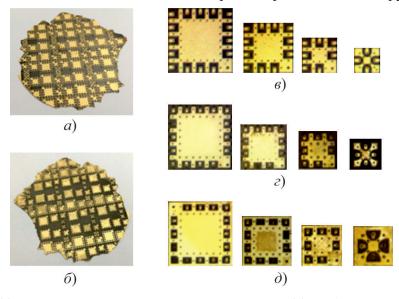


Рис. 33. Пластина с основаниями: лицевая сторона (a) и обратная сторона (b). Основания корпуса SMD базовой конструкции: наружная сторона (b) и внутренняя сторона (c). Основания корпуса SMD радиогерметичной конструкции (a), внутренняя сторона



На пластине ПАП групповым способом в едином технологическом цикле изготовлены основания четырех типоразмеров: 5×5 , 4×4 , 3×3 , 2×2 мм — для базовой и радиогерметичной конструкций корпуса SMD.

Далее следует операция разделения пластины ПАП на основания корпусов SMD с помощью установки лазерного фрезерования «Каравелла» с лазером видимого света на парах меди.

8.3. Технологический процесс изготовления объемной крышки из ПАП

Темнов А. М. предложил технологический процесс изготовления объемных крышек из ПАП групповым способом на основе планарной технологии и прецизионной литографии. На рис. 34 показан базовый технологический процесс изготовления объемных крышек из ПАП для корпусов SMD с размерами 5×5 , 4×4 , 3×3 и 2×2 мм.

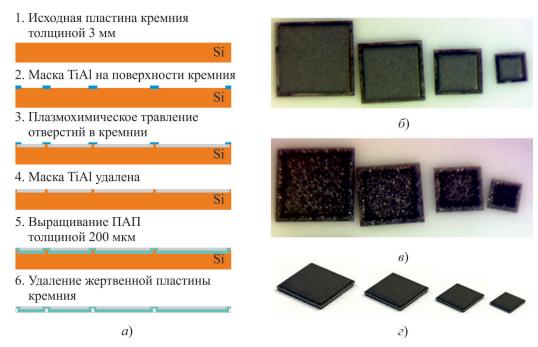


Рис. 34. Базовый технологический процесс изготовления объемных крышек из ПАП для корпусов SMD (a). Конструкция объемных крышек из ПАП для корпусов SMD: наружная (δ) и внутренняя (ϵ) стороны с архитектурой 3D после операции лазерного фрезерования. Конструкция корпусов SMD с архитектурой 3D из ПАП, содержащих алмазное основание и объемную алмазную крышку четырех типоразмеров: 5×5 , 4×4 , 3×3 и 2×2 мм соответственно (ϵ)

Аналогично можно изготавливать корпуса SMD прямоугольной формы с архитектурой 3D.

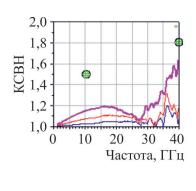
9. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА SMD ИЗ ПАП

Измерение КСВН и потерь в выводах корпуса из ПАП проводилось для базовой конструкции корпуса SMD. Для измерения потерь внутрь корпуса SMD из ПАП монтировалась МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом, изготовленная на плате арсенида галлия толщиной 100 мкм, которая соединялась с выводами корпуса SMD (рис. 35).





a)



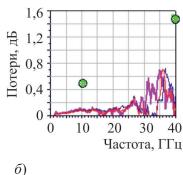


Рис. 35. Основание корпуса SMD с линией МПЛ (a), КСВН и прямые потери корпуса SMD (δ)

Измерение потерь корпуса SMD с линией МПЛ осуществлялось в диапазоне частот до 40 ГГц. Для измерения потерь использовался векторный анализатор цепей № 5244А, позволяющий измерять S-параметры четырехполюсников, оснащенный зондовой станцией с копланарными зондами.

Потери в одном выводе корпуса SMD оценивались по изменению параметра прямой передачи S_{21} следующим образом: сначала определялись суммарные потери корпуса SMD с линией МПЛ; затем – потери в линии МПЛ; после этого из суммарных потерь вычитались потери линии МПЛ и полученная разность делилась на 2.

Измерения КСВН и потерь корпуса SMD проводились на трех образцах. Реперными точками на графиках (см. рис. 35, б) показаны требования, предъявляемые к корпусам SMD, а именно:

- 1) КСВН СВЧ-входов не более 1,5 на 10 ГГц и 1,8 на 40 ГГц;
- 2) потери СВЧ-входов не более 0,6 дБ на 10 ГГц и 1,5 дБ на 40 ГГц.

Видно, что КСВН и потери корпуса SMD увеличиваются с повышением частоты. Базовая конструкция корпуса SMD из ПАП удовлетворяет вышеприведенным требованиям.

10. ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ КОРПУСОВ SMD НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Перспектива развития корпусов SMD нового поколения связана с дальнейшим совершенствованием конструкции и технологии их изготовления, в том числе с использованием возможностей ГМИС СВЧ нового поколения. Выше было показано, что МИС СВЧ, герметизированные в корпус SMD, не являются конечным продуктом и требуют включения дополнительных R-, L-, C-компонентов, которые приходится размещать на печатной плате. Для создания конечного продукта целесообразно интегрировать внутрь корпуса SMD необходимые R-, L-, C-элементы. Использование возможностей конструкции ГМИС СВЧ нового поколения позволит изготовить внутри корпуса SMD недостающие R-, L-, C-элементы непосредственно на алмазном основании групповым способом в едином технологическом цикле методами планарной технологии и прецизионной литографии.

11. ВЫВОДЫ

1. Предложено конструктивно-технологическое решение для корпуса SMD из ПАП, которое обеспечивает преодоление недостатков, присущих известным отечественным и зарубежным конструкциям корпуса SMD из алюмооксидной керамики, и позволяет:





- герметизировать кристаллы активных компонентов (транзисторов и МИС СВЧ) с повышенным тепловыделением;
- обеспечить хороший отвод тепла от кристаллов активных компонентов и сохранить их электрические характеристики и надежность;
- обеспечить планарность конструкции платы корпуса SMD, необходимую для применения современных методов групповой обработки, литографии и планарной технологии, в том числе в условиях массового производства, и снизить стоимость изготовления.
- 2. Теоретическое исследование потерь и КСВН корпуса SMD из ПАП показывает, что все три конструкции (базовая, традиционная и радиогерметичная) удовлетворяют требованиям, оговоренным в ОКР.
- 3. Впервые в отечественной практике созданы и исследованы экспериментальные образцы корпуса SMD на алмазном основании с алмазной крышкой объемной формы, измерены их характеристики и показано, что в диапазоне до 40 ГГц они позволяют герметизировать мощные транзисторы и МИС СВЧ.
- 4. Показано, что перспективным направлением развития корпуса SMD нового поколения является создание корпуса SMD на основе конструкции ГМИС СВЧ с необходимыми пассивными элементами (R, L, C) внутри корпуса.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Информационные материалы в интернете / MGA-62563 / Фирма Agilent, США.
- 2. Информационные материалы в интернете / HMC479MP86/ Фирма Hittite, США.
- 3. Информационные материалы в интернете / HMC507LP5 / Фирма Hittite, США.
- 4. Информационные материалы в интернете / HMC490LP5 / Фирма Hittite, США.
- 5. Информационные материалы в интернете / HMC608LC4 / Фирма Hittite, США.
- 6. Информационные материалы в интернете / TGA2513-SM / Фирма TriQuint, США.
- 7. Информационные материалы в интернете / HMC517LC4 / Фирма Hittite, США.
- 8. Информационные материалы в интернете / CHA2069-FAA / Фирма United Monolithic Semiconductors, Франция.
- 9. Информационные материалы в интернете / Китайская корпорация электронных технологий СЕТС.
- 10. **Пат. 2489769 РФ** / ООО «НПП ТЭЗ».
- 11. **Заявка на патент РФ.** Корпус СВЧ для изделия полупроводниковой электронной техники СВЧ / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. Уведомление о регистрации заявки 2017.
- 12. **Темнов, А. М.** Новое поколение мощных усилительных ГМИС X-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 2 (533). С. 54 74.
- 13. **Дерябкин, А. В.** Исследование механизма термической обработки теплоотводящих элементов конструкции из CVD-алмаза для CBЧ-приборов / А. В. Дерябкин, Е. Н. Куликов, А. К. Смирнова. АО «НПП «Исток» им. Шокина». С. 165 167.
- 14. **Духновский, М. П.** Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности / М. П. Духновский, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Федоров, О. Ю. Кудряшов, И. А. Леонтьев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2008. Вып. 2 (495). С. 41 46.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

Статья поступила 16 апреля 2018 г.





13.07.2018 13:11:28



УДК 621.373.42

РАСЧЕТ АВТОГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

А. К. Балыко, В. Ю. Мякиньков, Е. В. Терешкин

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

Найдено общее условие самовозбуждения диодных и транзисторных генераторов СВЧ. Получено выражение, связывающее отношение граничных частот диапазона перестройки генераторов, управляемых напряжением (ГУН), коэффициент перекрытия и коэффициент нелинейности емкости полупроводникового прибора. Приведены результаты решения некоторых характерных задач по расчету и проектированию ГУН.

КС: управляемые напряжением генераторы, расчет, проектирование

CALCULATION OF MICROWAVE ACTIVE OSCILLATORS

A. K. Balyko, V. U. Myakinkov, E. V. Tereshkin

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

The general condition for self-excitation of diode and transistor microwave generators is found. An expression is obtained connecting the ratio of the boundary frequencies of the tuning range of voltage controlled oscillators, the overlap factor and nonlinearity factor of the semiconductor device capacitance. The results of the solution of some typical problems in VCO calculation and design are presented.

Keywords: voltage-controlled oscillators, calculation, design

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-генераторы малой мощности с быстрой электрической перестройкой частоты являются основой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и определяют в значительной мере ее параметры и эксплуатационные характеристики. При этом для систем радионавигации, радиоразведки, радиопротиводействия и метрологической аппаратуры нужны широкодиапазонные управляемые напряжением генераторы (ГУН), перекрывающие весь СВЧ-диапазон для радиовысотомеров малых высот и радиоуровнемеров. Для систем связи и задающих генераторов РЛС, работающих на основе синтеза частот, необходимы СВЧ-генераторы с линейной частотной характеристикой. Для помехозащищенных РЛС с селекцией движущихся целей требуются стабильные малошумящие генераторы с дискретной перестройкой частоты. Все эти генераторы должны быть построены на полупроводниковых СВЧ-приборах и микросхемах, чтобы обеспечить их миниатюризацию, высокую экономичность и низкие питающие напряжения.

В 80-х годах прошлого столетия в качестве ГУН доминировали ЛОВ с магнитной и электростатической фокусировкой, которые хотя и обеспечивали необходимый диапазон перестройки частоты, но не устраивали потребителя по своим массогабаритным характеристикам, величине питающих напряжений, линейности, экономичности и т. д. Поэтому перед разработчиками ГУН была поставлена задача создания твердотельных аналогов таких ЛОВ.



44



Области применения ГУН с широким диапазоном перестройки требуют, как правило, разработки ряда генераторов, перекрывающих весь СВЧ-диапазон, и прежде всего диапазон от 1...18 ГГц. При этом с точки зрения уменьшения массы, габаритов и повышения экономичности и надежности аппаратуры перекрытие этого диапазона необходимо осуществлять минимальным числом генераторов.

В работе приведены результаты решения некоторых характерных задач по расчету и проектированию ГУН.

2. УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ГЕНЕРАТОРАХ СВЧ

При расчетах генераторов используют два условия самовозбуждения автоколебания, одно из которых применяют для генераторов на диодах СВЧ, а другое – для транзисторных генераторов.

В первом случае генерирующую систему можно представить параллельным соединением проводимостей двухполюсного активного элемента (диода) $Y_{\rm a}$ и нагрузки $Y_{\rm h}$. Условие самовозбуждения колебаний в этом случае имеет вид [1]:

$$Y = Y_{_{\rm H}} + Y_{_{\rm H}} = 0. \tag{1}$$

В случае транзисторных автогенераторов применяется условие [1]

$$|Y| = 0, (2)$$

где |Y| – определитель нормированной матрицы проводимости четырехполюсника, включающего активный трехполюсный элемент (транзистор) и нагрузку

$$||Y|| = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix}.$$

Существенно, что условие (2) не применимо к расчету диодных генераторов, поскольку не существует матрицы проводимости обратного сопротивления (проводимости) [2], а условие (1) не является условием самовозбуждения транзисторных генераторов, так как генераторы с трехэлектродным активным элементом нельзя представить в виде параллельного соединения двухполюсников.

Цель настоящего сообщения – соединить два условия самовозбуждения: (1) и (2) – в одно общее.

Для описания генерирующей системы применим нормированную матрицу рассеяния

$$||S|| = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Матрица (3) связывает нормированные падающие и отраженные напряжения электромагнитных волн на входных и выходных клеммах:

$$\begin{split} &U_{\text{lotp}} = S_{11} \ U_{\text{lnam}} + S_{12} \ U_{\text{2nam}}, \\ &U_{\text{2otp}} = S_{21} \ U_{\text{lnam}} + S_{22} \ U_{\text{2nam}}. \end{split} \tag{4}$$

Если клеммы четырехполюсника, включающего в себя как активный прибор, так и нагрузку, разомкнуты, то имеем [2]







 \bigoplus

$$U_{\text{lorp}} = U_{\text{lnag}} = U_{\text{l}},$$
 $U_{\text{2orp}} = U_{\text{2nag}} + U_{\text{2}}.$ (5)

Система уравнений (4) при этих условиях примет вид

$$U_{1}(S_{11}-1)+S_{12}U_{2}=0$$

$$U_{1}S_{21}+U_{2}(S_{22}-1)=0.$$
(6)

Нетривиальное решение система (6) имеет при условии, если определитель равен нулю [3]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} S_{11} - 1 & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} - 1 \end{vmatrix} = 0. \tag{7}$$

Покажем, что условие самовозбуждения (7) применимо как к диодным, так и к транзисторным генераторам.

В случае диодного генератора матрица рассеяния системы имеет вид

$$||S|| = \begin{vmatrix} -\frac{Y}{2+Y} & \frac{2}{2+Y} \\ \frac{2}{2+Y} & -\frac{Y}{2+Y} \end{vmatrix}, \tag{8}$$

где $Y = Y_a + Y_H$.

Условие (7) при этом превращается в равенство 4Y/(2+Y) = 0, что соответствует формуле (1). В случае транзисторного генератора матрица рассеяния имеет вид

$$||S|| = \begin{vmatrix} 1 - (Y_{11} + Y_{22}) + |Y| & -2 \cdot Y_{12} \\ 2 \cdot Y_{21} & 1 + (Y_{11} + Y_{22}) + |Y| \end{vmatrix} \cdot \frac{1}{1 + Y_{11} - Y_{22} - |Y|}.$$
 (9)

Подставляя элементы матрицы (9) в условие (7), получим

$$\frac{4 \cdot |Y|}{\left|1 + Y_{11} - Y_{22} - |Y|\right|} = 0 \tag{10}$$

что совпадает с условием (2).

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАПАЗОНА ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Расширение диапазона перестройки частоты f при изменении управляющего напряжения U является важнейшей проблемой при создании ГУН. Исследованию частотных характеристик генераторов с широким диапазоном перестройки посвящен ряд работ, где, в частности, было показано, что расширить диапазон перестройки можно путем применения управляющего прибора со сравнительно большой величиной коэффициента перекрытия емкости ($K_c = 15...30$). Однако в этих работах практически не исследовалась важная характеристика перестраиваемых генераторов — крутизна перестройки S = df/dU. Между тем ограничения, накладываемые на величину крутизны, могут существенно влиять на возможности перестройки частоты.

Для решения принципиальных вопросов перестройки частоты можно не рассматривать всю





 $^{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{}}}}}}}}}}}$

схему генератора, а исследовать лишь цепь, определяющую частоту генератора. В перестраиваемых генераторах такой цепью является контур, содержащий управляющий полупроводниковый прибор (ПП). Обозначим через $L_{_{9}}$, $C_{_{9}}$, $R_{_{9}}$ эквивалентные параметры схемы генератора, приведенной к клеммам этого ПП, а через $L_{_{B}}$, $C_{_{B}}$, $R_{_{B}}$ — эквивалентные параметры активного ПП (рис. 1, a).

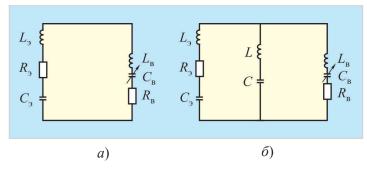


Рис. 1. Эквивалентная схема частотозадающего контура (a) и схема с дополнительным контуром (δ)

Частота последовательного резонанса контура определяется из выражения

$$f_0 = \sqrt{\frac{C_9 + C_B}{C_9 C_B (L_9 + L_B)}} \cdot \frac{1}{2\pi}.$$
 (11)

Емкость ПП $C_{\scriptscriptstyle \rm B}$ зависит от приложенного к нему напряжения U.

На практике для анализа диапазона перестройки генераторов широко используется следующая функция:

$$C_{\rm B}(U) = \frac{C_{\rm B0}}{\left(1 + \frac{U}{U_{\rm K}}\right)^{\gamma}},\tag{12}$$

где $U_{\mbox{\tiny K}}$ – контактная разность потенциалов; γ – показатель нелинейности; $C_{\mbox{\tiny B0}}$ – максимальная величина емкости ПП при U = 0.

Обозначим через $U_{\rm np}$ предельное значение управляющего напряжение, выше которого наступает пробой ПП, а через $C_{\rm в.min} = C_{\rm в}(U_{\rm np})$ — минимальную величину емкости ПП. Тогда из (12) получим выражение для коэффициента перекрытия K_c :

$$K_{c} = \frac{C_{\text{B0}}}{C_{\text{B min}}} = \left(1 + \frac{U_{\text{np}}}{U_{\text{K}}}\right)^{\gamma}. \tag{13}$$

Уравнение (13) связывает основные параметры ПП. Из него видно, что при $U_{\rm np}/U_{\rm k} < 100$ у ПП с плавным ($\gamma=1/3$) и резким ($\gamma=1/2$) профилями легирования примеси перекрытие по емкости не превышает 5...10, тогда как для ПП со сверхрезким профилем ($\gamma=1$) $K_c>50$. Эквивалентные параметры $L_{\rm s}, C_{\rm s}, R_{\rm s}$ моделируют полное выходное сопротивление активного ПП. В общем случае они зависят от частоты, однако часто эту зависимость можно не учитывать, считая, что постоянные величины реактивностей контура хорошо аппроксимируют поведение частотной характеристики.





Проанализируем максимальное увеличение диапазона перестройки частоты, если известны параметры L_3 и C_3 , значение частоты f_{01} в начале кривой перестройки (U=0) и максимальная величина крутизны S_0 . Учитывая, что $f_{01}=f_0(0)$, а $f_{02}=f_0(U_{\rm пр})$, из формулы (11) определим отношение крайних частот диапазона перестройки:

$$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \sqrt{\frac{K_c + \frac{C_{B0}}{C_3}}{1 + \frac{C_{B0}}{C_3}}}.$$
(14)

Видно, что при небольших величинах K_c требуемого диапазона перестройки (перепада частоты) можно достичь лишь при значениях отношений емкостей $C_{\rm B0}/C_{\rm 3}$, меньших определенной величины. Еще одно ограничение на это отношение возникает в том случае, если преобразовать уравнение (11) к виду:

$$\frac{L_{\rm B}}{L_{\rm 3}} = \left(\frac{f_{\rm 3}}{f_{01}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{C_{\rm 3}}{C_{\rm B0}}\right),\tag{15}$$

где
$$f_3 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_3 \cdot C_3}}$$
.

Поскольку $L_{_{\rm B}}/L_{_{\rm S}}>0$, то из (15) следует условие существования верхнего предела для значений $C_{_{\rm B0}}$ при $f_{_{01}}>f_{_{\rm S}}$:

$$\frac{C_{B0}}{C_{3}} < \frac{1}{\left(\frac{f_{01}}{f_{3}}\right)^{2} - 1}$$
 (16)

Для анализа максимальной величины диапазона перестройки исследуем зависимости частоты f_0 и крутизны $S=df_0/dU$ от напряжения U, приведенные на рис. 2. Видно, что диапазон перестройки увеличивается с ростом K_c , однако при этом растет и величина S. Поскольку в практических задачах S не должна превышать заданного значения S_0 , то условие $S < S_0$ ограничивает диапазон перестройки Δf . Если отношение $U_{\rm np}/U_{\rm k}$ одинаково для ПП с различными K_c , то величина Δf определяется из формулы $\Delta f = f_0(U_{\rm np}) - f_0(U_0)$, где U_0 — напряжение, соответствующее равенству $S(U_0) = S_0$. Зависимости $\Delta f(K_c)$ для ряда значений S_0 представлены на рис. 3.

При значениях S_0 , меньших определенной величины S_{00} , кривые носят экстремальный характер с максимумами в точках $K_{c0}(S_0)$. При $K_c < K_{c0}$ перестройка ограничивается слабой зависимостью $f_0(U)$, а при $K_0 > K_{c0}$ — сближением напряжений U_0 и $U_{\rm np}$. При больших S_0 напряжение U_0 значительно меньше $U_{\rm np}$ и кривые $\Delta f(K_c)$ не имеют экстремумов. При $S_0 < S_{00}$ существуют интервалы изменения S_0 , внутри которых увеличение перепада емкости ПП K_c приводит к снижению диапазона перестройки. Поэтому при выборе ПП необходимо учитывать требуемую величину крутизны перестройки.

Пусть $S_1 = S(0)$ и $S_2 = S(U_{\rm np})$, тогда из выражений (11)...(14) после несложных преобразований получим важное соотношение:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{f_{02}}{f_{01}} \cdot K_c^{\frac{1}{\gamma}-1}$$
 (17)

 \bigoplus

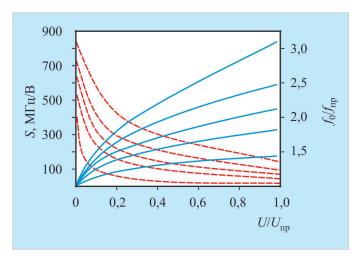


Рис. 2. Зависимости частоты f_0 (——) и крутизны перестройки S (-----) от напряжения U при различных величинах K_c

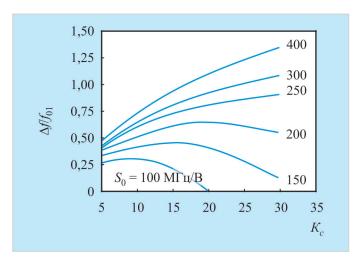


Рис. 3. Зависимости относительной величины диапазона перестройки $\Delta f | f_{01}$ от K_c при различных величинах S_0

Перепад крутизны пропорционален отношению частот f_{02}/f_{01} и коэффициенту, зависящему от параметров ПП. При $\gamma < 1$ отношение S_1/S_2 возрастает с увеличением K_c , а при $\gamma > 1$ — падает.

На основании изложенного можно использовать следующую методику определения оптимальных параметров $\Pi\Pi$.

- 1. По заданной величине S_0 находим максимальный диапазон перестройки $\Delta f/f_{01}$ и соответствующее значение перепада емкости K_c .
- 2. Используя найденные значения K_c и $f_{02}/f_{01}=1+\Delta f/f_{01}$, определяем величину отношения емкостей $C_{\rm BO}/C_{\rm S}$.
- 3. Показатель нелинейности γ находим из формул (13) либо (17), если сделаны дополнительные ограничения на величину перепада крутизны.
- 4. Для заданного значения $f_{01}/f_{_9}$ и найденного отношения $C_{_{\rm B0}}/C_{_9}$ рассчитываем требуемую величину индуктивности $L_{_{\rm B}}/L_{_3}$.





В схемах генераторов, как правило, присутствуют дополнительные реактивности (индуктивности или емкости). Принято считать, что их наличие является нежелательным, поскольку они ослабляют связь управляющего ПП с активным ПП, из-за чего уменьшается диапазон перестройки. Поскольку полностью освободиться от этих элементов невозможно, используются схемы компенсации реактивностей. Один из возможных вариантов компенсации с помощью емкости C индуктивности L показан на рис. 1, δ . Выполненные для этой схемы расчеты относительной величины диапазона перестройки показали существование оптимальных величин реактивностей L_0 и C_0 , при которых диапазон перестройки может быть увеличен в 1,2...1,3 раза.

4. ГЕНЕРАТОР С ПТШ В КАЧЕСТВЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

В традиционных схемах твердотельных ГУН в качестве активного ПП используются биполярные или полевые транзисторы, а в качестве управляющих ПП – варакторные диоды. В последние годы в диапазоне СВЧ широко используются монолитные интегральные схемы (МИС), содержащие полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ). В МИС-генераторах было предложено использовать ПТШ в качестве управляющего ПП [4–7].

Рассмотрим один из вариантов схемы генератора, содержащей два ПТШ, при этом первый ПТШ T_1 служит в качестве ПП, управляемого напряжением, а второй ПТШ T_2 служит для получения генерации (рис. 4).

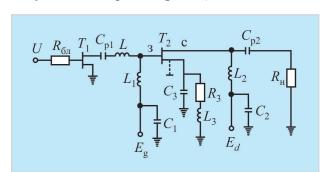


Рис. 4. Эквивалентная схема ГУН с двумя ПТШ

При U=0 транзистор T_1 открывается и через него течет ток. Источник тока эквивалентен сопротивлению R_0 открытого ПТШ. Если обозначить входную емкость транзистора T_2 через C_{72} и учесть, что у открытого транзистора емкости при U=0 составляют 0,5 пФ, то емкостное сопротивление будет существенно больше, чем R_0 . В этом случае резонансная частота цепи определяется из выражения: $f_1=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{T2}}}$. При U=-5 В > V_{p0} транзистор T_1 запирается, ток через него не течет и суммарная емкость транзистора T_1 равна C_p . Емкость всего частотозадающего контура в этом случае составляет $C=\frac{C_p \cdot C_{T2}}{C_p + C_{T2}}$, а резонансная частота $f_2=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=f_1 \cdot \sqrt{1+\frac{C_{T2}}{C_p}}=f_1 \cdot q$. Если генератор настроен на центральную частоту рабочего диапазона $f_0=\frac{f_1+f_2}{2}=f_1 \cdot \frac{1+q}{2}$, то из этих соотношений нетрудно получить выражение для

50



индуктивности $L = \left(\frac{1+q}{4\pi}\right)^2 \frac{1}{f_0^2 C_{TD}}$. Для оценки диапазона перестройки примем во внимание,

 $(4\pi) f_0^* C_{T2}$ что емкости управляющего ПТШ изменяются с напряжением U по законам: $C_{gs} = \frac{C_{gs0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{U}}}$;

$$C_{gd} = \frac{C_{gd0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{U_{\rm K}}}}$$
, а $C_{gd0} = C_{gs0}$, $U_{k} = 0.8$ В. В этом случае суммарная емкость

$$C = \frac{C_{gso}}{2} \frac{b \left(1 + a \sqrt{1 - \frac{U}{U_{K}}} \right)}{1 + (b + a) \sqrt{1 - \frac{U}{U_{K}}}},$$

где
$$a = \frac{2C_{ds}}{C_{gs0}}; \quad b = \frac{2C_{T2}}{C_{gs0}}.$$

Если положить, что при открытом транзисторе $T_1 (U = 0)$ частота генерации совпадает с нижней границей диапазона перестройки $f=f_0$, то емкость $C=C_1=\frac{C_{\rm gs0}}{2}\cdot\frac{b(1+a)}{1+a+b}$, а индуктивность $L = \frac{1}{\omega_0^2 C_1}$. Тогда для произвольного напряжения $U < V_{p0}$ получим закон изменения частоты f при изменении напряжения U:

$$f = f_0 \left[\left(\frac{1+a}{1+a+b} \right) \cdot \frac{1 + (a+b) \left(1 - \frac{U}{U_{\rm K}} \right)^{0.5}}{1 + a \left(1 - \frac{U}{U_{\rm K}} \right)^{0.5}} \right]^{0.5}.$$

Видно, что характер изменения f(U) определяется величинами: $a=2C_{ds}/C_{gs0}$ и $b=2C_{T2}/C_{gs0}$. Величину C_{T2} можно изменять путем изменения напряжения E_g на транзисторе T_2 .

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Балыко, А. К. Проектирование твердотельных генераторов СВЧ / А. К. Балыко, Г. П. Козлов, В. Ю. Мякиньков // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 3.
 - 2. Зелингер, Д. Основы матричного анализа и синтеза / Д. Зелингер. М.: Сов. радио, 1970.
- 3. Фельдштейн, А. Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. М.: Связь, 1971.
- 4. Пат. 2277293 РФ. Генератор СВЧ на транзисторе / А. К. Балыко, А. Н. Королев, В. А. Мальцев, В. Ю. Мякиньков, – Приоритет от 05.10.2005.
- 5. Пат. 2298280 РФ. Генератор СВЧ на транзисторе с электрической перестройкой частоты / А. К. Балыко, А. Н. Королев, В. А. Мальцев, В. Ю Мякиньков, Н. В. Козлов, Ю. Б. Рудый. – Приоритет от 12.08.2005.
- 6. Пат. 2353048 РФ. Генератор СВЧ на транзисторе / А. К. Балыко, А. Н. Королев, В. А. Мальцев, В. Ю. Мякиньков. - Приоритет от 24.09.2007.
- 7. Пат. 2568264 РФ. Генератор, управляемый напряжением / А. К. Балыко, В. Ю. Мякиньков, Л. А. Савельева, И. А. Балыко. – Приоритет от 15.10.2014.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

Статья поступила 28 апреля 2018 г.





УДК 621.382.323

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Г-ОБРАЗНОГО ЗАТВОРА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ СВЧ

В. Г. Лапин

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

Статья посвящена анализу предложенного оригинального способа формирования и конструкции затвора полевых транзисторов. Показаны технологические возможности реализации предложенного способа и приведены примеры и результаты его применения для изготовления полевых транзисторов и МИС СВЧ. Рассмотрены перспективы его дальнейшего развития.

КС: полевой транзистор СВЧ, затвор Г-образной формы сечения, проекционная литография

POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF USING Γ-SHAPED GATE FOR MANUFACTURING MICROWAVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS

V. G. Lapin

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

The article is devoted to the analysis of the proposed original method of forming and designing field-effect transistor's gate. The technological possibilities of implementing the proposed method are shown and examples and results of its application for manufacturing field-effect transistors and MMICs are given. The prospects of its further development are considered.

Keywords: <u>microwave field-effect transistor</u>, Γ-shaped gate, projection lithography

В полевых транзисторах СВЧ важнейшим элементом является затвор, практически всегда формируемый в виде параллельного соединения множества одиночных элементов. В СВЧ-транзисторах особенно часто используется затвор, контактирующий непосредственно с поверхностью полупроводника (без промежуточного слоя диэлектрика) и формирующий потенциальный барьер контакта Шотки. От конструкции, размеров, геометрической формы затвора (в том числе и от формы поперечного сечения каждого одиночного элемента затвора по направлению «исток — сток») сильно зависят параметры транзистора. Длина основания затвора L_3 , формируемого непосредственно в плоскости контакта Шотки, определяет важнейшие динамические параметры транзистора, такие, как максимальная частота усиления по мощности $F_{\rm max}$, а также коэффициент усиления и коэффициент шума на заданной частоте. Давно известно, что СВЧ-параметры транзистора улучшаются с уменьшением длины основания затвора, однако это улучшение может быть слабым, если не учесть ряда сопутствующих физических эффектов.

Действительно, при уменьшении длины L_3 уменьшается площадь поперечного сечения одиночных элементов затвора, что приводит к росту их продольного сопротивления и, следовательно, из-за потерь СВЧ-сигнала в затворной металлизации к ухудшению усиления и





шумовых характеристик. Для того чтобы снизить это паразитное сопротивление затворной металлизации, изготавливают затвор с Т-образным, или «грибовидным», поперечным сечением: с узкой нижней частью затвора (ножка затвора) и с широкой верхней частью (шляпка затвора). Такая конструкция затвора одновременно обеспечивает и малую длину затвора, и его низкое паразитное сопротивление.

Для формирования Т-образного затвора с субмикронными размерами его длины L_3 используется довольно сложная технология с применением электронной литографии и многослойной системы резистов (до четырех слоёв). Высокопроизводительный процесс электроннолучевой литографии (ЭЛЛ) обеспечивается современным достаточно дорогостоящим оборудованием, а при использовании относительно дешевого оборудования является малопроизводительным. Основные этапы этой технологии и принципы формирования затвора с T-формой поперечного сечения показаны на рис. 1.

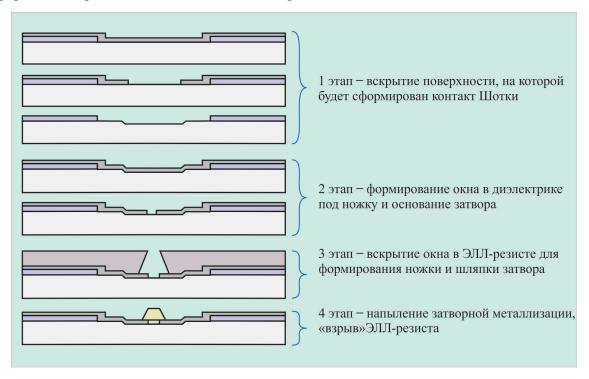


Рис. 1. Основные этапы формирования Т-образного затвора методом ЭЛЛ

Это один из простых вариантов последовательности формирования Т-образного затвора. Длина формируемого затвора зависит от разрешающей способности используемой литографии и прецизионного травления диэлектрического слоя. Точность позиционирования затвора в канале транзистора определяется многими факторами. В частности, в числе прочих важна точность совмещения при процессах литографии (определяется возможностями оборудования). Большую важность имеет воспроизводимость процессов вскрытия поверхности слоя, на котором формируется контакт Шотки (обязательно без внесения дефектов в этот слой!), травления диэлектрического слоя на 2 этапе (тоже без внесения дефектов в нижележащий слой полупроводника!), проявления резистов.

Таким образом, совокупность конструктивно-технологических проблем, которые необходимо выявить и решить для воспроизводимого формирования затворов высокого качества,





представляет собой достаточно глобальную задачу. Как основные в нее входят следующие проблемы.

- 1. Проблема достаточно точного трехмерного моделирования поведения многоэлементного затвора на СВЧ.
 - 2. Проблема выбора конструкции, геометрии и соотношения размеров элементов затвора.
- 3. Проблема создания технологии бездефектного травления сравнительно толстых слоев при субмикронном размере элементов.

Автором данной статьи был предложен новый оригинальный способ формирования затвора транзистора [1], который может быть осуществлен как с помощью электронно-лучевой литографии, так и с помощью проекционной литографии. Способ основан на способности литографического оборудования достаточно точно совмещать между собой рельеф слоев, формируемых на последовательных этапах литографии, причем не требует высокой разрешающей способности.

Первая идея заключается в том, что форма поперечного сечения затвора не обязательно должна быть симметричной, а при формировании затвора важно получение заданной длины основания затвора и низкого сопротивления верхней части затворной металлизации.

Вторая идея заключается в том, что размер вскрытой области в фоторезистивной маске может быть сравнительно большим — равным размеру верхней части (шляпки) затвора. Малая длина основания затвора и фиксация положения истокового края основания могут быть обеспечены с помощью края предварительно сформированного элемента из диэлектрического слоя (ступеньки из диэлектрика). Другим краем маски, задающим положение стокового края основания затвора, служит фоторезистивная маска (рис. 2).

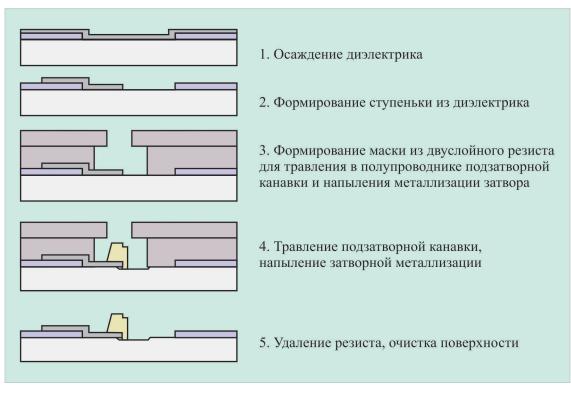


Рис. 2. Идея формирования Г-образного затвора методом фотолитографии с двухслойным резистом



При этом способе применяется двухслойная маска фоторезистов. При формировании собственно затвора может быть использовано как напыление металлов перпендикулярно поверхности пластины, так и напыление под углом, так, как показано на рис. 3.

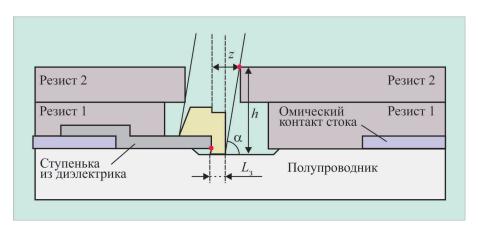


Рис. 3. Особенности формирования затвора при напылении слоя его металлизации под углом α. Красными точками помечены края слоев, определяющих ровность краев основания затвора

Из рис. 2, 3 видно, что длина затвора будет определяться зазором между ступенькой из диэлектрика и противоположным краем фоторезистивной маски, которые формируются с помощью двух последовательных литографий, и, следовательно, этот размер будет определяться величиной смещения, заложенной в фотошаблонах, или в программе экспонирования между этими двумя литографиями. Кроме того, из рис. 3 видно, что напыление затворной металлизации под углом позволяет дополнительно уменьшить длину затвора за счет «тени», создаваемой верхним слоем резиста.

Длина затвора может быть определена из формулы:

$$L_3 \cong z - h \cdot \operatorname{ctg}\alpha,$$
 (1)

где z — расстояние (зазор) между краем диэлектрической ступеньки и противоположным краем фоторезистивной маски; h — размер, практически совпадающий с суммарной толщиной двух слоев резиста; α — угол между потоком напыляемого металла и поверхностью полупроводниковой пластины.

Из формулы видно, что величину $L_{_3}$ можно уменьшить, увеличивая толщину фоторезистивной маски и уменьшая угол α . Очевидно, что при некоторых значениях величин h и α длина затвора может обратиться в ноль.

Как видно из рис. 3, реальная длина затвора оказывается несколько большей из-за наличия заглубления в n-полупроводнике и эффекта бокового подпыления металла под край диэлектрической ступеньки. Эта величина может быть рассчитана по формуле:

$$x \cong h_1 \cdot \operatorname{ctg}\alpha,$$
 (2)

где x – дополнительная величина длины основания затвора; $h_{\rm l}$ – величина заглубления.

По формуле (1) можно оценить длину затвора, которую можно реально получить, используя напыление металлизации затвора под углом. Если принять для расчетов величину зазора z равной 0,5 мкм, общую толщину резиста считать практически равной величине h = 1,1 мкм,

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018



а угол $\alpha = 80^{\circ}$ (отклонение от нормали 10°), то расчетная длина основания затвора будет равна 0.31 мкм.

Таким образом, видно, что за счет напыления под углом 80° длину основания затвора можно уменьшить почти на 0,2 мкм. Также интересно оценить увеличение длины затвора изза нависания ступеньки из диэлектрика над подзатворным углублением. В транзисторах на гетероструктурах величина заглубления в n^+ -полупроводник h_1 при использовании химического травления в наихудшем случае может составлять весьма большую величину: 0,05...0,10 мкм. Несмотря на это (смотри выражение (2)), максимум величины x составит всего лишь не более 0,02 мкм ($x=0,1\cdot0,176=0,0176$ (мкм)).

Как отмечалось выше, метод формирования Γ -образного затвора основан на совмещении двух формируемых последовательно слоёв. Поэтому возникает вопрос, а насколько точно будет воспроизводиться величина z по площади рабочей пластины и от пластины к пластине? Каков будет разброс этой величины? На эту величину будут влиять ряд факторов случайного происхождения, такие, как контрастность меток совмещения, отклонение параметров системы считывания меток, отклонение параметров системы управления движением стола установки.

Из теории вероятности известно, что многие случайные величины, например такие, как ошибки при измерениях, боковое отклонение и отклонение по дальности точки попадания от некоторого центра при стрельбе, величина износа деталей во многих механизмах и т. д., имеют

плотность распределения вероятности, определяемую формулой:
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$
.

В этом случае говорят, что случайная величина подчинена нормальному закону распределения (это распределение также называют законом Гаусса).

В этой формуле величина x – это отклонение от максимума распределения (математического ожидания), в нашем случае от «0», σ – среднее квадратичное отклонение. При проведении практических вычислений, за единицу измерения отклонения случайной величины, подчиненной нормальному закону, от её центра рассеяния (математического ожидания) принимают среднее квадратичное отклонение σ .

Из нормального распределения следует правило трех сигм:

$$p(-\sigma \le x \le \sigma) = 0.683, \ p(-2\sigma \le x \le 2\sigma) = 0.954, \ p(-3\sigma \le x \le 3\sigma) = 0.997.$$

В выражениях, приведенных выше: p — вероятность попадания величины отклонения в соответствующий диапазон.

Из вида этих выражений следует, что почти достоверно то, что случайная величина не отклонится от математического ожидания по абсолютной величине больше чем на 3σ , т. к. вероятность попадания в диапазон $\pm 3\sigma$ составляет 0,997.

Изготовители оборудования для проекционной литографии в спецификациях приводят величину точности совмещения. Для современных машин эта величина составляет порядка 0,06 мкм по $\pm 3\sigma$, это означает, что 99,7 % всех совмещенных структур будут иметь рассовмещение не более ± 60 нм, 95,4 % всех структур – не более ± 40 нм, 68,3 % – не более ± 20 нм. Для большей части затворов с длиной основания 0,3 мкм отклонение от этой заданной величины не будет превышать ± 10 %. Кроме того, длина основания затвора L_3 при напылении под углом существенно зависит от суммарной толщины слоев резиста h (см. рис. 3).

Современное оборудование для экспонирования и технология нанесения слоев резистов позволяют формировать их толщины с точностью не хуже чем $\pm 0,05$ мкм. Например, если толщина резиста h отклонится на 0,1 мкм от заданной величины 1,1 мкм, т. е. величина h соста-





вит 1 мкм, то длина основания затвора станет равной 0,324 мкм, т. е. увеличится примерно на 0,014 мкм.

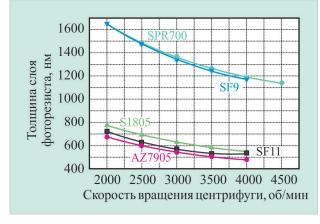
Из последней оценки следует, что при напылении металлизации затвора под углом наклона 80° изменения длины основания затвора не превышают 0,015 мкм, что существенно ниже, чем отклонения из-за неточности совмещения. При нормальном напылении (угол наклона 90°) зависимости длины основания затвора от суммарной толщины резиста нет.

Таким образом, вышеприведенные оценочные расчеты показывают, что способ изготовления затворов транзисторов с использованием двух последовательных фотолитографических процессов и нескольких (при процессе «взрывной» литографии по металлизации затвора) разнородных слоев резистов в качестве маски может быть реализован на практике.

Для практической реализации предложенного способа вначале были отработаны процесс плазмохимического осаждения диэлектрического слоя нитрида кремния $\mathrm{Si_3N_4}$ толщиной 0,15 мкм, процесс фотолитографии и процесс последующего травления этого диэлектрического слоя для формирования ступеньки диэлектрика.

Далее был отработан процесс формирования двухслойной маски из фоторезистов. В результате проведенных экспериментов было выяснено (рис. 4), что двухслойная маска из резистов PMGI SF9 и AZ7905 позволяет получить более воспроизводимые размеры и лучшую точность совмещения.

Рис. 4. Зависимости формируемых толщин слоев резистов различных марок от скорости вращения центрифуги при их нанесении



В результате проведенных экспериментов выбор был остановлен на использовании резистов марок PMGI SF9 и AZ7905.

Комплекс отработанных процессов позволил внедрить данный метод в серийное производство МИС СВЧ. Для изготовления затворов использовалась установка пошагового экспонирования (степпер) NSR-2005i9C, характеристики которой приведены ниже.

Основные характеристики степпера NSR-2005i9C

Масштаб переноса изображения	5:1
Мультиплицирование	шаговое, последовательное
Разрешение	не хуже 0,45 мкм
Длина волны актиничного света	365 нм (і-линия ртутной лампы)
Максимальная экспонируемая площадка	20×22 мм
Диаметр пластин	76 и 100 мм (два порта)
Ошибка совмещения	не более $0,09$ мкм (отклонение 3σ)
Ошибка совмещения при экспонировании нижележащего слоя на другой	
установке той же модели	$0,09$ мкм (отклонение 3σ)

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

Напыление затворной металлизации проводилось без отклонения от нормали.

Для апробации описанной выше технологии формирования затворов были изготовлены по несколько десятков пластин МИС СВЧ, таких, как пятиразрядный аттенюатор М44712, четырехразрядный фазовращатель М44149-1-2, переключатель М44218.

В качестве доказательства перспективности технологии Г-затвора в таблице представлен выход годных приборов для аттенюатора и фазовращателя. Расчет выхода годных (%) проводился по десяти пластинам (всего 40 пластин), выбранным подряд из производственного процесса в одном временном периоде. МИС с обычным трапециевидным затвором изготавливались с помощью электронной литографии на установке ZBA-21.

	Обычный	Затвор	Увеличение выхода
Прибор	трапециевидный	Г-образной	годных,
	затвор	формы	%
Аттенюатор	80,5 %	90,9 %	10,4
Фазовращатель	71,3 %	77,6 %	6,3

Выход годных определялся по результатам зондовых измерений СВЧ- и НЧ-параметров на пластине. Из представленных данных (см. таблицу) видно, что, даже при достаточно высоком выходе годных в технологии, выбранной для сравнения, при внедрении новой технологии удается дополнительно увеличить выход годных на 6...10 %.

Интересно отметить, что выход годных изделий на лучшей пластине с Г-образным затвором составил 97,8 %.

Установлено, что увеличение выхода достигнуто за счет большего размера окна в маске двухслойного резиста, которое лучше вскрывается при проявлении, а также за счет более воспроизводимого и равномерного травления подзатворного углубления.

На рис. 5 представлено изображение, полученное в сканирующем электронном микроскопе с увеличением 8930 раз, на котором показан вид сверху фрагмента затвора, напыленного под прямым углом с захватом части ступеньки диэлектрического слоя. Данный способ также использовался для изготовления мощных транзисторов. При этом применялось напыление затворной металлизации под углом (рис. 6).

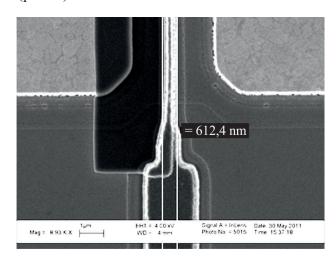


Рис. 5. Вид сверху на элемент затвора. Металлизация затвора формировалась напылением под углом 90°

58







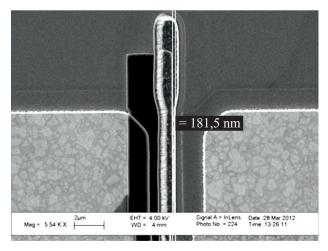


Рис. 6. Вид сверху на элемент затвора. Металлизация затвора формировалась напылением под углом 74°

На рис. 7 показаны недостатки, которые могут сопровождать процесс формирования затвора при химическом травлении удаляемого стоп-слоя (щелевое подтравливание по этому слою показано зеленой стрелкой) и подзатворной канавки (щелевое подтравливание под ступеньку диэлектрика показано белой стрелкой, карман – желтой стрелкой). Формирование подзатворной канавки необходимо для удаления части слоя n^+ -полупроводника, который может быть сильно насыщен дефектами, введенными в процессе проведения операции плазмохимического травления при формировании ступеньки из диэлектрика. По этой причине подзатворную канавку часто формируют методом химического травления, который из-за «мягкости» этого процесса принципиально не вводит дефекты. Однако химическое травление не позволяет долговременно и с высокой точностью воспроизводить глубину подзатворной канавки. Важно отметить, что современные технологии молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, широко применяющиеся для изготовления транзисторных гетероструктур, существенно превосходят по точности и воспроизводимости параметров слоев непосредственно сами транзисторные технологии [2]. В частности, в конструкциях гетероструктур успешно используются функциональные элементы, имеющие толщину всего в несколько моноатомных слоев. Для устранения этого разрыва в возможностях технологий, часто просто необходима замена технологии химического травления на более прецизионную технологию плазмохимического травления, в которой для предотвращения образования дефектов в нижележащих слоях используется уменьшение энергии ионов в конце процесса. Это уменьшение проводится до величин энергий, при которых образование даже точечных дефектов перестает происходить. Такой способ позволяет обеспечить приемлемо высокую производительность процесса травления и устранить процесс плазменного формирования дефектов. Использование такой технологии имеет ряд преимуществ:

- 1. Поскольку генерация дефектов устранена, необходимость химического травления для изготовления подзатворной канавки пропадает.
 - 2. Устраняется эффект щелевого подтрава.
- 3. Поскольку процесс плазмохимического травления слоев n^+ —GaAs легко останавливается на слоях $\mathrm{Al}_x\mathrm{Ga}_{1-x}\mathrm{As}$ даже при малых величинах x ($x \cong 0,25$), исчезает необходимость формирования в структуре стоп-слоя.
 - 4. Появляется возможность устранения дефектов, показанных стрелками на рис. 7.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018







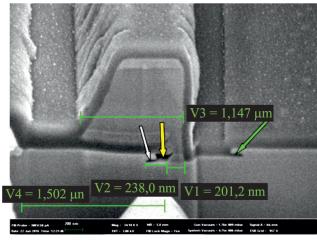


Рис. 7. Изображение поперечного сечения затвора, покрытого защитным слоем диэлектрика. Видна возможность изготовления затвора с длиной 0,2 мкм методом оптической литографии при наклонном напылении его металлизации

На рис. 8 показано характерное ожидаемое изображение поперечного сечения затвора при использовании плазмохимической технологии с уменьшением энергии ионов. Видно, что такая технология позволит существенно уменьшить размер карманов под шляпкой затворов и устранить щелевой подтрав. Показан случай, когда сохранено формирование подзатворной канавки.

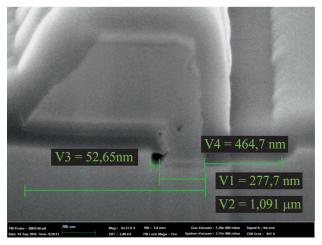


Рис. 8. Изображение поперечного сечения затвора, формируемого при использовании плазмохимической технологии с уменьшением энергии ионов

Другим вариантом использования Г-образного затвора является предварительное формирование подзатворной канавки, как показано на рис. 9

В данной статье приведены полученные на практике доказательства возможности использовать способ наклонного и нормального напыления металлизации для изготовления затворов транзисторов с барьером Шотки при длине основания затворов до 0,3 мкм и меньше в серийном производстве МИС и транзисторов с помощью только оптической литографии – без использования электронно-лучевой литографии.

Показано, что использование метода формирования Г-образного затвора позволяет существенно увеличить выход годных в сравнении с обычным методом.







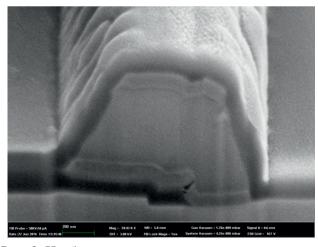


Рис. 9. Изображение поперечного сечения затвора, сформированного в предварительно вытравленной подзатворной канавке

Дальнейшее развитие этого способа может идти по пути тщательного изучения особенностей работы оборудования, используемого для процесса экспонирования, и особенностей плазмохимического травления с управляемой энергией ионов. Знание этих особенностей позволит усовершенствовать процесс для достижения меньших размеров и более высоких точностей их воспроизведения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Кувшинова, Н. А.** Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Γ -образным затвором / Н. А. Кувшинова, В. Γ . Лапин, В. М. Лукашин, К. И. Петров // Радиотехника. -2011. -№ 11. -C. 90-93.
- 2. **Лапин, В. Г.** Перспективы развития и применения DA-pHEMT в CBЧ МИС / В. Г. Лапин // Электронная техника. Сер. 1. CBЧ-техника. -2017. Вып. 1 (532). С. 26-44.

Статья поступила 17 мая 2018 г.





МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМБРАНОТРОПНОЙ АКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

К. Д. Казаринов

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

Представлен обзор литературных данных, а также результатов исследований, выполненных при участии сотрудников биофизической группы ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и посвященных изучению чувствительности мембранных биологических и модельных систем к электромагнитному излучению в широком диапазоне частот, включая КВЧ-излучение, импульсные электрические поля и лазерное излучение.

КС: электромагнитное излучение (ЭМИ), электрическое поле (ЭП), мембранные модельные и биологические системы, мембранотропность ЭМИ, импульсные поля, КВЧ-излучение, лазерное излучение, электропорация

INVESTIGATION OF THE MEMBRANETROPIC ACTIVITY OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN A WIDE RANGE OF WAVELENGTHS

K. D. Kazarinov

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

This paper presents the review of the literature data as well as the results of the studies performed with the participation of the employees of biophysical team of Kotelnikov's FIRE RAS. The investigations include the responsiveness of membrane biological and artificial physical-chemical systems to electromagnetic radiation in a wide frequency range including EHF radiation, pulsed electric fields and laser radiation.

Keywords: <u>electromagnetic field (EMF)</u>, <u>electric field (EF)</u>, <u>artificial and biological membrane systems</u>, <u>membranetropic activity of EMF</u>, <u>pulsed electric fields</u>, <u>EHF radiation</u>, <u>laser radiation</u>, <u>electroporation</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование биологического действия электромагнитных излучений (ЭМИ) стало социальным заказом современного индустриального общества. ЭМИ в настоящее время считается почти таким же по значимости компонентом биосферы, как воздух и вода. Его уровень значительно превышает уровень естественного электромагнитного фона. Энергоресурсы мира



удваиваются каждые десять лет, а удельный вес переменных электромагнитных полей (ЭМП) в электроэнергетике возрастает еще интенсивнее. Следовательно, необходимы средства защиты от этого воздействия [1–2]. С другой стороны, известен положительный терапевтический эффект при использовании ЭМП и разрабатываются все новые и новые методы лечения различных заболеваний [3–5].

Существуют также примеры исследований биотехнологического использования ЭМП [6–7]. Такая ситуация требует подробного изучения взаимодействия ЭМП с биологическими объектами на самых различных структурных и функциональных уровнях организма человека.

Мало у кого из специалистов сегодня возникают сомнения в том, что первичные мишени рецепции ЭМП находятся на клеточном и субклеточном уровнях.

Проведенный литературный обзор результатов исследований биологического действия ЭМП от низкочастотного, микроволнового, а также видимого диапазона дает основание предположить, что одним из наиболее чувствительных элементов клетки к действию ЭМП является клеточная мембрана [8]. При этом следует подчеркнуть, что изучение мембранной активности широкого диапазона длин волн ЭМП оправдано еще и потому, что природа многих процессов, протекающих в клетках и субклеточных органеллах при участии мембран, электромагнитная. Ионный транспорт через мембрану, образование мембранного потенциала, транспорт электронов в дыхательной цепи митохондрий, взаимодействие рецепторов со специфическими лигандами и ряд других процессов являются электромагнитными.

Важным обоснованием для рассмотрения мембранных систем в качестве основных участников взаимодействия ЭМИ с биосистемами является представление о том, что мембраны могут осуществлять как регуляторные, так и исполнительные функции. Биомембраны определяют морфологию любой клетки, ее специфическую организацию, адекватную соответствующей биологической функции в организме. Благодаря своей организации, они принимают активное участие в таких фундаментальных внутриклеточных процессах, как метаболизм, транспорт веществ, ионная проницаемость, возбудимость, механохимическая активность, запасание и преобразование энергии. Регуляция жизнедеятельности клетки происходит путем воздействия регуляторных сигналов на плазматическую мембрану, занимающую ведущее положение в иерархии систем управления на клеточном уровне [9]. Эта важная роль плазматической мембраны и ее структурно-функциональные особенности позволили Е. М. Крепсу [10] рассматривать мембранную систему в качестве основного звена адаптации организма, структуры, которая в первую очередь реагирует на изменение окружающей среды приспособительными реакциями.

Таким образом, становится актуальной концепция модуляции мембранной активности ЭМП в широком диапазоне длин волн. В данной работе мы предлагаем обзор результатов экспериментальных исследований, выполненных сотрудниками группы биофизиков ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН совместно с представителями ФГБУ Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины ФМБА России и ГБОУ ВПО РНИМУ им. Н. И. Пирогова Минздравсоцразвития России, которые позволили подтвердить гипотезу универсальности мембранной системы как первичного звена взаимодействия ЭМП с биологическими объектами.

Большое внимание в данной работе будет уделено мембранному механизму активации фагоцитарных клеток импульсами электрического поля.

Электрический пробой, или электропорация, биологических мембран – это нарушение барьерной функции мембраны, которое обычно определяют по входу или выходу из клетки важных





биологических веществ [11]. Академик Ю. А. Владимиров выдвинул предположение о том, что это явление может играть важную роль как в норме, так и в патологии клеток [12]. Электрический пробой используется как метод введения в клетки лекарственных веществ, а также изучения клеточной физиологии.

В результате наших исследований [13] впервые была показана возможность изучения процесса нарушения барьерных функций мембран при пробое по хемилюминесценции (ХЛ) объектов — сверхслабому свечению, которое сопровождает некоторые биохимические реакции во вне- или внутриклеточном пространстве.

В качестве объекта исследования использовалась суспензия нейтрофилов крови человека, в которой нами были обнаружены признаки электроактивации при воздействии высоковольтными импульсами электрического поля микросекундной длительности.

Изучению участия гемового белка митохондрий цитохрома c (cyt c) в мембранных механизмах действия лазерного излучения уделялось в наших исследованиях большое внимание.

Биологическое действие лазеров, так же как и источников КВЧ-излучения, известно уже более 40 лет, после того как стала развиваться новая медицинская технология лечения широкого круга воспалительных и онкологических заболеваний, основанная на использовании низкочитенсивного лазерного излучения [14]. В работе [15] показана роль суt c при его взаимодействии с кардиолипином в условиях облучения He–Cd-лазером. Чувствительным к свету оказался один из компонентов митохондрий, ответственный за обеспечение дыхательных и энергетических функций, — гемовый железосодержащий белок суt c, реагирующий с NO с образованием нитрозильных комплексов. В наших экспериментах излучение He–Cd-лазера с длиной волны 441,6 нм способствовало диссоциации нитрозильного комплекса суt c (Fe²⁺)–NO и этот процесс регистрировался с помощью ЭПР-спектрометра.

Спектр ЭПР суt c (Fe²⁺)—NO имеет характерную для нитрозильных комплексов гемовых белков форму одиночной асимметричной линии с g-фактором 2,00 и полушириной около 100 Гс. Амплитуда сигнала ЭПР была выбрана как количественная характеристика для исследования влияния излучения He—Cd-лазера на комплекс суt c (Fe²⁺)—NO. Было установлено, что амплитуда сигнала ЭПР падала почти вдвое в течение 1 мин под действием излучения лазера мощностью 20 мВт/см². Для сравнения контролировалась кинетика снижения амплитуды сигнала ЭПР в «темноте». Предполагалось, что падение интенсивности сигнала ЭПР связано с фотодиссоциацией комплекса и образованием несвязанного суt c (Fe²⁺) и свободного NO. На оптическом спектре поглощения наблюдалось увеличение пика 549 нм, принадлежащего суt c (Fe²⁺), соответствующее полному восстановлению суt c, а также исчезновение плеча поглощения в районе 560 нм, характерного для нитрозильных комплексов суt c (Fe²⁺)—NO. Таким образом, можно полагать, что суt c (Fe²⁺)—NO диссоциировал с образованием суt c (Fe²⁺) и NO [16].

Таким образом, приведенные выше данные показывают важную роль участия мембранных систем клеток в рецепции светового излучения биологическими объектами.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Механизмы действия КВЧ-излучения на биологические и модельные мембранные системы

Изучение фазовых переходов липидных мембран при КВЧ-облучении

При исследовании биологических эффектов КВЧ-излучения выяснилось, что оно оказывает неспецифическое воздействие во всем микроволновом диапазоне длин волн, что может свидетельствовать о тепловой природе этих явлений [17–19].





Позволю себе привести здесь цитату из книги В. В. Тучина: «Фотоны малых энергий (дальнее ИК и терагерцовое излучение, излучение крайне высоких частот (КВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) радиодиапазона) могут оказывать селективное действие на некоторые биомолекулы и их комплексы с окружением, например, за счет возбуждения вращательных уровней, механических колебаний макромолекул или акустических колебаний в клеточных мембранах, но в основном их действие неспецифическое и сводится к тепловому» [20]. Считается, что воздействие на организм человека происходит при интенсивностях облучения, которые вызывают слабое нагревание ткани, но биохимические механизмы эффектов облучения не совсем понятны. Любопытно утверждение Германа Швана о невозможности получить существенные нетермические эффекты ЭМП при интенсивности излучения, которое не вызывает заметного нагрева [21]. Такие же известные исследователи в области биоэлектромагнетизма Р. К. Эйди [22] и К. Р. Фостер скептически отнеслись к идее нетепловых биологических эффектов ЭМИ. Однако К. Р. Фостер предположил, что главные открытия в этой области исследований еще впереди и нужно быть готовыми для эффективного использования этих будущих достижений [23].

Однако часто эффекты ЭМИ не удается объяснить регистрируемым интегральным нагревом. Свидетельством тому — появившийся термин «температурный эквивалент» наблюдаемого эффекта.

Особую важность оценка теплового эквивалента приобретает в том случае, когда объект очень чувствителен к изменению температуры. В некоторых случаях это может происходить из-за того, что температура окружающей среды, при которой проводится облучение биологического объекта, близка к температуре фазового перехода биологических мембран. Тогда повышение температуры даже на несколько десятый долей градуса (°С) может привести к новому фазовому состоянию биологической структуры, например белок-липидного комплекса, и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом.

Для выяснения подобной ситуации мы постарались найти модель, обладающую температурным порогом структурных изменений. В качестве такой модели мы использовали мембраны из насыщенных фосфолипидов — дипальмитоиллецитина (ДПЛ) с температурой фазового перехода (гель-жидкий кристалл) в области 42 °С. Выполняя нашу задачу исследований, мы пришли к необходимости воспользоваться тонким полиэтиленовым капилляром, заполненным суспензией липосом. Подобный способ облучения в капилляре, пропущенном сквозь широкую стенку волновода, обеспечивает хорошее согласование биологического объекта с волноводным измерительным трактом [24].

В экспериментах с липосомами из ДПЛ наблюдался отчетливый излом кривой поглощения при мощности 40...50 мВт. Пропускание микроволнового сигнала измерялось в двух точках кинетической кривой: исходной $P_{\rm ot}$, т. е. непосредственно после включения мощности в волноводном тракте, и стационарной $P_{\rm ct}$ – после завершения переходного процесса и установления стационарного значения проходящего КВЧ-сигнала через диэлектрический капилляр в волноводном тракте. В случае липосом из яичного лецитина, которые претерпевают фазовый структурный переход при более высоких температурах, резких изменений зависимости поглощения от мощности сигнала мы не наблюдали. Все эксперименты были выполнены на длине волны 8,5 мм.

Можно предположить, что после включения микроволновой мощности суспензия липосом нагревается, а излом на зависимости поглощения сигнала от мощности в случае капилляров с ДПЛ связан с термотропным структурным переходом гель-жидкий кристалл, т. е. с плавлением мембран при температуре фазового перехода $42\,^{\circ}$ С. Контрольные опыты по обдуванию капилляра горячим воздухом ($50...60\,^{\circ}$ С) подтвердили, что поглощение микроволнового сигнала в нашей

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018









измерительной ячейке растет при повышении температуры объекта независимо от способа его нагревания.

Ранее нами были получены аналогичные результаты в экспериментах с суспензиями липидов в плоских кюветах [25]. В качестве модели исследований мы использовали мембраны из насыщенных фосфолипидов – димиристоиллецитина (ДМЛ) и ДПЛ с температурами фазовых переходов (гель-жидкий кристалл) в области 25 и 42 °С соответственно. Гистерезис, обнаруживаемый по светорассеянию при переходе гель-жидкий кристалл и обратно, оказывается при КВЧ-нагреве примерно в два раза более узким, чем при обычном ИК-нагреве. Наблюдаемое в экспериментах изменение температуры средней точки фазового перехода модельной биологической мембраны при КВЧ-нагреве можно связать с нагревом липосомы как извне, так и изнутри, в отличие от ИК-нагрева, когда мембрана греется только снаружи, причем размытость фазового перехода обусловлена плохим теплообменом между водой и мембраной липосомы.

Известно, что кооперативные перестройки легче всего проявляются при изменении температуры среды. Как оказалось, это свойство биологических мембран в физиологическом интервале температур — универсальная способность поддерживать жизнедеятельность клеток. Пороговый характер ответа на физический стимул представляется целесообразным для живой системы, так как ее помехоустойчивость по отношению к внешним сигналам возрастает и создаются условия для адекватного ответа при незначительном изменении интенсивности физического воздействия, превышающего некоторый порог [26].

Температура окружающей среды, при которой происходит микроволновое облучение биологического объекта, может быть близка к температуре фазового перехода углеводородных цепей фосфолипидов, из которых состоят биологические мембраны. Тогда повышение температуры даже на 0,2 °C в процессе облучения может привести к новому фазовому состоянию фрагмента мембраны, например белок-липидного комплекса, и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом. Таким образом, при воздействии микроволновым излучением на биологические структуры, находящиеся вблизи точки фазового перехода, достигается эффект дистанционного управления функциональной активностью клетки. Следует также отметить, что незначительное изменение температуры биообъекта, при котором наблюдается фазовый переход в рассматриваемом случае, не всегда может быть надежно зафиксировано измерительным прибором и эффект микроволнового излучения будет ложно истолкован как «нетепловой». В работе [27] был недавно предложен механизм нарушения барьерных функций мембран за счет кооперативных структурных фазовых перестроек фосфолипидного бислоя при термолизующем действии КВЧ-излучения «нетепловых уровней», которое способствует проникновению внутрь липосом веществ, активирующих перекисное окисление липидов (ПОЛ) мембран.

Измерение ХЛ изолированных нейтрофилов, ресуспендированных в плазме, доказало, что усиление активации нейтрофилов при КВЧ-облучении не опосредовано другими клетками крови или тромбоцитами. Мы показали также, что КВЧ может слабо, но достоверно усиливать функциональный ответ миелопероксидазы — важного белка мембран нейтрофилов, который способен продуцировать ROS (активные формы кислорода). Таким образом, наши исследования [28] показали, что КВЧ усиливает ответ нейтрофилов на индуктор активации в цельной крови, увеличивая продукцию ROS в крови.

Ускорение переноса биологически важных веществ в примембранных водных слоях при действии КВЧ-излучения

Простые опыты с наблюдением движения в воде «тушевых нитей» вблизи вертикальной стенки кварцевой кюветы или размытие границы «сахароза-вода» при КВЧ-облучении обнаружили перемешивание водных слоев вблизи поверхности, на которую падает излучение.

Исследование профиля температуры, образующегося при облучении тонких слоев воды оптическими методами, показало, что распределение температуры при поглощении КВЧ-излучения указывает на движение жидкости.

В наших экспериментах наблюдался конвективный «факел» в середине кюветы при ППМ 20 мВт/см². Механизм конвективного движения в этом случае, очевидно, термогравитационный, т. е. связан со всплыванием нагретых элементов жидкости.

Существенно иной характер имеет неустойчивость тонких слоев воды, в которых доминирующее влияние оказывает термокапиллярный эффект (межфазная конвекция). Высокое поглощение воды и, следовательно, малая глубина проникновения КВЧ-излучения приводят к тому, что вся падающая мощность поглощается в тонком слое, т. е. в воде появляются градиенты температуры. Можно было видеть, как более светлый слой, температура которого повышена в результате поглощения КВЧ-излучения, начинает растягиваться по поверхности, вовлекая в движение жидкость по всей кювете. Излучение падало в данном случае через боковую стенку кюветы. Однако в любом случае при поглощении водой КВЧ-излучения появление градиента температур вызывает градиент поверхностного натяжения и, следовательно, движение жидкости в поверхностном слое [29].

Для количественной оценки порога конвекции в условиях КВЧ-облучения мы использовали полярографический метод, основанный на том, что предельный диффузионный ток разряда на электроде какого-либо иона определяется скоростью его поступления к поверхности электрода [30].

Результаты экспериментов свидетельствуют о возрастании полярографического тока для O_2 при КВЧ-облучении приэлектродного слоя. В системе с вытеснением кислорода воздуха аргоном эффект КВЧ проявлялся гораздо ярче. Оказалось, что КВЧ-облучение при плотности потока мощности 1 мВт/см² ускоряет нарастание концентрации O_2 в растворе почти в два раза. Таким образом, следует ожидать, что под действием КВЧ-излучения может увеличиваться скорость пассивного переноса ионов и молекул в водных средах за счет изменения гидродинамической устойчивости.

С учетом вышесказанного, можно попытаться объяснить эффекты КВЧ-излучения в экспериментах с участием химических реакций в мембранах, учитывая возможность ускорения доставки реагентов к месту реакции.

Например, скорость накопления продуктов ПОЛ в суспензии липосом. В результате окисления фосфолипидов увеличивается проницаемость мембран для ионов и других важных биологических веществ (один из механизмов патологии клетки).

Независимо от способа инициирования окисления, КВЧ-излучение приводило к ускорению процессов ПОЛ и дозовая зависимость имела пороговый характер от значений ниже 1 мВт/см². Предполагается, что данный эффект связан с увеличением скорости доставки кислорода к месту реакции ПОЛ [31].

От сферических моделей липидных мембран перейдем к плоской бислойной липидной мембране (БЛМ), которая дает возможность регистрировать транспортные процессы в мембранных системах непосредственно при КВЧ-облучении.





Как известно, сопротивление потоку вещества, проникающего через мембранную систему, определяется проницаемостью не только мембраны, но и примембранных водных слоев. Модифицирование мембраны валиномицином может создать такие условия для транспорта ионов К⁺, при которых лимитирующей стадией переноса будут примембранные водные слои. Так, было показано увеличение проводимости БЛМ, модифицированной валиномицином, при включении КВЧ-излучения, и это увеличение проводимости полностью обратимо при выключении облучения. В то же время БЛМ без модификатора оказалась нечувствительной к действию КВЧ-излучения [32].

Более сложной системой для изучения мембранного транспорта является препарат кожи лягушки, предназначенный для перекачивания ионов Na^+ с ее внешней стороны на внутреннюю. Ионы Na^+ , пассивно диффундируя в клетки с внешней стороны по электрохимическому градиенту, затем перекачиваются к внутренней стороне кожи с помощью специального фермента $Na-K-AT\Phi$ -азы. Процесс переноса сопровождается генерацией разности потенциалов между изолированными растворами с двух сторон кожи, которая и является показателем скорости процесса переноса.

Включение КВЧ-облучения приводило к ускорению переноса Na^+ , о чем можно было судить по увеличению разности потенциалов на коже. При увеличении интенсивности излучения эффект возрастал. Таким образом, можно предположить, что и в данном случае ускорение переноса ионов Na^+ через кожу лягушки связано с увеличением пассивной диффузии этих ионов под действием КВЧ-излучения.

Исследовалось также действие КВЧ-излучения на УФ-фотолиз дрожжевых клеток. Было обнаружено, что КВЧ-излучение низкой интенсивности увеличивает выход из клеток в среду продуктов нуклеопротеидной природы с максимумом поглощения 260 нм [33]. Дозовая зависимость показывает проявление эффекта при интенсивности облучения порядка 1 мВт/см² и отсутствие зависимости от мощности излучения при интенсивности 10 мВт/см². Возможно, в данном случае ускорение лизиса при фотохимическом процессе связано с ускорением процесса переноса продуктов реакции в водной фазе под действием КВЧ-излучения. В пользу такого предположения свидетельствуют данные о таком же увеличении лизиса дрожжевых клеток при механическом перемешивании суспензии, а также имеющиеся литературные сведения о важности гидродинамических эффектов при фотолизе везикулярных структур.

Следует отметить, что первые результаты экспериментов по изучению конвективного движения водных растворов при поглощении КВЧ-излучения были получены сотрудниками нашей биофизической группы под научным руководством академика Н. Д. Девяткова еще в начале восьмидесятых годов прошлого века [34–35]. В дальнейшем эти результаты были подтверждены и развиты в работах специалистов из Филадельфийского центра биомедицинской физики [36].

Микроволновое излучение усиливает пероксидазную активность суt с в мембранах митохондрий

Известно, что окислительный стресс играет существенную роль при патологических процессах (ишемии, воспалении), токсических воздействиях и т. п. В тканях окислительный стресс приводит к гибели клеток, основным механизмом которой является апоптоз (процесс программируемой клеточной гибели). Механизмы запуска апоптоза, вызванного стрессом, чрезвычайно разнообразны, однако все эти механизмы сходятся на уровне митохондрии и индуцируют





2(537).indd 68

выход суt c из митохондрий в цитозоль (митохондриально-зависимый апоптоз) [37]. Эта необратимая стадия развития апоптоза приводит к запуску каскада протеолитических ферментов и деградации клетки. Считается, что выходу суt c в цитозоль предшествует перераспределение кардиолипина в мембранах митохондрии и образование комплексов суt c / кардиолипин (КЦ-комплексов). КЦ-комплекс характеризуется высокой пероксидазной активностью и катализирует накопление гидроперекиси кардиолипина, которая, в свою очередь, необходима для образования пор во внешней мембране митохондрии и выхода проапоптотических белков (включая суt c) в цитозоль.

Результаты нашей экспериментальной работы показали, что микроволновое излучение усиливает пероксидазную активность сут c и его КЦ-комплекса [38].

Известно, что водорастворимая флуоресцентная молекула Амплекс красный (AR) сравнительно устойчива в буфере и почти не окисляется в присутствии сут c или $\mathrm{H_2O_2}$. Воспроизведенные нами экспериментальные результаты подтверждают это, а также то, что комбинация сут c и перекиси водорода вызывает заметное окисление AR. Однако в присутствии липосом, содержащих кардиолипин (т. е. при образовании КЦ-комплексов), степень окисления AR многократно усиливается.

Микроволновое излучение вызывает усиление окисления AR в присутствии сут c и ${\rm H_2O_2}$. Это усиление оксидазной активности заметно как в присутствии разных липосом, так и без них, однако абсолютная величина эффекта наиболее выражена в присутствии кардиолипина.

Таким образом, мы показали, что микроволновое излучение при длине волны 7,7 мм не влияет (или сравнительно мало влияет) на окислительные процессы, индуцируемые глобулярной формой сут c. В то время как оксидазная активность КЦ-комплексов на 1-2 порядка превышала активность свободного сут c и в ещё большей степени усиливалась под действием микроволнового излучения.

Как было отмечено выше, взаимодействие ${\rm cyt}\,c$ с ${\rm H_2O_2}$ играет важную роль при развитии апоптотических процессов в митохондриях. Суть явления заключается в том, что при взаимодействии ${\rm cyt}\,c$ с некоторыми отрицательно заряженными липидами (как, например, кардиолипин) наблюдается увеличение пероксидазной активности у комплекса ${\rm cyt}\,c$ / анионный липид, и связано это явление с тем, что усиливается взаимодействие ионов железа ${\rm c}\,{\rm H_2O_2}$.

КЦ-комплекс представляет интерес с точки зрения взаимодействия с микроволновым излучением. Во-первых, он находится на границе раздела фаз липид-вода и катализирует окислительно-восстановительные реакции в обеих фазах. Следовательно, простое усиление конвекции за счёт поглощения микроволнового излучения водой может повлиять на кинетику ферментативной реакции [39–40].

Во-вторых, белок в КЦ-комплексе находится в состоянии расплавленной глобулы и, следовательно, может иметь максимумы поглощения в очень широком диапазоне частот [41]. Поглощение микроволнового излучения глобулой может влиять на её конформационное состояние, а значит, на каталитическую активность гема.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что КЦ-комплекс является потенциальной мишенью для микроволнового излучения, которое усиливает его пероксидазную активность и может повышать смертность клеток при коинкубации их с индукторами апоптоза. Мы предполагаем, что микроволновая активация КЦ-комплекса может лежать в основе механизма повышения смертности клеток, находящихся в состоянии патологии, под действием этого излучения. Кроме того, активация этого комплекса микроволновым излучением в клетках

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018





может повысить чувствительность клеток к апоптотическим (в том числе противораковым) агентам и позволит моделировать ответ клеток на различные воздействия. Это может быть использовано для лечения онкологических заболеваний, инфаркта миокарда и многих других патологий.

2.2. Мембранный механизм активации фагоцитарных клеток импульсами электрического поля

В качестве объекта исследования использовалась суспензия нейтрофилов крови человека, в которой нами были обнаружены признаки электроактивации высоковольтными импульсами электрического поля микросекундной длительности.

В результате изучения механизма этого явления было установлено, что под действием электрического поля в мембранах клеток открываются поры, которые существуют десятки секунд и способствуют проникновению из среды в цитоплазму ионов Ca²⁺. Результаты измерений внутриклеточной концентрации свободного кальция и накопления общего кальция в нейтрофилах при электропорации импульсом длительностью 50 мкс с различной амплитудой показали, что ионы Ca²⁺ проникают в клетки, если амплитуда электрического поля превышает значение 1 кВ/см. Значение скачка концентрации тем выше, чем больше амплитуда приложенного импульса, и достигает при 5 кВ/см значения около 1300 нМ. В то же время общее количество поступающего кальция на одну клетку достигает 1,2 фмоль и соответствует значениям, характерным для физиологической активации [42].

Для определения времени жизни пор в мембранах электропорированных нейтрофилов к суспензии клеток добавляли изотоп ⁴⁵Са через разные интервалы времени после электрического пробоя. Очевидно, что зависимость поглощения клетками меченого кальция от времени должна отражать процесс залечивания пор.

Для оценки среднего размера единичной поры использовали ряд меченых флуоресцентным красителем Texas Red декстранов различной молекулярной массы (3, 10 и 40 кДа). Было показано, что декстран в 3 кДа проникает в клетки при амплитуде импульса 2 кВ/см и выше, декстран в 10 кДа — при амплитуде выше 5 кВ/см. В то же время при инкубировании нейтрофилов с декстраном в 40 кДа повышение напряжения вплоть до 9 кВ/см не приводит к достоверному увеличению флуоресценции осадка. Зная размер молекул декстрана, можно оценить радиус пор как снизу — при амплитуде 2 кВ/см и 5 кВ/см — 1,4 нм и 2,3 нм соответственно, так и сверху — при амплитуде 9 кВ/см — не более 4,3 нм [43].

Результаты наших экспериментов показали, что для регистрации XЛ-ответа при электростимуляции нейтрофилов присутствие в среде ионов кальция Ca^{2+} является обязательным. На основании этого факта можно предположить, что в результате электропорации биологических мембран внутрь клеток попадают двухвалентные ионы кальция, которые и запускают стереотипные физиологические реакции клеток, продукты которых и вызывают сверхслабое свечение, регистрируемое хемилюминометром.

Итак, явление электростимуляции нейтрофилов связано с увеличением селективной проницаемости мембран клеток в результате пробоя и образования пор с временем жизни в десятки секунд. За это время из среды в цитоплазму попадают ионы кальция, включающие стереотипные физиологические реакции клетки.

Хемилюминесценция является результатом стимуляции кислородного метаболизма клеток и не отличается от реакции клеток на контакт с чужеродными частицами или от действия специфических биохимических стимуляторов.





Результаты экспериментальной работы, выполненной при участии наших сотрудников, позволили сделать вывод о том, что активация фагоцитарной активности нейтрофилов высоковольтными импульсами электрического поля может быть использована для определения фагоцитарной активности клеток в микрообъемах цельной крови. Следует отметить, что цельная кровь как диагностический материал гораздо более доступна, чем ткани, в которых локализован патологический процесс. В последнем случае необходимо проведение биопсии, что достаточно сложно и требует знания локализации процесса. Анализ крови в этом случае позволяет оценить состояние всех тканей и организма в целом. Например, ХЛ-ответ лейкоцитов в крови резко снижается при таких заболеваниях, как агранулоцитоз и генетический дефект фермента миелопероксидазы. По кинетике люминесценции иммунных клеток крови можно выявить наличие аллергической сенсибилизации, пневмокониоза, а также обнаружить угнетение иммунологической реактивности в случае онкологических заболеваний [44].

Экспериментальные результаты, полученные в наших исследованиях, показывают различную реакцию XЛ электропорированных нейтрофилов больных и здоровых людей при добавлении в суспензию клеток анальгина. Эффект проявлялся в различной степени ингибирования этим лекарством XЛ-нейтрофилов крови доноров и больных с непереносимостью противовоспалительных препаратов.

Изучение механизма этого эффекта показало, что анальгин является хорошим перехватчиком гидроксильных радикалов и гипохлорит-ионов. Добавление плазмы крови к системе, содержащей электроактивированные нейтрофилы и анальгин, снижает эффект тушения ХЛ анальгином. Это явление можно объяснить связыванием анальгина с белками плазмы. Сравнение зависимостей ингибирования ХЛ-клеток и молекулярных соединений, генерирующих свободные радикалы, от концентрации анальгина показывает, что, в отличие от суспензии нейтрофилов, в модельных системах наблюдается тушение ХЛ до нуля. В этом заключается важный методический результат нашей работы: возможность с помощью анальгина дифференцированно изучать внеи внутриклеточную ХЛ фагоцитирующих клеток.

Таким образом, полученные в данной работе результаты позволяют создавать методы диагностики больных с непереносимостью противовоспалительных препаратов, таких, как аспирин, анальгин, индометацин и др., в лабораторных условиях in vitro, т. е. до использования препарата для лечения больных.

Известно, что пробой мембран достигается не только внешней разностью потенциалов, приложенной к клетке, но и диффузионным потенциалом, генерируемым самой мембраной [45].

К исследованию механизмов подобных эффектов можно отнести экспериментальную работу по изучению воздействия золотых наночастиц на липидную модель клеточной мембраны, в результате которой было обнаружено увеличение мембранной проводимости для наночастиц [46]. В данном эксперименте применялся метод нейтронной рефлектометрии, позволяющей вести наблюдение слоя липидов без его разрушения. Использовались наночастицы золота (диаметром 2 нм) двух типов. К поверхности одних прикреплялась катионная группа, а к другим — анионная. В итоге выяснилось, что реакция мембраны на наночастицы с разным зарядом радикально отличается. Катионные наночастицы проникали через мембрану, дестабилизируя её структуру. Анионные наночастицы, наоборот, не преодолевали мембрану и даже затрудняли её структурные изменения в условиях повышенного рН.

Объяснить наблюдаемые эффекты дестабилизации клеточных мембран с участием металлических заряженных наночастиц мы попытались с помощью теории электрического пробоя [47].

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

Чрезвычайное сходство феноменологии пробоя клеточных и искусственных мембран указывает на то, что при электрическом пробое биомембран процесс образования и развития проводящих дефектов происходит в липидном бислое.

Теоретический анализ изменения энергии сферической везикулы с порой при диффузионной разности потенциалов показал, что в условиях, близких к реальным, диффузионный пробой носит обратимый характер, т. е. пора с течением непродолжительного времени закрывается, чтобы вновь открыться после достижения пороговой разности концентраций заряженных частиц во внутри- и внеклеточной среде.

Известно, что в основе патологических процессов, связанных с неспецифическим увеличением проницаемости мембран, лежат четыре фундаментальных механизма: 1) перекисное окисление липидов в мембранах; 2) активация мембранных фосфолипаз; 3) растяжение мембран в результате осмотического набухания везикулярных структур; 4) аномальная адсорбция белков на мембране [48].

К этому списку теперь можно добавить, согласно нашим представлениям, и механизм адсорбции наночастиц металлов на клеточной мембране.

Связывание наночастиц металла с клеточной мембраной должно приводить к снижению поверхностного натяжения последней и соответственно к понижению энергетического барьера порообразования, а также наведению дополнительного локального электрического поля (увеличению мембранного потенциала).

Механизм уменьшения потенциала пробоя состоит в снижении потенциального барьера образования пор, которое может происходить за счет, во-первых, изменения поверхностного натяжения мембраны и энергии изгиба кромки поры, во-вторых – увеличения поверхностного заряда мембраны (при адгезии заряженных наночастиц), а значит, увеличения напряженности внутримембранного электрического поля. В наших предварительных экспериментах мы обнаружили модификацию активности клеток крови при добавлении в суспензию наночастиц золота [49], а в других опытах – наночастиц серебра [50].

Влияние наночастиц золота размером 60 нм на систему гемостаза человека проявлялось в активации тромбоцитов и нейтрофилов. Экспериментально установлено влияние наночастиц серебра размером 25 нм на активацию клеток иммунной системы (нейтрофилов), которая сопровождается образованием активных форм кислорода. Установлен также антиагрегационный эффект этих наночастиц при действии на тромбоциты.

Результаты этих экспериментов показывают роль золотых и серебряных наночастиц, которая заключается в изменении поверхностного заряда на мембранах клеток крови, тем самым меняя их поверхностный мембранный потенциал, что, согласно приведенному выше механизму электропорации клеток, стимулирует проводимость мембранной системы за счет образования пор с соответствующими физиологическими последствиями. С этой точки зрения можно рассматривать результаты работы [51], в которой показана роль наночастиц серебра и переменного электрического поля в уничтожении патогенных клеток с помощью механизма электропорации мембран.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в обзоре результаты экспериментальных работ позволяют сделать вывод о том, что биологические мембраны в качестве первичных рецепторов оказались чувствительными во всех исследованных диапазонах длин волн ЭМП: импульсов электрического поля, КВЧ-излучения и лазерного излучения в видимом диапазоне.





Действие КВЧ-излучения низкой интенсивности имеет тепловой характер даже при незначительном повышении температуры объекта, которая не всегда может быть зарегистрирована техническими средствами. К этим эффектам относятся фазовые переходы (гель – жидкий кристалл) в мембранах и конвекция у границы раздела фаз (мембрана – вода). Действие КВЧ ускоряет перенос ионов и других важных биологических веществ через мембранные системы и ускоряет биохимические реакции в гетерогенных системах с соответствующими физиологическими последствиями.

Комплекс цитохром c — кардиолипин в мембранах митохондрий является потенциальной мишенью для КВЧ-излучения, которое усиливает его пероксидазную активность и может повышать смертность клеток, находящихся в состоянии патологии, при коинкубации их с индукторами апоптоза.

КВЧ-излучение усиливает функциональный ответ миелопероксидазы — важного белка мембран нейтрофилов, который способен продуцировать ROS. Таким образом, КВЧ-излучение стимулирует ответ нейтрофилов на индуктор активации в цельной крови, увеличивая продукцию ROS в крови.

Стимуляция клеток импульсами электрического поля приводит к увеличению селективной проницаемости мембран клеток в результате пробоя и образования пор с временем жизни в десятки секунд. За это время из среды в цитоплазму попадают ионы кальция, включающие стереотипные физиологические реакции клетки. Обнаружение этого эффекта позволило предложить методики определения иммунного статуса организма и определения непереносимости некоторых лекарств больными, а также создать приборы для учреждений медико-биологического профиля, реализующие эти методики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Kottou, S.** How safe is the environmental electromagnetic radiation? / S. Kottou, D. Nikolopoulos, E. Vogiannis, D. Koulougliotis, E. Petraki // J. Phys. Chem. Biophys. 2014. Vol. 4. P. 146.
- 2. **Vian, A.** Plant risponses to high frequency electromagnetic fields / A. Vian, E. Davies, M. Gendraud, P. Bonnet // Biomed research international. 2016. Article ID 1830262, 13 p.
- 3. **Ордынская, Т. А.** Волновая терапия / Т. А. Ордынская, П. В. Поручиков, В. Ф. Ордынский. М.: Эксмо, 2008. 496 с.
- 4. **Мырзабаева, Н. А.** Применение лазеро- и КВЧ-пунктуры в эрадикационной терапии больных с функциональной диспепсией, ассоциированной с Helicobacter pylori / H. А. Мырзабаева // Терапевтический вестник. -2009. -№ 4 (24). -C. 48 49.
- 5. **Teppone, M.** Extremely high-frequency therapy in oncology / M. Teppone, R. Avakyan // J. Altern. Complement Med. 2010. Vol. 16 (11). P. 1211 1216.
- 6. **Лихачева, А. А.** Влияние СВЧ-излучения на почвенные стрептомицеты / А. А. Лихачева, А. С. Комарова, А. А. Лукьянов, М. В. Горленко, А. С. Терехов // Почвоведение. -2006. -№ 8. C. 951 955.
- 7. **Лихачева, А. А.** Влияние СВЧ-излучения на физиологические характеристики культур актиномицетов и бактерий / А. А. Лихачева, А. А. Лукьянов, Г. М. Зенова, А. Х. Тамбиев // Почвоведение. − 2000. − № 5. − С. 31 35.
- 8. **Казаринов, К. Д.** Изучение механизмов действия электромагнитных полей в широком диапазоне длин волн на биомембранные системы / К. Д. Казаринов // Тезисы симпозиума «Проблемы медицинской биофизики», Москва, МГУ, 14–15 сентября, 2012. С. 84.
- 9. **Конев, С. В.** Структурная лабильность биологических мембран и регуляторные процессы / С. В. Конев. Минск: Наука и техника, 1987. 240 с.
- 10. **Крепс, Е. М.** Фосфолипиды клеточных мембран нервной системы в развитии животного мира / Е. М. Крепс; под ред. академика А. И. Опарина. Л.: Наука, Ленингр. отд. Баховские чтения. АН СССР. Ин-т биохимии им. А. Н. Баха. 1967. 76 с.



- 11. **Ch**
- 11. **Chen, C. I.** Membrane electroporation theories: a review / C. I. Chen, S. W. Smye, M. P. Robinson, J. A. Evans // Med. Biol. Eng. Comput. 2006. Vol. 44 (1–2). P. 5 14.
- 12. **Пучкова, Т. В.** Снижение электрической прочности как основной механизм нарушения барьерной функции мембран / Т. В. Пучкова, А. В. Путвинский, Ю. А. Владимиров // ДАН СССР. 1983. Т. 270. С. 1489 1492.
- 13. **А. с. 1433189 РФ.** Способ активации фагоцитарной активности in vitro / Ю. А. Владимиров, В. А. Казаманов, К. Д. Казаринов, А. В. Путвинский, В. С. Шаров.
- 14. **Мачнева, Т. В.** Изучение действия низкоинтенсивного лазерного излучения синего, зеленого и красного диапазонов на процесс заживления экспериментальных кожных ран у крыс / Т. В. Мачнева, Д. М. Протопопов, Ю. А. Владимиров, А. Н. Осипов // Биофизика. 2008. Т. 53, вып. 5. С. 894 901.
- 15. **Осипов, А. Н.** Регуляция пероксидазной активности цитохрома c с помощью оксида азота и лазерного излучения / А. Н. Осипов, Г. О. Степанов, Ю. А. Владимиров, А. В. Козлов, В. Е. Каган // Биофизика. 2006. Т. 71, вып. 10. С. 1392 1398.
- 16. **Борисенко, Г. Г.** Нитрозильные комплексы цитохромов митохондриальной цепи первичные хромофоры в механизме фотоактивации дыхания / Г. Г. Борисенко, С. С. Постнов, А. Н. Осипов, К. Д. Казаринов, Ю. А. Владимиров // Биологические мембраны. -2002. T. 19. C. 379 391.
- 17. **Le Quément, C. I.** Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression / C. I. Le Quément, C. N. Nicolaz, D. Habauzit, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. Le Dréan // Bioelectromagnetics. 2014. Vol. 35, Issue 6. P. 444 451.
- 18. **Zilberti, L.** Parametric analysis of transient skin heating induced by terahertz radiation / L. Zilberti, A. Arduino, O. Bottauscio, M. Chiampi // Bioelectromagnetics. 2014. Vol. 35 (5). P. 314 323.
- 19. **George, D. F.** Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding / D. F. George, M. M. Bilek, D. R. McKenzie // Bioelectromagnetics. 2008, May. Vol. 29 (4). P. 324 330.
 - 20. Тучин, В. В. Основы лазерной медицины. Изд. 2. Гл. 1. Основы лазерной биомедицины / В. В. Тучин. С. 13.
- 21. **Schwan, H. P.** Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields: AC-field induced ponderomotoric forces / H. P. Schwan // Br. J. Cancer Suppl. Mar. 1982. No 5. P. 220 224.
- 22. **Adair, R. K.** Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation / R. K. Adair // Bioelectromagnetics. 2003. Vol. 24, No 1. P. 39 48.
- 23. **Foster, K. R.** Thermal and nonthermal mechanisms of iteraction of radio-frequency energy with biological systems / K. R. Foster // IEEE transaction on plasma science. 2000. Vol. 28, No 1. P. 15 23.
- 24. **Казаринов, К.** Д. Исследование поглощения микроволнового излучения тонким полиэтиленовым капилляром, заполненным суспензией липосом / К. Д. Казаринов, А. В. Летяева, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. -2013. -№ 1 (516). -C. 48 54.
- 25. **Казаринов, К. Д.** Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности / К. Д. Казаринов // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. 1990. Т. 27. 102 с.
- 26. **Конев, С. В.** Структурная лабильность биологических мембран и регуляторные процессы / С. В. Конев. Минск: Наука и техника, 1987. 240 с.
- 27. **Казаринов, К.** Д. Влияние ЭМИ низкой интенсивности микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. -2018.-Вып. 1 (536). С. 60-68.
- 28. **Vlasova, I. I.** Extremely high frequency electromagnetic radiation promotes neutrophil antimicrobial activity / I. I. Vlasova, E. V. Mikhalchik, A. A. Gusev, N. G. Balabushevich, S. A. Gusev and K. D. Kazarinov // Bioelectromagnetics. February 2018. Vol. 39, Is. 2. P. 144 155.
- 29. **Андреев, В. Е.** Использование в биохимическом эксперименте явления межфазной конвекции в водных растворах при поглощении КВЧ-излучения / В. Е. Андреев, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2007. № 2. С. 35 41.
- 30. **Борисенко, Г. Г.** Использование гидродинамической неустойчивости при микроволновом облучении жидких сред в биохимическом эксперименте / Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. -2007. -№ 1. -C. 98 106.
- 31. **Казаринов, К.** Д. Изучение биологического действия микроволнового излучения с помощью хемилюминесцентного метода / К. Д. Казаринов, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. -2010. -№ 2. -C. 57 71.
 - 32. Kazarinov, K. D. Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation /







- K. D. Kazarinov, A. V. Putvinsky, V. S. Malinin // Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Plenum publishing corporation. N.Y. 1999. P. 441 444.
- 33. **Борисенко, Г. Г.** Биологические мембраны первичные мишени рецепции электромагнитных полей в медико-биологическом эксперименте / Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. -2007. -№ 4. -C. 25-37.
- 34. **Шаров, В. С.** Ускорение перекисного окисления липидов под действием электромагнитного излучения мм-диапазона / В. С. Шаров, К. Д. Казаринов, В. Е. Андреев, А. В. Путвинский, О. В. Бецкий // Биофизика. 1983. Т. 23. С.146 147.
- 35. **Казаринов, К.** Д. Влияние непрерывного миллиметрового излучения низкой интенсивности на транспорт ионов в коже лягушки / К. Д. Казаринов, В. С. Шаров, А. В. Путвинский, О. В. Бецкий // Биофизика. 1984. Т. 29, № 3. С. 480 482.
- 36. **Khizhnjak**, **E. P.** Temperature oscillation in liquid media caused by continuous (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation / E. P. Khizhnjak, C. Ziskin // Bioelectromagnetics. 1996. Vol. 17. P. 223 229.
- 37. **Bergstrom, C. L.** Cytochrome *c* causes pore formation in cardiolipin-containing membranes / C. L. Bergstrom, P. A. Beales, Y. Lv, T. K. Vanderlick, J. T. Groves // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2013. Vol. 110 (16). P. 6269 6274.
- 38. **Казаринов, К.** Д. Влияние ЭМИ низкой интенсивности микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. -2018.-Вып. 1 (536). С. 60-68.
- 39. **Казаринов, К.** Д. Роль клеточных мембранных систем в рецепции электромагнитных полей КВЧ-диапазона биологическими объектами / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. -2008. -№ 1. -ℂ. 42-55.
- 40. **Казаринов, К.** Д. Изучение действия КВЧ-излучения на скорость биохимических реакций / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // 5-й Международный конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», симпозиум А: «Новые методы и приборы», Санкт-Петербург. 2009. С. 11.
 - 41. Ptitsyn, O. B. Protein folding / Ed. T.E. Creighton. New York: W. H. Freeman & Co., 1992. P. 243 300.
- 42. **Малинин, В. С.** Аккумуляция кальция во внутриклеточных депо нейтрофилов человека при пермеабилизации электрическим пробоем / В. С. Малинин А. В. Путвинский, К. Д. Казаринов // Биологические мембраны. 1995. Т.12, вып. 4. С. 445 446.
- 43. **Малинин, В. С.** Механизм активации нейтрофилов крови человека импульсами электрического поля / В. С. Малинин, А. В. Путвинский, К. Д. Казаринов // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 876 886.
- 44. **Путвинский, А. В.** Электрический пробой мембран эритроцитов за счет диффузионной разности потенциалов / А. В. Путвинский, С. А. Попов, Т. В. Пучкова, Ю. А. Данилов, Ю. А. Владимиров // Биофизика. 1983. Т. 28, вып. 3. С. 505 506.
- 45. **Malinin, V. S.** Calcium dependent activation of human blood neutrophils electric fields pulses / V. S. Malinin, A. V. Putvinsky, K. D. Kazarinov // Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Plenum Publishing Corporation, N.Y., 1999. P. 569 572.
- 46. **Tatur, S.** Effect of functionalized gold nanoparticles on floating lipid bilayers / S. Tatur, M. Maccarini, R. Barker, A. Nelson and G. Fragneto // Langmuir. 2013. Vol. 29 (22). P. 6606 6614.
- 47. **Казаринов, К.** Д. Изучение возможности применения наночастиц в СВЧ-онкотермии / К. Д. Казаринов, О. А. Баранова, И. Г. Полников, А. В. Чеканов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 1(532). С. 54 64.
- 48. **Пучкова, Т. В.** Снижение электрической прочности как основной механизм нарушения барьерной функции биомембран / Т. В. Пучкова, А. В. Путвинский, Ю. А. Владимиров // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 6. С. 1489 1492.
- 49. **Chekanov, A. V.** Influence of gold nanoparticles on activation of human blood neutrophils / A. V. Chekanov, O. A. Baranova, A. D. Levin, E. Yu. Solov'eva, A. I. Fedin, K. D. Kazarinov // Biophysics. May 2013. Vol. 58, Issue 3. P. 385 388.
- 50. **Чеканов, А. В.** Влияние наночастиц серебра на активацию нейтрофилов / А. В. Чеканов, З. Ю. Соловьева, А. В. Бабушкин, В. П. Мудров, М. В. Стамм, О. А. Баранова, А. И. Федин, К. Д. Казаринов // Медицинский алфавит. Совр. лаборатория. -2014. -№ 4. -C. 50 53.
- 51. **Dolat, O. Rajabi.** Silver nanoparticles and electroporation: their combinational effect on Leishmania major / O. Rajabi Dolat, S. S. Salarabadi, S. Yadegari-Dehkordi, A. Sazgarni // Bioelectromagnetics. 2015. Vol. 36 (8). P. 586 596.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

Статья поступила 4 апреля 2018 г.





ЭКОНОМИКА

УДК 338.242

ПРАКТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОСОБЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОН ТЕХНИКО-ВНЕДРЕНЧЕСКОГО ТИПА КАК ПРООБРАЗА ИННОВАЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ В СФЕРЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ 1

М. В. Чекаданова

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

И. Н. Каштанов

Московский педагогический государственный университет

Проанализированы экономические, административные и инфраструктурные условия работы резидентов в особых экономических зонах технико-внедренческого типа (ОЭЗ ТВТ), риски, из-за которых может замедлиться прогресс в развитии ОЭЗ ТВТ, а также обстоятельства, позволяющие поставить знак равенства между понятиями ОЭЗ ТВТ и инновационный кластер.

КС: <u>особая экономическая зона технико-внедренческого типа, инновационный кластер, сфера высоких технологий</u>

PRACTICE OF THE FORMATION OF SPECIAL ECONOMIC ZONES OF TECHNICAL AND IMPLEMENTATION TYPE AS PROTOTYPE OF INNOVATION CLUSTERS IN THE SPHERE OF HIGH TECHNOLOGIES

M. V. Chekadanova

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

I. N. Kashtanov

Moscow pedagogical state university

The article analyzes the economic, administrative and infrastructure conditions of residents' work in special economic zones of technical and implementation type, the risks that may slow down the progress in the development of the TIT SEZ, as well as the circumstances that allow to put an equal sign between the concepts of the TIT SEZ and innovation clusters.

Keywords: special economic zone of technical and implementation type, innovation cluster, sphere of high technologies

Одно из направлений поиска совершенных организационно-экономических структур, призванных обеспечить ускоренное инновационное развитие высокотехнологичных отраслей и производств, связано с появлением новой их формы – особых экономических зон (ОЭЗ). Таких зон предусмотрено четыре типа: промышленно-производственные, технико-внедренческие, портовые и туристические. На инновации ориентированы первые две из них. С момента принятия закона об ОЭЗ (2005 г.) [2] накоплен определенный опыт их функционирования, выявлены проблемы и «узкие места», намечены пути их решения [3–7]. Вместе с тем до настоящего времени остаются непроработанными вопросы соотношения данной организационной формы

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

2(537).indd 76

 $^{^{1}}$ При подготовке статьи использованы материалы [1], подготовленные под руководством и при непосредственном участии автора.

с кластерными инициативами, реализуемыми правительством в сфере инноваций и промышленного развития [8–10], пока не сложилось объективного мнения о потенциальной результативности мер поддержки инноваций в рамках ОЭЗ технико-внедренческого типа (ОЭЗ ТВТ).

Российские ОЭЗ ТВТ создавались как институт государственно-частного партнерства с целью интенсификации развития и коммерциализации отечественных инновационных технологий. Концепция ОЭЗ ТВТ состоит в развитии объектов инновационной инфраструктуры на специально выделенной территории, на которой резиденты из числа наукоемких компаний пользуются единой системой налоговых и финансовых льгот². Все услуги налоговых, таможенных и прочих служб осуществляются в режиме «единого окна». ОЭЗ ТВТ создаются сроком на 49 лет, что является оправданным в части гарантий государства потенциальным частным российским и зарубежным инвесторам, которые готовы инвестировать и совместно развивать новые инновационные технологии на выделяемых территориях. На текущий момент в России создано шесть ОЭЗ ТВТ: «Зеленоград», «Санкт-Петербург», «Дубна», «Томск», «Иннополис» (Татарстан) и «Исток» (Фрязино). Последние две ОЭЗ ТВТ были созданы сравнительно недавно (в 2012 и 2015 гг. соответственно) и находятся в стадии развития инфраструктуры. Остальные четыре ОЭЗ ТВТ уже имеют опыт деятельности и промежуточные результаты работы.

Каждая из ОЭЗ ТВТ располагается на территории от 60 до 311 га и состоит из одной или нескольких площадок. Только две из шести зон («Дубна» и «Исток») встроены в действующую инфраструктуру городов, в пределах которых они расположены (тип «браунфилд»³), остальные принадлежат к типу «гринфилд»⁴. ОЭЗ ТВТ «Исток» имеет самую малую по площади территорию по сравнению с другими ОЭЗ, что объясняется типом «браунфилд» и дефицитом свободных земельных участков в границах городской черты, где она расположена. Общие сведения по ОЭЗ ТВТ приведены в табл. 1.

Общая характеристика российских ОЭЗ ТВТ

Таблица 1

Наименование ОЭЗ ТВТ	Год получения статуса	Период действия, лет	Общая площадь, га	Тип	
«Зеленоград»	2005	49	127,0	Гринфилд⁵	
«Санкт-Петербург»	2005	49	129,4	Гринфилд	
«Дубна»	2005	49	187,7	Браунфилд	
«Томск»	2005	49	270,0	Гринфилд	
«Иннополис»	2012	49	311,4	Гринфилд	
«Исток»	2015	49	60,0	Браунфилд	

²В соответствии с Законом от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ ОЭЗ ТВТ представляет собой «часть территории Российской Федерации, на которой действует особый режим предпринимательской деятельности, а также может применяться таможенная процедура свободной таможенной зоны» [2].

2(537).indd 77



³«Браунфилд» (англ. «brownfield») – тип инвестиционной площадки, создаваемой на основе ранее существующих производственных площадок, как правило, обеспеченных строениями, сооружениями и инфраструктурой, в отношении которых проводится реконструкция и (или) капитальный ремонт.

⁴«Гринфилд» (англ. «greenfield») – тип инвестиционной площадки, не обеспеченный инфраструктурой.

⁵ОЭЗ ТВТ «Зеленоград» принадлежит, скорее, к смешанному типу, поскольку одна из площадок на момент получения статуса ОЭЗ находилась на территории НИУ «МИЭТ» с уже частично созданной инфраструктурой.

Каждая ОЭЗ ТВТ имеет свою определенную специализацию, которая либо сложилась исторически, еще в советский период, либо была определена стратегией развития региона («Иннополис») – рис. 1. Резидентам ОЭЗ ТВТ предоставляются особые условия для ведения бизнеса, отличные от условий, распространенных на остальной территории РФ. Все льготы и преференции, предоставляемые резидентам, можно свести к нескольким категориям:

– особый административный режим, реализованный в формате «одного окна», который значительно снижает типовые административные барьеры на этапе запуска нового или реформирования существующего бизнеса. Кроме того, для снижения административной нагрузки на бизнес предусмотрено осуществление органами государственного контроля контрольных мероприятий в отношении резидентов (за исключением таможенного и налогового контроля) исключительно в виде плановых комплексных проверок по согласованию с территориальным органом в течение срока, не превышающего 2 недель;



Рис. 1. Специализация резидентов ОЭЗ ТВТ

- создание новой или реконструкция существующей инфраструктуры преимущественно за счет федерального бюджета⁶. Инфраструктура ОЭЗ ТВТ включает в себя необходимые коммунальные и производственные коммуникации, административные здания, инжиниринговые центры и пр.;
- упрощенный миграционный режим в отношении иностранных граждан, привлекаемых к работе резидентами ОЭЗ ТВТ и отнесенных к категории высококвалифицированных специалистов законодательством [11];
- гарантии государства сроком на весь период действия ОЭЗ ТВТ, закрепленные трехсторонним договором между Минэкономразвития РФ, управляющей компанией (УК) и резидентом. Гарантии от неблагоприятного изменения законодательства о налогах и сборах также предусмотрены в Законе [2] и в части вступления РФ в ВТО. Кроме этого, гарантирована льготная оплата за технологическое присоединение к сетям в пределах 20 тыс. руб. за единицу;
- льготные расценки по аренде офисных и производственных площадей и выкупу земельных участков;
 - свободный таможенный режим с нулевыми ставками НДС и таможенных пошлин (табл. 2);





⁶Исключение составляет ОЭЗ ТВТ «Исток», инфраструктура которой уже создана или создается за счет средств «якорных» предприятий-резидентов.

Таблица 2

Нормы таможенного режима для резидентов ОЭЗ ТВТ

Фискальная норма	Описание льготы	Основание предоставления [2]	
Таможенные пошлины и НДС (импортные) при ввозе импортных сырья, материалов, комплектующих	Освобождение	Часть 1.1 ст. 37	
Акциз при ввозе импортных сырья, материалов, комплектующих	Ставки в соответствии с тарифами, утвержденными Таможенными орга- нами на территории РФ	Часть 1.2 ст. 37	
Таможенные пошлины и НДС (импортные) при ввозе сырья и материалов, комплектующих с других	Ставки в соответствии с тарифами, утвержденными Таможенными орга- нами на территории РФ	Часть 17 ст. 37	
территорий ОЭЗ или приобретении у лиц, не являющихся резидентами ОЭЗ	После уплаты пошлин и НДС таможенными органами производится возврат уплаченных налогов, если освобождение от уплаты ввозных таможенных пошлин и НДС предусмотрено при фактическом вывозе товаров, работ, услуг с таможенной территории РФ	Часть 17 ст. 37	
Таможенные пошлины и НДС (экспортные) на товары при продаже или предоставлении в аренду на территорию другой ОЭЗ	Освобождение	Часть 29 ст. 37	
Таможенные пошлины и НДС (экспортные) на товары при продаже или предоставлении в аренду на остальной территории РФ	Взимаются таможенные пошлины, НДС и акцизы по ставкам налогов, действующим на дату принятия таможенной декларации	Часть 19, часть 26 ст. 37	

– специальный налоговый режим, предусматривающий снижение налога на прибыль и отсутствие налогов на имущество, землю и транспорт и платежей с фонда отплаты труда в фонды. В налоговых льготах резидентов всех шести ОЭЗ ТВТ существует незначительная разница в силу особенностей регионального законодательства;

– иные способы повышения операционной эффективности предприятий-резидентов, включающие: возможность применения ускоренной амортизации основных средств (применение специального коэффициента к основной норме амортизации основных средств, но не выше 3, в отношении амортизируемых основных средств, используемых только для ведения научнотехнической деятельности); возможность признания расходов на НИОКР (в том числе не давших положительного результата), произведенных резидентами, в том отчетном (налоговом) периоде, в котором они были осуществлены, в размере фактических затрат.

Инфраструктуру ОЭЗ ТВТ можно разделить на несколько типов: базовую (основные ресурсы и коммуникации), инновационную (бизнес-инфраструктура) и таможенную. Успех развития ОЭЗ ТВТ напрямую зависит от степени функциональности готовой и создаваемой инфраструктуры



всех типов. Параметры базовой инфраструктуры определяются техническими условиями (ТУ) каждой отдельной ОЭЗ ТВТ на этапе эскизного проектирования. Все без исключения ОЭЗ ТВТ должны быть обеспечены стандартными коммуникациями: тепловая энергия, электроэнергия, водоснабжение, водоотведение, природный газ⁷.

Резиденты ОЭЗ ТВТ пользуются привилегиями приоритета в рассмотрении заявок на подключение и бесплатности самого подключения к коммуникациям. Это позволяет существенно экономить в структуре общего объема инвестиций в рамках проектов развития производства инновационной продукции. Таможенная инфраструктура ОЭЗ ТВТ должна обеспечивать действие режима свободной таможенной зоны, позволяющего осуществлять ввоз и вывоз товаров (оборудование, сырье, комплектующие, строительные материалы, готовая продукция) без уплаты таможенной пошлины и НДС. Инфраструктура, как правило, включает в себя несколько контрольно-пропускных пунктов, зон таможенного контроля, стоянку и специальную досмотровую площадку для транспортных средств. Основные операционные характеристики типичной таможенной инфраструктуры ОЭЗ ТВТ: время работы — 24/7; высокая оперативность оформления; временное бесплатное хранение товаров сроком до нескольких месяцев; консультирование в разработке индивидуальной схемы ведения внешнеэкономической деятельности. Практика действующих с 2005 г. ОЭЗ ТВТ показывает, что на 1 га общей площади приходится порядка 25...30 м² площади таможенного поста⁸.

Бизнес-инфраструктура представляет собой общую площадь технопарковой зоны, в состав которой входят административно-деловые и прочие объекты коллективного пользования.

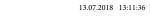
Каждая ОЭЗ ТВТ реализует собственный подход к оценке стоимости арендуемой площади в административно-деловых зданиях. Административно-деловые объекты (офисные площади) являются частью всей бизнес-инфраструктуры каждой ОЭЗ ТВТ. Эта бизнес-инфраструктура может представлять собой комплекс технопарковых объектов и/или организационных единиц, которые необходимы для полного цикла инноваций — от идеи до серийного производства новой продукции (табл. 3).

Таблица 3 Функциональные технопарковые объекты в структуре ОЭЗ ТВТ

Наименование ОЭЗ ТВТ	Центр венчурных инвестиций	Инжиниринговый центр и Центр прототипирования	Центр коллективного пользования	Центр трансфера (коммерциализации) технологий	Выставочный центр	Экспериментальное производство, уникальный стенд	Бизнес-акселераторы и инкубаторы	Центр сертификации
«Зеленоград»	_	+	+	+	_	+	+	+
«Санкт-Петербург»	_	_	_	+	+	_	_	_

 $^{^{7}}$ Поставки магистрального природного газа не являются обязательными и доступны только в половине ОЭЗ ТВТ. 8 Площадь таможенного поста составляет (в тыс. 8 С): на ОЭЗ ТВТ «Зеленоград» – 4,7; ОЭЗ ТВТ «Санкт-Петербург» – 1,5; ОЭЗ ТВТ «Дубна» – 6,3.





Окончание табл. 3

Наименование ОЭЗ ТВТ	Центр венчурных инвестиций	Инжиниринговый центр и Центр прототипирования	Центр коллективного пользования	Центр трансфера (коммерциализации) технологий	Выставочный центр	Экспериментальное производство, уникальный стенд	Бизнес-акселераторы и инкубаторы	Центр сертификации
«Дубна»	+	_	+	+	-	-	+	+
«Томск»	+	+	_	+	+	_	+	_
«Иннополис»	_	_	+	_	+	-	+	_
«Исток»	_	_	+	_	+	+	+	+

Примечания. Центр венчурных инвестиций – инвестиционная компания, работающая со стартапами в части развития инновационных проектов. Инжиниринговый центр – организация, выполняющая широкий спектр инженерно-консультационных услуг по подготовке и обеспечению процесса производства и реализации продукции, по обслуживанию и эксплуатации промышленных, инфраструктурных и других объектов. Центр прототипирования (подвид инжинирингового центра) – инженерно-производственная организация, целью которой является обеспечение хозяйствующих субъектов доступом к проектированию и производству изделий. В его дополнительные услуги обычно входят: проектирование конструкторской документации, проектирование и корректировка 3D-моделей, изготовление прототипов. Центр коллективного пользования – организация, обладающая специализированным научно-технологическим оборудованием и подготовленными специалистами, обеспечивающая возможность проведения исследований на данном оборудовании для широкого круга ученых, научных коллективов и организаций. Центр трансфера (коммерциализации) технологий – организационная единица, создаваемая при вузе, НИИ или промышленном предприятии, деятельность которой направлена на коммерциализацию интеллектуального продукта научно-технической деятельности на основе собственных разработок вуза, НИИ или предприятия. Выставочный центр - отдельно выделенные площади для демонстрации результатов создания инновационных продуктов. Экспериментальное производство, уникальный стенд – оборудование с рекордными на мировом уровне параметрами или имеющее мировые аналоги, но занимающее в их ряду свое уникальное место по совокупности параметров. Бизнес-акселератор, инкубатор – организация, оказывающая услуги вновь образованным (до 3 лет) субъектам малого предпринимательства по предоставлению в аренду помещений и оказанию необходимых услуг, в том числе консультационных, бухгалтерских и юридических. Центр сертификации - организация, аккредитованная в установленном порядке для выполнения работ по сертификации соответствия и регистрации деклараций соответствия для различных видов продукции и услуг в соответствии с российскими и международными стандартами.

Помимо универсальных инфраструктурных объектов резиденты имеют возможность размещать собственные производственные мощности на арендуемых или выкупаемых территориях ОЭЗ ТВТ.

На базе развиваемой инфраструктуры ОЭЗ ТВТ оказывают своим резидентам дополнительные виды услуг, что является комплементарным стимулом для появления и развития высокотехнологичных малых и средних предприятий, бизнес-модель которых не подразумевает создание собственных служб неосновного вида деятельности.

Перечень услуг может включать в себя: бухгалтерское сопровождение (преимущественно в форме упрощенной системы налогообложения); юридические услуги (корпоративное право); инвестиционный консалтинг (привлечение средств, бизнес-планирование); маркетинговые



услуги (помощь в выходе на новые российские и международные рынки); кадровый консалтинг (подбор, коучинг, программы мотивации персонала); патентно-лицензионные услуги (регистрация прав на интеллектуальную собственность); информационное сопровождение и PR-мероприятия (конференции, конкурсы, семинары, форумы, круглые столы, печатные информационные материалы); разработка программ создания и модернизации производства (для продукции, разрешенной к выпуску в ОЭЗ ТВТ). Большая часть услуг, в особенности одновременно для нескольких резидентов, оказывается на безвозмездной основе в соответствии с утвержденным бизнес-планом Управляющей компании (УК) ОЭЗ ТВТ. Условия оказания индивидуальных (кастомизированных) услуг обсуждаются в отдельном порядке.

В настоящий момент две из шести созданных ОЭЗ ТВТ («Зеленоград» и «Санкт-Петербург») не имеют собственных УК. Эти ОЭЗ ТВТ управляются непосредственно АО «ОЭЗ» В соответствии с условиями соглашений об управлении, заключенными с Минэкономразвития РФ, АО «ОЭЗ» выполняет следующие стандартные функции: обеспечивает создание и надлежащее функционирование объектов инфраструктуры, а также иных объектов, предназначенных для работы ОЭЗ ТВТ; привлекает резидентов и иных инвесторов в ОЭЗ ТВТ, в том числе для осуществления деятельности по созданию объектов инфраструктуры; разрабатывает проект планировки ОЭЗ ТВТ и представляет его на утверждение в Минэкономразвития РФ; обобщает и направляет в Минэкономразвития РФ в сроки, установленные соглашением об управлении, фактические значения показателей функционирования ОЭЗ ТВТ, отражающие деятельность УК и резидентов и установленные соглашением об управлении.

Организационная структура УК ОЭЗ ТВТ должна обеспечивать выполнение всех функций, возложенных на ОЭЗ ТВТ. Для этого в ее составе выделено несколько организационных единиц (рис. 2). Общая численность персонала УК ОЭЗ ТВТ может насчитывать порядка 30...100 сотрудников в зависимости от площади занимаемой территории, типа (гринфилд или браунфилд), отраслевой специализации и количества резидентов.

По итогам 2016 г. совокупный объем государственных инвестиций, направленных на финансирование создания объектов инженерной, транспортной, социальной, инновационной и иной инфраструктуры ОЭЗ ТВТ, составил 95,2 млрд руб. В 2016 г. в специальном реестре ОЭЗ ТВТ зарегистрировано 294 резидента (или 37 %) от общего числа 793 резидентов ОЭЗ всех типов. Количество резидентов с участием иностранного капитала в ОЭЗ ТВТ составляет порядка 8 %. На текущий момент ОЭЗ ТВТ выполняют плановые показатели по привлечению резидентов.

УК демонстрируют различную эффективность деятельности по привлечению резидентов в части готовности последних инвестировать в создаваемые инновационные объекты. Наиболее эффективной по данному показателю можно признать работу УК ОЭЗ «Исток» (нет бюджетных инвестиций), «Санкт-Петербург» и «Дубна». В среднем по всем зонам на каждый рубль бюджетных инвестиций в ОЭЗ ТВТ резиденты вложили около 37 коп. Это довольно низкий показатель в сравнении с начальными планами привлечения частного капитала. К началу 2017 г. резидентами ОЭЗ ТВТ было создано 10,32 тыс. рабочих мест на фоне примерно 5 % использования потенциала близлежащих территорий.

Несмотря на значительный прогресс в развитии ОЭЗ ТВТ за последние несколько лет, в целом сохраняются риски, из-за которых этот процесс может замедлиться. Рассмотрим некоторые из них.

2(537).indd 82

82





⁹Управляющая компания федерального уровня, которая управляет ОЭЗ напрямую либо через дочерние общества и филиалы [12].



Рис. 2. Типовая организационная структура управления УК ОЭЗ ТВТ

Структурные риски. Структура российской экономики в течение долгого периода не стимулировала вложение частного капитала в развитие прорывных технологий и инноваций. Российский частный капитал предпочитает высокую доходность в сочетании с низкими рисками и коротким периодом возврата инвестиций. В отличие от других мировых экономик, российские механизмы стимулирования развития инноваций не сформировали устойчивый тренд диверсификации национального хозяйства. В этих условиях кластерный подход развития по территориальному принципу может позволить создавать автономные компании малого и среднего бизнеса, которые будут взаимодействовать с резидентами ОЭЗ ТВТ и тем самым создавать благоприятную среду развития инноваций.

Рыночные риски. Риски подобного рода связаны с конкурентоспособностью ОЭЗ ТВТ в качестве площадки для переезда инновационных компаний из места их начального формирования на территорию ОЭЗ ТВТ. В данном случае необходимо учитывать затраты на переезд, которые будут влиять на положительное решение резидента только в случае значительной стратегической и/или экономической выгоды. Для снижения подобного рода рисков УК необходимо осуществлять гибкую ценовую политику в части предоставления услуг по аренде, технической поддержке и консультированию резидентов в зависимости от их «инновационного вклада» в развитие якорных организаций.

Отраслевые риски. Сложно прогнозируемый вид риска, связанный с трудностями исполнения своих обязательств резидентами ОЭЗ ТВТ. Возможен также риск удорожания строительных



83



материалов, что ведет к увеличению себестоимости новых объектов недвижимости. Данный фактор способен привести к повышению вероятности возникновения нехватки средств для финансирования объектов технопарковой инфраструктуры ОЭЗ ТВТ. В целях хеджирования подобных рисков должна действовать система отбора подрядчиков на конкурсной основе. Например, от участников конкурса запрашиваются сведения о ранее созданных объектах, что позволяет оценивать потенциал подрядчика. Для этих же целей вводится система обеспечения исполнения заключаемых договоров в виде предоставления банковской гарантии или внесения денежных средств на депозит.

Финансовые риски. Потенциальные резиденты могут быть подвержены рискам, связанным с изменением ставки рефинансирования и курсов иностранных валют, установленных Центральным банком России. В случае заимствования средств в виде кредитов с плавающей процентной ставкой увеличится сумма средств, подлежащих уплате в виде процентных расходов. Вариантом хеджирования процентного риска может являться пересмотр варианта повышения маржинальности бизнеса, что, с одно стороны, позволяет иметь запас финансовой устойчивости организации, а с другой — сохранить конкурентоспособность.

Операционные риски. Операционный риск представляет собой риск прямых или косвенных потерь, обусловленных несовершенством управленческих процессов, а также ошибками или недостаточной квалификацией менеджмента компании. Для минимизации операционных рисков необходимо четкое разграничение полномочий и сфер ответственности менеджмента компании. Экономическое обоснование управленческих решений и персональная ответственность должностных лиц компании на всех уровнях управления также способствуют минимизации последствий данного вида рисков.

В организации деятельности ОЭЗ ТВТ сохраняются проблемы, не позволяющие в полной мере использовать потенциал данной формы территориально-отраслевой организации инновационной деятельности. В частности, сравнительный анализ показал, что льготы для резидентов российских ОЭЗ ТВТ не настолько значительны, как, например, в Индии или Китае. На территории российских ОЭЗ ТВТ отменяются не самые существенные налоги. Часто совокупной будущей экономии от операционной деятельности существующего предприятия бывает недостаточно для проведения разовых затрат по переносу производства в ОЭЗ ТВТ. При этом стоит также учитывать факт потери части рабочего коллектива при релокации компании. Очевидно, что система льгот и преференций еще недостаточна для привлечения частного капитала даже в развитие стартапов, в чем можно убедиться на основе анализа практики развития ОЭЗ ТВТ¹⁰. Инвесторы в любой стране готовы вкладывать в капитал свободных экономических зон только в случае очевидной выгоды по сравнению с другими территориями. Поэтому помимо преференций, предлагаемых на федеральном уровне, также необходимы дополнительные гарантии государственных органов власти на региональном и местном уровнях. Помимо государственных гарантий привлечение частного капитала более эффективно реализуется через создание венчурных фондов. На текущий момент эта инициатива реализована только в двух из шести ОЭЗ ТВТ (ОЭЗ ТВТ «Дубна» и ОЭЗ ТВТ «Томск»)¹¹.

Еще одной проблемой развития российских ОЭЗ ТВТ является их ориентация на привлечение

 $^{^{11}}$ В ОЭЗ «Томск» инвесторы имеют доступ к услугам Государственного фонда поддержки малых предприятий в научно-технической сфере.





 $^{^{10}}$ Бюджетные инвестиции в создание 1 рабочего места в ОЭЗ ТВТ в 2,5 раза превышают частные.

инвестиций исключительно с внутреннего рынка. Отчасти это происходит из-за того, что многие зарубежные компании, которые время от времени рассматривают варианты экспансии на российский рынок с инновационными продуктами, могут просто не знать о существовании возможности стать резидентом ОЭЗ ТВТ. В этом случае необходима активная позиция УК по привлечению зарубежных инвесторов. Резиденты российских ОЭЗ ТВТ часто сталкиваются с проблемой отсутствия спроса на инновационную продукцию внутри страны. Не более 5 % отечественных предприятий и организаций интересуются новыми разработками, которые они готовы применять в производстве конечной продукции. Сказывается давно и прочно выстроенная сеть промкооперации зарубежных поставщиков. Вклинивание в структуру зарубежных комплексных поставок на российский рынок влечет за собой отказ от сервисных обязательств компаний-интеграторов. Государство инвестирует значительные средства в создание инфраструктуры ОЭЗ ТВТ в России, поскольку большая их часть создается с нуля (тип гринфилд). Это удлиняет срок окупаемости инвестиций и, как следствие, препятствует практике дальнейшего тиражирования модели ОЭЗ ТВТ в других регионах.

Вместе с тем, несмотря на перечисленные проблемы, создание территориально локализованных организационно-экономических структур, ориентированных на инновационную деятельность и имеющих понятные существенные льготы для организации деятельности в выбранной области специализации, имеет хорошие перспективы, что подтверждается международным опытом создания инновационных кластеров.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование дало основание полагать, что в российской и зарубежной теории и практике организации и управления инновационным процессом можно вычленить рациональную траекторию поведения, способную в наших условиях обеспечить действительное инновационное развитие приоритетных областей экономики национального хозяйства. Речь идет о комбинации возможностей, предоставляемых отечественным законодательством, о свободных экономических зонах и мировом опыте построения инновационных кластеров в высокотехнологичных секторах экономики. В частности, для всех резидентов ОЭЗ формируются одинаковые исходные рамочные условия, делающие их сложный, рискованный наукоемкий бизнес более привлекательным, нежели за ее пределами, но при этом оставляя открытым вопрос о лидерстве в условиях свободной конкуренции участников данного территориально-отраслевого образования. В этой ситуации можно также ожидать, что при создании высокотехнологичного кластера в рамках функционирующей ОЭЗ ТВТ система льгот и преференций, предусмотренная действующим законодательством, наконец окажет ожидаемое стимулирующее воздействие на инновационную деятельность ее резидентов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Стратегия развития особой экономической зоны технико-внедренческого типа «Исток» (ОЭЗ ТВТ «Исток») на территории городского округа Фрязино Московской области. Фрязино: УК ОЭЗ ТВТ «Исток», 2017. 119 с.
- 2. Российская Федерация. Законы. Об особых экономических зонах в Российской Федерации: федер. закон от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ (ред. на 03.07.2016).
- 3. **Костюнина, Г. М.** Свободные экономические зоны в мире и в России / Г. М. Костюнина. М.: МГИМО (У) МИД России, каф. МЭО и ВЭС МГИМО (У) МИД России, 2008. 139 с.



- 4. Кластерные политики и кластерные инициативы: теория, методология, практика: кол. монография / Под. ред. Ю. С. Артамоновой, Б. Б. Хрусталева. Пенза: ИП Тугушев С. Ю., 2013. 230 с.
- 5. **Приходько,** С. В. Особые экономические зоны / С. В. Приходько, Н. П. Воловик // Консорциум по вопр. приклад. эконом. исслед.; Канад. агентство по междунар. развитию [и др.]. М.: ИЭПП, 2007. 268 с.
- 6. Пилотные инновационные территориальные кластеры в Российской Федерации / Под ред. Л. М. Гохберга, А. Е. Шадрина. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2013. 108 с.
- 7. **Кузнецова**, **О. В.** Особые экономические зоны: эффективны или нет? / О. В. Кузнецова // Пространственная экономика. -2016. -№ 4. -C. 129-152.
- 8. О промышленных кластерах и специализированных организациях промышленных кластеров: постановление Правительства РФ от 31 июля 2015 г. № 779.
- 9. О приоритетном проекте Минэкономразвития России «Развитие инновационных кластеров лидеров инвестиционной привлекательности мирового уровня»: приказ Минэкономразвития России от 27 июня 2016 г. № 400.
- 10. Методические рекомендации по реализации кластерной политики в субъектах Российской Федерации. Утв. Минэкономразвития России 26 декабря 2008 г. № 20615-АК/Д19.
- 11. **Российская Федерация. Законы.** О правовом положении иностранных граждан в Российской Федерации: федер. закон от 25 июля 2002 г. № 115-ФЗ (ред. на 29.07.2017).
 - 12. Россия. Особые Экономические Зоны. URL: http://www.russez.ru (дата обращения 18.05.2018).

Статья поступила 21 мая 2018 г.

<u> — новые книги —</u>

ИОВДАЛЬСКИЙ В. А. **Конструкция и технология микрополосковых плат ГИС СВЧ-диапазона:** учеб. пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. — М.: КУРС, 2018. — 176 с.: ил.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления микрополосковых плат (МПП) ГИС СВЧ-диапазона, разработке направлений конструкторско-технологического развития соответствующих им концепций. Проведен анализ конструкции и технологии изготовления ГИС, сформированы направления и соответствующие им концепции, предназначенные для формирования на их основе иерархической системы направлений развития и разработки соответствующей ей концептуальной парадигмы развития техники ГИС СВЧ-диапазона.

Пособие предназначено для студентов Московского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.







ИСТОРИЯ

УДК 001(09)

ОТ ИДЕИ – К ПРИБОРУ

А. К. Балыко

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

FROM IDEA TO DEVICE

A. K. Balyko

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

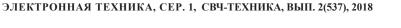
Головное предприятие отечественного СВЧ-приборостроения понесло тяжелую непоправимую утрату.

5 февраля 2018 г. на 64-м году жизни скоропостижно скончался видный ученый и организатор науки и производства, начальник крупного научно-производственного комплекса НПК-17 кандидат технических наук Виталий Юрьевич Мякиньков.

1. ПАМЯТИ ВИТАЛИЯ ЮРЬЕВИЧА МЯКИНЬКОВА

На стыке 50 — 60-х годов усилиями коллектива отдела НПК-8, руководимого молодым ученым Юрием Павловичем Мякиньковым, только что защитившим кандидатскую диссертацию, были разработаны уникальные конструкции усилительных ламп бегущей волны (ЛБВ) для первого советского спутника связи. В дальнейшем были созданы новые, сверхмалошумящие космические ЛБВ, которые явились основой для построения знаменитых в СССР спутников связи «Горизонт» и «Молния». Только на базе приборов Ю. П. Мякинькова стало возможным существование телевидения в СССР — нашей огромной по размерам стране. За выдающиеся заслуги перед отечественной наукой и техникой Ю. П. Мякиньков был удостоен Ленинской и Государственной премий СССР. Он был настоящим лидером в своей области. Ю. П. Мякиньков ушел из жизни в 1997 году. Супруга ученого, Ольга Семеновна, много лет преподавала иностранный язык в школе № 2 г. Фрязино. Помимо большого научного наследия и работоспособного коллектива, Ю. П. Мякиньков оставил после себя, пожалуй, самое дорогое — сына Виталия и дочь Елену.

В. Ю. Мякиньков родился 14 марта 1954 г. В 1977 г. закончил Московский энергетический институт и поступил на работу в одно из лучших подразделений НПП «Исток» – в НПК-17, в лабораторию А. М. Алексеенко, где на протяжении ряда лет успешно развивались два мощных направления: электровакуумное и твердотельное. В этом дружном и работоспособном кол-



87



лективе и начал свою трудовую деятельность Виталий Юрьевич. В середине 70-х годов сотрудник лаборатории кандидат технических наук В. М. Долич первым в стране сделал твердотельный аналог ламп обратной волны — транзисторный генератор СВЧ, перестраиваемый напряжением (ГУН). На это направление в помощь старшим были направлены «молодые силы» «алексеенковской» лаборатории: В. Ю. Мякиньков, И. В. Горюнов, И. С. Петров, И. В. Новоселец, О. Л. Талызина, Н. Б. Кавелина.

Уже с первых лет работы у Виталия Юрьевича проявились незаурядные качества исследователя: природная наследственная изобретательность и умение организовать работу коллектива и довести законченную разработку до своего логического завершения — внедрения в производство. Все это способствовало его росту в научном и административном направлениях. В работах, посвященных исследованию частотных характеристик твердотельных СВЧ ГУН, В. Ю. Мякиньков предложил для расширения диапазона перестройки применять варакторы со сверхрезким профилем легирования и с большой величиной коэффициента перекрытия емкости варактора. Он впервые сформулировал положение о предельной величине перепада крутизны на границах изменения управляющего напряжения и вывел формулу, которой пользуются все разработчики подобных генераторов по настоящее время. В результате глубоких теоретических и экспериментальных исследований им был разработан ряд транзисторных ГУН, перекрывающих многооктавный диапазон частот. Генераторы В. Ю. Мякинькова обеспечили создание перестраиваемых по частоте гетеродинных приборов, что позволило впервые в стране разработать современные средства радиоэлектронной борьбы.

Развитие летательных аппаратов требовало приборов точного измерения высоты (высотомеров) для их автоматической и слепой посадки, а также для поддержания полета на заданной высоте. Основным элементом радиовысотомеров и радиоуровнемеров является ГУН. Для существенного улучшения линеаризации частоты у ГУН В. Ю. Мякиньков предложил несколько оригинальных конструкций. Разработанные на базе этих изобретений ГУНы стали основой отечественных приемопередающих модулей радиовысотомеров четвертого и пятого поколений. Используя богатый накопленный научный потенциал, Виталий Юрьевич подготовил и успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1987 году сменил на посту руководителя лаборатории своего учителя.

Впечатляющим итогом работы сотрудников под руководством А. М. Алексеенко и В. Ю. Мякинькова стало создание более 30 уникальных твердотельных приборов. Существенно, что созданные ими приборы не имели аналогов в мировой практике. На основе целого ряда широкодиапазонных генераторов на многочисленных радиолокационных предприятиях страны были разработаны противорадиолокационные головки самонаведения «Комплекс», станции радиоразведки «Прорыв» и «Тор-25», вертолетная система радиопротиводействия «Озарение», самолетные и вертолетные радиовысотомеры «Игла», «Шмель», «Ласточка», «Репер», «Висение», «Оса», «Челнок» – для беспилотных летательных аппаратов, «Полоса» – для многоразовой ракетно-космической системы «Энергия – Буран», «Посадка» – для самолетов Ту-204, Ил-96, «Нефрит» – для ракетных комплексов «Оникс», «Уран», «Бирюза», «Меч», «Москит», синтезаторы частот для РЛС изделий «Панцирь» и «Зоопарк», контрольно-поверочная аппаратура «Целина-2» и «Стенд», связная аппаратура «Сандра» и «Шпилька» и многие другие.

- В. Ю. Мякиньков входил в состав авторского коллектива от НПП «Исток», который в 1994 году выдвигался на соискание Государственной премии Российской Федерации.
 - В 2009 году В. Ю. Мякиньков возглавил родное подразделение НПК-17, которое всегда бы-





ло и продолжает быть высокоэффективным на предприятии. В НПК-17 проводятся десятки работ по созданию генераторов малой и средней мощности в диапазоне частот 5...1500 ГГц. За многие годы здесь были созданы более 500 типов приборов для самых различных видов радиоэлектронной аппаратуры, как гражданского, так и военного применения. Огромную помощь Виталию Юрьевичу в бесперебойном выполнении этих работ оказывали А. В. Тыртышников, Л. Г. Савельева, Е. В. Терешкин, И. В. Горюнов, А. П. Гусев, А. П. Чугуй, В. Ф. Губарев, Ю. Б. Рудый, другие руководители подразделений и сотрудники НПК-17.

Несмотря на огромную загруженность в производственной сфере, В. Ю. Мякиньков не прекращал своей научной деятельности. Виталий Юрьевич – автор 50 печатных работ и 35 патентов на изобретения. Большое внимание он уделял молодым сотрудникам подразделения. У многих из них, закончивших филиал МИРЭА при НПП «Исток», он был научным консультантом при выполнении дипломных проектов.

Виталия Юрьевича любили в коллективе НПК-17 и НПП «Исток» за его преданность родному подразделению, честность, скромность, доступность, деликатность, общительность, подлинно русскую интеллигентность. Он всегда находил необходимые слова одобрения и практические действия, чтобы помочь каждому нуждающемуся. Виталия Юрьевича уважало руководство НПП «Исток» за преданность родному предприятию, безотказность и надежность. В конце прошлого года В. Ю. Мякиньков за выдающиеся успехи в деле повышения обороноспособности страны указом Президента России был награжден третьей высокой государственной наградой.

Юрий Павлович и Виталий Юрьевич вошли в золотой фонд «истоковских» династий – династия Мякиньковых. В истории НПП «Исток» это единственный пример, когда отец и сын были эффективными руководителями крупных подразделений предприятия.

В память о выдающемся «истоковском» ученом ниже приведена история лаборатории 1705, в которой много лет он проработал. Большая часть истории была написана А. М. Алексеенко. К работе над ней он привлекал В. Ю. Мякинькова и меня [1].

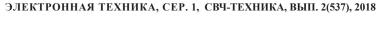
2. ЛАБОРАТОРИЯ 1705

Лаборатория 1705 — лаборатория ГУН была образована в 1957 году в составе отдела 170 (позднее НПК-17) наряду с лабораториями по разработке клистронов, приборов миллиметрового диапазона длин волн, полупроводниковых приборов, измерительной и конструкторскотехнологической лабораторий. За многие годы количество лабораторий и их состав постоянно менялись, и только лаборатория по разработке широкодиапазонных ГУН СВЧ сохранила в основном свой костяк.

Первым начальником с 1957 по 1964 г. была Наталья Михайловна Афанасьева. Под её руководством сформировался коллектив, определилось научно-техническое направление и были созданы первые отечественные ГУНы – лампы обратной волны (ЛОВ) с магнитной фокусировкой ОВ-1, ОВ-2 и ОВ-10. В эти же годы в лаборатории родилась и была впервые реализована идея создания ЛОВ с электростатической фокусировкой – прибора СВЧ, не имеющего ни отечественных, ни зарубежных аналогов.

После перевода Н. М. Афанасьевой в московский НИИ «Титан» лабораторию с 1964 по 1987 г. возглавлял Александр Михайлович Алексеенко. В 1962 г. он защитил кандидатскую диссертацию, посвященную созданию ЛОВ с электростатической фокусировкой. Исследования и разработки этого класса приборов на долгие годы стали основным научно-техническим направ-

2(537).indd 89

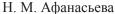






89







А. М. Алексеенко

лением лаборатории. Эти работы позволили резко продвинуться вперед отечественной технике, разработать новые совершенные электронные приборы СВЧ, по своим параметрам (массогабаритным характеристикам, диапазону электрической перестройки частоты, питающим напряжениям и др.) существенно превосходящие зарубежные аналоги. Важнейшей составляющей этой работы были также стыковочные работы с различной аппаратурой и промышленное освоение изделий. В 70-е годы в лаборатории начали интенсивно развиваться твердотельные СВЧ-приборы на основе СВЧ-транзисторов, варакторных диодов, диодов Ганна, ЛПД и т. п.

С 1987 по 1997 г. лабораторию возглавлял Виталий Юрьевич Мякиньков. Под его руководством в лаборатории успешно развивалось твердотельное направление, уделялось большое внимание комплексированным устройствам, объединяющим в себе несколько важнейших функций, необходимых для той или иной радиоэлектронной аппаратуры. Годы его руководства лабораторией совпали с годами развала страны, падения престижа науки, разрушения целых предприятий и научно-технических контактов.

Несмотря на все трудности, Виталию Юрьевичу совместно с сотрудниками лаборатории удалось сохранить и развить тематику лаборатории и, главное, не дать развалиться коллективу. Создаваемые ими приборы находят широкое применение в разнообразной радиоаппаратуре как военного, так и гражданского применения не только в нашей стране, но и за рубежом.

Активную деятельность в этом направлении продолжил сменивший его Иван Валентинович Горюнов, который возглавляет лабораторию по настоящее время.

В данной статье рассказывается о малоизвестных страницах истории лаборатории 1705. Речь пойдет о работах по созданию генераторов СВЧ малой мощности с широким диапазоном непрерывной электрической перестройки частоты, поскольку только электронные схемы управления частотой способны обеспечить нужную скорость перестройки, определяющую эффективность работы радиоэлектронной аппаратуры.

Выделим основные области применения ГУН: задающие генераторы радиовысотомеров малых высот для авиационной и ракетно-космической техники; поисковые гетеродины систем радиоэлектронной борьбы (радиоразведка и радиопротиводействие), обеспечивающие поиск











И. В. Горюнов

целей и их подавление; поисковые гетеродины противорадиолокационных головок самонаведения (ПРГС) ракет на РЛС противника; генераторы качающейся частоты панорамной радио-измерительной аппаратуры, обеспечивающей измерение параметров во всем заданном диапазоне частот. Кроме этого, ГУНы эффективны в качестве гетеродинов в помехозащищенных РЛС, а также в различных навигационных системах летательных аппаратов и малых кораблей (самолетов, вертолетов, крылатых ракет, торпедных и ракетных катеров и т. д.).

Назначение перечисленной выше аппаратуры выдвигает к ГУНу свои специфические требования, касающиеся его рабочего диапазона частот, ширины полосы перестройки и линейности частотной характеристики, выходной мощности и уровня собственных шумов, устойчивости к внешним воздействиям и гарантированной долговечности. Поэтому создать универсальный прибор, пригодный на все случаи жизни, нельзя. Каждый раз приходится создавать прибор, оптимальный для данного конкретного случая.

3. СОЗДАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

К середине 50-х годов, в «вакуумный» период СВЧ-электроники, среди генераторов с широкой электрической перестройкой частоты доминировали ЛОВ с магнитной фокусировкой электронного потока. ЛОВ – это перестраиваемый по частоте вакуумный генератор. Идея ЛОВ высказана в 1948 году советским ученым М. Ф. Стельмахом. Генерацию колебаний, явившихся результатом взаимодействия электронного потока и обратной волны, впервые наблюдал в 1950 г. в США физик С. Мильман. Термин «ЛОВ» введен американскими учеными Р. Компфнером и Н. Уильямсом в 1953 г., которые впервые дали теоретическое описание работы прибора. Самые первые отечественные ЛОВ ОВ-1 и ОВ-2, разработанные под руководством Н. М. Афанасьевой, представляли собой металлостеклянные конструкции с замедляющей системой в виде биспирали. Фокусировка электронного потока осуществлялась магнитным полем соленоида. Частота выходного сигнала перестраивалась изменением напряжения замедляющей системы в пределах от 200 до 2000 В. Эти генераторы перекрывали диапазоны частот от 6,5 до 10,2 ГГц (ОВ-1) и

2(537).indd 91

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

91

от 4,4 до 6,8 ГГц (OB-2) с выходной мощностью не менее 20 мВт. На их основе были разработаны первые отечественные установки для панорамных измерений, системы радиолокационной разведки и т. д. Существенные недостатки этих приборов (непакетированная конструкция, большое потребление мощности, высокие напряжения, наличие паразитных боковых составляющих в спектре сигнала, недостаточная устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям) активизировали работы как по исследованию физических процессов в ЛОВ, так и по усовершенствованию конструкции. Важную роль при этом сыграли исследования спектральных и шумовых характеристик, выполненные В. И. Новосельцем. Также первая отечественная металлокерамическая пакетированная ЛОВ была создана в отделе 170 в конце 50-х годов под руководством Н. М. Афанасьевой. Прибор перекрывал диапазон частот от 11,03 до 16,8 ГГц при максимальном напряжении 1000 В и выходной мощности не менее 20 мВт. Масса (вместе с постоянным магнитом) составила 2,5 кг. Впоследствии на других предприятиях отрасли: в НИИ «Волна» и в ОКБ НПО «Светлана» – были созданы параметрические ряды аналогичных ЛОВ, обеспечивших сплошное перекрытие частотного диапазона от 1 до 40 ГГц.

За прошедшие десятилетия в НПК-17 ЛОВ типа О создавались в диапазоне частот от 1 до 1500 ГГц. Так, еще в 1955 году академиком Н. Д. Девятковым была создана и командирована в отдел 170 группа молодых специалистов теоретического отдела (И. К. Викулов, А. А. Негирев, А. С. Победоносцев) под руководством А. С. Тагера, которой было поручено начать первую на предприятии работу по созданию широкодиапазонных ЛОВ миллиметрового диапазона. Первая ЛОВ, работавшая в длинноволновой части этого диапазона, была создана уже в 1956 году. Это был металлостеклянный прибор, для фокусировки пучка в котором использовалось продольное магнитное поле, создаваемое электромагнитом, с потребляемой мощностью 100...150 Вт и массой порядка 200 кг. Создание этого прибора стало началом глубоких теоретических и экспериментальных исследований, направленных на перекрытие всего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Эта задача была возложена на вновь созданную в отделе 170 лабораторию, которой с 1958 г. руководил М. Б. Голант, а с 1969 г. – А. А. Негирев. Работы проводились в течение продолжительного времени М. Б. Голантом, А. А. Негиревым, В. С. Савельевым, З. Ф. Каплуном, В. А. Зюлиной, З. Т. Алексеенко. Большой вклад в эту работу внесли также Т. Б. Реброва, Ю. В. Дедик, Л. А. Лункина. В ходе выполнения многочисленных НИР и ОКР были найдены оригинальные решения сложнейших конструктивно-технологических проблем.

В дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн разрабатывались главным образом ЛОВ с электростатической фокусировкой.

В ЛОВ замедленная электромагнитная волна распространяется навстречу потоку электронов. Замедление волны до скорости электронов осуществляется с помощью замедляющей системы, в качестве которой могут использоваться «гребенки», «встречные штыри», одно- и двухзаходные спирали и т. д. Фокусирующая система ЛОВ направляет поток электронов таким образом, чтобы он за время движения вдоль системы не покидал область интенсивного электромагнитного поля. Из-за наличия тяжелых и громоздких магнитных систем недостатки этих ЛОВ были видны невооруженным глазом: приборы имели впечатляющие габариты, а масса достигала нескольких килограммов. Кроме того, наличие магнитного поля способствовало возбуждению в спектре выходного сигнала паразитных составляющих. Все это было серьезным препятствием для использования ЛОВ в высокочувствительной бортовой самолетной и ракетной аппаратуре. Поэтому легко понять авторов многочисленных работ, пытавшихся создать легкие и малога-

2(537).indd 92

баритные ЛОВ с электростатической фокусировкой, лишенные тяжелых и громоздких магнитных систем и обладающие, благодаря этому, «чистым» спектром.

Электростатические поля для фокусировки электронных потоков начали успешно применяться много десятилетий назад с момента зарождения электронной оптики. Пример тому – создание электронно-лучевых трубок.

Однако для ЛОВ, чтобы обеспечить необходимый уровень параметров, требовалось увеличить рабочий ток на несколько порядков. И поэтому нужны более эффективные способы электростатической фокусировки. Наиболее часто при попытках создания ЛОВ использовались два варианта фокусирующих систем: периодическая (ПЭФ) и центробежная (ЦЭФ). В системах с ПЭФ фокусирующий эффект достигается за счет периодического изменения скорости электронов, а в системах ЦЭФ, обладающих осевой симметрией, – путем формирования вращающегося трубчатого электронного потока.

Предлагалось множество вариантов (не менее двух десятков) конструкций ЛОВ как за рубежом, так и у нас в стране. Среди них были ЛОВ как с ПЭФ, так и с ЦЭФ (например, спиратрон) и даже такая экзотическая, как «слаломная», объединяющая в себе элементы периодической и электростатической фокусировки. Но то обстоятельство, что ни одно из этих многочисленных предложений не привело к созданию приборов, не уступающих по своим основным, электрическим параметрам (выходной мощности и диапазону перестройки) ЛОВ с магнитной фокусировкой, существенно снизило интерес к проблеме.

Из воспоминаний А. М. Алексеенко: «Даже такой выдающийся ученый, как академик А. В. Гапонов-Грехов, в беседе со мной в те далекие годы высказал сомнение в возможности реализации ЛОВ с электростатической фокусировкой».

Однако для молодых энтузиастов в то счастливое время никаких авторитетов не существовало. Было решено создавать ЛОВ с использованием ПЭФ, которая в принципе должна была иметь большую устойчивость к механическим воздействиям, чем ЦЭФ. Суть идеи заключалась в том, чтобы в приборе использовался не однолучевой, а многолучевой поток электронов, формируемый специальной электронной пушкой с плоскими электродами и периодическим электростатическим полем, создаваемым замедляющей системой — основным узлом ЛОВ. В 50-е годы это была одна из первых попыток повысить эффективность работы СВЧ-прибора за счет увеличения числа электронных лучей. Спустя десятилетие этот принцип был успешно реализован и в пролетных клистронах, но с уровнем выходной мощности, на несколько порядков превосходящим уровни наших ЛОВ.

Предложенный А. М. Алексеенко принцип устройства ЛОВ был обсужден предварительно с А. С. Тагером и Ю. Д. Самородовым и получил их одобрение. В 1959 г. было выдано авторское свидетельство на изобретение ЛОВ с электростатической фокусировкой № 217538 (авторы: А. М. Алексеенко, Ю. Д. Самородов, А. С. Тагер, приоритет 15.04.59 г.). Позднее, когда был разработан первый прибор этого класса (ЛОВ «Засечка»), по указанию министра электронной промышленности А. И. Шокина конструкция была запатентована в США, Англии, Франции и Италии. К слову, такое не часто происходило в отечественной СВЧ-электронике. Это изобретение и легло в основу дальнейших НИР и ОКР по созданию ЛОВ с ПЭФ в НПП «Исток», а впоследствии и в подключенном к этим работам СКБ киевского завода «Генератор», так как лаборатория 1705 не могла удовлетворить потребности всех заказчиков.

Первые макеты ЛОВ, подтвердившие правильность такого решения, были получены к концу 1959 года. Их создание обеспечили Ю.А. Шевелев, сумевший приспособить в то время един-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

13.07.2018 13:11:39

ственный в НПП «Исток» макет электроискрового станка для нарезки замедляющих систем, и слесарь-механик Б. Л. Морозов – настоящий «истоковский левша».

Из воспоминаний А. М. Алексеенко: «Первые макеты были изготовлены с грубыми нарушениями вакуумной технологии. Их цель была – проверить принцип работы и получить эффект генерации. Поэтому они могли работать только на разборном стенде в режиме непрерывной откачки, и рассчитывать на достижение приемлемой долговечности было нельзя. Когда на экране осциллографа мы увидели ярко выраженную зону колебаний, я испытал такой восторг, как при рождении сына – ведь мы впервые в мире доказали, что ЛОВ с электростатической фокусировкой можно создавать, что открывается возможность их использования не только в наземной, но и в бортовой авиационной и ракетной аппаратуре. Очень приятно было, что нашу радость разделил с нами выдающийся ученый М. Б. Голант, который, бросив все дела, прибежал к нашему стенду. А ведь этот эксперимент мог бы сорваться – сроки уже прошли, если бы не Б. Л. Морозов, то что бы тогда было. Из-за моей невнимательности незастегнутым рукавом халата я оторвал укрепленную с микронной точностью электронную пушку от замедляющей системы. Мастерство Бориса Леонидовича спасло положение – он сумел снова собрать систему с нужной точностью, но что я о себе услышал – бумага не выдержит. Пришлось стерпеть. Происходило это все поздно вечером, после 23 часов, в пустом монтажном участке накануне дня рождения нового класса приборов. Путь для создания образцов, пригодных для применения в конкретной аппаратуре, был открыт».

На начальной стадии разработчики плохо представляли себе те трудности, которые предстояло преодолеть. Создание первых макетов показало, что:

- а) электроискровая обработка, обеспечивая нужную точность изготовления замедляющих систем, имевших весьма сложную конфигурацию, имеет недопустимо низкую производительность на изготовление одной системы уходило несколько суток;
- б) последующая очистка замедляющей системы от продуктов электроэрозии представляет серьезную проблему, не имевшую решения в те годы. Нарезка осуществлялась в среде керосина, что приводило к появлению на рабочей поверхности замедляющей системы углеродной пленки, резко увеличивавшей потери СВЧ-энергии. Существовавшие в те годы методы химической очистки не обеспечивали ее удаление;
- в) использование бескислородной меди в качестве материала замедляющей системы оказалось недопустимым из-за низкой механической прочности ее после паек и отжигов: малейшая деформация приводила к резкому ухудшению параметров ЛОВ. Требовался новый материал, обладающий электрическими свойствами меди и высокой механической прочностью;
- г) теплообмен между частями замедляющей системы, находящимися под различными потенциалами, явно недостаточен и приводит к недопустимым изменениям геометрических размеров.

Эти проблемы требовали незамедлительных решений. И они были найдены благодаря помощи дружного коллектива НПП «Исток».

Под руководством Б. И. Ставицкого были созданы специальные высокопроизводительные электроискровые станки с программным управлением, которые позволили довести время изготовления замедляющих систем до нескольких часов. Метод прецизионной электроискровой обработки непрофилированным электродом (движущейся проволокой) был до этого предложен М. Б. Голантом, Б. И. Ставицким и Ю. А. Шевелевым.

В отделе 180 Н. С. Сытилиной были разработаны методы химической очистки.

В отделе 290 В. А. Рождественский буквально в течение нескольких месяцев создал кобаль-

товую бронзу, сочетающую положительные свойства меди с высокой механической прочностью. В последующие годы кобальтовая бронза нашла широкое применение в электровакуумном производстве.

В отделе 280 под руководством В. Н. Батыгина были созданы миниатюрные изоляторы из керамики 22ХС, обладающие высокой механической прочностью и требуемой теплопроводностью.

И в последующие годы, работая над созданием новых приборов и осуществляя модернизацию уже разработанных в условиях серийного производства, сотрудники лаборатории 1705 получали поддержку со стороны смежных подразделений.

Так, в отделе 240 (начальники Л. Н. Тимошин и Б. Ч. Дюбуа) были разработаны и внедрены в серийное производство экономичные катодно-подогревательные узлы. А. Б. Киселевым специально для ЛОВ с ПЭФ созданы высокоэкономичные металлизированные оксидные катоды, в 1,5...2 раза превосходящие по эмиссионным характеристикам традиционные оксидные катоды.

Очень важная работа была выполнена одним из лучших технологов «Истока» А. Я. Астафьевым. Разработанная им специально для ЛОВ с ПЭФ серийная технология ускоренной автоматизированной откачки с предварительной промывкой водородом узлов прибора на откачном посту и последующей тренировки обеспечила высокую стабильность параметров приборов и повысила гарантированный срок службы до 3000 ч.

Качественное улучшение параметров ЛОВ (уменьшение перепадов мощности, повышение линейности частотной характеристики, снижение паразитных излучений) было достигнуто благодаря применению поглощающей керамики КТ-30, созданной под руководством В. Н. Батыгина и А. И. Иноземцевой. Одним из первых, кто оценил достоинство этого материала, был сотрудник лаборатории 1705 инженер В. И. Рогов, который ввел в конструкцию ЛОВ изготовленные из нее узлы.

Очень весом вклад теоретиков в разработки ЛОВ с ПЭФ. Работы В. Б. Хомича и И. И. Голеницкого позволили выяснить предельные возможности ЛОВ и объяснили многие непонятные явления в приборах. В этих работах дана оценка допусков на основные геометрические размеры приборов.

Большой вклад в теорию ЛОВ с ПЭФ внес профессор Саратовского университета, академик РАЕН Н. И. Синицын, творческое сотрудничество коллектива лаборатории с которым продолжалось многие годы и во многом определило ряд важнейших конструктивных решений. Результаты теоретических работ подтвердили возможность использования периодической электростатической фокусировки не только в ЛОВ малой мощности (до 100 мВт), но и в ЛОВ с повышенным (более 1 Вт) уровнем выходной мощности и указали пути снижения питающих напряжений до нескольких десятков вольт.

В 1961 г. была закончена НИР «Золотник», в ходе которой были созданы образцы ЛОВ с ПЭФ, которые можно было уже опробовать в конкретной аппаратуре. Символично, что акт госкомиссии по этой теме был подписан 12 апреля 1961 г., в день полета Ю. А. Гагарина. Коллектив поверил, что и приборы, разработанные в лаборатории, будут в космосе. Этап поиска закончился. Началась тяжелая работа по созданию промышленных конструкций, отвечающих самым жестким требованиям бортовой авиационной и ракетно-космической аппаратуры.

Первым ОКРовским прибором этого класса стала ЛОВ «Засечка» (гл. конструктор А. М. Алексеенко). Ее применили сразу же в нескольких видах изделий: в радиовысотомерах противотанковой ракеты и космического корабля «Союз» (разработчик радиовысотомеров Уральское проектно-конструкторское бюро (УПКБ) «Деталь», г. Каменск-Уральский Свердловской облас-

ти), а также и в противорадиолокационных головках самонаведения (разработка ПО «Автоматика», г. Омск).

Из воспоминаний А. М. Алексеенко: «Испытания изделий прошли успешно. Один пример: при ударе противотанковой ракеты о бетонную стену большая часть аппаратуры вышла из строя, а «Засечка» сохранила работоспособность. Отличные электрические параметры и высокая надежность позволили потребителям на одной из конференций по СВЧ-электронике в 60-е годы назвать «Засечку» одним из лучших СВЧ-приборов того времени».

Тем не менее, созданные УПКБ «Деталь» и ПО «Автоматика» изделия не претендовали на массовый выпуск, а как разработчикам хотелось, чтобы их первенец и по объемам выпуска был одним из первых среди ЭВП СВЧ.

Резкое увеличение выпуска произошло, когда ЛОВ «Засечка» была использована в качестве местного гетеродина метеолокатора «Гроза», разработанного в НПО «Ленинец» для самолетов гражданской авиации Як-40, Ту-154, Ту-134, Ил-62 и др. Выбор пал на ЛОВ не только благодаря ее отличным электрическим параметрам и широкому диапазону перестройки (в сотни раз превышающему электрическую настройку отражательного клистрона), но и потому, что, в отличие от многих других отечественных СВЧ-приборов, она обладала патентной чистотой, что было крайне важно для организации экспорта самолетов. Решением начальника 1ГУ МЭП СССР И. Т. Якименко специально для этой цели была выпущена ЛОВ «Засечка» со специальной литерой.

Серийный выпуск «Засечки» был организован в цехе 44, который возглавлял в то время О. С. Серебряков. Сроки внедрения были жестко оговорены приказом 1ГУ МЭП СССР, и коллектив цеха проявил чудеса изобретательности и ответственности за порученное дело. Инженерам Н. А. Нечепуренко, Г. И. Алпатову, Е. Н. Моисееву и другим удалось устранить многие дефекты, обусловленные отсутствием производственного опыта и проявившие себя в процессе эксплуатации: разрывы частотной характеристики, межэлектродные пробои и т. д. В связи с резким ростом потребности (до 3000 шт. в год) производство ЛОВ «Засечка» вновь было передано киевскому заводу «Генератор».

ЛОВ «Засечка» в трехсантиметровом диапазоне длин волн при выходной мощности в несколько десятков милливатт имела электронную перестройку частоты около 20 %. Приборы с такими параметрами крайне необходимы для противорадиолокационных головок самонаведения. Дело в том, что их рабочие диапазоны были привязаны к частотам, на которых работали РЛС предполагаемого противника. В различных участках диапазона СВЧ эти частоты занимали области, не превышающие, как правило, 20 %. Это обстоятельство позволяло, сузив диапазон электрической перестройки ЛОВ, использовать схему питания с заземленным анодом, сократив у нее число источников питания, снизив питающие напряжения и потребляемую мощность, уменьшив массу и габариты. Для прибора, используемого на борту ракеты, все это очень и очень существенно. Эти достоинства оказались весьма полезны и для навигационной аппаратуры летательных аппаратов и малых кораблей.

Поэтому ЛОВ с подобными параметрами были созданы во всем СВЧ-диапазоне от 1 до 40 ГГц: «Георгин-1» (30 см) «Георгин-II» (10 см) (гл. конструктор обоих приборов В. М. Долич), «Гравировка» (6 см) (гл. конструктор Амелькина.), «Зубец-II» (2 см) и «Горностай» (8 мм) (гл. конструктор обоих приборов А. М. Алексеенко). Все эти приборы нашли широкое применение.

Из воспоминаний А. М. Алексеенко: «Забавный случай произошел в начале 80-х годов. Раздается телефонный звонок, и взволнованный голос из Заполярья кричит в трубку: «Брежнев»



застрял во льдах!!! Срочно высылайте «Зубец»! Не сразу сообразив, в чем дело, мы, наконец, поняли, что речь идет об атомном ледоколе, названном в честь покойного Леонида Ильича. А дело заключалось в том, что ЛОВ «Зубец» была использована в качестве гетеродина в станции бокового обзора «Нить» самолетов ледовой разведки, а та оказалась недоукомплектована СВЧ-приборами. С нашей стороны были приняты срочные меры, «Зубец» отправлен заказчику, и «Брежнев» вызволен из ледового плена».

Большой интерес представляло выяснение предельной выходной мощности ЛОВ с ПЭФ. Теоретические расчеты и предварительные эксперименты показали, что она может достигать нескольких ватт. В результате в трехсантиметровом диапазоне длин волн был создан прибор «Зеница» с выходной мощностью не менее 1 Вт (гл. конструктор Н. М. Афанасьева). На первых порах этот прибор не нашел потребителя, но спустя несколько лет, когда Наталья Михайловна уже не работала на «Истоке», он оказался единственным у нас в стране пригодным для создания радиовысотомера системы мягкой посадки автоматической станции на Луну (разработчик радиовысотомера УПКБ «Деталь»). Разработанный на его базе радиовысотомер «Прибор-В», благодаря высокому уровню выходной мощности, обеспечивал измерение высот от нескольких десятков километров практически до нуля, в то время как при выходной мощности порядка 100 мВт у радиовысотомеров малых высот измеряемая высота обычно не превышает 1,5...2 км.

Поставка потребителям ЛОВ «Зеница», а затем и усовершенствованных образцов (модернизация ЛОВ «Зеница» была проведена в ОКР «Зеница-ІІ» (гл. конструктор А. М. Алексеенко), в ходе которой были значительно уменьшены масса и габариты прибора и повышена линейность частотной характеристики) осуществлялась непосредственно из лаборатории под бдительным оком военпредов В. Н. Неелова и П. А. Томникова и их руководителей Т. Н. Полухина и Н. С. Андрейчика. Военная приемка не только контролировала, но и помогла организовать проведение комплексных испытаний, чтобы гарантировать качество каждого изделия. Ответственность была очень велика, так как в лунных станциях не было предусмотрено дублирования радиовысотомера. И тем не менее, несмотря на строгий контроль, неприятности возникали.

Из вспоминаний А. М. Алексеенко: «Однажды к концу рабочего дня раздался звонок из Москвы с просьбой немедленно прибыть в НИИ «Вега». Причину вызова не объяснили. Прибыв в институт, я застал в большом зале такую картину. В центре стояла посадочная ступень лунной станции, а вокруг нее суетились с десяток человек. Среди них я узнал главного инженера УПКБ «Деталь» и старшего военпреда. Все эти люди пытались понять, в чем причина отказа аппаратуры при испытаниях на воздействие пониженного давления. Ведь все элементы станции прошли полный комплекс испытаний, были приняты военной приемкой, и станция должна быть отправлена на космодром. Это было ЧП!!!

После ознакомления с методикой и результатами испытаний мне стало ясно, что причина отказа заключалась в нашей ЛОВ. Дело в том, что при понижении атмосферного давления элементы ЛОВ испытывают хоть и незначительную, но деформацию. При малых межэлектродных расстояниях, составляющих десятые и сотые доли миллиметра, любая посторонняя частица может попасть в зазор между электродами и, даже при незначительном изменении размеров, стать причиной короткого замыкания. По возвращении во Фрязино мы вскрыли забракованный образец. Было обнаружено, что такой частицей стал микроскопический кусочек оксида, оторвавшийся с поверхности катода и до поры до времени не мешавший работе прибора. Легко догадаться, что пережил тогда я, весь коллектив лаборатории и наши военпреды.

Прибор был заменен и запуски всех лунных станций начиная с «Луны-16» прошли успешно. Но все четверо суток, которые занимал полет станиий к Луне, и при каждом запуске я не спал. Тяжесть ответственности за труд тысяч людей была невероятной. В память об этих событиях в музее «Истока» демонстрируется карта лунной поверхности с обозначением места посадки станиии «Луна-16», доставившей лунный грунт на Землю, и орден Трудового Красного знамени, который мне вручил А. И. Шокин».

На малогабаритные ЛОВ с электростатической фокусировкой обратили внимание разработчики панорамной измерительной аппаратуры. Но их не устраивал относительно узкий диапазон перестройки первых ЛОВ.

Увеличение диапазона перестройки было достигнуто за счет создания и применения такой конструкции замедляющей системы, которая допускала одновременное синхронное изменение напряжений на обеих ее частях, электрически изолированных друг от друга, с целью поддержания оптимального соотношения фокусирующих и дефокусирующих сил при изменении напряжения электронного луча. Характерная особенность этих ЛОВ заключалась в том, что ни один из ее электродов не имел электрического контакта с корпусом, что позволяло потребителю заземлять любой из них. Это крайне важно при разработке блоков питания и управления частотой.

Необходимо было привести его в соответствие со стандартной разбивкой волноводных каналов на поддиапазоны. Эта задача была решена инженером В. Н. Масленниковым в ходе НИР «Герб». На основе результатов этой НИР был создан уникальный ряд широкодиапазонных ЛОВ: «Засечка-1», (гл. конструктор А. И. Руденко), «Герб-1», «Гармоника» (гл. конструктор обеих работ В. Ф. Крицкий) и «Гомель» (гл. конструктор А. М. Алексеенко), обеспечивший сплошное перекрытие диапазона частот от 8 до 40 ГГц. Первые три прибора были созданы при нашей помощи в СКБ завода «Генератор» (В. С. Бамоном, А. И. Руденко, В. Ф. Крицким, А. И. Матвиенко и др.), а самый сложный – ЛОВ восьмимиллиметрового диапазона длин волн «Гомель» – в НПП «Исток».

Серийный выпуск всех четырех приборов осуществлялся киевским заводом «Генератор». На их основе в Каунасском институте измерительной техники (Литовская ССР) были созданы панорамные измерители параметров СВЧ-трактов, долгое время используемые на многих предприятиях даже после развала Советского Союза.

У созданных в 60-е годы ЛОВ напряжение, управляющее частотой сигнала, достигало нескольких сотен, а иногда приближалось и к тысяче вольт. В 70-е – встала задача резкого снижения управляющего напряжения (до 100...120 В) и дальнейшей миниатюризации ЛОВ. Эти требования наиболее остро выдвигались, главным образом, создателями противорадиолокационных головок самонаведения, так как отставание, сложившееся в разработке твердотельных генераторов с электрической перестройкой частоты из-за отсутствия на тот момент нужной элементной базы, стало тормозом в развитии этого важнейшего вида вооружений.

Научный руководитель работы, сотрудник лаборатории 1705 Е. Т. Максимов в НИР «Горизонт» пошел тем же путем, который прошел М. Б. Голант, создавший минитроны (сверхминиатюрные отражательные клистроны) за счет максимально возможного повышения отношения рабочего тока к напряжению. Е. Т. Максимову удалось снизить питающие напряжения (в том числе и управляющее частотой) в 5...10 раз и в несколько раз уменьшить массу и габариты прибора. При этом было показано, что требуемые параметры могут быть обеспечены как в коротковолновой, так и в длинноволновой частях сантиметрового диапазона СВЧ, определенного заказчиком (ПО «Автоматика», г. Омск). По результатам НИР «Горизонт» было поставлено два ОКР: «Галактика» и «Горизонт-1». Отметим, что большинство работ по созданию различных ЛОВ с ПЭФ проходило по постановлению ЦК КПСС или Совета Министров СССР.

На долю фрязинцев выпала первоочередная разработка в десятисантиметровом диапазоне – ОКР «Галактика» (гл. конструктор Е. Т. Максимов), а киевлянам досталась работа в трехсантиметровом диапазоне – ОКР «Горизонт-1» (гл. конструктор А. И. Матвиенко). На основе этих приборов были разработаны головки самонаведения для новейших ракет класса «воздухземля» и сверхточных крылатых ракет. Особенность ОКР «Галактика» и «Горизонт-I» заключалась в том, что нужно было срочно организовать серийный выпуск приборов. Однако по причинам, далеким от техники, произошла задержка их внедрения в производство. Разговоры о том, внедрять или не внедрять их в производство, длились несколько месяцев, и в результате обстановка вокруг «Галактики» накалилась до предела (аналогичная ситуация сложилась и у киевлян, только позднее на год).

Из вспоминаний А. М. Алексеенко: «Меня вызвал к себе начальник 1 ГУ МЭП СССР И. Т. Якименко. Он сообщил, что срыв поставок «Галактики» автоматически приводит к срыву годовых планов по важнейшим позициям не только МЭП, но и МРП, МСМ и МАП. Он зачитал письмо из Госплана СССР, в котором указывалось на личную ответственность руководства НПП «Исток» за срыв поставок. До конца года надо было поставить 127 приборов, а на дворе был уже октябрь. Ни о какой организации серийного производства речи и быть не могло – поставки пришлось выполнять из лаборатории.

Сотрудники лаборатории тех лет хорошо помнят настоящий штурм, длившийся больше двух месяцев. Рабочий день начинался в 8 ч утра и заканчивался в 12 ч ночи. Выходные дни были забыты. За столом начальника лаборатории каждое воскресенье восседал главный инженер 1 ГУ Ю. А. Искренко и следил за ходом выполнения работ. Лабораторию стал часто посещать генеральный директор С. И. Ребров. Надо сказать, что в последние два месяца, в самый пик штурма, при возникновении каких-либо препятствий дирекция своевременно реагировала на возникающие трудности и делала все возможное, чтобы обеспечить нас всем необходимым. С. И. Ребров лично следил за испытаниями первых образцов приборов. Неоценимую помощь нам оказала военная приемка (руководитель В. П. Быркин, военпред П. А. Томников). Особо нужно отметить, что условия поставок и порядок испытаний с руководством 5 ГУ Минобороны СССР согласовывал лично сам И. Т. Якименко.

Все это позволило за несколько дней до Нового 1980-го года доложить Ивану Тихоновичу Якименко о досрочном выполнении поставок. Карающая рука была отведена и от НПП «Исток» и от нашего 1 ГУ МЭП СССР.

Нужно отметить, что в условиях штурмовщины удавалось остроумно решать сложные обычно экономические вопросы. Так, для измерения параметров ЛОВ необходимо было срочно изготовить измерительную установку, включая СВЧ-тракт. Понимал, что без неё прибор не выпустить. Руководители НПК-5, наши друзья и отличные инженеры Р. А. Беляков и М. У. Муртазин, решили потрясти главного инженера и заломили премию, ссылаясь на невероятные трудности. Главный инженер Ю. П. Уточкин сдался. Каково же было его удивление, когда через несколько часов после подписания приказа о премии, СВЧ-тракт был готов. Мы были в восхищении от изобретательности наших друзей-метристов. Лаборатория стала единой, как пелось в популярной в то время песни: «Мы дети «Галактики»...». Эта работа укрепила и сплотила коллектив, и жизнь стала веселее.





После завершения этой работы состоялся митинг сотрудников НПК-17, на котором присутствовал Ю. П. Уточкин. Он дал высокую оценку нашей работе. Коллектив, участвовавший в выполнении поставок, приказом министра МЭП СССР был отмечен небывалой по тому времени премией в сумме 15 000 руб. А уже через два месяца ЛОВ «Галактика» была освоена в производстве цехом 44 (начальником цеха в это время был Г. Н. Алпатов)».

Созданием приборов «Галактика» и «Горизонт-1» завершилась «вакуумная эпоха» развития ГУНов. Она продолжалась более 20 лет. В результате было создано 20 типов приборов и организовано серийное производство большинства из них. На основе созданных ЛОВ с электростатической фокусировкой разработаны десятки радиоэлектронных устройств различного назначения.

Эти результаты стали возможны благодаря творческому участию в НИР и ОКР всего коллектива НПП «Исток». Но в первую очередь их обеспечили сотрудники лаборатории широкодиапазонных генераторов, ее ветераны: начальники лаборатории И. М. Афанасьева и А. М. Алексеенко, инженеры-разработчики Е. Т. Максимов, В. М. Долич, Л. А. Амелькина, Р. М. Давыденко, В. И. Рогов, А. А. Зиновьев, а также технологи и метристы Н. М. Никулина, В. П. Серебров, А. И. Кувашова, З. И. Беляева, Т. А. Назарова, Г. Ф. Бодрова, И. С. Ильницкая и Н. А. Чабан. Приход в конце 70-х годов нового поколения инженеров: В. Ю. Мякинькова, И. В. Новосельца, И. В. Горюнова, И. С. Петрова, О. Л. Талызиной — способствовал повышению творческого потенциала лаборатории и обеспечил относительно безболезненный переход к твердотельной тематике.

4. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЭТАП В ИСТОРИИ ЛАБОРАТОРИИ

Развитие радиоэлектронной аппаратуры идет по пути ее миниатюризации и создания комплексированных устройств, снижения питающих напряжений и потребляемой мощности, повышения надежности и долговечности и, конечно, снижения трудовых затрат. Как показывает мировая практика, на сегодняшний день эти задачи наиболее успешно могут быть решены на основе твердотельной микроэлектроники.

И поэтому в то время, когда развивались бурные события по поводу поставок «Галактики», начался новый этап в развитии ГУНов — создание твердотельных генераторов на основе транзисторов и диодов Ганна.

Как известно, первый в мире СВЧ-генератор на ЛПД был создан у нас, в НПП «Исток», на основании открытия, сделанного в 1959 году А. С. Тагером, А. И. Мельниковым, А. М. Цебиевым и Г. П. Кобельковым. Научный мир высоко оценил это достижение, давшее старт для расширения фронта работ по твердотельной тематике при создании СВЧ-генераторов. Как у нас в стране, так и за рубежом стали появляться все новые и новые диоды различного назначения, биполярные и полевые транзисторы, работающие в СВЧ-диапазоне. На их основе стали создаваться твердотельные аналоги вакуумных СВЧ-генераторов и усилителей, в том числе и ГУНы.

Вскоре стало ясно, что если для относительно узкодиапазонных ГУНов можно использовать серийные СВЧ-транзисторы и диоды, то для получения широкого диапазона электрической перестройки частоты (до 40 % и более) нужно располагать бескорпусными транзисторами и диодами в виде кристаллов со специальными характеристиками. Специализированные предприятия не могли организовать их производство, так как были ориентированы на массовый выпуск и просто физически не могли учесть все требования каждого потребителя. Нужно было создавать свою технологическую базу.





Первыми эту задачу решили в США на фирме «Avantek». НПП «Исток» такими возможностями в то время не располагал. И поэтому лаборатория 1705 начала работу в области широкодиапазонных твердотельных генераторов с создания относительно узкодиапазонных ГУНов (с диапазоном перестройки не более 20...30 %) с использованием серийных СВЧ-транзисторов и диодов. Тем не менее, переход «от вакуума к твердому телу» потребовал новых технологических решений. Предстояло в первую очередь освоить микрополосковую технологию; решить задачу герметизации корпусов изделий и создания внутри корпуса защитной атмосферы; предотвратить паразитное излучение через вводы питания с помощью специальных фильтров; создать развязывающие устройства, устраняющие влияние на работу прибора как внешней нагрузки, так и взаимное влияние элементов схемы друг на друга.

Эти задачи были успешно решены. Так, в НПК-17 под руководством В. В. Немцева, а затем В. В. Иванова налажен выпуск микрополосковых схем и решены вопросы пайки и сварки сверхминиатюрных схем.

В отделе 180 И. П. Стародубов и Т. Н. Ершова, а в отделе 280 К. Б. Джуринский совместно с В. М. Доличем разработали герметичные фильтры питания и управления, устранявшие паразитное излучение. К. Б. Джуринский создал также серию вакуумно-плотных СВЧ-разъемов, отвечающих всем требованиям бортовой ракетной и самолетной аппаратуры.

Инженеры лаборатории 1705 В. Ю. Мякиньков и И. В. Новоселец придумали и реализовали простой и эффективный способ герметизации многокамерных корпусов методом «перевернутой крышки». К сожалению, запатентовать (получить свидетельство на изобретение) не удалось — долго решали, то ли это был способ, то ли конструкция, между тем результат получился удивительный. Стала возможной многоразовая быстрая герметизация и разгерметизация при полной радиоэкранировке узлов и отличном внешнем виде. Этод метод до сих пор в НПК-17 применяется во многих разработках для герметизации.

В ОКБ ростовского завода «Гранит» А. И. Чечетиным и Б. П. Симанчуком, а в НПК-9 Н. Д. Урсуляком и их сотрудниками были созданы миниатюрные микрополосковые вентили для развязки элементов схем.

В отделе 180 инженер Г. А. Колесникова разработала сверхминиатюрные микроконденсаторы, работающие в СВЧ-диапазоне с номиналами емкостей от десятых долей до десятка пикофарад.

В НПК-4 инженерами Б. Ф. Горбиком и В. П. Снегиревым уже для ГУНов с более расширенным (до 40 %) диапазоном электрической перестройки были созданы бескорпусные диоды Ганна («Пунган») и диоды с изменяемой в широких пределах емкостью (варакторные диоды «Природа» и «Принцип» с резким и сверхрезким p–n-переходом), а затем НПК-4 начал выпуск бескорпусных полевых СВЧ-транзисторов.

Из известных способов электрической перестройки частоты твердотельных СВЧ-генераторов (варакторная и ЖИГ-перестройка) для приборов, созданных в НПК-17, характерно преимущественное использование варакторной перестройки, обеспечивающей максимально высокие скорости изменения частоты, отсутствие у частотной характеристики гистерезисных явлений, возможность снижения массогабаритных характеристик и большую температурную стабильность параметров. Пионерами этого направления стали на НПП «Исток» В. М. Долич, Н. К. Егоров, В. А. Голубцов и В. П. Падня, создавшие первый в нашей стране транзисторный ГУН «Гравюра», работающий в десятисантиметровом диапазоне на новейших биполярных транзисторах, разработанных в конце 70-х и начале 80-х годов в московском НПП «Пульсар». Основное назначение прибора — гетеродин перестраиваемых приемников бортовой, в том числе навигационной, аппаратуры.





13.07.2018 13:11:40





А вскоре был создан генераторный модуль «Гармония» (гл. конструктор А. М. Алексеенко), предназначенный для радиовысотомеров малых высот. Модуль имел линейную частотную характеристику и отвечал самым жестким требованиям, предъявляемым к элементам бортовой самолетной и ракетно-космической аппаратуры. На его основе было разработано многофункциональное устройство «Глазурь» (гл. конструктор В. И. Рогов), объединяющее функции передачи и приема отраженного сигнала.

В 80-е годы комиссия Минрадиопрома СССР провела сравнительные испытания модуля «Глазурь» с приемопередающим блоком высотомера, разработанного в США. Комиссия отметила, что по своим электрическим параметрам «Глазурь» ни в чем не уступает зарубежному аналогу, а по конструктивно-технологическому исполнению существенно его превосходит. Главный вывод комиссии — необходимо скорейшее внедрение модуля «Глазурь» в серийное производство.

Изделия «Гармония» и «Глазурь» стали базовыми узлами серии радиовысотомеров для современных и вновь разрабатываемых военных и гражданских самолетов и вертолетов, беспилотных дистанционно пилотируемых летательных аппаратов, крылатых ракет и космических аппаратов. Эти радиовысотомеры позволяют летательным аппаратам автоматически поддерживать заданную высоту полета, огибать препятствия, обеспечивают слепую посадку, управляют телекоммуникационной аппаратурой на беспилотных аппаратах и т. д.

Столь широкое применение модулей «Гармония» и «Глазурь» потребовало немедленного внедрения этих изделий в производство. Серийный выпуск был организован в цехе 41 (в то время начальником цеха была Л. М. Решетина, а старшим технологом – О. В. Папин). Благодаря самоотверженному труду сотрудников цеха, внедрение изделий прошло успешно и в установленные сроки, и они до настоящего времени в нужных количествах поставляются потребителю. Было время, когда выпускались тысячи изделий в год.

Вершиной стал радиовысотомер многоразового космического корабля «Буран». Успешный полет «Бурана» был отмечен правительственными наградами, которые получили и создатели модулей «Гармония» и «Глазурь»; А. М. Алексеенко был награжден орденом Октябрьской революции, а В. И. Рогов, В. Ю. Мякиньков и Т. А. Назарова – медалями «За трудовую доблесть» и «За трудовое отличие».

В 1997 году А. М. Алексеенко и В. Ю. Мякиньков посетили первый международный авиа-космический салон в г. Жуковском (МАКС-1). Практически все экспонаты, представленные на салоне, несли на борту «Гармонию» или «Глазурь». Впечатление от содеянного было огромным. А если еще учесть, что там же демонстрировались не только самолеты и вертолеты, но и крылатые ракеты и другое ракетное вооружение летательных аппаратов, в головках самонаведения которых применены ЛОВы «Галактика», «Горизонт», «Засечка», «Георгин-1» и «Георгин-II», то можно понять гордость коллектива лаборатории за результаты своего труда и труда работников родного НПП «Исток».

Из воспоминаний А. М. Алексеенко: «17 мая 2003 года по первой программе ТВ была показана передача, посвященная работам в области ракетной техники КБ «Радуга» (г. Дубна). В частности, рассказывалось о ракетном комплексе «Москит» — убийце авианосцев, как его назвали в США. В период разрядки американцы приобрели несколько таких комплексов для того, чтобы научиться их сбивать. Однако сделать это им ни разу не удалось. И ведь все благодаря использованию в навигационной системе комплекса радиовысотомера и головок самонаведения, созданных на основе разработанных в лаборатории 1705 приборов, это ли не свидетельство качества наших разработок».





Модули «Гармония» и «Глазурь» имеют диапазон перестройки около 5 % и предназначены только для радиовысотомеров. Развитие на НПП «Исток» технологической базы и появление СВЧ бескорпусных диодов и транзисторов позволили приступить к созданию твердотельных ГУНов с перестройкой от 20 до 67 %, что привело к качественному улучшению тактико-технических характеристик противорадиолокационных головок самонаведения и аппаратуры радиоразведки и радиопротиводействия, а также открыло новые возможности в создании связной аппаратуры.

В течение 80-х годов были разработаны генераторы с варакторной перестройкой частоты, перекрывающие диапазон частот от 1 до 18 ГГц, в различных корпусах по гибридно-интегральной технологии.

Разработки твердотельных ГУНов («Огниво», «Оборот», «Огранка», «Гибрид», «Гарус», «Гобелен»), выполненные в лаборатории, позволили резко снизить массогабаритные характеристики радиоэлектронных устройств, более чем на порядок уменьшить питающие напряжения и потребляемую мощность. В ходе этих работ были созданы бескорпусные диоды Ганна, варакторные диоды со сверхрезким переходом на основе GaAs и Si и ЧИПы конденсаторов, работающих вплоть до 20 ГГц с возможностью пайки до 400 °С.

В диапазоне частот 7...18 ГГц разработки генераторов проводились под руководством А. М. Алексеенко, Е. Т. Максимова, В. Ю. Мякинькова, Н. М. Никулиной и Л. А. Амелькиной. Диапазон электрической перестройки базовых приборов в этом диапазоне частот составил до 40 % и обеспечивал перекрытие диапазона частот соответствующих волноводных каналов $(7,14...10,55\ \Gamma\Gamma \mu, 8...12\ \Gamma\Gamma \mu u 12...18\ \Gamma\Gamma \mu)$. В качестве активных элементов применялись бескорпусные диоды Ганна на основе GaAs, разработанные специально для этой цели в НПК-4 (НПП «Исток») Б. Ф. Горбиком и В. В. Авериным, а в качестве развязки – микрополосковые ферритовые вентили на краевой волне. Диапазон частот от 8 до 18 ГГц перекрывался генераторами на диодах Ганна, пятью типами. Уровень гетеродинных шумов составлял менее минус 160 дБ/Гц. Масса генераторов – от 50 до 150 г. К недостаткам этих ГУН можно отнести большие температурные уходы частоты, наличие послеперестроечного дрейфа, использование различных для конкретного образца величин питающих напряжений. Кроме того, для генераторов на диодах Ганна потребляемая мощность составляет 5...10 Вт при уровне выходной мощности порядка нескольких десятков милливатт. Диапазон от 1 до 8 ГГц перекрывается четырьмя генераторами, разработками которых руководили В. Ю. Мякиньков, И. С. Петров и В. М. Долич при участии И. В. Новосельца и О. Л. Талызиной, на основе биполярных транзисторов и варакторных диодов со сверхрезким переходом. Выходная мощность – более 10 мВт. Перепад по крутизне электрической перестройки частоты – не более 15 раз, при максимальной крутизне не более 500 МГц/В. В качестве развязки от внешнего тракта в этих приборах используются буферные усилители на полевых транзисторах. Для этих генераторов В. В. Ивановым при участии И. С. Федорова и К. Г. Кузнецова была разработана технология нанесения защитного слоя диэлектрика на напыленные резисторы для обеспечения сохранения номинала сопротивления с высокой точностью даже при воздействии температуры до 450 °C при пайке кристаллов транзисторов золото-кремниевой эвтектикой.

В 90-х годах проводилась ОКР «Орган» под руководством Е. Т. Максимова по обеспечению в одном генераторном модуле непрерывного перекрытия диапазона частот 8...19,5 ГГц на полевых транзисторах по гибридно-монолитной технологии. В рамках ОКР «Орган» были разработаны генераторы на полевых транзисторах (НПК-4, НПП «Исток», гл. конструктор В. Г. Лапин). Диапазон частот 8...20 ГГц перекрывался тремя генераторами с варакторной перестройкой частоты, работающими на основной частоте. Генератор СВЧ низкочастотного



Лаборатория 1705, 1982 г. Стоят слева-направо: Л. А. Амелькина, Н. Б. Машина (Кавелина), З. И. Васильева, Н. М. Никулина, В. Ю. Мякиньков, Е. Т. Максимов, И. В. Новоселец, В. П. Серебров, И. С. Петров, В. И. Рогов, О. Л. Барабошкина (Талызина); сидят: Г. Ф. Бодрова, М. М. Самоукина (Гаврилюк), Т. А. Назарова, Т. С. Мурашова (Мякинькова)

диапазона изготавливался на поликоровой плате с применением сосредоточенных элементов (гл. конструктор И. В. Горюнов), а генератор высокочастотного диапазона изготавливался по гибридно-монолитной технологии (гл. конструктор Ю. М. Богданов). Из-за прекращения финансирования заказчиком (ЦКБА, г. Омск) работа была завершена по достигнутому результату, однако опыт, полученный в ходе этой разработки, был использован в ОКР «Отпор».

В ОКР «Отпор» В. И. Роговым и Т. А. Назаровой под руководством В. Ю. Мякинькова и И. В. Горюнова разработаны СВЧ-генераторы с электрической перестройкой 8...10 ГГц и 10...12 ГГц; в качестве развязывающего буферного усилителя применен гибридно-монолитный усилитель на мостах Ланге, разработанный в НПК-4 (гл. конструктор К. В. Дудинов), что позволило значительно повысить надежность, долговечность и снизить энергопотребление по сравнению с генераторами на диодах Ганна.

В ОКР «Бармица-17» в 2004 г. был разработан (гл. конструктор В. И. Рогов) на основе кристаллов полевых транзисторов миниатюрный широкодиапазонный генератор с массой менее 10 г, обеспечивающий электрическую перестройку от 11,7 до 14,9 ГГц при управляющем напряжении от 0,5 до 15 В и питании 6 В. В 2004 году в результате успешно завершенной ОКР «ГУН» И. В. Горюновым и В. И. Роговым под руководством В. Ю. Мякинькова были созданы широкодиапазонные транзисторные генераторы, перекрывающие непрерывно диапазоны частот от 0,1 до 2,0 ГГц двенадцатью литерами и от 4,0 до 8,1 ГГц — четырьмя литерами с низким уров-

нем фазовых шумов и улучшенной линейностью частотной характеристики для синтезаторов частот, используемых в космической аппаратуре.

В последние годы для различных систем космической, бортовой и наземной аппаратуры в лаборатории 1705 был создан большой спектр миниатюрных ГУНов для синтезаторов частоты и генераторов с ФАПЧ, имеющих низкий уровень фазовых шумов, малое потребление и хорошую повторяемость (ОКР «Синтезатор-17», ОКР «Обмер», ОКР «Софора-17», ОКР «Система», ОКР «Сирена», СЧ ОКР «Панцирь-СЧ1», СЧ ОКР «Стропа» и др.). Главный конструктор всех работ – начальник лаборатории И. В. Горюнов. В работах принимали активное участие инженеры С. А. Сердюков, А. А. Панасенко, А. К. Гуларян, Н. И. Коломацкая, Е. О. Сафонова и другие. Ими было показано, что широкодиапазонные генераторы можно создавать на отечественной элементной базе с широкодиапазонной (до октавы) варакторной перестройкой частоты от 0,1 до 6 ГГц и с перестройкой частоты около 20 % и от 4 до 25 ГГц и выше на основе биполярных и полевых транзисторов (с применением транзисторных умножителей частоты).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балыко, А. К. История лаборатории 1705 / А. К. Балыко; под ред. В. Н. Батыгина. – Фрязино, 2007.

Статья поступила 6 марта 2018 г.

— НОВЫЕ КНИГИ

ИОВДАЛЬСКИЙ В. А. **Размещение элементов и компонентов ГИС СВЧ-диапазона в подложке МПП:** учеб. пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2018. – 192 с.: ил.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ-диапазона, разработке направлений конструкторскотехнологического развития, формированию иерархической Системы направлений развития техники ГИС СВЧ. Проведен анализ возможности улучшения электрических, тепловых и массогабаритных характеристик ГИС за счет размещения элементов и компонентов в объеме подложки микрополосковой платы.

Пособие предназначено для студентов Московского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.







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

- 1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).
 - 2. Статья должна содержать:
 - соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
 - инициалы и фамилии авторов;
 - название;
 - реферат;
 - ключевые слова;
 - текст самой статьи;
 - список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

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

- 3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.
- 4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ -0.7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста -12 пунктов, примечаний и ссылок -10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги A4 (210×297 мм).

Сложные формулы набираются только в "Редакторе формул" Word. Непосредственно в Worde допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика в формате CorelDRAW, WMF;
 - размер рисунка не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

- 6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.
- 7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.
- 8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.
 - 9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 2003 и дается общим списком в конце статьи.
- 10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.
- 11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.
- 12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(537), 2018

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.





ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2018 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки -7200 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 — и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12.

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

3 A K A 3	
Прошу принять подписку на научно-технический с серия 1, "СВЧ-техника" на 2018 г. и направлять по	1
Куда (почтовый индекс	, адрес)
Кому (название орган	noonnin)
(название орган.	изации)
Заказ оплачен платежным поручением №	дата
на сумму	3а экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н. Переводчик Барабанова Л.В. Компьютерная верстка Земскова Л.А. Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.6.2018 г. Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ" г. Москва Усл. п. л. 13,0 Уч.-изд. л. 13,5 Индекс 36292 Φ ормат $60 \times 88^{1/8}$ Тираж 500 9 статей

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







Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2018, вып. 2 (537), с. 106

Подписной индекс 36292 в каталоге агентства «Роспечать»

(

