



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 3 (534)

2017

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 3(534)

2017

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. Малышик**,
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. Михальченко**,
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякинчиков**, 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, телерадиовещания 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», 2017 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 3(534)

2017

Founded in 1950 г.

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»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, 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**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **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 ПИ № ФС 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

- Куликова И.В., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Приступчик Н.К.* – Исследование тепловых режимов мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием..... 6
- Пчелин В.А., Лисицын А.А., Трегубов В.Б., Корчагин И.П., Манченко Л.В., Маковецкая А.А., Семенюк С.С.* – Малогабаритные усилители с выходной мощностью не менее 0,5 и 6 Вт для АФАР *Ku*-диапазона..... 22

Комплексированные изделия и аппаратура

- Данилин Н.С., Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Булаев И.Ю.* – Микроминиатюризация электронной компонентной базы на основе микросистем в корпусе СВЧ-диапазона для малых спутников..... 28

Электроракуумные приборы

- Симонов К.Г., Мамонтов А.В., Алхименко Е.А., Батькова Т.А., Ключников Н.А., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И.* – Инжекторы электронов для ускорителей..... 34
- Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. *LCR*-модель с индуктивным проводником вывода..... 41

Технология и материаловедение

- Рогачёв И.А., Курочка А.С., Мешков О.И., Князьков А.В., Никитин Д.А., Зинкин С.Д., Верещагина А.С.* – Использование капсулирования с целью сохранения морфологии омических контактов *Ti/Al/Ni/Au* на гетероструктурах *AlGaIn/GaN*..... 50
- Вашин С.А., Корепин Г.Ф.* – Полевая десорбция поверхностных газов и электрическая прочность ЭВП..... 56

Краткие сообщения

- Кяргинский Б.Е.* – Исследование микросхем в качестве широкополосных шумовых генераторов..... 64

История

- Балыко А.К., Попов Р.М., Рожков В.В.* – Сергей Иванович Ребров – директор и человек..... 69
- Кузнецова Т.А., Алмазов-Долженко К.И.* – Взаимно обогащающий союз науки, производства и образования..... 83

CONTENTS

Solid-state electronics

- Kulikova I.V., Lapin V.G., Lukashin V.M., Pashkovsky A.B., Pristupchik N.K.* – Thermal modes investigation of power field-effect transistors with donor-acceptor doping..... 6
- Pchelin V.A., Lisitsyn A.A., Tregubov V.B., Korchagin I.P., Manchenko L.V., Makovetskaya A.A., Semenyuk S.S.* – Small-size amplifiers with output power not less than 0.5 and 6 W for *Ku*-band active phased arrays..... 22

Complex products and equipment

- Danilin N.S., Potyupkin A.U., Volkov S.A., Bulayev I.U.* – Microminiaturization of the electronic component base on the basis of microsystems in the microwave package for small satellites..... 28

Electrovacuum devices

- Simonov K.G., Mamontov A.V., Alkhimenko E.A., Bat'kova T.A., Klyuchnikov N.A., Perminov I.G., Pravdikovskaya G.I.* – Electron injectors for accelerators..... 34
- Kalina V.G., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V.* – Cyclotron protective device. *LCR*-model with inductive output conductor..... 41

Technology and material science

- Rogachev I.A., Kurochka A.S., Meshkov O.I., Knyaz'kov A.V., Nikitin D.A., Zinkin S.D., Vereshchagina A.S.* – The use of encapsulation to preserve the morphology of Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructures..... 50
- Vashin S.A., Korepin G.F.* – Field desorption of surface gasses and electrical strength of electrovacuum devices..... 56

News in brief

- Kyarginy B.E.* – Investigation of microcircuits as broadband noise generators..... 64

History

- Balyko A.K., Popov R.M., Rozhkov V.V.* – Serguei Ivanovich Rebrov – director and person.. 69
- Kuznetsova T.A., Almazov-Dolzhenko K.I.* – Mutually enriching union of science, production and education..... 83

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК.621.382.333

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

И. В. Куликова, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский,
Н. К. Приступчик

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

Теоретически исследованы тепловые режимы мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и определены основные факторы, обуславливающие перегрев активных областей таких приборов. Оценены критические удельные мощности, при которых допустимый перегрев прибора обеспечивается стандартным методом отвода тепла в подложку. Проведен теоретический анализ потенциальных возможностей усиленного охлаждения мощных гетероструктурных арсенидгаллиевых полевых транзисторов при помощи теплопроводящего покрытия. Согласно проведенным расчетам, применение теплопроводящего покрытия уменьшает перегрев прибора от двух до пяти раз в зависимости от толщины покрытия, конструкции транзистора и режима его работы. Уменьшение перегрева достигается при минимальном дополнении в технологию изготовления транзисторов без увеличения теплопроводности подложки.

КС: распределение температуры, полевой транзистор, область тепловыделения, теплопроводящее покрытие

THERMAL MODES INVESTIGATION OF POWER FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH DONOR-ACCEPTOR DOPING

I. V. Kulikova, V. G. Lapin, V. M. Lukashin, A. B. Pashkovsky,
N. K. Pristupchik

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

Thermal modes of power field-effect transistors on heterostructures with donor-acceptor doping have been theoretically analyzed and the main factors contributing to the overheating of the active regions of such devices have been identified. Critical power density at which the permissible overheating of the device is ensured by the standard method of heat dissipation in the substrate has been estimated. Theoretical analysis of potential possibilities of enhanced cooling of power gallium arsenide field-effect transistors with thermally conductive coating is done. According to the calculations, the application of thermally conductive coating, depending on coating thickness, transistor structure and its operation mode reduces the overheating from two to five times. The reduction of overheating is achieved with a minimum addition to the technology of transistors without increasing the thermal conductivity of the substrate.

Keywords: the temperature distribution, field-effect transistor, heat dissipation area, thermally conductive coating

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных механизмов ограничения выходной СВЧ-мощности полупроводниковых приборов на основе GaAs является сильный перегрев, возникающий в процессе работы из-за относительно большого теплового сопротивления GaAs. В мощных полевых транзисторах из-за относительно низкой теплопроводности основной вклад в тепловое сопротивление дает именно подложка GaAs. Для сохранения механической прочности и простоты монтажа желательно иметь достаточно толстые подложки (обычно 100 мкм), но при использовании толстых подложек перегрев транзистора может возрасти до недопустимых величин. Температура активной области прибора растет при увеличении толщины подложки и уменьшении расстояния между секциями транзистора (периодом структуры), что ведет к падению подвижности электронов и, как следствие, к уменьшению протекающего через транзистор тока стока, а значит, к уменьшению коэффициента усиления и выходной мощности [1, 2]. С другой стороны, при увеличении рабочих частот мощных СВЧ-усилителей и полевых транзисторов, для улучшения их характеристик за счёт уменьшения времен пролета и роли паразитных элементов часто требуется максимальная плотность упаковки прибора (минимизация расстояний между истоком, затвором и стоком в одиночной секции транзистора). В числе прочих ограничений, максимально возможная плотность упаковки прибора ограничена максимально допустимой температурой канала, при превышении которой начинаются интенсивные деградационные процессы [2] (для транзисторов на основе GaAs её обычно принимают равной 150 °С). Поэтому во многих применяемых в настоящее время конструкциях приходится уменьшать толщину GaAs-подложки до 25...30 мкм, а для сохранения механической прочности наращивать снизу толстый слой золота (около 30 мкм) [3, 4]. Многие годы при работе в X -диапазоне и выше удельная выходная мощность полевых транзисторов на основе GaAs-гетероструктур из-за многочисленных физических, конструкционных и технологических ограничений существенно не превосходила величину 1 Вт/мм. Конструкции транзисторов проектировались на тепловыделение, соответствующее этой величине удельной выходной мощности. Однако с появлением гетероструктур с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [5...8] величина удельной выходной мощности уже выросла в два раза, в перспективе возможно еще большее увеличение, что делает тепловые режимы работы таких приборов гораздо более напряженными. Исследование тепловых режимов работы DA-DpHEMT с обычными и с перспективными вариантами их конструкций является целью данной работы.

2. ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА

Расчет процесса теплопередачи проводился на основе 3D-уравнения стационарной теплопроводности, учитывающего температурную зависимость коэффициента теплопроводности арсенида галлия. Трехмерный характер используемого уравнения позволяет учесть влияние отдельных элементов конструкции транзистора, что дает возможность нахождения условий максимально сильного отвода тепла. Расчет проводился для транзисторов с периодами расположения секций затворов (расстояниями между затворами в соседних секциях транзисторов) 14 и 28 мкм. Толщины подложек в транзисторах задавались равными 25 и 100 мкм. При расчетах полагалось, что чип транзистора имеет ширину 600 мкм, расстояние от границ прямоугольных габаритов топологии транзистора до края чипа задавалось равным 200 мкм. Толщина металлизации шин истока и стока – 2 мкм. Учитывалось, что транзистор монтируется методом

пайки на медное основание толщиной 2 мм, температура на нижней грани которого считалась неизменной при вариациях выделяемой мощности и задавалась равной двум характерным величинам: 23 и 80 °С. На нижней стороне подложки транзистора толщиной 100 мкм предусматривалось наличие слоя золота толщиной 5 мкм и слоя припоя Sn:Au толщиной 20 мкм. На нижней стороне подложки транзистора толщиной 25 мкм предусматривалось наличие слоя гальванического золота толщиной 30 мкм и слоя припоя Sn:Au толщиной 20 мкм. Точно промоделировать состав слоев после пайки транзистора на медное основание достаточно проблематично (в принципе этот вопрос требует серьёзных дополнительных исследований), поэтому задание слоев на нижней стороне подложки является модельным и предназначено исключительно для прогноза их влияния на тепловой режим. Области выделения тепла в транзисторе считались расположенными у стоковых краев секций затвора транзистора с равномерным распределением удельной мощности по всей длине каждой одиночной секции. Поперечный размер каждой области тепловыделения был задан равным 0,3 мкм [9], ее толщина – 0,1 мкм (примерная толщина активного слоя с учётом тепловой диффузии). Рассматривались конструкции транзисторов с длинами секций («пальцев») затвора 50 и 100 мкм при суммарной (по всем секциям) ширине затвора 1,2 и 2,4 мм соответственно. Существует неопределённость при задании величины теплопроводности гальванического золота. Считается, что она определяется режимами осаждения и, как правило, в 2...3 раза хуже, чем у аморфного золота, поэтому при расчетах использовалось несколько характерных величин. Фотография серийного транзистора, схематическое изображение исследуемого прибора и характерные параметры, использованные при расчётах, приведены на рис. 1 и в табл. 1.

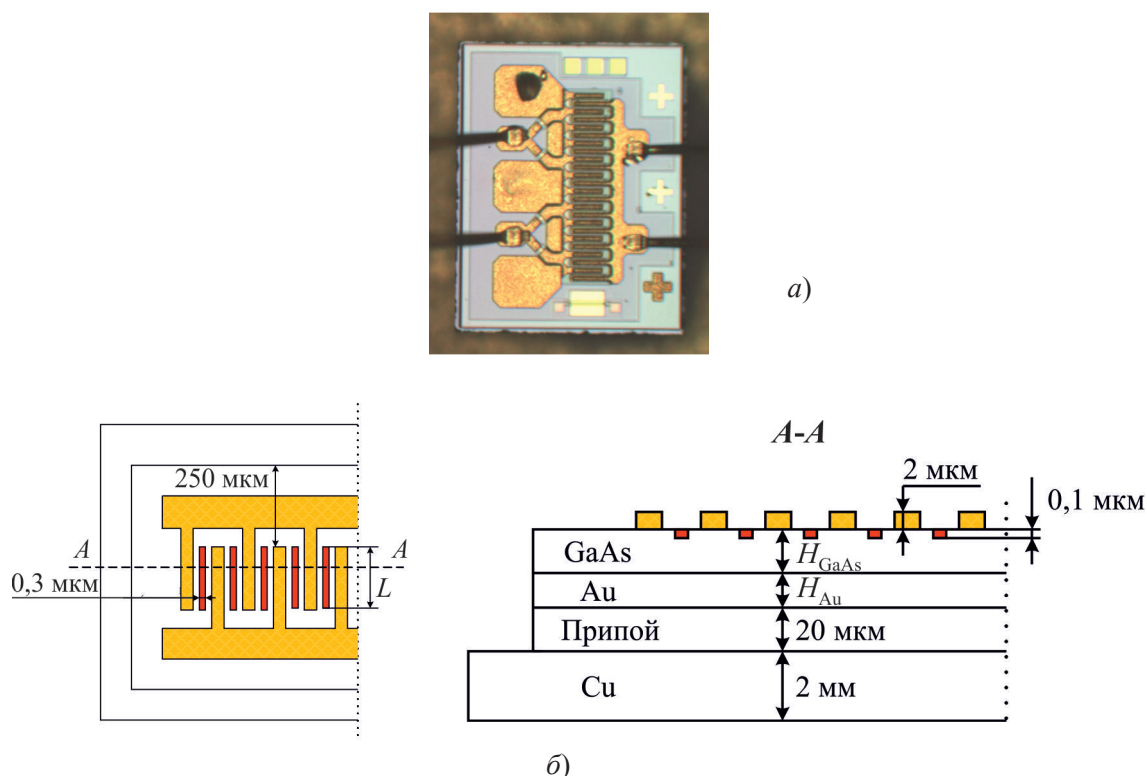


Рис. 1. Фотография (а) и схематическое изображение рассматриваемого прибора (б). Красным цветом показана область тепловыделения

Таблица 1

Параметры тепловой модели транзистора

Длина секций затвора L , мкм	50, 100	
Толщина подложки H_{GaAs} , мкм	25	100
Толщина гальванического золота H_{Au} , мкм	30	5
Коэффициент теплопроводности гальванического золота k , Вт/(м·К)	100, 200, 300	
Температура основания T_0 , °C	23, 80	
Мощность на единицу длины затвора W , Вт/мм	1, 2, 3, 4	
Шаг между затворами h , мкм	14	28

Известно, что температура канала сильно меняется по трем координатам: в направлении длины каждой одиночной секции, в поперечном направлении и в направлении к теплоотводящему медному основанию [3, 4, 10], что подтверждается и расчётами по построенной 3D-модели (рис. 2). С учётом малости размеров индивидуальных областей тепловыделения каждой секции транзистора, измерить максимальную температуру в этих областях работающего в усилительном режиме транзистора достаточно сложно. Поскольку разрешение даже самых прецизионных тепловизоров не превышает нескольких микрон, то измеряться будет совершенно другая, меньшая величина, являющаяся результатом усреднения по существенно большему размеру области измерения. Максимальная температура канала, пересчитываемая из результатов экспериментов по деградации, фактически находится при условии равномерного нагрева транзистора. В связи с этим возникает закономерный вопрос, как эта температура соотносится с максимальной температурой канала, получаемой при расчетах в каждой индивидуальной области тепловыделения.

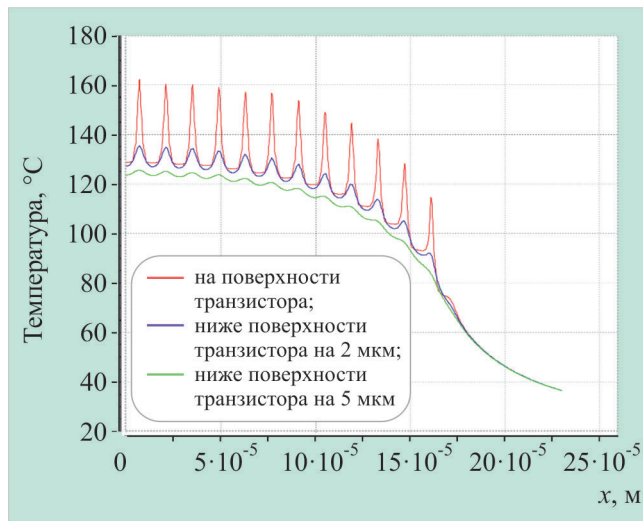


Рис. 2. Распределение температуры по центру активной области в направлении, перпендикулярном секциям транзистора и параллельном поверхности структуры (задано: удельная СВЧ-мощность – 1 Вт/мм, КПД – 50 %, длина секции – 100 мкм, толщина подложки – 100 мкм, температура основания – 23 °C, период затвора – 14 мкм; отсчет координаты ведется от середины транзистора)

Известно, что все транзисторы на ДрНЕМТ-гетероструктурах при отдаваемой удельной мощности чуть менее 1 Вт/мм выдерживают испытания на надёжность при работе в непрерывном режиме. Поэтому, на первый взгляд, в качестве температуры начала сильной деградации можно брать наибольшее значение максимальной температуры в канале, которое будет вычислено в одном из рассматриваемых вариантов при задании удельной выходной мощности 1 Вт/мм. В этом расчете, естественно, большое значение имеет КПД транзистора, однако без

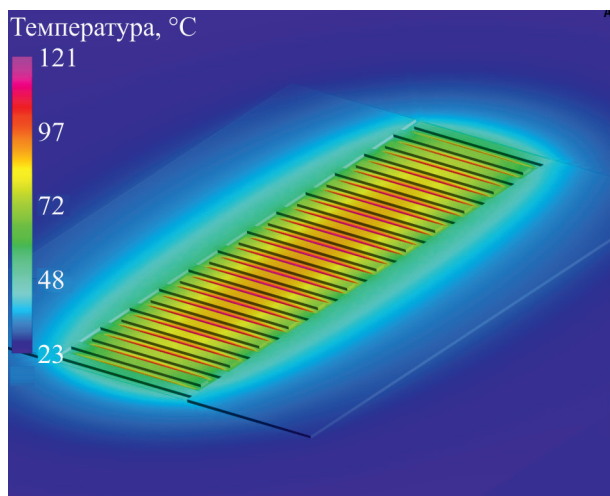


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности транзистора. Температура основания равна 23 °С, толщина подложки – 100 мкм

больших ограничений общности для оценок теплового режима при работе в режиме усиления «А» КПД можно принять равным 50 % (в этом случае на разогрев прибора идёт дополнительная удельная мощность постоянного тока, равная удельной выходной СВЧ-мощности).

Так как транзисторы даже с длиной секции 100 мкм при всех типах испытаний не деградируют ни при толщине подложки 100 мкм и периоде структуры 28 мкм, ни при толщине подложки 25 мкм и периоде структуры 14 мкм, то, возможно, что вычисленная максимальная температура канала, достигающая 160...170 °С (она несколько выше общепринятой величины 150 °С) в локализованных у секций затвора областях выделения тепла, см. рис. 2...5, вполне допустима для работы этих приборов.

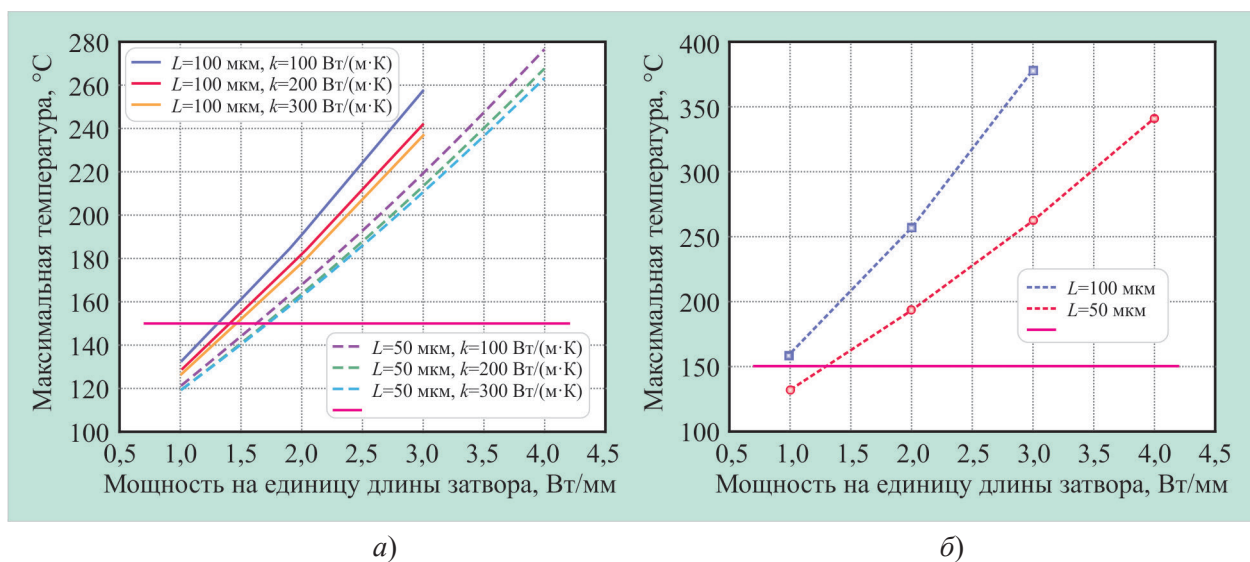


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности при $T_0 = 80\text{ °C}$, $h = 28\text{ мкм}$, КПД – 50 %:

$a - H_{\text{GaAs}} = 25\text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 30\text{ мкм}$; $b - H_{\text{GaAs}} = 100\text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 5\text{ мкм}$

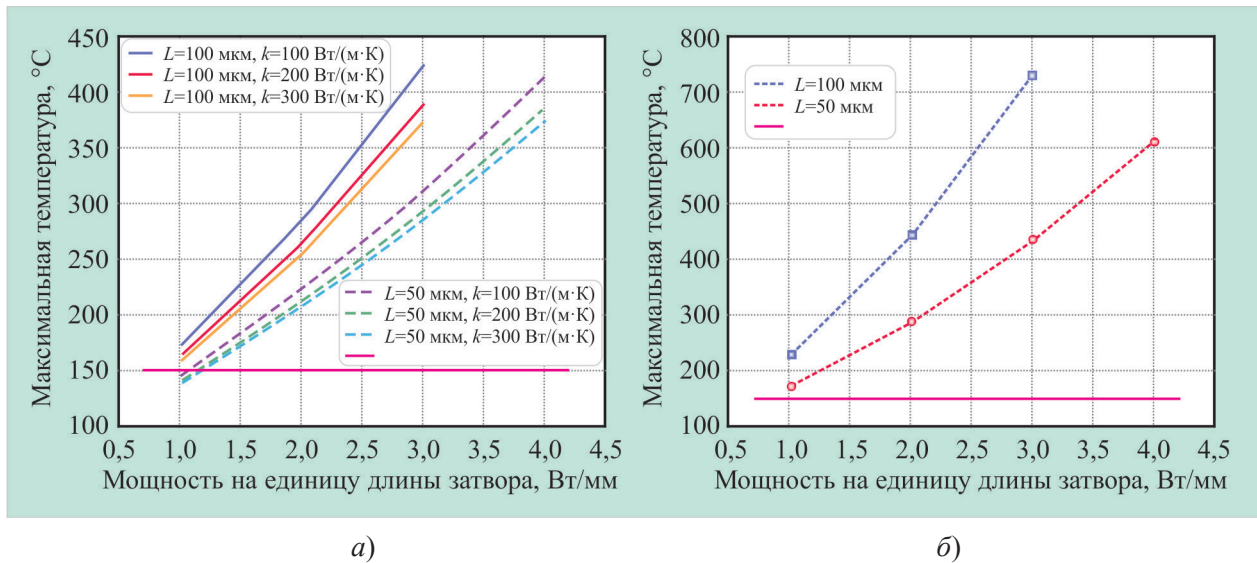


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности при $T_0 = 80^\circ\text{C}$, $h = 14$ мкм, КПД – 50 %:
 а – $H_{\text{GaAs}} = 25$ мкм, $H_{\text{Au}} = 30$ мкм; б – $H_{\text{GaAs}} = 100$ мкм, $H_{\text{Au}} = 5$ мкм

Максимальная температура на поверхности достигается в центре топологической площадки, занимаемой транзистором. При отступлении от центра, даже на сравнительно незначительное расстояние, температура заметно изменяется (см. рис. 2). Поскольку испытания транзисторов с длиной секций 100 мкм проводились при удельной выходной СВЧ-мощности менее 1 Вт/мм, полученный при расчетах результат соответствует традиционной критической температуре 150°C , которая в дальнейшем и будет использоваться для оценок.

Надо отметить, что главное влияние перегрев канала оказывает на надёжность транзистора, но, кроме этого, по оценкам, перегрев канала на 100°C [11] приводит к падению коэффициента усиления на 1...2 дБ и выходной мощности на 10...20 %, в зависимости от режима работы, конструкции транзистора и характеристик гетероструктуры.

Следует отметить важность учёта температурной зависимости коэффициента теплопроводности арсенида галлия. Как видно из рис. 4 и 5, вычитание из результатов, полученных при температуре основания $T_0 = 80^\circ\text{C}$, разницы в 57°C не приводит к совпадению с кривой, полученной при $T_0 = 23^\circ\text{C}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ СТАНДАРТНОМ ТЕПЛОТВОДЕ

Вначале можно сделать простые оценки. Если не учитывать трехмерной специфики задачи, то R_{T100} – удельное тепловое сопротивление транзистора при толщине подложки 100 мкм и теплопроводности гальванического золота $k_{\text{Au}} = 200$ Вт/(м·К) – примерно в три раза выше, чем у транзистора при толщине подложки 25 мкм с удельным тепловым сопротивлением R_{T25} :

$$\frac{R_{T100}}{R_{T25}} \approx \frac{H_{100} / k_{\text{GaAs}}}{H_{25} / k_{\text{GaAs}} + H_{\text{Au}} / k_{\text{Au}}} \approx 3,2,$$

а значит, и перегрев транзистора с толщиной подложки 25 мкм и периодом 14 мкм должен быть заметно (примерно в полтора раза) ниже, чем у прибора с толщиной подложки 100 мкм и периодом 28 мкм. Однако более точные результаты, получаемые при решении трехмерной задачи, это предположение не подтверждают.

На рис. 4...7 приведены зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности, выделяемой транзистором при различных температурах основания корпуса T_0 , длинах секций L , толщинах подложки H_{GaAs} , толщинах слоя золота H_{Au} и периодах секций затворов h .

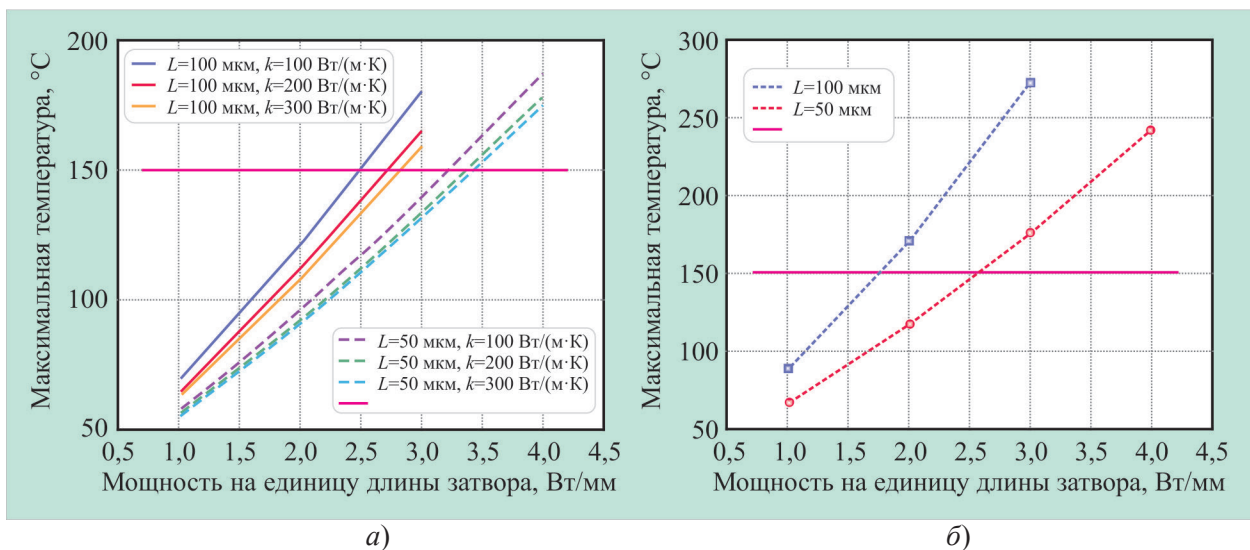


Рис. 6. Зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности при $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $h = 28 \text{ мкм}$, КПД – 50 %:
 а – $H_{\text{GaAs}} = 25 \text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 30 \text{ мкм}$; б – $H_{\text{GaAs}} = 100 \text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 5 \text{ мкм}$

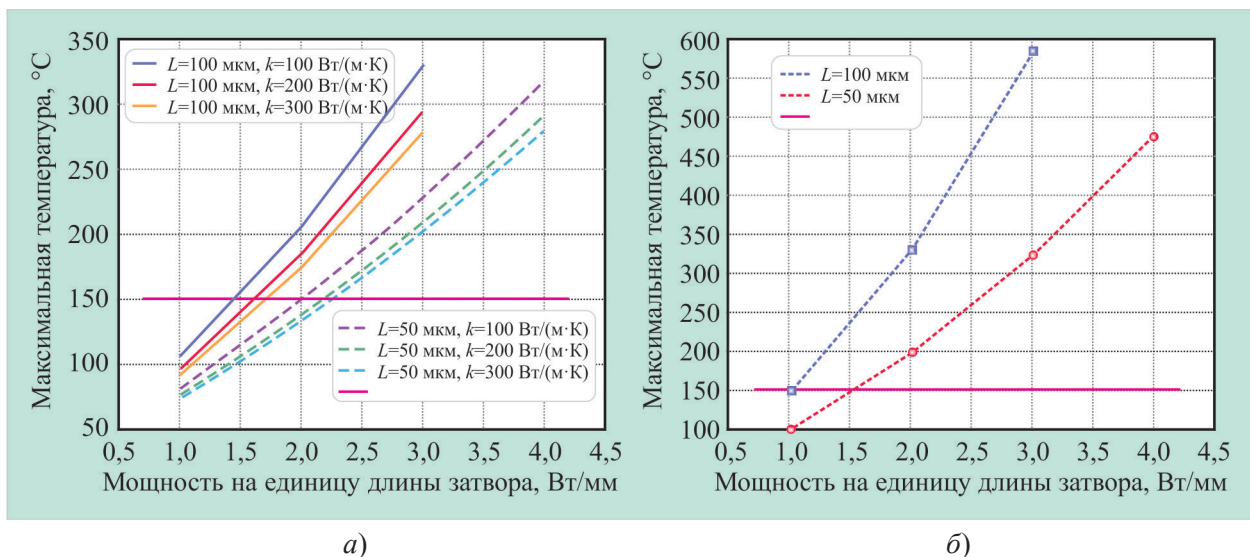


Рис. 7. Зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности при $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $h = 14 \text{ мкм}$, КПД – 50 %:
 а – $H_{\text{GaAs}} = 25 \text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 30 \text{ мкм}$; б – $H_{\text{GaAs}} = 100 \text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 5 \text{ мкм}$

Результаты вычислений показали следующее.

1. При периоде секций затворов 28 мкм, толщине подложки 100 мкм и прочих равных условиях максимальная температура в канале близка к максимальной температуре канала при периоде секций затворов 14 мкм и толщине подложки 25 мкм. Этот результат получен для коэффициента теплопроводности гальванического золота 300 Вт/(м·К). Таким образом, уменьшение толщины подложки в четыре раза при учете 3D-растекания тепла, теплового сопротивления слоя гальванического золота и припоя уменьшает полное тепловое сопротивление максимально нагретой области транзистора всего лишь вдвое, а не почти в 3,5 раза, как это следует из простых оценок, не учитывающих 3D-эффект растекания тепла.

2. При одинаковой удельной выходной СВЧ-мощности транзистора максимальная температура в канале транзистора при длине секции 50 мкм существенно меньше, чем аналогичная температура канала транзистора с длиной секции 100 мкм. Различие этих температур возрастает при увеличении толщины подложки, уменьшении величины коэффициента теплопроводности гальванического золота и увеличении температуры основания корпуса.

3. Даже при сравнительно большом периоде секций затворов (28 мкм), КПД 50 % и длине секции 50 мкм транзисторы при удельной выходной СВЧ-мощности более 3 Вт/мм (потенциально достижимой в GaAs DA-DpHEMT) нагреваются до максимальных температур выше 150 °С (что недопустимо для транзисторов на основе GaAs) при температуре основания корпуса 23 °С. При длинах секций 100 мкм нагрев выше 150 °С достигается при удельной выходной СВЧ-мощности менее 2,5 Вт/мм.

4. При периоде секций затворов 14 мкм, температуре основания корпуса 23 °С и двукратном увеличении удельной выходной СВЧ-мощности (наблюдаемом в DA-DpHEMT) в расчетах получен заметный нагрев транзисторов даже при длине секции 50 мкм, идеальном качестве гальванического золота и толщине GaAs-подложки 25 мкм. При 100-мкм длине секции нагрев недопустимо велик – выше 150 °С при температуре основания 23 °С.

Как отмечалось выше, при уменьшении толщины подложки в 4 раза (до 25 мкм), из-за технологических особенностей монтажа транзистора на основание корпуса (с промежуточным слоем Au и слоем припоя Sn:Au) удельную выходную СВЧ-мощность транзистора при КПД, равном 50 %, можно увеличить всего в 2 раза – до величины 2 Вт/мм. Следует отметить, что тривиальное уменьшение толщины GaAs-подложки HEMT, конечно, дает уменьшение ее теплового сопротивления, но приводит как к увеличению паразитных емкостей «затвор – основание корпуса» и «сток – основание корпуса», так и к заметному разбросу характеристик приборов из-за того, что при изготовлении очень тонких подложек увеличивается относительная погрешность в толщинах. Меры по увеличению точности изготовления сверхтонких подложек требуют заметного усложнения технологии. Возникает закономерный вопрос, насколько можно улучшить теплоотвод при фиксированной толщине достаточно толстой подложки с учётом трехмерного растекания тепла? Рассмотрим предельный случай – при толщине подложки 25 мкм заменим в расчётах промежуточный слой золота и слой припоя Sn:Au на очень хорошо проводящий тепло слой поликристаллического алмаза или слой графена – по аналогии с разработкой [12, 13] (рис. 8). Также предположим, что алмазный тепловой интерфейс непосредственно, т. е. без 20-мкм слоя припоя Sn:Au, соединен с медным основанием корпуса.

Естественно, в такой идеализированной ситуации максимальная температура транзистора заметно упадёт. Видно, что при комнатной температуре в зависимости от периода структуры и

и длины секции конструкция с алмазным интерфейсом на подложке позволила бы увеличить максимальную допустимую мощность примерно на 20...30 %, что в принципе очень неплохо, но до конца проблему теплоотвода не решает. По-видимому, подобная технология для арсенида галлия будет достаточно эффективна только при дальнейшем уменьшении толщины подложки аналогично [12, 13], что, как отмечалось выше, нежелательно.

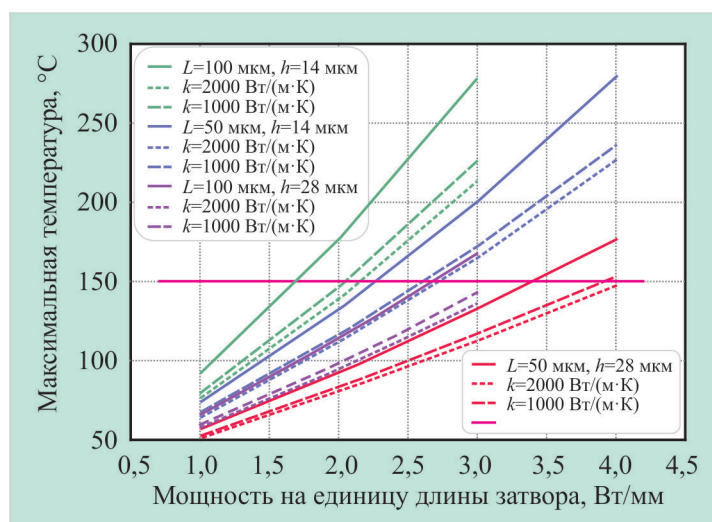


Рис. 8. Зависимости максимальной температуры канала (в центре транзистора) от удельной СВЧ-мощности при $T_0 = 23$ °C, КПД – 50 %:
сплошные линии – при $H_{Au} = 30$ мкм и 20-мкм слое припоя Sn:Au;
пунктир – результаты при введении алмазного интерфейса на подложке

4. ТРАНЗИСТОРЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ НА ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Проведенные расчёты показывают, что без существенного уменьшения толщины арсенидгаллиевой подложки серьёзно улучшить теплоотвод традиционными способами вряд ли удастся. Существует много идей дальнейшего улучшения теплоотвода в сторону подложки (отвод тепла вниз) [4], сводящихся, по сути дела, к уменьшению её толщины, и некоторые успешно используются, например, на нитридгаллиевых полевых транзисторах [12, 13], однако они или сталкиваются со значительными технологическими трудностями, или требуют кардинальной перестройки технологии изготовления прибора. Проведенные нами исследования позволяют выдвинуть принципиально иную идею – вместо того чтобы пытаться улучшить отвод тепла из областей его выделения только в направлении подложки, осуществить дополнительный отвод тепла вверх, отвести этот дополнительный поток тепла на периферию транзистора с последующим уходом тепла в основание корпуса через полупроводниковую подложку. Сделать это можно совершенно разными способами, например нанести поверх очень тонкого защитного слоя Si_3N_4 тонкую пленку алмазоподобного диэлектрика по всей площади кристалла, сформировав в нем окна для последующих электрических соединений шин истока, затвора и стока.

Естественно, при этом придется решать ряд технологических проблем, например подбирать материал и толщину покрытия так, чтобы оно или кристалл не разрушались при перегреве от

термических напряжений. Весьма привлекательным вариантом представляется холодное нанесение на поверхность кристалла эффективно проводящего тепло (с теплопроводностью около 50 Вт/(м·К) или больше) клея или лака – изолятора после монтажа транзистора на теплоотводящее основание корпуса. Это позволило бы полностью избежать термических напряжений при монтаже (пайке), а термические напряжения при эксплуатации из-за малого перегрева были бы несущественны. К сожалению, в настоящее время доступна лишь широкая номенклатура клеев с высокой теплопроводностью (порядка 60...80 Вт/(м·К)) и наполнителем на основе серебра, которые являются хорошими проводниками и поэтому совершенно непригодны для дополнительного теплового интерфейса. Принципиально важно, что существуют низкотемпературные способы нанесения алмазоподобных покрытий [14, 15], совместимые с технологиями арсенидгаллиевых и нитридгаллиевых приборов, такие покрытия являются диэлектриками и с успехом могут быть использованы в качестве дополнительного теплового интерфейса. В настоящее время на основе нанотехнологий [16] активно разрабатываются материалы с совершенно новыми свойствами, и, возможно, уже в ближайшее время будут разработаны иные типы диэлектрических материалов с высокой теплопроводностью.

Ранее идеи по отводу тепла от поверхности приборов, близкие к нашей, уже высказывались, например, в методе обратного монтажа кристаллов [3] или по применению алмазного покрытия в нитридгаллиевых транзисторах [14]. Однако в первом случае этот способ не слишком эффективен из-за очень малого поперечного размера областей локального тепловыделения в полевых транзисторах [10]. Во втором случае проблема связана с тем, что теплопроводность нитрида галлия (220 Вт/(м·К)) больше теплопроводности арсенида галлия (44 Вт/(м·К)), как минимум, в пять раз [17, 18]. Поэтому способ посадки GaN-транзистора без алмазоподобного покрытия, но с тонкой подложкой непосредственно на алмазное основание [12, 13] выглядит более предпочтительным.

Для проверки эффективности предложенной нами идеи проведем расчёт транзисторов при введении сверху теплопроводящего покрытия толщиной h_c (рис. 9), имеющего удельную теплопроводность 1000 Вт/(м·К), что соответствует поликристаллическому алмазу, для тех же вариантов конструкций, что рассматривались выше.

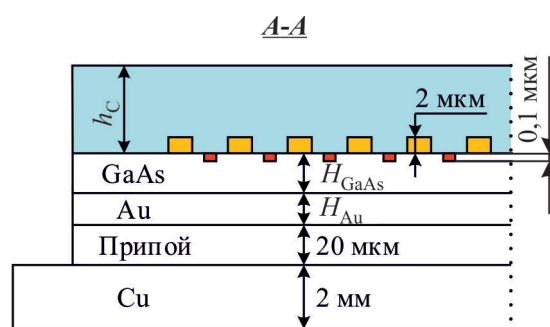


Рис. 9. Мощный СВЧ полевой транзистор на основе GaAs-гетероструктуры с нанесённым теплопроводящим покрытием толщиной h_c (схематический упрощённый продольный разрез транзистора)

Как показывали расчёты, результаты получаются примерно одинаковыми, если при уменьшении удельной теплопроводности алмазоподобного покрытия увеличивать пропорционально его толщину.

Для выявления эффекта от нанесения алмазоподобного покрытия в качестве исходной используем модель транзистора, результаты для которой были приведены на рис. 2. Результаты расчетов представлены для трех вариантов формирования покрытия на исходной модели транзистора. В первом варианте (рис.10, а) покрытие нанесено только в пределах активной области транзистора (т. е. только поверх секций истока, затвора и стока шириной L , см. рис.1). Во втором варианте (рис.10, б) покрытие нанесено как на активную область прибора, так и с расширением области покрытия на 50 мкм за её пределы. В третьем варианте (рис. 10, в) покрытие нанесено по всей площади чипа.

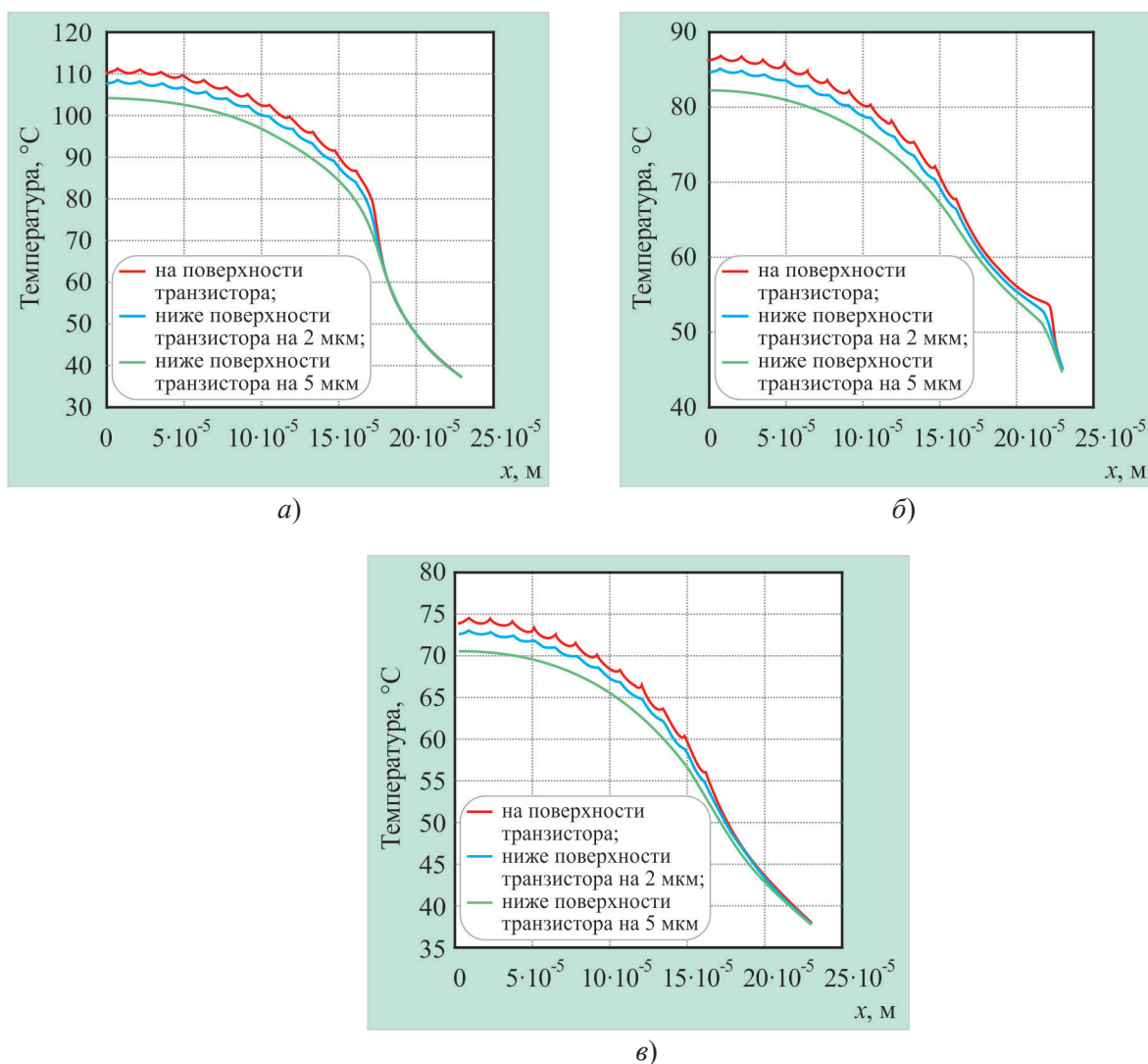


Рис. 10. Распределение температуры по центру активной области в направлении, перпендикулярном секциям транзистора и параллельном поверхности структуры. Отсчет координаты ведется от центра транзисторной структуры (температура корпуса – 22 °С, СВЧ-мощность – 1 Вт/мм, КПД – 50 %, длина секции – 100 мкм, толщина подложки – 100 мкм, температура основания – 23 °С):

а – алмазоподобным слоем толщиной 5 мкм покрыта вся активная область транзистора; *б* – вся активная область транзистора и периферия поверхности чипа вокруг активной области на расстоянии 50 мкм; *в* – вся активная область транзистора и вся поверхность чипа

Видно, что связанные с малыми размерами области тепловыделения (высотой примерно в 30 °С) исчезают. Уменьшение ещё на 20 °С можно соотнести с поперечным выравниванием температуры в направлении вдоль секций (рис. 11).

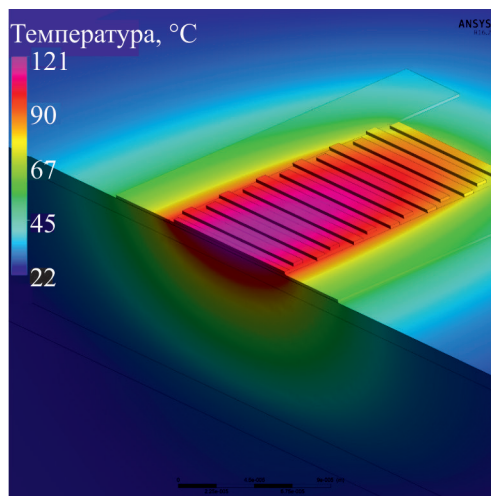


Рис. 11. Распределение температуры на поверхности транзисторной структуры (активная область транзистора покрыта алмазоподобным слоем толщиной 5 мкм; СВЧ-мощность – 1 Вт/мм; КПД – 50 %; длина секции – 100 мкм; толщина подложки – 100 мкм; температура основания – 23 °С)

При нанесении покрытия по варианту б, т. е. с выносом на 50 мкм за периферию активной области, температура дополнительно снижается на 25 °С, а нанесение алмазоподобного теплового интерфейса на всю поверхность чипа уменьшает эту величину ещё на 10 °С, т. е. перегрев уменьшается более чем в 2,5 раза.

Для более детальной демонстрации эффективности введения в конструкцию транзистора алмазоподобного теплового интерфейса на рис. 12 и 13 приведены зависимости максимальной температуры канала от удельной мощности тепловыделения для различных вариантов исполнения полевых транзисторов: как при отсутствии алмазоподобного теплового интерфейса, так и при различных его толщинах h_c .

Результаты вычислений для транзисторов с тепловым интерфейсом на поверхности структуры показали следующее.

1. При толщине GaAs-подложки 100 мкм, периоде структуры 28 мкм тепловой интерфейс толщиной более 5 мкм с удельной теплопроводностью 1000 Вт/(м·К) полностью решает проблему теплоотвода в транзисторах с длиной секций 50 мкм при удельной мощности тепловыделения менее 3,5 Вт/мм и в транзисторах с длиной секций 100 мкм при удельной мощности тепловыделения менее 2,5 Вт/мм при жестких условиях эксплуатации (работа в непрерывном режиме при температуре окружающей среды 80 °С).

2. При толщине GaAs-подложки 25 мкм, периоде структуры 14 мкм тепловой интерфейс толщиной более 5 мкм и теплопроводностью 1000 Вт/(м·К) полностью решает проблему теплоотвода в транзисторах с длиной секций 50 мкм при удельной мощности тепловыделения менее 2 Вт/мм и в транзисторах с длиной секций 100 мкм при удельной мощности тепловыделения менее 1,5 Вт/мм. Решение проблемы теплоотвода достигается при работе в непрерывном режиме и температуре окружающей среды 80 °С.

3. Уменьшение длины секций сильно уменьшает величину перегрева транзистора, так же как и в результатах расчётов для транзисторов без алмазоподобного теплового интерфейса.

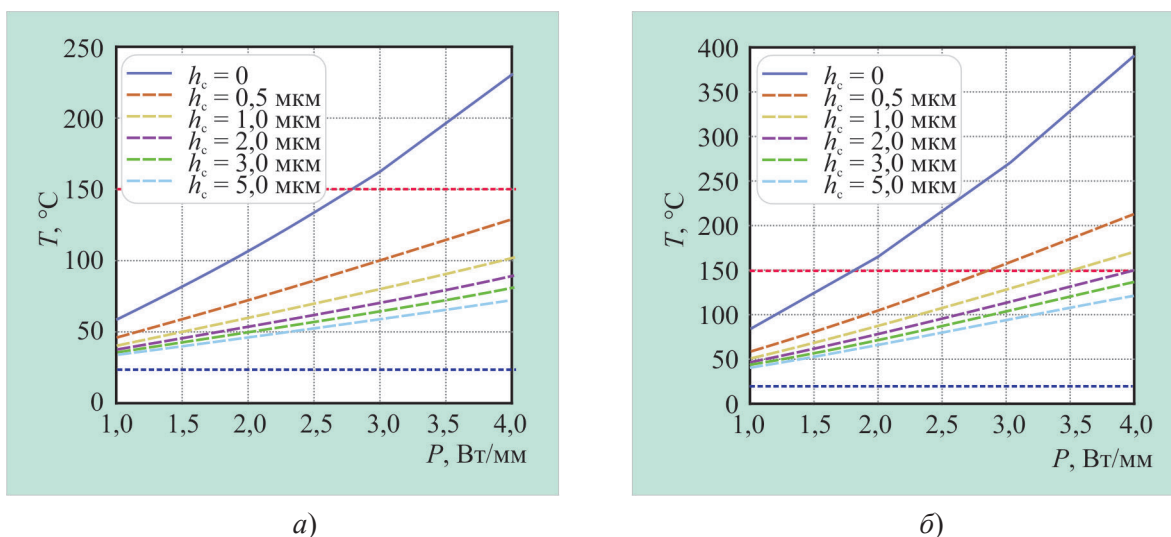


Рис.12. Зависимости максимальной температуры в канале транзистора от удельной мощности тепловыделения при длине секций 50 мкм (а), 100 мкм (б) (толщина подложки – 100 мкм; период секций затворов – 28 мкм):

горизонтальная красная пунктирная линия – критическая температура, выше которой начинаются интенсивные процессы деградации; горизонтальная синяя пунктирная линия – температура окружающей среды

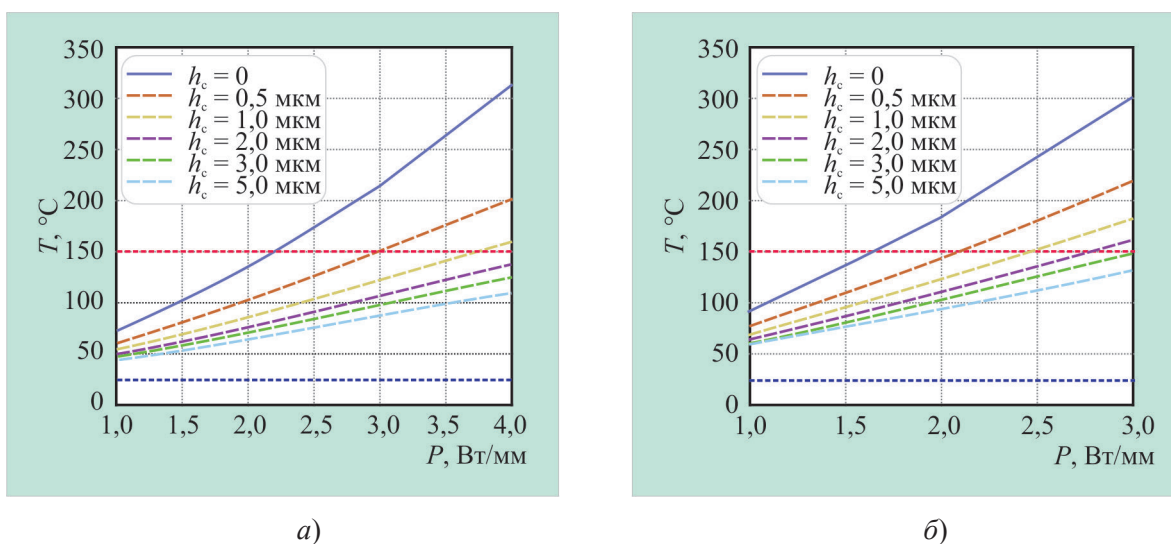


Рис.13. Зависимости максимальной температуры в канале транзистора от удельной мощности тепловыделения при длине секций 50 мкм (а), 100 мкм (б) (толщина подложки – 25 мкм при слое гальванического золота толщиной 30 мкм и слое припоя Sn:Au толщиной 20 мкм; период секций затворов – 14 мкм):

горизонтальная красная пунктирная линия – критическая температура, выше которой начинаются интенсивные процессы деградации; горизонтальная синяя пунктирная линия – температура окружающей среды

3. СРАВНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА С ДРУГИМИ СПОСОБАМИ УСИЛЕНИЯ ОТВОДА ТЕПЛА

Представляет практический интерес сравнить, хотя бы качественно, предложенный способ уменьшения тепловой нагрузки с другими способами. Например, с оригинальным способом уменьшения до нескольких микрометров толщины остающегося после травления подложки буферного слоя GaAs при помощи специального стоп-слоя. Этот стоп-слой выращивается в структуре и предназначен для остановки процесса травления подложки на желаемой глубине [4]. Результаты расчётов, необходимые для такого сравнения, приведены в табл. 2 и 3.

В табл. 2 приведены величины максимальной температуры в центре транзистора при различных величинах выделяемых мощностей и различной толщине алмазоподобного покрытия (АПП), нанесенного на всю поверхность чипа. Температура корпуса равна 80 °С.

Таблица 2

Максимальная температура, °С, транзистора с АПП

Толщина АПП, мкм	Выделяемая мощность, Вт (Вт/мм)		
	2,4 (1,0)	4,8 (2,0)	7,2 (3,0)
1,0	182,45	295,75	409,71
2,0	165,23	259,05	354,02
3,0	153,83	234,4	316,49
5,0	140,44	205,45	272,28

В табл. 3 приведены значения максимальной температуры в структуре со стоп-слоем и тонкой подложкой под активной областью [4] для температуры корпуса 80 °С, транзистор ничем не покрыт, снизу – гальваническое золото. Период структуры – 14 мкм, длина «пальцев» – 100 мкм, мощность – 2,4 Вт (удельная мощность – 1 Вт/мм)

Таблица 3

Максимальная температура, °С, транзистора с тонкой подложкой под активной областью. АПП отсутствует

Толщина GaAs буферного слоя, мкм	Толщина гальванического золота, мкм	Теплопроводность гальванического золота, Вт/(м·К)	T_{max} , °С
10	90	100	175
10	90	200	154
10	90	300	147
5	95	100	166
5	95	200	144
5	95	300	136

Видно, что при значениях удельной теплопроводности гальванического золота менее 200 Вт/(м·К) поверхностный алмазоподобный тепловой интерфейс при удельной теплопроводности по-

крытия 1000 Вт/(м·К) и толщине GaAs-подложки 100 мкм становится не менее эффективен, чем способ со стоп-слоем в структуре уже при толщине АПП 3 мкм.

Таким образом, проведенные расчёты показали, что введение в конструкцию транзистора поверхностного теплового интерфейса вплотную к областям локального тепловыделения, во-первых, сразу сглаживает распределение температуры на поверхности кристалла и всей активной области прибора в направлениях, продольных и поперечных по отношению к направлению ориентации секций транзистора, устраняя все резкие перепады. Во-вторых, при наличии теплопроводящего покрытия открывается второй и, из-за высокой теплопроводности покрытия, очень эффективный канал отвода тепла – из областей сильного тепловыделения вверх, далее на периферию кристалла транзистора с последующим переносом тепла через подложку в теплоотводящее основание корпуса. Даже если рассмотреть абсолютно симметричную задачу – всю структуру отобразить относительно верхней поверхности транзистора, а мощность тепловыделения оставить прежней, то величина максимального перегрева канала уменьшится в 2 раза. В техническом решении с верхним поверхностным тепловым интерфейсом сверху оказывается материал интерфейса, имеющий существенно большую, чем GaAs-подложка, удельную теплопроводность. Естественно, конечный перенос тепла в основание корпуса все равно происходит через арсенидгаллиевую подложку с относительно низкой теплопроводностью, но после введения поверхностного алмазоподобного теплового интерфейса перенос тепла происходит через контакт «подложка – основание корпуса», имеющий площадь, гораздо большую, чем занимаемая активной областью прибора. Следует отметить, что вклады каждого из механизмов: сглаживание перепадов и отвод тепла вверх, в стороны и далее вниз, в основание корпуса, сравнимы, а совместное действие этих механизмов и приводит к тому, что перегрев прибора может уменьшиться в несколько раз. Важным фактором является также то, что в принципе совсем не обязательно наносить теплопроводящий интерфейс полностью на весь чип. Достаточно, чтобы он выступал на не слишком большие расстояния за область выделения тепла. Этот факт может, например, исключить необходимость создания окон в АПП для контактирования. Следует отметить, что при необходимости окна в АПП достаточно просто можно сформировать методом плазмохимического травления в кислородной плазме.

Кроме того, одно из главных достоинств способа, основанного на формировании поверхностного алмазоподобного термоинтерфейса, заключается в том, что при этом вся базовая технология изготовления мощных полевых транзисторов и монолитных усилителей практически не меняется. Как показывают оценочные трехмерные расчёты, формирование алмазоподобного термоинтерфейса не меняет и согласование приборов, а выигрыш от уменьшения перегрева канала транзистора оказывается велик.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты демонстрируют, что существенное увеличение мощности в транзисторах с донорно-акцепторным легированием при стандартных способах отвода тепла ведет к их быстрому перегреву даже при длине секций транзистора 50 мкм. Проблема может быть решена при помощи теплопроводящего покрытия, нанесенного на поверхность транзистора. Согласно проведенным расчетам, при минимальном дополнении в технологию изготовления транзисторов и без дополнительных мер по улучшению теплопроводности подложки, в зависимости от толщины покрытия, конструкции транзистора и режима его работы, величина максимального перегрева (относительно температуры корпуса) может быть уменьшена от двух до пяти раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зи, С.** Физика работы полупроводниковых приборов. Т.1 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 360 с.
2. **Ди Лоренцо, Д. В.** Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / Под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. – М.: Радио и связь, 1988. – 499 с.
3. **Воробьев, А. А.** Моделирование теплового режима мощных транзисторов и МИС и новый метод монтажа кристаллов / А. А. Воробьев, Е. В. Воробьева, А. В. Галдецкий // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 37 – 41.
4. **Воробьев, А. А.** О возможности создания эффективного теплоотвода от мощного СВЧ-транзистора с помощью структуры со стоп-слоем / А. А. Воробьев, А. В. Галдецкий // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 42 – 54.
5. **Лукашин, В. М.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, А. Б. Соколов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
6. **Журавлев, К. С.** Серийный рНЕМТ с удельной мощностью 1,4 Вт/мм / К. С. Журавлев, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, А. Б. Соколов, А. И. Торопов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып.1 (512). – С. 55 – 61.
7. **Лукашин, В. М.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, Е. И. Голант, А. А. Капралова // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, Вып. 5. – С. 684 – 692.
8. **Лукашин, В. М.** Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием, эффективно работающие при нулевом смещении на затворе / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков, А. А. Капралова, К. С. Журавлев, А. И. Торопов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 5 – 14.
9. **Бережнова, П. В.** Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах / П. В. Бережнова, В. М. Лукашин, А. К. Ратникова, А. Б. Пашковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 4 (492). – С. 21 – 24.
10. **Куликова, И. В.** Тепловые режимы мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием / И. В. Куликова, А. Б. Пашковский, Н. К. Приступчик // Электроника и микроэлектроника СВЧ. V Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2016 г.: сб. тр. конф. Т.1. – 2016. – СПбГЭТУ. – С. 238 – 241.
11. **Брагина, Н. А.** Оценка изменения характеристик полевых транзисторов при охлаждении до 77 К / Н. А. Брагина, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Микроэлектроника. – 1991. – Т. 20, Вып. 3. – С. 268 – 273.
12. **Chao, P. C.** A new high power GaN-on-diamond HEMT with low-temperature bonded substrate technology / P. C. Chao et al. // CS MANTECH Conference Digest. – 2013. – P. 179 – 182.
13. **Chao, P. C.** GaN-on-diamond HEMTs with 11W/mm output power at 10 GHz MRS advances / P. C. Chao, Kanin Chu, Jose Diaz, Carlton Creamer, Scott Sweetland, Ray Kallaher, Craig McGray, Glen D. Via and John Blevins. – January 2016. – Vol. 1. – Issue 02. – P. 147 – 155.
14. **Seok, Ogyun.** AlGaIn/GaN schottky barrier diodes employing diamond-like carbon passivation / Ogyun Seok, Young-Hwan Choi, Minki Kim, Jumi Kim, Byungyou Hong and Min-Koo Han // CS MANTECH Conference, May 17 – 20th, 2010, Portland, Oregon, USA. – 229 p.
15. **Пат. 2244983 C1 (RU)** / А. А. Гиппиус и др. – Приоритет от 14.07.2003.
16. **Altman, David.** Improving thermal performance of DoD systems. Engineering the thermal properties of micro and nanomaterials / David Altman // Raytheon Technology Today. – 2012. – No 1. – P. 18.
17. **Jezowski, A.** Thermal conductivity of GaN crystals in 4,2...300 K range / A. Jezowski, B. A. Danilchenko, M. Boc'kowski, I. Grzegory, S. Krukowski, T. Suski, T. Paszkiewicz // Solid State Communications. – 2003. – Vol. 128. – P. 69 – 73.
18. **Madelung, O.** Semiconductors data handbook / O. Madelung. – 2004. – XIV. – 691 p.

Статья поступила 10 апреля 2017 г.

УДК.621.375.029.64, 621.396.677.494

**МАЛОГАБАРИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ
С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ НЕ МЕНЕЕ 0,5 И 6 Вт
ДЛЯ АФАР *Ku*-ДИАПАЗОНА**

**В. А. Пчелин, А. А. Лисицын, В. Б. Трегубов, И. П. Корчагин,
Л. В. Манченко, А. А. Маковецкая, С. С. Семенюк**

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

Разработаны малогабаритные усилители мощности для АФАР *Ku*-диапазона. В согласующих цепях применена керамика с высокой диэлектрической проницаемостью. Представлены меры для предотвращения неустойчивой работы усилителей. Для получения требуемых электрических параметров проведено суммирование мощности в выходном каскаде 6-ваттного усилителя. Все элементы усилителей изготовлены в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

*КС: АФАР, *Ku*-диапазон, усилитель мощности, согласующая цепь, СВЧ-транзистор*

**SMALL-SIZE AMPLIFIERS
WITH OUTPUT POWER NOT LESS THAN 0.5 AND 6 W
FOR *Ku*-BAND ACTIVE PHASED ARRAYS**

**V. A. Pchelin, A. A. Lisitsyn, V. B. Tregubov, I. P. Korchagin,
L. V. Manchenko, A. A. Makovetskaya, S. S. Semenyuk**

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

A small-size power amplifier for *Ku*-band active phased arrays has been developed. Ceramics with high dielectric permittivity is used in matching networks. Measures undertaken to avoid the amplifiers work instability are presented. In order to obtain the required electric parameters, power addition in 6 W amplifier output stage was conducted. All amplifier elements are made in JSC «RPC «Istok» named after Shokin».

*Keywords: active phased array, *Ku*-band, power amplifier, matching network, microwave transistor*

В выходном канале АФАР *Ku*-диапазона требуются импульсный усилитель (УМ-1) с выходной мощностью $P_{\text{вых}} \geq 6$ Вт, коэффициентом усиления 33 дБ и КПД не менее 25 %, работающий в диапазоне частот 13,5...14,5 ГГц, и усилитель УМ-2 с $P_{\text{вых}}$ не менее 500 мВт в диапазоне частот 16,0...16,8 ГГц, с таким же КПД. Усилители должны иметь малые габаритные размеры, низкое напряжение питания и высокую надёжность. Кроме высоких требований по электрическим параметрам, герметичный корпус УМ не должен превышать поперечный размер 6,5 мм. Казалось бы, что заданным требованиям могут отвечать мощные СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС). Однако имеются два существенных ограничения:

– промышленный выпуск отечественных МИС отсутствует, зарубежные МИС дороги и труднодоступны из-за ограничительных мер;

– лучшие низковольтные GaAs МИС *Ku*-диапазона, например НМС 5879LS7 фирмы Analog Devices с $P_{\text{вых}} = 5$ Вт, $K_y = 28$ дБ, КПД 22 %, в диапазоне частот 12...16 ГГц имеют размеры

корпуса 7×7 мм, а у бескорпусной МИС TGA 2514 фирмы TriQuint с $P_{\text{вых}} = 6$ Вт, $K_y = 24$ дБ, КПД 28 % в диапазоне частот 13...16 ГГц размеры чипа составляют $2,87 \times 3,9 \times 0,1$ мм. В то же время цепи питания, необходимые для нормального функционирования МИС, в 3...5 раз превышают поперечные размеры кристалла и применение МИС весьма проблематично при заданных размерах корпуса.

Тем не менее, нами получен большой опыт разработки УМ на гетероструктурных GaAs полевых транзисторах производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», в частности, при создании модуля М42229 с $P_{\text{вых}} \geq 8$ Вт в диапазоне частот 15,8...16,4 ГГц [1]. Разработки, в которых применялись согласующие цепи на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью, подробно представлены в работе [2]. Необходимо отметить специфику конструкции усилителя АФАР: продольные размеры его не столь критичны, как поперечные.

В статье приведены характеристики усилительных каскадов и УМ в целом, описана конструкция, обеспечивающая необходимые электрические параметры и устойчивую работу усилителей.

Усилитель УМ-1 пятикаскадный. В 3-каскадном предусилителе (ПУМ) с $P_{\text{вых}} \geq 500$ мВт использованы транзисторы «Полёт» (Курс ТГ-5), «Парад» (ЗП612 А-5) и секция транзистора «Принц 4-50». В выходном 2-каскадном усилителе (ВУМ) с $P_{\text{вых}} \geq 6$ Вт использовались транзисторы «Принц 2-70» (КРПГ.432152044 ГЧ), и два транзистора «Принц 4-70» (КРПГ.432153.014 ГЧ) – в схеме суммирования. Между ПУМ и ВУМ вставлен микрополосковый вентиль МПВ 15-6-3А (КРПГ.468545.042 ТУ). ПУМ и ВУМ заключены в отдельные металлокерамические корпуса, имеющие микрополосковые входы и выходы СВЧ-мощности и вводы питания, перечисленные узлы напаяны на общее основание.

В связи с малыми поперечными размерами усилителя невозможно было изготовить качественный фильтр в цепях питания транзисторов и поначалу наблюдалось самовозбуждение каскадов, несмотря на то, что корпус представлял собой запердельный волновод. Возбуждение удалось устранить за счет ввода полосовых фильтров между каскадами, а также вентиля между ПУМ и ВУМ. Крышки УМ приклеивались к корпусам компаундом ТК8-А.

Усилитель УМ-2 трёхкаскадный, в нём применялись транзисторы «Полёт» (входной каскад), «Парад» (промежуточный каскад), секция «Принц 4-50» (выходной каскад). По своей структуре усилитель идентичен ПУМ.

Усилительные каскады изготовлены на поликоровых подложках толщиной 0,5 мм (входной каскад) и 0,25 мм (промежуточный и выходной каскады). Для устранения самовозбуждения между промежуточным и выходным каскадом помещён полосовой фильтр, одновременно служащий развязкой по постоянному току. Транзисторы «Полёт» и «Парад» приклеивались к основанию корпуса токопроводящим клеем ЭЧЭ-С. С целью уменьшения индуктивности вводов транзистор «Парад» монтировался с помощью балочных выводов [3]. Секция транзистора «Принц 4-50» припаивалась к основанию с помощью золотооловянной эвтектики.

Расчет ПУМ на основе транзисторов «Полет», «Парад» и ячейки транзистора «Принц 4-50» проводился с использованием модели большого сигнала. Результаты расчёта приведены на рис. 1.

Экспериментально получено: коэффициент усиления ПУМ при $P_{\text{вх}} = 3$ мВт и токе потребления 300 мА составляет 23...25 дБ, $P_{\text{вых}} \geq 0,6$ Вт (рис. 2).

Габаритные размеры корпуса ПУМ – $25 \times 6,5 \times 4,5$ мм. На рис. 3 представлен внешний вид ПУМ.

Определяющим элементом УМ по электрическим характеристикам и габаритным размерам является ВУМ.

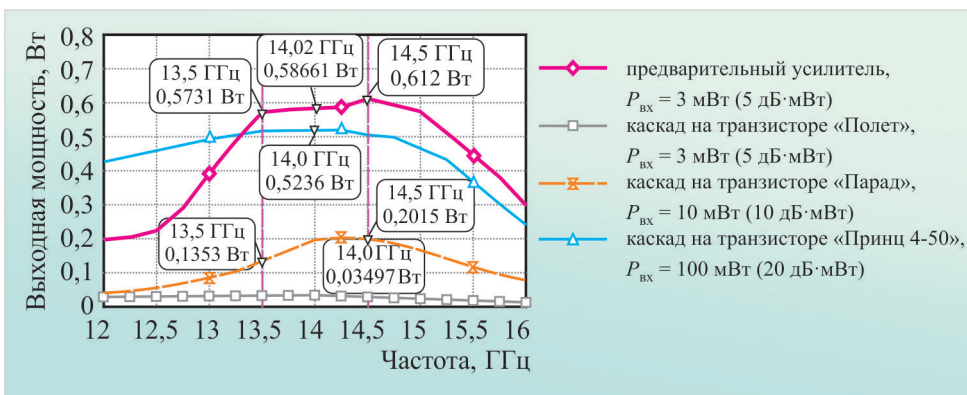


Рис. 1. Расчёт АЧХ ПУМ (рабочая точка транзистора «Полеет»: $U_d = 7$ В, $I_d = 45$ мА; рабочая точка транзистора «Парад»: $U_d = 7$ В, $I_d = 120$ мА; рабочая точка транзистора «Принц»: $U_d = 7$ В, $I_d = 220$ мА)

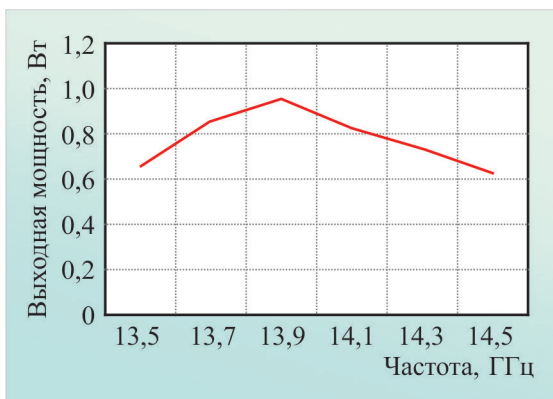


Рис. 2. Выходная мощность ПУМ

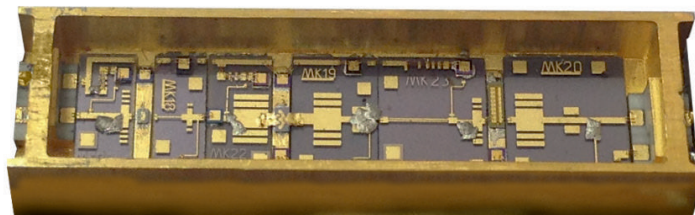


Рис. 3. Внешний вид ПУМ

В ВУМ применены гетероструктурные GaAs полевые транзисторы «Принц 2-70» во входном каскаде и «Принц 4-70» в выходном каскаде. Выходная мощность одной секции транзистора составляет не менее 1,5 Вт на частоте 10 ГГц. В выходном каскаде мощность от входного транзистора делится и усиливается двумя параллельно включенными транзисторами.

Проектирование усилителя на транзисторах с большой шириной затвора представляет сложную задачу. Традиционные цепи согласования на общую нагрузку не применимы из-за сильного влияния секций друг на друга и чрезвычайно малых входных и выходных импедансов транзистора. При этом необходимо учитывать длину «пальцев» структуры, взаимное влияние проволочных выводов транзистора, существенно влияющих на рабочую полосу частот и эффективность сложения мощности секций транзистора. Указанные особенности не позво-

лили применить в выходном каскаде ВУМ транзистор «Принц 4-105», обеспечивающий мощность 8 Вт на частоте 10 ГГц. В литературе отмечено, что, например, для транзистора с восемью проволочными выводами на затворе и стоке (каким и является транзистор «Принц 4-70») полоса частот составляет 60 % от полосы частот одной секции [4]. Для согласования секции транзистора «Принц 4-70» использовалась барий-самарий-титановая керамика (БСТ) с диэлектрической проницаемостью 80.

При проектировании ВУМ также выполнялись расчётно-экспериментальные работы по созданию нелинейной модели транзистора [5, 6]. Разрабатывались методики определения электрических параметров одной секции транзистора, рассчитывались схемы согласования и суммирования полного транзистора.

Был проведен расчет характеристик последовательного соединения предвыходного и выходного каскадов ВУМ. При этом входная мощность принята равной 500 мВт. Рабочая точка секции транзистора «Принц 4-70»: $U_d = 8$ В, $I_d = 310$ мА. В результате расчета получены характеристики, показанные на рис. 4.

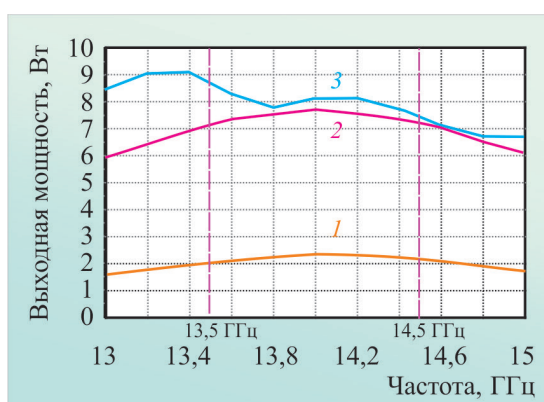


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики ВУМ при последовательном соединении предвыходного и выходного каскадов:

кривая 1 – частотная зависимость выходной мощности предвыходного каскада («Принц 2-70») при мощности на входе 500 мВт; кривая 2 – частотная зависимость выходной мощности выходного каскада (на двух транзисторах «Принц 4-70») при мощности на входе 1,7 Вт; кривая 3 – частотная зависимость выходной мощности всей сборки при мощности на входе 500 мВт

Экспериментальная зависимость выходной мощности от частоты при токе потребления 2,6 А и $P_{вх} = 300$ мВт представлена на рис. 5. Внешний вид ВУМ показан на рис. 6.

Был также решён ряд задач по обеспечению устойчивости, в частности введены полосовые фильтры между каскадами, уменьшены до минимума поперечные потенциалы как секций, так и между соседними транзисторами.

Конструкция УМ-2 мало отличается от ПУМ, за исключением ширины корпуса, равной 5 мм, что ввело дополнительные трудности при проектировании. С целью обеспечения устойчивости усилителя входной каскад работает с автосмещением и между каскадами включён полосовой фильтр. Внешний вид УМ показан на рис. 7.

Зависимость выходной мощности от частоты УМ-2 показана на рис. 8.

Конструкции корпусов ПУМ, ВУМ и УМ-2 идентичны, отличаются только по длине и ширине. Корпуса изготовлены из меди. Основание, стенки и микрополосковые вводы спаяны с по-

мощью серебряного припоя при температуре 800 °С. На основаниях выполнены пьедесталы высотой 0,25 мм для монтажа транзисторов. Поверхности корпусов покрыты золотом толщиной 2 мкм.

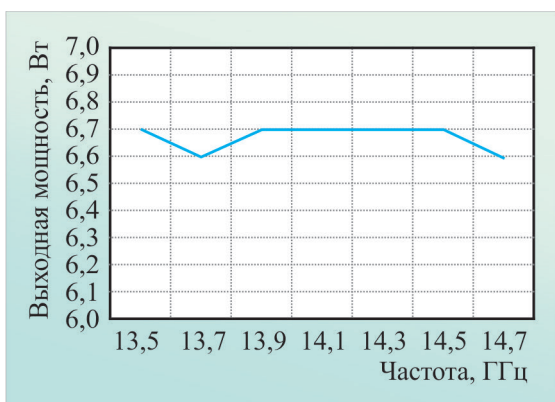


Рис. 5. Экспериментальная зависимость выходной мощности ВУМ от частоты

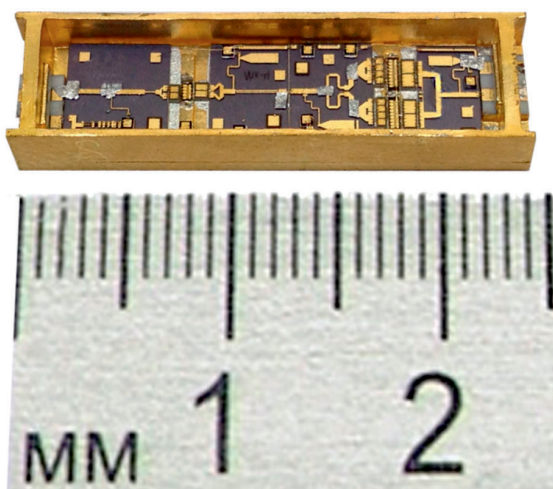


Рис. 6. Внешний вид ВУМ

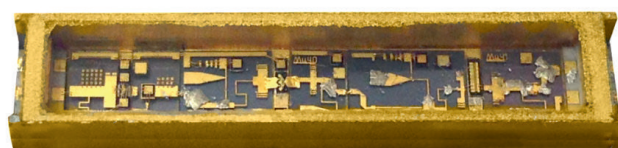


Рис. 7. Внешний вид УМ-2

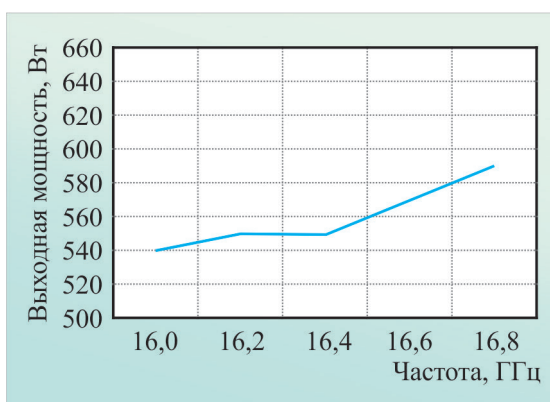


Рис. 8. Зависимость выходной мощности УМ-2 от частоты

В результате получены усилители для АФАР со следующими характеристиками:

УМ-1

Центральная частота.....	14,0 ГГц
Полоса рабочих частот.....	1000 МГц
Выходная мощность, не менее.....	6 Вт
КПД, не менее	25 %
Коэффициент усиления, не менее.....	33 дБ
Напряжение стока.....	8 В
Габаритные размеры:	
ПУМ.....	25×6,5×4,5 мм
ВУМ.....	24×6,5×4,5 мм

УМ-2

Центральная частота.....	16,4 ГГц
Полоса рабочих частот.....	800 МГц
Выходная мощность, не менее.....	500 мВт
КПД, не менее.....	25 %
Коэффициент усиления, не менее.....	23 дБ
Напряжение стока.....	6 В
Габаритные размеры.....	26×5×4,5 мм

Таким образом, разработаны малогабаритные усилители мощности для АФАР Ku-диапазона с выходной мощностью не менее 0,5 и 6 Вт. В представленных УМ все комплектующие элементы произведены в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Созданные приборы имеют габаритные размеры, удовлетворяющие требованиям для АФАР Ku-диапазона, и электрические характеристики, соответствующие современному мировому уровню для усилителей мощности на GaAs-транзисторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабинцев, Д. В.** Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона / Д. В. Бабинцев, А. Н. Королёв, В. А. Красник, А. В. Климова, В. Г. Лапин, В. М. Малышник, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов, В. Ю. Язан // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 41 – 42.
2. **Пчелин, В. А.** Гибридно-интегральные малогабаритные усилители мощности / В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов, И. П. Корчагин, А. Г. Далингер, Л. В. Манченко, В. А. Красник, В. М. Малышник // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 4(527). – С. 57 – 62.
3. **Пат. 2191492 РФ** / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин. – Приоритет от 17.04.2000.
4. **Сечи, Ф.** Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти; под ред. д.т.н. А. А. Борисова. – М.: Техносфера, 2016. – С. 218 – 224.
5. **Пчелин, В. А.** Двухкаскадный усилитель мощности X-диапазона на гетероструктурных полевых транзисторах ФГУП «НПП «Исток» / Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов // Материалы 20-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: «Вебер», 2010. – С. 127 – 128.
6. **Капралова, А. А.** Тестовая плата для построения и коррекции нелинейных моделей мощных полевых транзисторов / А. А. Капралова, И. П. Корчагин, Л. В. Манченко, Э. В. Погорелова, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып.1 (520). – С. 39 – 44.

Статья поступила 17 марта 2017 г.

КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ И АППАРАТУРА

УДК 629.7+681.2

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

АО «Российские космические системы», г. Москва

Представлена информация о современных методах и инструментальных средствах использования космической электронной компонентной базы на основе микросистем в корпусе. Материалы отражают мировой уровень космической индустрии и получены в результате исследований по реализации концепции инновационных космических микросистем в корпусе.

КС: ЭКБ, микросистемы в корпусе, микроспутники

MICROMINIATURIZATION OF THE ELECTRONIC COMPONENT BASE ON THE BASIS OF MICROSYSTEMS IN THE MICROWAVE PACKAGE FOR SMALL SATELLITES

N. S. Danilin, A. U. Potyupkin, S. A. Volkov, I. U. Bulayev

JSC «Russian Space Systems», Moscow

The information on modern methods and tools for using the space electronic component base on the basis of microsystems in the package is presented. The materials show the world level of the space industry and are obtained as a result of research into the implementation of the concept of innovative space microsystems in the package.

Keywords: ECB (electronic component base), microsystems in the package, microsattellites

Вплоть до середины – конца 1980-х годов малые аппараты существенно уступали по характеристикам большим, поскольку использовали ту же самую элементную базу. Однако успехи микроминиатюризации, выразившиеся в появлении больших интегральных микросхем, миниатюрных электромеханических систем, «систем в корпусе» и «систем на кристалле», позволили заложить серьезный функционал в аппаратуре малых масс и габаритных размеров [1].

Ведущие мировые фирмы космического и оборонного сегментов уже несколько лет используют в своих изделиях так называемые системы в корпусе (СвК) (system in package), где на смену электронно-компонентной базы (ЭКБ) пришли микросистемы в корпусе. Система в корпусе – это технология, которая позволяет интегрировать КМОП, КНИ, КНС, биполярные и пленочные структуры с СВЧ, МЭМС, оптоэлектронными и дискретными компонента-

ми в одном корпусе. Уникальность этой технологии определяется соотношением между ценой реализуемых изделий и их функциональностью в единице объема корпуса.

Нами впервые в РФ разработаны теория и методические основы, подходы и принцип создания, развития и целевого использования инновационных космических микросистем в корпусе как основы макроуровня перспективных микроспутников. Эта прогрессивная технология позволяет снизить массогабаритные характеристики изделия, его энергопотребление, повысить функциональность в единице объема, сократить цикл «разработка – выпуск» новых космических аппаратов [2].

Результаты указанных исследований одобрены на коллегии Минэкономразвития (июль 2011 г.), вошли в проект «Сколково», а также в межправительственную Программу РФ – США по развитию космической техники.

Таким образом, СвК является стратегической технологией для мировой и отечественной космической промышленности и полностью определяет возможности по эффективному занятию рынка микроспутниковых систем. Доля СвК в космических аппаратах США за 2015 г. составляет 39 % от общего объема ЭКБ, стоимость – 0,5 млрд долл. Эта тенденция стала практикой потому, что расходы на проектирование конечных изделий удешевились на 15...20 %. Процесс проектирования сокращен по времени на 40 %. Комплектация и построение изделий на базе заведомо исправных кристаллов «KNOWN GOOD DIE» и типовых узлов в виде микросистем в корпусе сократили производственные расходы на 30 %. Тестирование изделий заняло не более 10 % от общего времени реализации изделий. В 2015 г. доля проектов с применением микроспутников составила 90 % от общего объема космических проектов США (рис. 1).

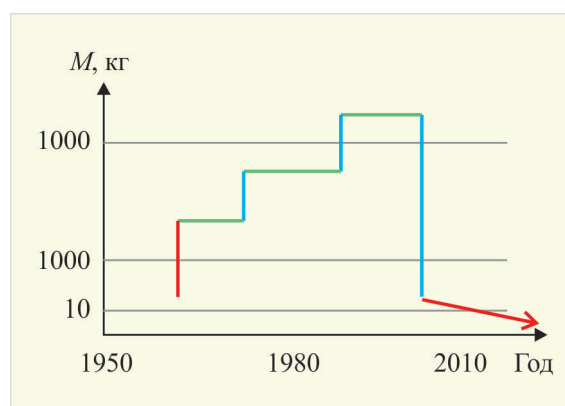


Рис. 1. Весовые характеристики спутников НАСА

Все это вызвало своеобразный «ренессанс» малых спутников, которые уже примерно четверть века развиваются достаточно успешно.

В настоящее время считается, что кроме миниатюризации компонентов интерес к МКА вызывают еще несколько тенденций, среди которых:

- сокращение сложности миссий и снижением затрат на управление;
- удешевление наземной инфраструктуры для получения, обработки и распространения данных;
- появление на рынке новых систем выведения.

Развитие «умной начинки» МКА подчиняется закону Мура, единому для всей современной электроники. Он гласит, что число транзисторов в интегральной микросхеме растет, экспоненциально увеличиваясь на порядок каждые шесть лет. Таким образом, эффективность бортового радиоэлектронного оборудования спутника способна возрастать (или оставаться на необходимом уровне) при сохранении и даже уменьшении исходных размеров аппарата. В соответствии с законом Мура, характеристики МКА в ряде случаев становятся сопоставимы с возможностями «больших» собратьев. Именно поэтому наиболее впечатляющие успехи на «малогобаритном фронте» заметны среди спутников наблюдения (рис. 2).

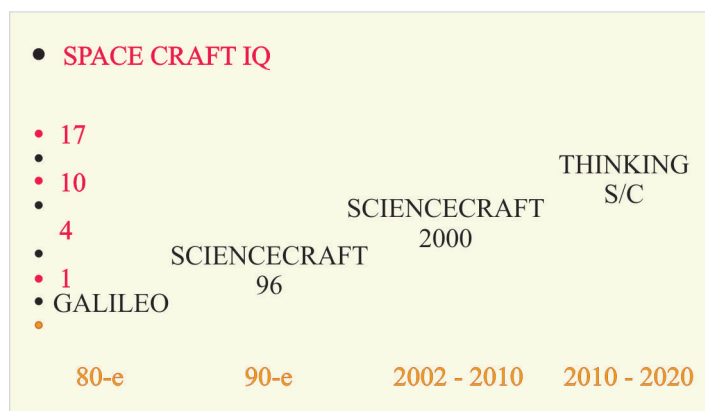


Рис. 2. Концепции миниатюризации и IQ микроспутников

МКА массой всего 8 кг имеют стоимость в разы (если не на порядок) меньше, чем у обычного спутника – около 1 млн долл. Группировка в 30 МКА обеспечит круглосуточную оперативную выдачу информации. Полученные изображения потребители смогут получать по радиоканалу круглосуточно.

Важнейшая особенность МКА – возможность формирования орбитальных группировок по типу «роя». В нем спутники могут разбиваться на специализированные группы: управления, энергоснабжения, целевого назначения, связи и т. д. Это дает ряд ценных преимуществ:

- способность реконфигурировать систему за счет оперативного перераспределения функций;
- высокую устойчивость;
- возможность синтеза очень больших оптических и радиолокационных апертур, недоступных «нормальным» аппаратам.

МКА работают в основном с небольшим баллистическим сроком существования – от нескольких месяцев до трех-пяти лет. А раз так, то незачем применять на них дорогую электронику класса «space», вполне можно обойтись комплектующими класса «industrial», буквально взятой с полки. Это будет быстрее, проще и существенно дешевле, чем замахиваться на космический «хайтэк».

В итоге страна сможет иметь компактную качественную группировку спутников как с оптико-электронной, так и с радиолокационной аппаратурой, чтобы обеспечить оперативное получение спутниковых снимков космического пространства [3].

Для реализации поставленных задач в СВЧ-диапазоне целесообразно использовать перспективные полупроводниковые материалы.

К настоящему моменту в практике разработки радиочастотных бортовых узлов (РЧБУ) ут-

вернулись следующие гетероструктуры: GaAs, GaN, SiGe, InP (рис. 3). В качестве иллюстрации ниже приводятся несколько примеров их применения.

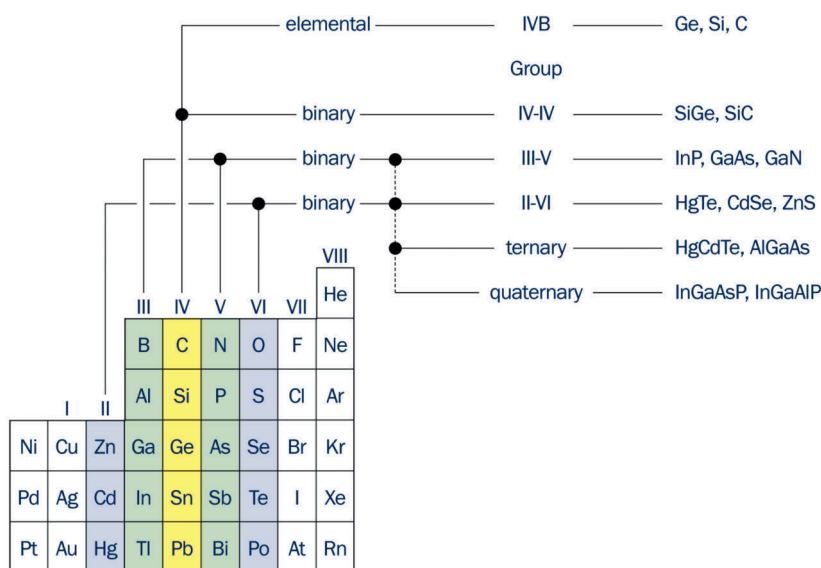


Рис. 3. Обзор перспективных гетерополупроводниковых материалов для применения в РЧБУ

Технология GaAs на сегодняшний день является основной для реализации бортовых усилителей мощности, что позволяет достичь значения объема годового рынка таких микросхем до 500 000. Эта технология также используется в качестве основной при производстве СВЧ-переключателей. Поскольку РЧБУ развиваются в сторону увеличения частоты при снижении потерь сигнала и увеличении числа каналов коммутации с близкими к нулю токами в ненагруженном режиме, то GaAs рНЕМТ-ключи – идеальное решение в таких приложениях. Кроме того, важное применение GaAs-структур в РЧБУ – это *Ku*-диапазонные приемники и переключатели для DBS-телевидения.

Радарные приложения, радиокommunikации типа «point-to-point» и множество специальных изделий в классе «high end» являются основным рынком сбыта для структур типа GaAs, SiC и GaN.

Следует отметить, что GaAs-структуры устойчивы к воздействиям факторов космического пространства и обладают высоким уровнем радиационной стойкости. Это фактор является определяющим при комплектации бортовых устройств отдельными микросхемами, изготовленными по этой технологии, и многокристалльными модулями. Например, бортовые активные фазированные антенные решетки (АФАР) изготавливаются с использованием изделий этого класса.

Обширные исследованные возможности кремниевых структур не могут затмить такие характеристики гетероструктур, как высокая скорость перемещения зарядов и низкий уровень шума при гарантированной радиационной стойкости. Кроме того, кремниевая микроэлектроника представлена изделиями с огромным числом транзисторов на единице площади кристалла при рабочем напряжении порядка единиц вольт и с ограниченным частотным диапазоном до 10 ГГц. По этим причинам естественным является решение об интеграции кремниевых и гетерополупроводниковых изделий по технологии СВК.

С 2008 г. МО США (DARPA) развивает так называемые технологии COSMOS (Compound Semiconductors on Silicon) по интеграции гетерополупроводниковых изделий с кремниевыми кристаллами.

Их условно можно разделить на два класса.

Интеграция гетерокристаллов в процессе изготовления КМОП-пластин. Эта технология адаптирована компаниями Northrop Grumman и Raytheon.

Ключевыми факторами для эффективной реализации этого технологического процесса являются следующие:

- точность расположения подложки гетерополупроводника на подложке КМОП-изделия;
- совместимость характеристик материалов;
- удельная плотность соединений между материалами;
- уровень выхода годных изделий как интегральный критерий эффективности процесса COSMOS.

В основе предлагаемого подхода находится использование многослойной керамики (LTCC) в качестве подложки, на которой формируются соединения в формате $2D$ или $3D$ между необходимыми кристаллами и дискретными компонентами.

Практический опыт в этом направлении приобрели компании Aeroflex, Armkor и др. Об успешности этой интеграционной технологии может говорить то, что только на Aeroflex по заказным спецификациям методом интеграции на уровне многокристальных сборок производятся более 15 типов гибридных изделий с тиражом не менее 200 шт. каждого номинала.

Существенным препятствием для развития системной микроминиатюризации в области космического приборостроения является множественность номенклатуры функциональных назначений РЧБУ. Среди причин этого, прежде всего, стоит выделить большое число типов используемых ЭРИ, а также ряд специфических требований, например электромагнитная совместимость и помехозащищенность. Переход на новые конструктивные решения с редуцированными размерами, равно как и разработка узлов с малым потреблением энергии и низким уровнем шумов возможны только при масштабном внедрении интегрированных систем из гетерополупроводников и КМОП-изделий. Наличие успешного мирового опыта (например, технологии класса COSMOS) и подходящей отечественной технологической среды гарантирует успешное развитие новых поколений РЧБУ космического применения с использованием технологии интеграции гетерополупроводниковых изделий с кремниевыми кристаллами [4].

Одной из версий обнаружения с помощью кластеров МКА астероидов и комет, с целью уменьшения опасности их воздействия на Землю, может быть гипотетически построенная путем выведения в космическое пространство дифференцированно по трем разновысотным фронтам слежения, например вблизи геостационарной орбиты ($R = 36...40$ тыс. км), отличающейся низким уровнем радиационного воздействия, временных флотилий слежения за состоянием Космоса. Конструкция МКА, помимо стандартных на некоторых экземплярах, должна предусматривать ИК-радиометры, спектрометры и ударные микролазеры для соприкосновения с небесным телом. Эта операция позволит установить физико-химические характеристики внеземных тел для будущей стратегии воздействия с целью недопущения их падения на Землю. Таким образом, создается временная дискретная информационная среда в масштабах Космоса, способная реагировать на приближение внеземных тел, необходимая для принятия решения о высокоточном или ядерном воздействии на траекторию движения астероидов и метеоритов, исключающего их столкновение с Землей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин, Н. С. Инновационные космические микросистемы в корпусе / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011.
2. Белов, Д. А. Бортовой космический ретранслятор на базе передовой технологии электронной компонентной базы «системы-в-корпусе» / Д. А. Белов, Н. С. Данилин // Вестник электроники. – 2012. – № 4.
3. Данилин, Н. С. Модернизация космической электронной инфраструктуры на основе альянса систем частного применения кристаллов в корпусе / Н. С. Данилин, И. Ю. Булаев, М. А. Бражников, М. К. Соловьев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 4 (527). – С. 41 – 49.
4. 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.

Статья поступила 1 июня 2017 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГОРШКОВ Ю.Г. **Обработка речевых и акустических биомедицинских сигналов на основе вейвлетов.** Монография. – М.: Радиотехника, 2017. – 240 с.

Изложены новые перспективные методы обработки речевых и акустических биомедицинских сигналов на основе вейвлетов, аппаратно-программные средства для решения прикладных задач криминалистического исследования фонограмм, оценки эмоционального состояния человека, шумоочистки и засекречивания речи, а также построения биомедицинских систем диагностики заболеваний сердца и легких.

Основное внимание уделено разработке вейвлет-технологий высокоточного анализа речевых и акустических биомедицинских сигналов. Впервые предложены решения многоуровневого вейвлет-преобразования, обеспечивающие визуализацию нестационарных сигналов с повышенным частотно-временным разрешением. Рассмотрены средства защиты речевой информации, приводятся алгоритмы и программные средства засекречивания речевых и акустических биомедицинских сигналов на вейвлетах. Представлена система телемедицины нового поколения с засекречиванием акустических биомедицинских сигналов.

Для ученых и инженеров, работающих над созданием средств обработки биомедицинских сигналов на новых принципах. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам технических вузов.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.384.6

ИНЖЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

**К. Г. Симонов, А. В. Мамонтов, Е. А. Алхименко, Т. А. Батькова,
Н. А. Ключников, И. Г. Перминов, Г. И. Правдиковская**

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

Создан ряд инжекторов электронов диодной и триодной конструкции с напряжением 20...300 кВ и диаметром катода 6...110 мм. В инжекторах в основном используются импрегнированные катоды, конструкция инжекторов допускает оперативную замену катодных узлов. Инжекторы применены в двадцати ускорительных комплексах различного назначения.

КС: инжектор электронов, диодная и триодная конструкция, импрегнированный катод, оперативная замена катодных узлов, применение

ELECTRON INJECTORS FOR ACCELERATORS

**K. G. Simonov, A. V. Mamontov, E. A. Alkhimenko, T. A. Bat'kova,
N. A. Klyuchnikov, I. G. Perminov, G. I. Pravdikovskaya**

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

A number of electron injectors of a diode and triode design with a voltage of 20...300 kV and a cathode diameter of 6...110 mm have been created. The injectors mainly use impregnated cathodes, the design of the injectors allows for rapid replacement of cathode assemblies. Injectors are used in twenty accelerating complexes for various purposes.

Keywords: electron injector, diode and triode design, impregnated cathode, rapid replacement of cathode assemblies, application

1. ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов нашли широкое применение в стерилизации медицинских изделий и продуктов питания, радиационной обработке материалов, в досмотровых комплексах и других областях науки и техники.

Линейные ускорители электронов делятся по принципу действия на СВЧ-ускорители и ускорители прямого действия.

Среди ускорителей прямого действия наиболее перспективными являются ускорители отпаянной конструкции. Они не требуют систем откачки, имеют малый цикл подготовки к эксплуатации, компактны, долговечны, удобны и надежны в эксплуатации. Такие ускорители впервые в мире были созданы в АО «НПП «Исток» им. Шокина» и получили название «электронные отпаянные пушки» (ЭОП).

2. ИНЖЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ СВЧ-УСКОРИТЕЛЕЙ

АО «НПП «Исток» им. Шокина» многие годы создает инжекторы электронов [1], которые используются во многих ускорительных комплексах. «Исток» имеет собственную технологическую базу по производству катодов, керамических узлов и других элементов, используемых в инжекторах.

В инжекторах применяются в основном импрегнированные катоды, что вполне обеспечивает работоспособность катода при вакууме $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па, получаемом в ускорителях.

Созданные инжекторы электронов нашли применение в ускорительных комплексах РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров), АО «МРТИ РАН», Всероссийского центра глазной и пластической хирургии (г. Уфа), где производится стерилизация аллотрансплантантов (биологические ткани человека), ОИЯИ (г. Дубна), НИЯУ «МИФИ» и др.

Рассмотрим инжектор электронов, созданный на основе катода диаметром 15 мм (рис. 1). Основные требования к инжектору электронов: рабочее импульсное напряжение – 60 кВ, ток с катода – 5 А.

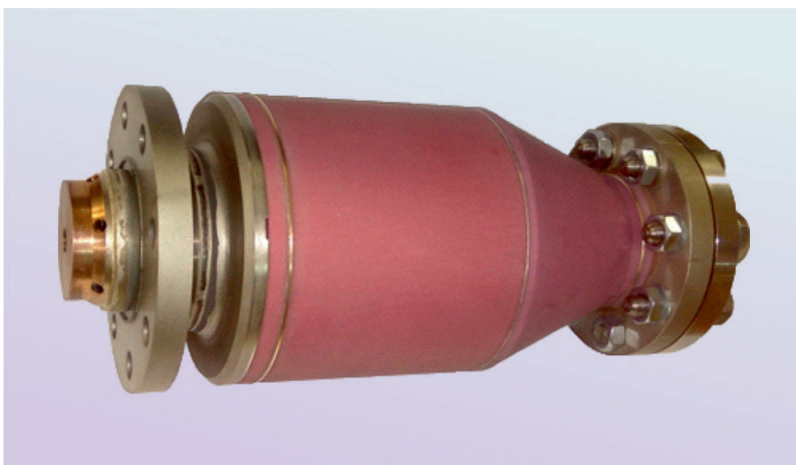


Рис. 1. Инжектор электронов

Держатель с катодно-подогревательным узлом показан на рис. 2. Особенностью конструкции инжектора является то, что она позволяет производить оперативную замену катодно-подогревательного узла с фокусирующим электродом. Крепление катодно-подогревательного узла с держателем осуществляется с помощью трех винтов: два винта крепят катодно-подогревательный узел к держателю, а третий винт – вывод накала катода к вводу накала инжектора.

Другая особенность конструкции этого инжектора заключается в том, что входная часть ускоряющей структуры является принадлежностью инжектора и его анодом.

Такой инжектор используется в ускорительном комплексе АО «МРТИ РАН», который работает в режиме промышленной эксплуатации с 1994 г.

В этом ускорительном комплексе производится стерилизация широкой номенклатуры медицинских изделий для европейской территории России (рис. 3).

Отметим также, что в ускорительном комплексе АО «МРТИ РАН» используется сверхмощная цепочка усилительных клистронов КИУ-15М...КИУ-17, созданная на «Истоке» [2].

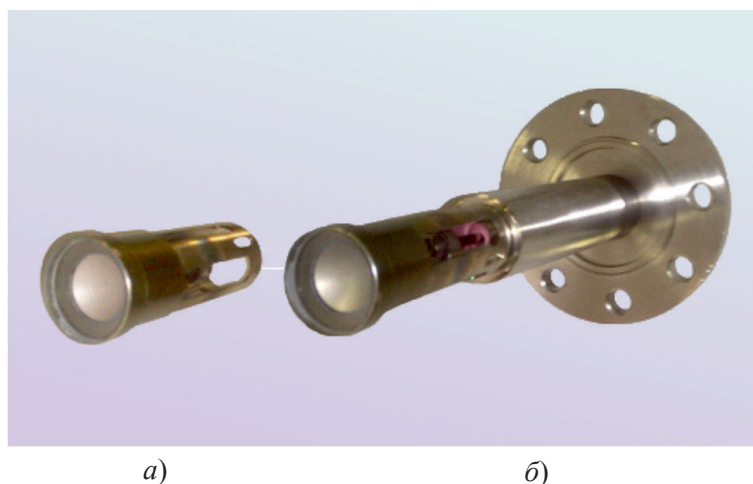


Рис. 2. Съемный катодно-подогревательный узел (а) и держатель с катодно-подогревательным узлом (б)



Рис. 3. Облучаемые изделия на конвейере в ускорительном комплексе АО «МРТИ РАН»

На рис. 4 представлен инжектор с анодным напряжением 30 кВ для ускорителей электронов инспекционно-досмотровых комплексов [3]. Отличительной особенностью инжектора является то, что на катод диаметром 8 мм наложена специальная маска из квадратных ячеек. Это позволяет направить на вольфрамовую мишень, преобразующую энергию электронного пучка в тормозное излучение, слабо сфокусированный электронный пучок и тем самым обеспечить надежную работу мишени и ускорителя.

Для ОИЯИ (г. Дубна) был разработан инжектор электронов с диаметром катода 110 мм и энергией электронов до 300 кэВ (рис. 5).

Созданные инжекторы электронов используются в семнадцати ускорительных комплексах различного назначения.

Основные технические характеристики созданных инжекторов приведены в табл. 1.

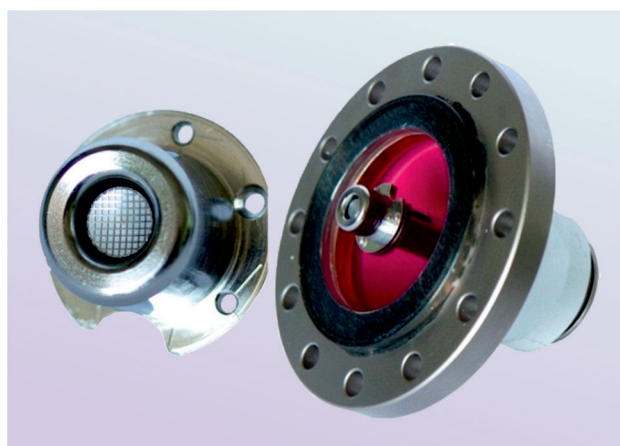


Рис. 4. Инжектор с маской на катоде

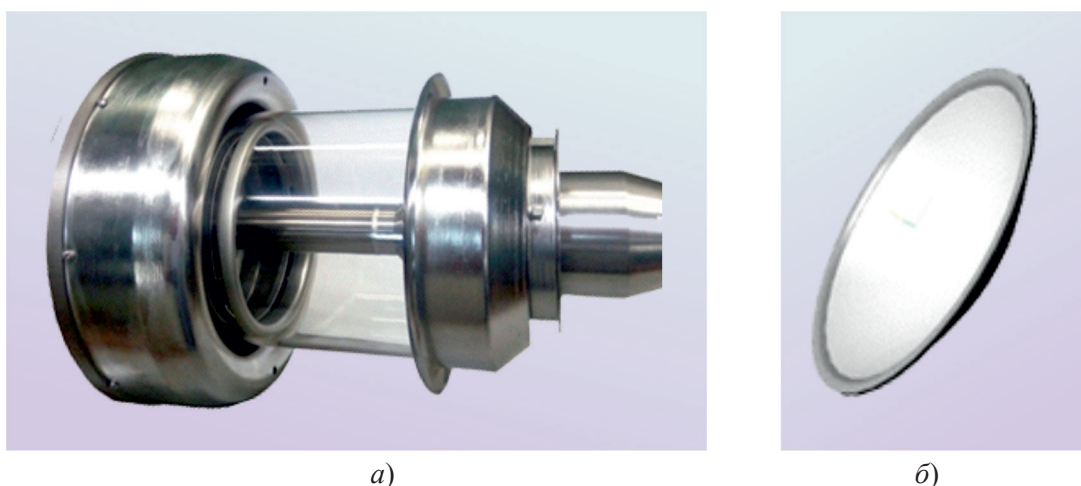


Рис. 5. Инжектор электронов с высоковольтным стеклянным изолятором (а) на напряжение 300 кВ и сферическим катодом (б) диаметром 110 мм

Таблица 1

Диаметр катода	6	8	15	110
Импульсное напряжение, кВ	50	50	60	300
Импульсный ток катода, А	0,5	1	5	300
Длительность импульса, мкс	4	4	6	0,25

3. ИНЖЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТПАЯННЫХ ПУШЕК

На «Истоке» были созданы ЭОП с энергией электронов от 100 до 200 кэВ, формирующие широкий электронный пучок [4, 5]. Фотография ЭОП с окном вывода электронов 100×200 мм представлена на рис. 6.

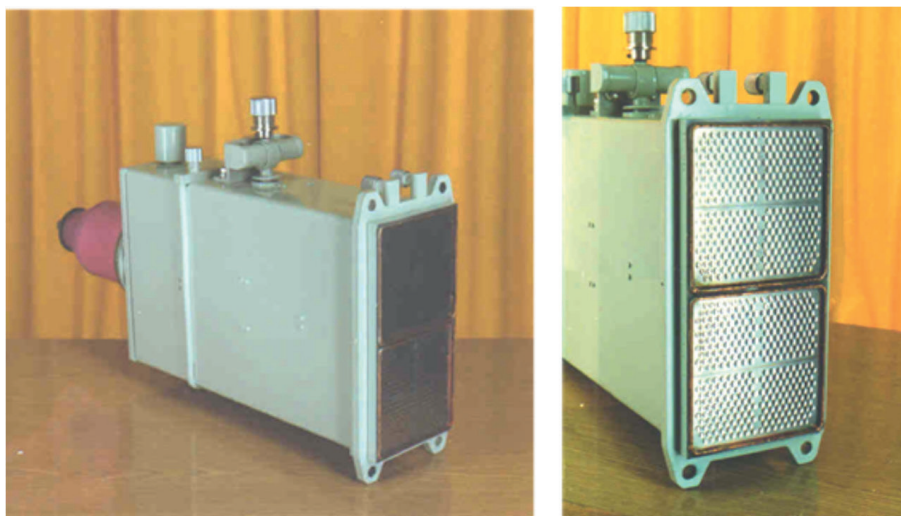


Рис. 6. ЭОП с размером окна 100×200 мм

ЭОП выводят мощный широкий электронный пучок из вакуумной области пушки в атмосферу или иную газовую среду. При создании ЭОП наиболее эффективной оказалась конструкция инжектора, содержащая два катода (рис. 7). Такая конструкция инжекторов и специальная электронная оптика позволили обеспечить на выходе пушки однородный электронный пучок. В инжекторах были применены импрегнированные катоды диаметрами 6, 11,4 и 24 мм.

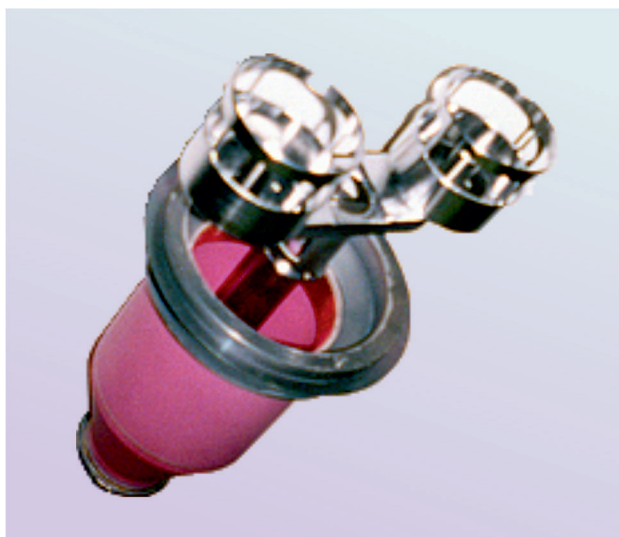


Рис. 7. Инжектор для ЭОП с двумя катодами

Также создан уникальный катодный узел с ленточным оксидным катодом [6] и длиной эмитирующей части 320 мм при ширине 6 мм для ЭОП на энергию 160...200 кэВ (рис. 8). Эта пушка формирует на выходе расходящийся электронный пучок с размерами 40×300 мм.

На основе инжекторов электронов были созданы ЭОП, параметры которых приведены в табл. 2.

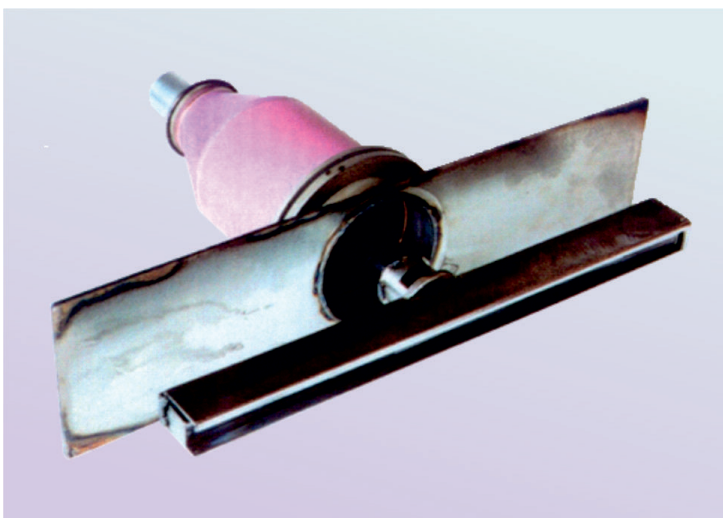


Рис. 8. Инжектор с ленточным катодом 6×320 мм

Таблица 2

Параметр	ЭОП-1	ЭОП-2	ЭОП-3	ЭОП-4
Тип катода	Два круглых			Ленточный
Размеры катода, мм:				
диаметр	5,7	11,4	24	–
длина	–	–	–	320
Максимальный импульсный ток катода, А	6	15	80	25
Максимальное импульсное напряжение, кВ	200	200	160	200
Длительность импульса, мкс	4	2	5	1,5
Размеры выпускного окна, мм	200×100			300×40

На основе электронных отпаянных пушек ЭОП-1 и ЭОП-2 в АО «МРТИ РАН» были созданы компактные установки электронно-лучевой технологии, которые были установлены на крупнейшей фирме 3М (США), а на основе ЭОП-3 была создана установка в РИЦ «Курчатовский институт».

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На «Истоке» создан ряд инжекторов электронов для линейных резонансных ускорителей с диаметром катода 6...110 мм и напряжением 20...300 кВ и инжекторы электронов для электронных отпаянных пушек на энергии от 100 до 200 кэВ.

Инжекторы электронов нашли применение во многих ускорительных комплексах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Simonov, K.** Electrons injectors with cathode diameter of 6÷15 mm and new cup energy input on the wave *E11* for accelerators / K. Simonov, E. Alkhimenko, N. Batkova, S. Grishin, A. Mamontov, G. Pravdikovskaya, E. Stroykov // Proceedings of IPAC 2014, Dresden, Germany. – P. 692 – 694.
2. **Борисов, А. А.** Сверхмощные импульсные клистроны и многочастотные СВЧ электровакуумные приборы. Достигнутые характеристики, перспективы разработок / А. А. Борисов, А. В. Галдецкий, А. Н. Королев, А. В. Мамонтов, В. А. Рыжов, К. Г. Симонов, О. А. Морозов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Ч. II. – 2013. – Вып. 4 (519). – С. 26 – 36.
3. **Пат. 2245588 РФ.** Источник рентгеновского излучения / В. М. Белугин, В. М. Пироженок, Н. Е. Розанов, К. Г. Симонов. – Оpubл. 2004, Бюл. № 3.
4. **Симонов, К. Г.** Электронные отпаянные пушки / К. Г. Симонов; под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985. – 128 с.
5. **Korolev, A.** Characteristics of sealed-off electron gun with wide beam / A. Korolev, K. Simonov, V. Pirozhenko // Proceedings of EPAC 2002, Paris, France. – P. 2769 – 2771.
6. **Пат. 2321096 РФ.** Катодный узел для электронной пушки с протяженным электронным потоком / Т. А. Батькова, Р. В. Грицук, А. Б. Киселев, А. Н. Королев, Г. И. Правдиковская, К. Г. Симонов. – Оpubл. 2008, Бюл. № 9.

Статья поступила 6 марта 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Радиотехнологии противодействия террористическим угрозам. Кол. монография / Под ред. В. И. Есипенко. – М.: Радиотехника, 2016. – 168 с.: ил. (Науч. серия «Радиотехнологии в системах безопасности»).

Монография посвящена технической стороне проблем предотвращения террористических угроз. Приведены технологии обнаружения и нейтрализации взрывоопасных предметов, рассмотрены электромагнитные методы обнаружения и блокирования минновзрывных заграждений; беспилотные и роботизированные средства разведки. Рассмотрены вопросы обнаружения радиоэлектронных элементов в каналах управления подрывом мин нелинейным радиолокатором. Затронуты акустические и оптические методы и средства предотвращения террористических угроз.

Для инженеров, конструкторов, научно-технических работников, аспирантов, занимающихся вопросами ближней и нелинейной радиолокации, а также обработкой радиолокационных и акустических сигналов и оптических изображений. Будет полезна специалистам, занимающимся проблемой нейтрализации террористических угроз. Может быть рекомендована студентам старших курсов вузов в качестве учебного пособия.

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО. LCR-МОДЕЛЬ С ИНДУКТИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ ВЫВОДА

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

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

Предложена методика расчёта и определены параметры LCR-модели циклотронного защитного устройства с учётом индуктивности цепи связи с нагрузкой. Показана необходимость увеличения связи и уменьшения частоты резонатора относительно центральной частоты полосы пропускания по мере возрастания индуктивности цепи. Приведены графики изменения коэффициента включения нагрузки и уменьшения частоты резонатора при вариации индуктивности.

КС: циклотронное защитное устройство, методика расчета, параметры, LCR-модель

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICE. LCR-MODEL WITH INDUCTIVE OUTPUT CONDUCTOR

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

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

The calculation technique is proposed and the parameters of the LCR-model of the cyclotron protective device are determined taking into account the inductance of the coupling circuit with the load. It is shown that it is necessary to increase the coupling and decrease the resonator frequency with respect to the central frequency of the passband as the inductance of the circuit increases. The graphs of the change in the load turn on factor and the decrease in the frequency of the resonator with variation in inductance are given.

Keywords: cyclotron protective device, calculation technique, parameters, LCR-model

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) как LCR-модели рассмотрены в ряде работ, в которых секция ЦЗУ представлена классической моделью пропускающего фильтра, где внешняя нагрузка непосредственно шунтирует резонатор, а частота резонатора и циклотронных колебаний луча равна центральной частоте полосы пропускания [1–7].

Модель ЦЗУ с автотрансформаторной связью резонатора и нагрузки, сопротивление которой существенно меньше сопротивления луча, рассмотрена в работе [8], где определена зависимость частоты резонатора и коэффициента включения от сопротивления нагрузки. Показано, что при влиянии нагрузки собственная частота резонатора должна быть меньше центральной частоты полосы пропускания.

Частота резонатора и коэффициент включения нагрузки в работе [8] определены при пренебрежимо малой индуктивности проводника, соединяющего резонатор с внешним трактом.

В данной работе определено влияние индуктивности проводника на параметры LCR-модели с автотрансформатором.

Коаксиальный тракт нагрузки подключен к ламелям резонатора соединителем – проводником связи (рис. 1), индуктивное сопротивление которого влияет на условия согласования фильтрующей структуры секции с внешней нагрузкой.

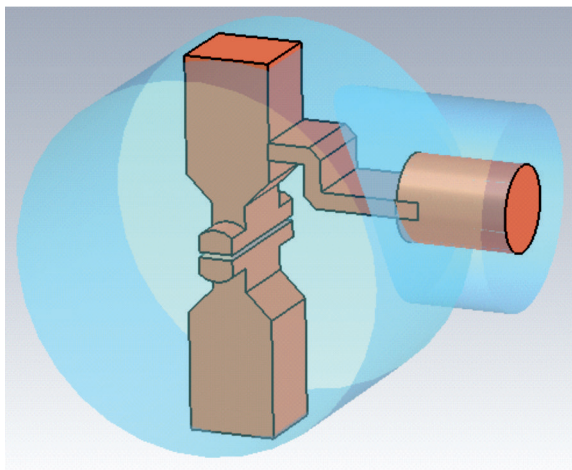


Рис. 1. Изображение секции ЦЗУ. Коаксиальный тракт соединен с ламелью резонатора соединителем, имеющим индуктивность L_{in}

Модель секции ЦЗУ представим двухзвенным LCR -фильтром с индуктивным автотрансформатором, нагруженным сопротивлением $Z_0 + i\omega L_{in}$ (рис. 2).

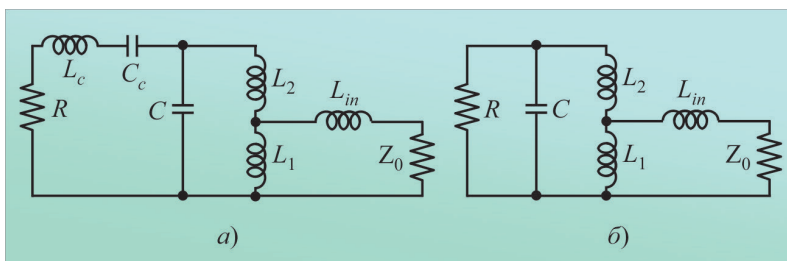


Рис. 2. LCR -модель секции ЦЗУ с автотрансформатором сопротивлений: a – в диапазоне частот; b – на частоте согласования с внешней цепью; R, L_c, C_c – элементы цепи имитации циклотронных колебаний электронного луча; C, L_1, L_2 – элементы модели резонатора; L_{in} – индуктивность соединителя; Z_0 – сопротивление внешней нагрузки

2. ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЯ НА ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Оценим характер влияния индуктивности соединителя на условия построения модели.

Сопротивление $i\omega L_{in}$ последовательной цепи, связывающей автотрансформатор с внешней нагрузкой, уменьшает приведенную к резонатору вещественную проводимость нагрузки $\text{Re}(Y_{нагр})$:

$$Y_{нагр} = \frac{1}{Z_0 + i\omega L_{in}} = \text{Re}(Y_{нагр}) - i \text{Im}(Y_{нагр}) = \frac{Z_0}{Z_0^2 + \omega L_{in}^2} - i \frac{\omega L_{in}}{Z_0^2 + \omega L_{in}^2}.$$

Образно говоря, индуктивное сопротивление соединителя «развязывает» вещественные проводимости нагрузки и резонатора.

По мере увеличения индуктивного сопротивления соединителя $i\omega L_{in}$ и уменьшения вещест-

венной проводимости $\text{Re}(Y_{\text{нагр}})$ возрастает величина связи резонатора с внешней нагрузкой, при которой достигается согласование низкой проводимости резонатора с высокой проводимостью нагрузки.

При увеличенной связи с нагрузкой резонатор повышено шунтируется мнимой проводимостью входной цепи $-\text{Im}(Y_{\text{нагр}})$, эффективная индуктивность резонатора при этом уменьшается и частота резонанса модели возрастает.

При необходимом условии равенства частоты нагруженного резонатора и центральной частоты полосы пропускания, собственная частота резонатора при индуктивном сопротивлении соединителя должна быть меньше центральной частоты полосы пропускания.

3. ОСНОВЫ РАСЧЁТА НАГРУЗКИ РЕЗОНАТОРА ПРИ ИНДУКТИВНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЯ

Определим условия согласования нагруженного лучом резонатора с внешней нагрузкой при индуктивном сопротивлении соединителя $i\omega L_{in}$ и частоте циклотронных колебаний, равной центральной частоте полосы пропускания (см. рис. 2, б):

$$f_c = 1 / (2\pi\sqrt{L_c C_c}) = f_0. \quad (1)$$

Выходное сопротивление резонатора с учётом индуктивности проводника соединителя представим выражениями:

$$Z = \text{Re}(Z) + i \text{Im}(Z), \quad (2)$$

$$\text{Re}(Z) = \frac{ak^2 x^2 \rho}{a^2(1-x^2)^2 + x^2}, \quad (3)$$

$$\text{Im}(Z) = kx\rho \frac{a^2(1-x^2)[1-(1-k)x^2] + x^2(1-k)}{a^2(1-x^2)^2 + x^2} + \omega L_{in}, \quad (4)$$

где $x = \omega/\omega_{\text{рез}} = f/f_{\text{рез}}$ – частота сигнала, нормированная к собственной частоте резонатора; $L = L_1 + L_2$ – индуктивность резонатора; $\rho = \omega_{\text{рез}} L = 1/\omega_{\text{рез}} C$ – характеристическое сопротивление резонатора; $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC} = 2\pi f_{\text{рез}}$ – частота резонатора; $a = R/\rho$ – вещественное сопротивление электронного луча с циклотронными колебаниями, нормированное к сопротивлению резонатора; $k = L_1/L$ – коэффициент включения, определяющий связь резонатора с внешней цепью; L_{in} – индуктивность соединителя.

Условия согласования внешней нагрузки Z_0 с выходным сопротивлением резонатора Z при центральной частоте сигнала $x_0 = f_0/f_{\text{рез}}$ определяются двумя равенствами: вещественные сопротивления нагрузки и резонатора равны с точностью до коэффициента стоячей волны σ , сумма мнимых сопротивлений равна нулю:

$$\text{Re}(Z, x_0) = Z_0/\sigma, \quad \text{Im}(Z, x_0) = 0. \quad (5)$$

С учётом требований (5) и соотношения $\omega L_{in} = x\omega_{\text{рез}} L_{in}$ в формуле (4) условия согласования сопротивлений при значении КСВН $\sigma = 1$ определяются системой двух уравнений:

$$ax^2k^2 - [a^2(1-x^2)^2 + x^2]Z_{0N} = 0, \quad (6a)$$

$$k \frac{a^2(1-x^2)[1-(1-k)x^2] + x^2(1-k)}{a^2(1-x^2)^2 + x^2} + X_{in} = 0, \quad (6б)$$

где $Z_{0N} = Z_0/\rho$ – нормированное сопротивление нагрузки; $X_{in} = \omega_{rez} L_{in}/\rho$ – нормированное сопротивление соединителя на собственной частоте резонатора.

4. РАСЧЁТ ДВУХЗВЕННОЙ МОДЕЛИ ЦЗУ ПРИ ИНДУКТИВНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЯ

Влияние индуктивности соединителя рассмотрим на примере построения модели ЦЗУ в виде фильтрующей системы с заданной полосой пропускания.

Система уравнений (6) характеризуется пятью переменными: нормированной частотой сигнала x , коэффициентом включения k , нормированными сопротивлениями электронного луча a , внешней нагрузки Z_{0N} и соединителя X_{in} . Значения трёх переменных, из общего числа пяти, в системе двух уравнений следует принять исходно.

При расчётах моделей с заданной полосой пропускания ΔF и центральной частотой f_0 должны быть определены: нормированная резонансная частота сигнала $x_0 = f_0/f_{rez}$ и коэффициент включения k , т. е. частота настройки резонатора f_{rez} и параметры цепи автотрансформатора L_1, L_2 .

Исходными параметрами при этом являются сопротивления луча, внешней нагрузки и резонатора, т. е. нормированные сопротивления луча a и внешней нагрузки Z_{0N} .

Значение третьей переменной, собственной частоты резонатора $\omega_{rez} = 2\pi f_{rez}$, в формуле (6б) исходно неизвестно, её величина с определённой точностью должна быть установлена в результате расчёта. Поскольку частота резонатора сравнительно близка к значению центральной частоты полосы пропускания ω_0 , решение системы уравнений (6) может быть выполнено несколькими ступенями. Вначале частота резонатора полагается равной центральной частоте полосы пропускания: $\omega_{rez} = \omega_0$. На последующих ступенях расчёта значение собственной частоты резонатора ω_{rez} определяется результатом расчёта предыдущей ступени.

Напомним, что частотная характеристика двухзвенной фильтрующей системы (см. рис. 2, а) зависит от соотношения сопротивлений внешнего тракта и луча, нагружающих резонатор на центральной частоте полосы пропускания. При сопротивлениях тракта и луча, равных $R\sigma_{max}$ и R , а также соответствующем выборе элементов L_c, C_c цепи, имитирующей циклотронные колебания луча, частотная характеристика КСВН имеет W -образную форму с повышенной полосой пропускания по максимальному значению КСВН, равному σ_{max} [3].

Определим данные LCR -модели с автотрансформатором при сопротивлении внешней нагрузки $Z_0 + i\omega L_{in}$. Исходные требования, для общности, примем те же, что в работе [8]: полоса пропускания $\Delta F = 500$ МГц по допустимому значению КСВН $\sigma_{max} = 1,24$; центральная частота сигнала $f_0 = 10$ ГГц; характеристическое сопротивление резонатора $\rho = 50$ Ом; сопротивление внешней нагрузки $Z_0 = 50,8$ Ом. Индуктивность проводника связи примем равной $L_{in} = 1,0$ нГн.

Расчёт модели сводится к трём операциям:

- по условиям $f_0, \Delta F, \sigma_{max}$ при выбранном сопротивлении резонатора ρ определяется необходимое сопротивление луча R ;

- при индуктивности соединителя L_{in} , сопротивлениях луча $R\sigma_{max}$, внешней нагрузки Z_0 и резонатора ρ решением уравнений (6) для КСВН $\sigma = 1$ на центральной частоте f_0 определяются коэффициент включения k , частота резонатора f_{rez} и его элементы C, L_1, L_2 ;

- при величине КСВН на центральной частоте f_0 , равной σ_{max} , и сопротивлении луча R определяются элементы L_c, C_c последовательной резонансной цепи, имитирующей колебания луча.

Наряду с уравнениями (6) в ходе расчёта далее использованы приведенные в работах [2, 3] численные коэффициенты и формулы расчёта элементов последовательного резонатора L_c, C_c .

Установив необходимое значение вещественного сопротивления электронного луча с циклотронными колебаниями:

$$R = 2\pi \frac{f_0}{\Delta F} \delta \rho = 2\pi \frac{10^{10}}{500 \cdot 10^6} 0,08888 \cdot 50 = 558,45 \text{ (Ом)}, \quad (7)$$

где δ – коэффициент, определяемый значением КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$ в пределах полосы пропускания [3], найдём исходные переменные системы уравнений (6):

– нормированное сопротивление электронного луча

$$a_{\max} = \frac{R\sigma_{\max}}{\rho} = \frac{558,445 \cdot 1,24}{50} = 13,84956; \quad (8)$$

– нормированное сопротивление нагрузки

$$Z_{0N} = \frac{Z_0}{\rho} = \frac{50,8}{50} = 1,016. \quad (9)$$

Параллельный резонатор модели (см. рис. 2) при найденных значениях сопротивлений пучка a и нагрузки Z_{0N} , согласно системе уравнений (6), имеет следующие параметры:

– нормированная частота согласования $x_0 = 1,055481552$;

– коэффициент включения $k = 0,4874706689$;

– собственная частота резонатора

$$f_{\text{рез}} = \frac{f_0}{x_0} = \frac{10,0}{1,055481522} = 9,474348442 \text{ (ГГц)}; \quad (10)$$

– реактивные элементы: $L = \rho/2\pi f_{\text{рез}} = 0,839925532$ (нГн),

$$L_1 = kL = 0,409439061 \text{ (нГн)}, \quad L_2 = (1-k)L = 0,430486471 \text{ (нГн)}, \quad (11)$$

$$C = 1/2\pi f_{\text{рез}} \rho = 0,3359702128 \text{ (пФ)}. \quad (12)$$

Схема модели (см. рис. 2, б), имеющей одинаковые значения сопротивлений внешней нагрузки и луча $R\sigma_{\max}$, приведенных к резонатору на центральной частоте f_0 , показана на рис. 3; контрольная частотная характеристика КСВН – на рис. 4.

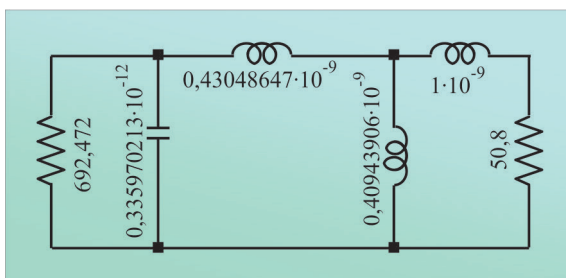


Рис. 3. Структура модели (см. рис. 2, б) на центральной частоте полосы пропускания при сопротивлениях нагрузки и луча $R\sigma_{\max}$

Переходя к сопротивлению колебаний луча $R = 558,45$, в σ_{\max} раз меньшему приведенного к резонатору сопротивления нагрузки $R\sigma_{\max}$, определим характеристическое сопротивление, индуктивность и ёмкость последовательной резонансной цепи, имитирующей колебания луча:

$$\rho_c = \frac{R^2}{\rho} \sigma_{\max} = \frac{558,45^2 \cdot 1,24}{50} = 7734,287 \text{ (Ом)}, \quad (13)$$

$$L_c = \frac{P_c}{2\pi f_0} = \frac{7734}{2\pi \cdot 10^{10}} = 123,095 \text{ (нГн)}, \quad (14)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi P_c f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 7734 \cdot 10^{10}} = 2,05777842 \text{ (фФ)}. \quad (15)$$

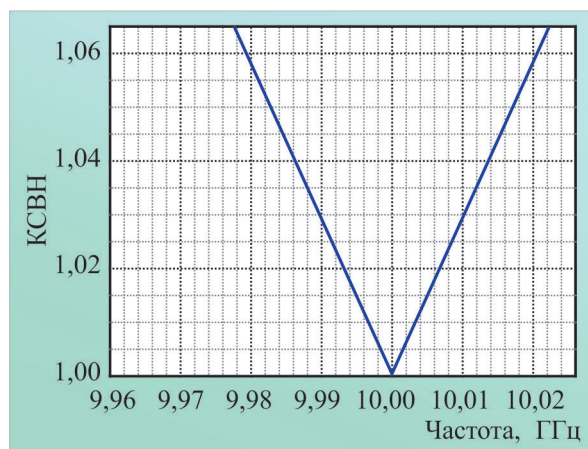


Рис. 4. Частотная характеристика КСВН модели с индуктивным соединителем (см. рис. 3) при сопротивлениях нагрузки и луча $R\sigma_{\max}$

Результатирующая двухзвенная модель показана на рис. 5, частотная характеристика КСВН – на рис. 6.

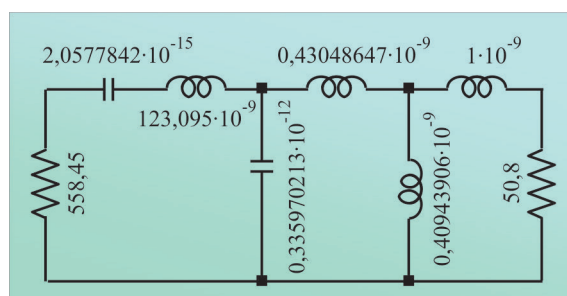


Рис. 5. Двухзвенная модель ЦЗУ с индуктивным соединителем. Внешняя нагрузка подключена к резонатору через автотрансформатор

Частотная характеристика модели с индуктивным соединителем при условиях согласования (5) имеет несущественные для практики отличия от идеальной характеристики: центральный максимум КСВН слегка превышает заданное значение $\sigma_{\max} < 1,24$, частота максимума КСВН незначительно повышена, высокочастотный минимум характеристики σ (1,03) не равен единице. Полоса пропускания при этом отвечает заданному значению $\Delta F = 500$ МГц.

Ток и напряжение ускорения электронного луча данной модели при обычных значениях величины зазора и длины ламелей ($d = 0,1$ мм и $l = 2,5$ мм), определенные согласно формулам работы [3], соответствуют известным из практики нормам:

$$I_0 = \frac{8k_1^2 d^2 R}{L_c^2} = 8 \left(\frac{2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{123,095 \cdot 10^{-9}} \right)^2 558,45 = 212 \text{ (мкА)}, \quad (16)$$

$$(17\text{фя}) \quad V_0 = \left(\frac{k_1 R l}{L_c} \right)^2 = \left(\frac{2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 558,45 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{123,095 \cdot 10^{-9}} \right)^2 = 9,14 \text{ (В)}, \quad +\text{Ё}$$

где k_1 – численный коэффициент [3].

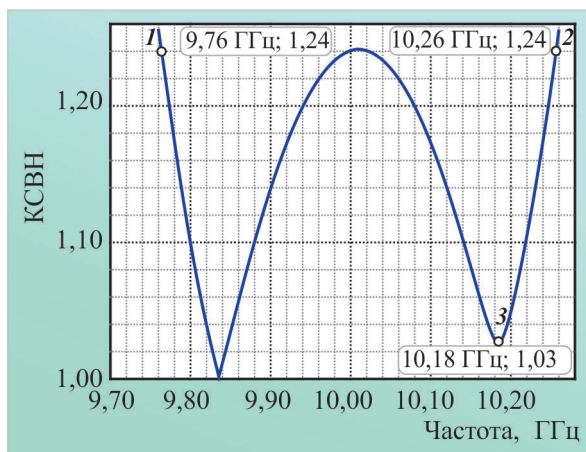


Рис. 6. Частотная характеристика КСВН двухзвенной модели с индуктивным соединителем при связи нагрузки и резонатора через индуктивный автотрансформатор. Полоса пропускания $\Delta F = 500$ МГц по уровню КСВН $\sigma_{\max} \leq 1,24$

Собственная частота резонатора, как показано выше, для реализации *W*-образной частотной характеристики при комплексной нагрузке резонатора $Z_0 + i\omega L_{in}$ должна быть меньше центральной частоты полосы пропускания.

Величина необходимого уменьшения частоты резонатора рассматриваемой модели, а также возрастание коэффициента включения при увеличении индуктивности соединителя L_{in} показаны на рис.7 и 8.

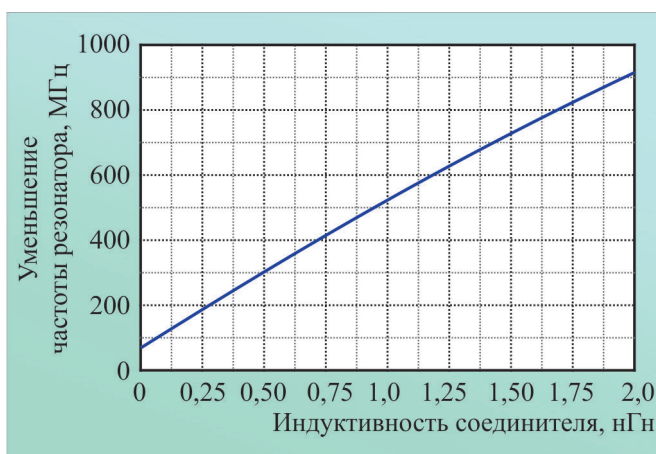


Рис. 7. Уменьшение собственной частоты резонатора при возрастании индуктивности соединителя

Минимальные значения коэффициента включения и уменьшения частоты резонатора при $L_{in} \rightarrow 0$ определяются степенью нагрузки резонатора вещественным сопротивлением внешней

цепи [8]. Необходимое уменьшение частоты резонатора и коэффициент включения по мере увеличения индуктивности проводника возрастают практически пропорционально величине индуктивности.

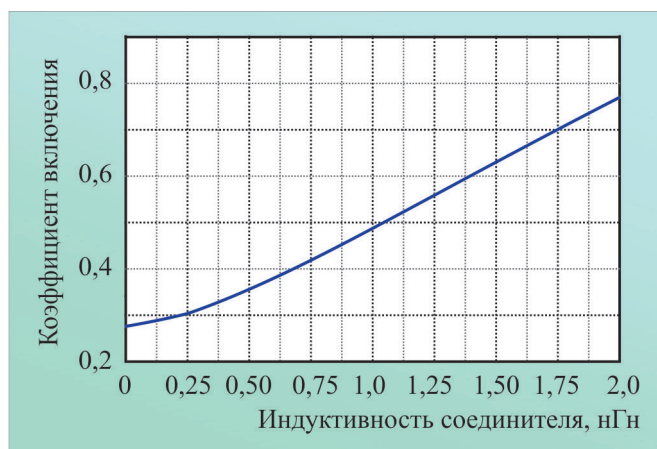


Рис. 8. Увеличение коэффициента включения при возрастании индуктивности соединителя

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен резонатор ЦЗУ, нагруженный внешним трактом через индуктивный автотрансформатор и отрезок проводника.

Частота нагруженного резонатора, как звена полосового фильтра, должна быть равна центральной частоте полосы пропускания. Индуктивное сопротивление проводника нагрузки, шунтируя автотрансформатор, повышает частоту резонанса. В условиях равенства частоты нагруженного резонатора центральной частоте полосы пропускания собственная частота резонатора с учётом индуктивности соединителя должна быть меньше центральной частоты полосы пропускания. Необходимое уменьшение частоты резонатора пропорционально индуктивному сопротивлению проводника.

Наряду с этим, индуктивное сопротивление проводника уменьшает величину вещественного сопротивления тракта, приведенного к резонатору. Для согласования высокого сопротивления луча с пониженным сопротивлением тракта требуется повышенное значение коэффициента включения нагрузки.

Необходимое уменьшение частоты резонатора сравнительно просто достигается изменением его конструкции.

Повышенные значения коэффициента включения нагрузки, как показывает опыт, реализовать сложно, что накладывает ограничение на размеры проводника связи, индуктивное сопротивление которого не должно существенно превышать сопротивление тракта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзинский, Ю. А. Расчёт рабочей полосы циклотронного защитного устройства // Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 1 (504). – С. 70 – 87.

2. **Калина, В. Г.** Моделирование СВЧ циклотронного защитного устройства как трехзвенного фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 3 – 15.
3. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 19 – 38.
4. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства с подавлением зеркального канала / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 4 (523). – С. 48 – 62.
5. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронных защитных устройств на основе контрольных измерений / В. Г. Калина // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 4 (523). – С. 63 – 72.
6. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Расчёт связи с нагрузкой / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 2 (529). – С. 8 – 12.
7. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Расчёт характеристического сопротивления резонатора / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3 (530). – С. 31 – 39.
8. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Модель с автотрансформатором / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1 (532). – С. 74 – 83.

Статья поступила 15 мая 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

УСЫЧЕНКО В.Г., СОРОКИН Л.Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. Монография. – М.: Радиотехника, 2017. – 288 с.: ил.

Экспериментальными, аналитическими и численными методами исследуется стойкость сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов и радиоприемных устройств дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн к направленным и случайным импульсным электромагнитным воздействиям различной частоты, длительности и формы. Рассмотрены особенности воздействия сверхширокополосного радиочастотного излучения. Оценена дальность поражения широкополосных и узкополосных радиоприемных устройств излучателями мощных одиночных и периодически следующих электромагнитных импульсов.

Для научных работников, инженеров, конструкторов радиоаппаратуры, к которой предъявляются повышенные требования стойкости к воздействию мощных электромагнитных помех. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382.322

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАПСУЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ СОХРАНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ Ti/Al/Ni/Au НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaN/GaN

И. А. Рогачёв, А. С. Курочка, О. И. Мешков, А. В. Князьков,
Д. А. Никитин, С. Д. Зинкин, А. С. Верещагина

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

Рассмотрен метод формирования омических контактов Ti/Al/Ni/Au на гетероструктурах AlGaN/GaN с использованием капсулирования, а также некоторые проблемные аспекты применения этого метода. Выбран оптимальный режим капсулирования.

КС: нитрид галлия, омический контакт, капсулирование, морфология

THE USE OF ENCAPSULATION TO PRESERVE THE MORPHOLOGY OF Ti/Al/Ni/Au OHMIC CONTACTS ON AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES

I. A. Rogachev, A. S. Kurochka, O. I. Meshkov, A. V. Knyaz'kov,
D. A. Nikitin, S. D. Zinkin, A. S. Vereshchagina

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

The method of forming Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts on AlGaN/GaN heterostructures using encapsulation is considered, as well as some problematic aspects of the application of this method. The optimal mode of encapsulation is selected.

Keywords: gallium nitride, ohmic contact, encapsulation, morphology

1. ВВЕДЕНИЕ

III-N широкозонные полупроводники обладают уникальными физическими свойствами, позволяющими использовать их в силовой электронике в широком диапазоне частот.

Разработка мощных полевых транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN обеспечивает продвижение твердотельной электроники в область более высоких частот, мощностей и температур.

Основой для производства полевых транзисторов при использовании III-N гетероструктур являются эпитаксиальные процессы [1]. По мере усложнения конструкции и повышения тре-

требований к электрическим параметрам транзисторов повышается значение постростовых операций, в частности, большое значение приобретает процесс формирования омических контактов.

Формирование качественных омических контактов на основе гетероперехода AlGaIn/GaN является одной из самых сложных задач в технологии изготовления транзисторов в первую очередь из-за большого значения ширины запрещенной зоны (для GaN – 3,5 эВ).

Большинство омических контактов к областям *n*-типа проводимости гетероструктур AlGaIn/GaN изготавливают из наиболее популярной многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au, в других вариантах этой металлизации никель заменён на тугоплавкие металлы и соединения [1–3]. Основное влияние на формирование омического контакта оказывают два нижних слоя металлов – Ti/Al. Оптимальное соотношение между нижним слоем Ti и следующим слоем Al кардинально влияет на электрические и морфологические свойства омических контактов [4–8].

Вторая техническая проблема при формировании омического контакта возникает в связи с тем, что в структуре присутствует слой Al, который должен взаимодействовать с полупроводником при температурах порядка 800 °С, т. е. выше собственной температуры плавления. Вжигание при более низких температурах даёт значительно более высокие значения сопротивления омических контактов [9–12].

При вжигании металлических слоёв омического контакта методом быстрого термического отжига происходит нарушение их морфологии, что ведёт к снижению равномерности параметров приборов по пластине и их воспроизводимости от пластины к пластине. Также сильное увеличение шероховатости приводит к трудностям создания топологии каналов и затворов методом электронной литографии.

Для сохранения морфологии омических контактов используют метод капсулирования, который состоит в том, что перед процессом быстрого термического отжига всю поверхность пластины покрывают слоем диэлектрика. Таким образом, получается, что форма металлических слоёв зафиксирована с одной стороны поверхностью полупроводника, а с остальных – плёнкой диэлектрика, благодаря этому она сохраняется при высокотемпературном воздействии. В качестве диэлектрика используют в основном оксид и нитрид кремния [13, 10].

Диэлектрические плёнки, используемые при капсулировании, содержат в себе механические напряжения, которые могут повлиять на их целостность в процессе вжигания (рис. 1 и 2). Чем толще диэлектрическая плёнка, тем больше механических напряжений она содержит [10]. Поэтому необходимо подобрать такую толщину плёнки, которая бы фиксировала форму омического контакта и при этом содержала минимальное количество механических напряжений.

Наличие диэлектрической плёнки, содержащей кремний, приводит к образованию соединений кремния с алюминием и золотом за счет диффузии. Точки эвтектики для сплавов Si–Al и Si–Au равны 577 и 363 °С соответственно [10]. В результате возможно образование так называемых «облаков» (см. рис. 2, в), благодаря которым изменяются свойства поверхности пластины.

Удаление диэлектрических слоёв после высокотемпературной обработки проводят в индуктивно связанной плазме в атмосфере фтора [13, 10].

Таким образом, при использовании металлизации Ti/Al/Ni/Au возникает проблема – грубая шероховатость поверхности. В данной работе представлены результаты использования метода капсулирования при создании омических контактов к нитриду галлия, целью которого является минимизация нарушений морфологии омического контакта.

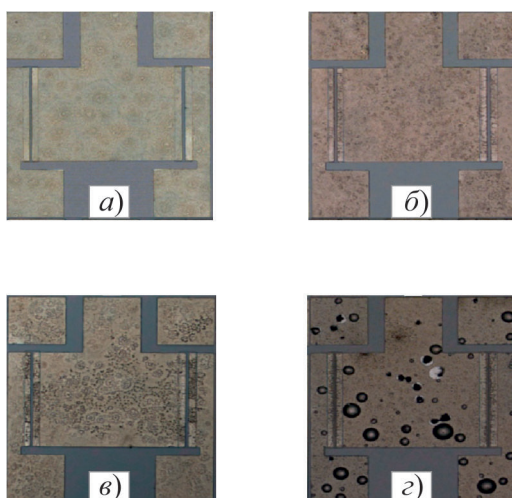


Рис. 1. Снимки морфологии омических контактов Ti/Al/Ta/Au с капсулированием нитридом кремния [1]:
a – 50 нм; *б* – 100 нм; *в* – 150 нм; *г* – 200 нм

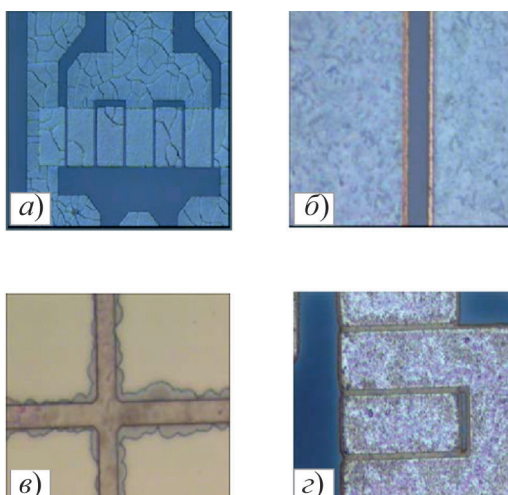


Рис. 2. Снимки морфологии омических контактов Ti/Al/Ni/Au с капсулированием [2]:
a – SiN ($\times 100$); *б* – SiN ($\times 1000$); *в* – образование «облаков» при капсулировании SiN; *г* – SiO₂ ($\times 200$)

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для эксперимента были использованы гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенные на предприятии «Элма-Малахит».

На этих структурах была сформирована мезаизоляция методом реактивного ионного травления в индуктивно связанной плазме в атмосфере смеси газов Cl₂/BCl₃.

Предварительная обработка подложек осуществлялась в несколько стадий.

1. Удаление с поверхности подложек органических пленок обработкой образца в ацетоне с последующей обработкой в изопропиловом спирте.

2. Удаление с поверхности подложек окислов в растворе HCl и H₂O (1:1) в течение 3 мин.
3. Промывка образца в деионизованной воде и сушка.

Затем на поверхность полупроводника была нанесена многослойная металлизация Ti/Al/Ni/Au толщиной 45/140/50/50 нм в установке «Evatec 641» методом электронно-лучевого напыления без предварительного нагрева подложек.

Формирование топологии омических контактов осуществлялось с помощью технологии lift-off. Капсулирование проводилось путем осаждения слоёв нитрида кремния толщиной от 5 до 50 нм на установке стимулированного плазмой химического осаждения из газовой фазы «STS LPX» при 350 °C в смеси газов SiH₄, NH₃, N₂ в соотношении (1:5:30), давлении 2000 мТорр и 30-Вт мощности ВЧ-генератора (13,56 ГГц). Далее следовал быстрый двухстадийный термический отжиг при температурах 600 и 850 °C. Отжиг проводился на установке «As-one», длительность отжига – 20 и 40 с соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 показаны снимки омических контактов после вжигания. Видно, что с увеличением толщины капсулирующего слоя диэлектрика морфология поверхности омических контактов сохраняется лучше. При использовании диэлектрика толщиной более 35 нм происходит образование так называемых «облаков» (рис. 4) и заметны разрушения капсулирующего слоя (трещины на поверхности, см. рис. 3, д).

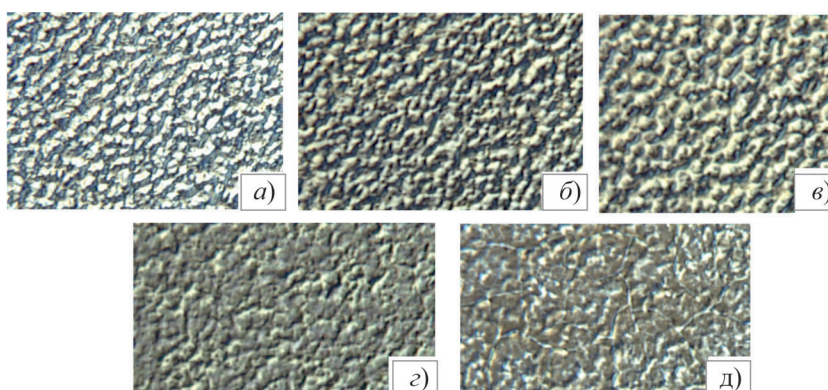


Рис. 3. Снимки поверхности омических контактов после вжигания в течение 40 с при 850 °C с использованием капсулирования нитридом кремния ($\times 100$):
а – без капсулирования; б – капсулирование 5 нм; в – капсулирование 10 нм;
г – капсулирование 30 нм; д – капсулирование 50 нм

При помощи профилометра Dektak 150 были получены профили поверхности омического контакта после стравливания диэлектрика и очистки в буферном травителе. Как видно из рис. 5, тонкие слои капсулирующего диэлектрика (5 и 10 нм) не приводят к сохранению морфологии омического контакта, в то время как присутствие слоёв Si₃N₄ толщиной 30 и 50 нм обеспечивает меньшую шероховатость. На рис. 6 представлена зависимость шероховатости поверхности металлического слоя омических контактов от толщины капсулирующего слоя. Видно, что существует зависимость между этими двумя величинами: чем толще слой диэлектрика, тем более низкую шероховатость имеют омические контакты. Но также выяснили, что увеличение толщины диэлектрического слоя приводит к образованию силицидов металлов, «облаков»,

которые имеют низкое сопротивление, что приведёт к увеличению токов утечки. Поэтому при применении капсулирования необходимо искать компромисс между сохранением морфологии поверхности и отсутствием низкоомных силицидов металлов на поверхности полупроводника.



Рис. 4. Образование «облаков» после вжигания в течение 40 с при 850 °С с толщиной капсулирующего слоя 35 нм

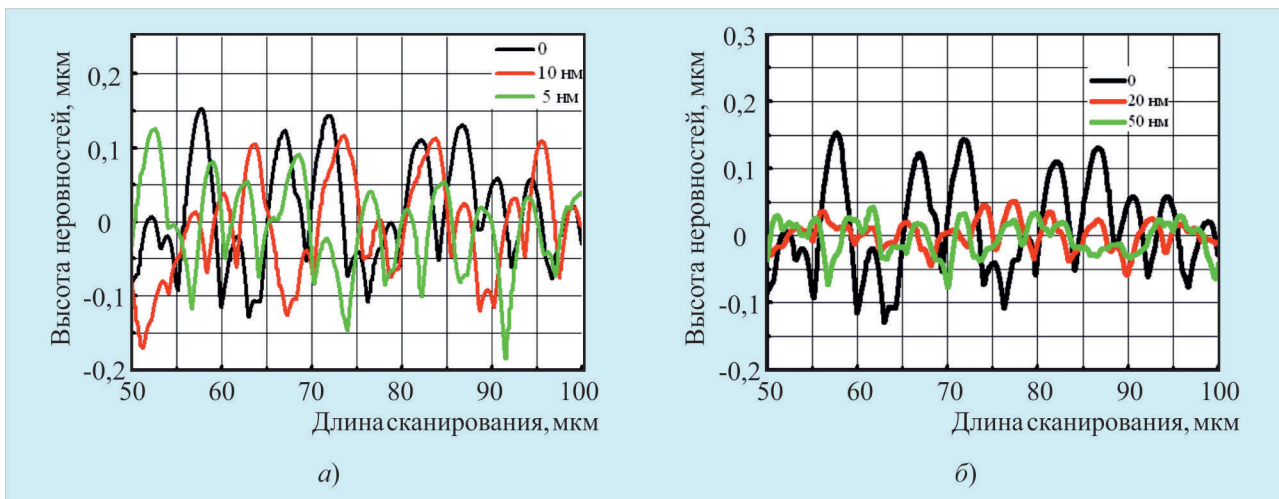


Рис. 5. Профили поверхности омических контактов после вжигания в течение 40 с при 850 °С с использованием разной толщины капсулирующего слоя

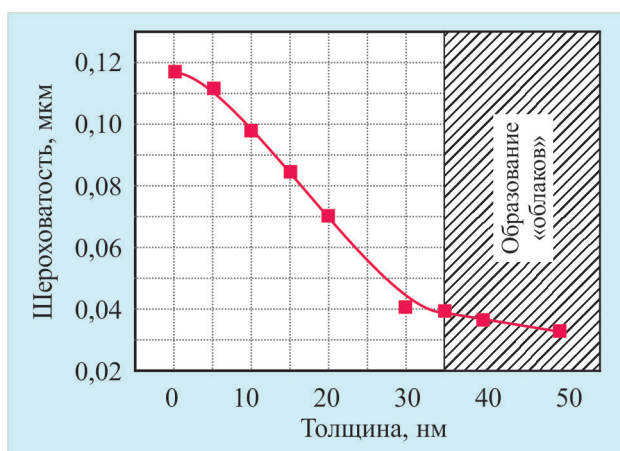


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности омического контакта после вжигания в течение 40 с при 850 °С от толщины капсулирующего слоя

Сопротивление омических контактов составило порядка 0,55 Ом·мм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода капсулирования диэлектрическим слоем нитрида кремния приводит к снижению шероховатости омических контактов и сохранению их морфологии. Шероховатость металлического слоя после вжигания зависит от толщины капсулирующего диэлектрика. Тонкие слои нитрида кремния (до 20 нм) приводят к незначительному снижению шероховатости, в то время как слои толщиной более 30 нм обеспечивают её снижение в 3 раза.

Также в ходе работы было выяснено, что для капсулирующего слоя толщиной более 35 нм характерно образование металлов с кремнием, так называемых «облаков», которые имеют низкое сопротивление и способны значительно увеличить токи утечки прибора.

Таким образом, оптимальная толщина капсулирующего слоя нитрида кремния составляет 30 нм. При этом удаётся добиться снижения шероховатости поверхности омического контакта с 0,12 до 0,04 мкм, также сохраняется морфология контакта и отсутствуют эвтектические сплавы металлов с кремнием.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Van Daele, B.** / B. Van Daele, G. Van Tendeloo, W. Ruythooren // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 87. – P. 061905.
2. **Bardwell, J. A.** / J. A. Bardwell, S. Haffouz, H. Tang // J. Electrochem. Soc. – 2006. – Vol. 153. Issue 8. – P. G746 – G749.
3. **Kolaklieva, L.** / L. Kolaklieva, R. Kakanakov, V. Cimalla // IEEE Electron Devices Society: 26th International Conference on Microelectronics: Proceedings. Vol.1: Nis, Serbia, 11-14 May 2008. – P. 221 – 224.
4. **Chaturvedi, N.** Mechanism of ohmic contact formation in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors / N. Chaturvedi, U. Zeimer, J. Wurfl, G. Trankle // Semicond. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 21, No 2. – P. 175 – 179.
5. **Motayed, Abhishek.** Electrical, thermal, and microstructural characteristics of Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contacts to *n*-type Ga_N / Abhishek Motayed, Ravi Bathe, M. C. Wood, O. S. Diouf, R. D. Vispute, S. N. Mohammad // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93, No 2. – P. 1087 – 1094.
6. **Vasil'ev, A. G.** SVCh-pribory i ustroystva na shirokozonnnyh poluprovodnikah / A. G. Vasil'ev, Yu. V. Kolkovskii, Yu. A. Koncevoi. – М.: Tehnosfera, 2011. – 416 p.
7. **Roccaforte, F.** Nanoscale carrier transport in Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts on AlGa_N epilayers grown on Si (111) / F. Roccaforte, F. Iucolano, F. Giannazzo, A. Alberti, V. Raineri // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 022103 1– 3.
8. **Jacobs, B.** Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGa_N/Ga_N FET structures / B. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. – 2002. – Vol. 241. – P. 15 – 18.
9. **Волков, В. В.** Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGa_N/Ga_N, полученных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии / В. В. Волков, В. П. Иванова, Ю. С. Кузьмичев, С. А. Лермонтов, Ю. В. Соловьев, Д. А. Баранов, А. П. Кайдыш, Д. М. Красовский, М. В. Павлеченко, С. И. Петров, Ю. В. Погорельский, И. А. Соколов, М. А. Соколов, М. В. Степанов, В. П. Чалый // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 9.
10. **Wang, Cong.** Electrical characterization and nanoscale surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGa_N/Ga_N HEMT / Cong Wang, Nam-Young Kim // Nanoscale Research Letters. – 2012, 7:107.
11. **Knafo1, Y.** Investigation of contact metal stacks for submicron Ga_N HEMT / Y. Knafo1, I. Toledo, I. Hallakoun, J. Kaplun // 1 Department of Electrical Engineering – Physical Electronics, Tel-Aviv University.
12. **Гольцова, М.** Мощные Ga_N-транзисторы – истинно революционная технология / М. Гольцова.
13. **Javorka, Peter.** Fabrication and characterization of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor / Peter Javorka.

Статья поступила 10 апреля 2017 г.

УДК 537.521.1

ПОЛЕВАЯ ДЕСОРБЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАЗОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭВП

С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин

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

Рассмотрены условия возникновения полевой десорбции газов с различных электродов, подлежащих высоковольтной тренировке. Показана связь полевой десорбции газов с развитием электрического пробоя в вакууме между тренируемыми электродами электровакуумного прибора (ЭВП). Доказано влияние микрогеометрии (пористости) поверхностей электродов и степени их обезгаживания на электрическую прочность ЭВП. Показано, что при минимальной напряжённости поля от 5,9 кВ/мм на одном из ЭВП с поверхностей электродов появляется десорбированный газ.

КС: полевая десорбция, отпаянный ЭВП, пробой, высоковольтная тренировка

FIELD DESORPTION OF SURFACE GASSES AND ELECTRICAL STRENGTH OF ELECTROVACUUM DEVICES

S. A. Vashin, G. F. Korepin

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

Conditions for the onset of desorption of gasses from various electrodes subject to high-voltage training are considered. The relationship between the field desorption of gasses and the development of electrical breakdown in vacuum between the electrodes of the electrovacuum device (EVD) being trained is shown. The influence of microgeometry (porosity) of the electrode surfaces and the degree of their degassing on the electrical strength of electrovacuum devices is proved. It is shown that with a minimum field strength from 5.9 kV/mm a desorbed gas appears on one of the vacuum devices from the surfaces of the electrodes.

Keywords: field desorption, sealed-off EVD, breakdown, high-voltage training

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–11] отмечается, что вакуумному электрическому пробую между электродами предшествуют возникновение токов автоэлектронной или порозлектронной эмиссии, выделение материалом электродов газа, в том числе в виде ионов. Однако в ранее опубликованных работах нет точных данных о точном количестве выделяющегося газа [12] и о напряженности электрического поля, при которой начинается десорбция газа. Это ограничение связано с трудностью измерения давления газа и соответствующей фиксации возникновения потока этого газа. Присутствие десорбции газа ранее подтверждалось только при помощи косвенных измерений [2, 13].

Электровакуумные приборы (ЭВП) сверхвысоких частот, как правило, в своем составе имеют встроенные магнитные электроразрядные насосы (НЭМ). Поэтому по величине изменения тока НЭМ можно судить об изменении давления газов, а следовательно, и об изменении потока газов, поступающих в НЭМ, например, в результате их десорбции в ЭВП, зная параметры насоса [9, 14–16].

Целью данной работы является определение условий появления десорбированного газа, в частности минимально возможного изменения давления газа после приложения высокого напряжения между электродами, и влияния десорбированного газа на электрическую прочность ЭВП.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОЙ ДЕСОРБЦИИ ГАЗОВ В ОТПАЯННЫХ ЭВП

Исследование полевой десорбции газов проводилось в отпаянных мощных высоковольтных ЭВП. Во время предварительной высоковольтной тренировки подавалось высокое напряжение на вакуумный промежуток сетка-анод (сетка, катод – электроды, имеющие одинаковый потенциал) и сетка-катод (катод, анод – электроды, имеющие одинаковый потенциал). Измерения проводились при минусовой или плюсовой полярности напряжения на сетке, анодом являлся корпус мощного предварительно тренированного клистрона. Исследование вакуумных промежутков проводилось с введенным в рабочий режим НЭМ от источника постоянного высокого напряжения. В источнике напряжения имеется возможность цифрового измерения токов НЭМ в широком диапазоне: от 0,1 нА до сотен микроампер. Измерение меньших значений тока ограничивается уровнем шумов источника питания.

Исследование полевой десорбции газов при подаче высокого напряжения в плюсовой полярности промежутка сетка-анод проводилось на другом источнике питания НЭМ с невысокой точностью (измерения тока фиксировались в микроамперах).

2.1. Исследование полевой десорбции газов вакуумного промежутка сетка-анод

Сущность предложенной методики исследования заключалась в измерении изменения давления газов при подъеме напряжения между исследуемыми электродами в процессе измерения тока НЭМ после предварительной откачки ЭВП до сверхнизкого давления (скорость откачки насоса при давлении 10^{-4} Па составляет 1 л/с), так как величина тока НЭМ прямо пропорциональна давлению газа ЭВП.

Кривая изменения давления при подъеме напряжения на вакуумном промежутке сетка-анод приведена на рис.1. Видно, что напряженность поля $E_{c-a} = 7,8$ кВ/мм (минус на сетке) соответствует той критической напряженности, при которой появляется десорбция газа под действием электрического поля. Следует отметить, что ток проводимости (утечки) вакуумного промежутка сетка-анод при этом не возрастал, что свидетельствует об исключении действия тока автоэлектронной и термоэлектронной эмиссии (в пределах точности измерения) на десорбцию газа с поверхностей электродов. Незначительная и постоянная величина тока утечки по поверхности изолятора не могла привести к его разогреву и к изменяющейся

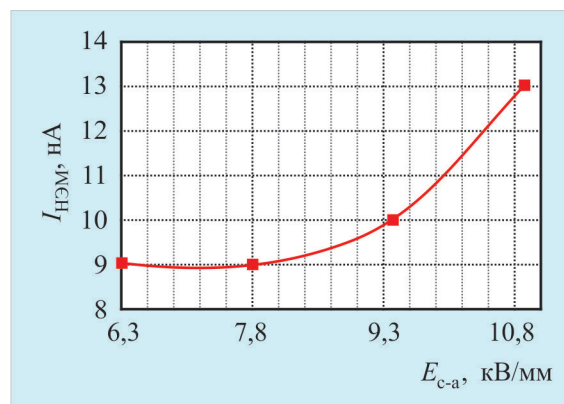


Рис. 1. Изменение десорбции газов от напряженности электрического поля вакуумного промежутка сетка-анод (минус на сетке)

десорбции газа при изменении напряжения между электродами. Поэтому имеющуюся десорбцию газа можно считать полевой. ЭВП предварительно прошел высоковольтную тренировку в статическом режиме, затем выдерживался без напряжений более суток. Последующая его выдержка в течение 30 мин при напряженности поля вакуумного промежутка сетка-анод 10,9 кВ/мм не изменила тока НЭМ, который остался равным 13 нА. Пробоев при измерении десорбции газов в данном эксперименте не обнаружено.

Результаты расчета показали, что при изменении напряженности поля E_{c-a} с 7,8 до 10,9 кВ/мм (минус на сетке) поток десорбируемого газа составляет $2 \cdot 10^{-11}$ м³·Па/с. Установлено, что изменение тока НЭМ не является следствием ошибок при измерении малых токов НЭМ.

Постоянство тока НЭМ при выдержке с установленной напряженностью поля $E_{c-a} = 10,9$ кВ/мм (минус на сетке) показывает, что десорбция газа во время выдержки не изменяется. Это можно объяснить миграцией газа с других поверхностей вакуумного объема ЭВП на места его десорбции. Очевидно, что процесс миграции газа с последующей полевой десорбцией будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет истощение источников газа на поверхностях вакуумного объема ЭВП и откачка этого газа НЭМ. Следует отметить, что данное явление происходило при подаче высокого напряжения минусовой полярности на вакуумный промежуток сетка-анод и полевой десорбции с поверхности анода. При подаче высокого напряжения плюсовой полярности на вакуумный промежуток сетка-анод десорбция газа будет идти с сетки и, возможно, частично с катода (катод и сетка имеют одинаковый потенциал).

Исследование отпаянных приборов, имеющих повышенное газосодержание поверхностей электродов (в основном катода), наглядно показывает увеличение полевой десорбции газов начиная с $E_{c-a} = 5,9$ кВ/мм (рис. 2). Видно (кривые 1 и 2), что полевая десорбция газов в начальный момент, сразу после очередного повышения напряжения, имеет максимальное значение и в течение трех минут происходит её снижение. Согласно кривой 3 (см. рис. 2), сразу после установления заданной напряженности поля $E_{c-a} = 7,3$ кВ/мм интенсивность газовой выделенности нарастает, по сравнению с кривыми 1 и 2, затем, через минуту, достигается максимум, далее следует тенденция к снижению выделения газа. Это подтверждает высказанное выше предположение о влиянии миграции газа на его десорбцию под действием электрического поля. Во время измерений ток межэлектродного промежутка не превышал 0,24 мА, не относился к току авто- или термоэлектронной эмиссии, поэтому влияние его на полевую десорбцию газов незначительно. Пробоев при исследовании десорбции газов в данном эксперименте не наблюдалось.

На рис. 3 показана десорбция газа с поверхностей катода и сетки при подаче напряжения на эти электроды в плюсовой полярности относительно анода. Десорбция газа возникает при напряженности поля $E_{c-a} = 6,3$ кВ/мм и сильно отличается от десорбции газов с анода (см. рис. 1).

Результаты расчета показали, что при изменении напряженности поля с $E_{c-a} = 6,3$ кВ/мм до $E_{c-a} = 11,3$ кВ/мм поток десорбируемого газа составляет $3,5 \cdot 10^{-8}$ м³·Па/с. Результаты измерений показывают, что с сетки и пористой структуры катода десорбция газов значительно больше, чем с поверхности анода.

Во время исследования прибора с аномально повышенным газосодержанием катода пробои появились при напряженности поля $E_{c-a} = 7,8$ кВ/мм (поток десорбируемого газа составляет $8 \cdot 10^{-7}$ м³·Па/с). Согласно кривой 1 (рис. 4), частота пробоев спустя первые минуты резко снизилась, спустя 3 мин количество пробоев уменьшилось до двух в минуту. Полевая десорбция в начале наблюдения при $E_{c-a} = 11,3$ кВ/мм также резко снизилась. При этом во время пробоев мгновенные изменения тока НЭМ составили 2...4 мкА, кроме того, утечка на вакуумном про-

межутке во время подачи напряжения не превышала допустимой величины 0,2 мА. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что электрическая прочность вакуумного промежутка ЭВП в первую очередь зависит от микрогеометрии (пористости), газонасыщенности электродов, свойств адсорбированных слоев газов обеих поверхностей электродов и других факторов [1, 3, 8, 10]. Очевидно, что особенности десорбции говорят о большом количестве сорбированного газа в области сетки, поверхности катода и пушки.

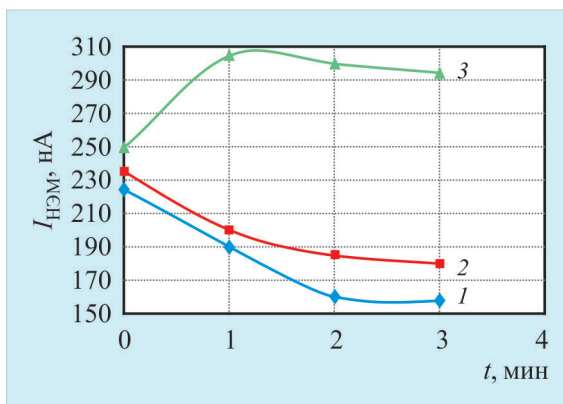


Рис. 2. Изменение десорбции газов в процессе выдержки ЭВП при разных напряженностях электрического поля вакуумного промежутка сетка-анод (минус на сетке):
 1 – $E_{c-a} = 5,9$ кВ/мм; 2 – $E_{c-a} = 6,5$ кВ/мм; 3 – $E_{c-a} = 7,3$ кВ/мм

Рис. 3. Изменение тока НЭМ от напряженности электрического поля вакуумного промежутка сетка-анод (плюс на сетке)

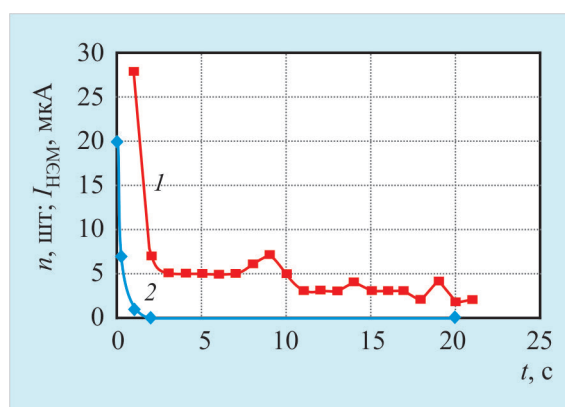
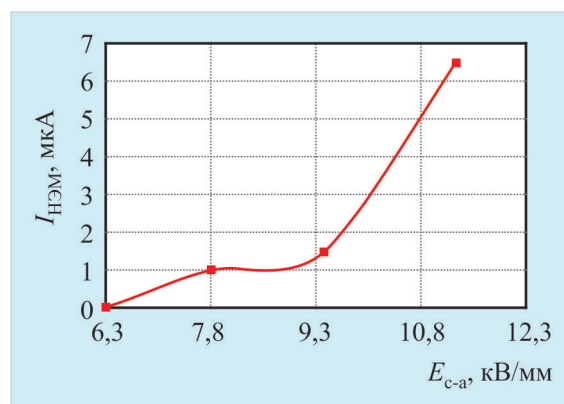


Рис. 4. Изменение десорбции газов и интенсивности пробоев при напряженности поля $E_{c-a} = 11,3$ кВ/мм (плюс на сетке):
 1 – интенсивность пробоев; 2 – десорбция газов, измеренная по току НЭМ

2.1. Исследование полевой десорбции газов вакуумного промежутка сетка-катод

Исследование полевой десорбции газов вакуумного промежутка сетка-катод других ЭВП, имеющих повышенное газосодержание, показывает (рис. 5), что в минусовой полярности относительно катода на этом промежутке газы выделяются значительно больше, чем в плюсовой. Эти данные подтверждают результаты, полученные по полевой десорбции газов на вакуумном промежутке сетка-анод при разных полярностях подаваемого напряжения. В минусовой полярности появление значительной полевой десорбция начиная с $E_{с-к} = 7,3$ кВ/мм (рис. 5, а) обеспечивается за счет газов, находящихся на поверхности катода, причем замечено нелинейное возрастание тока утечки (ток между электродами вакуумного промежутка) вместе с напряженностью поля. В плюсовой полярности полевая десорбция газа начинает появляться также с $E_{с-к} = 7,3$ кВ/мм (рис. 5, б), при этом ток утечки не обнаружен. Наличие тока утечки в минусовой полярности, возможно, обусловлено в том числе токами автоэлектронной и пороэлектронной эмиссии [1, 3] сетки. В этом случае частично десорбция газа может быть вызвана и бомбардировкой катода электронами с сетки.

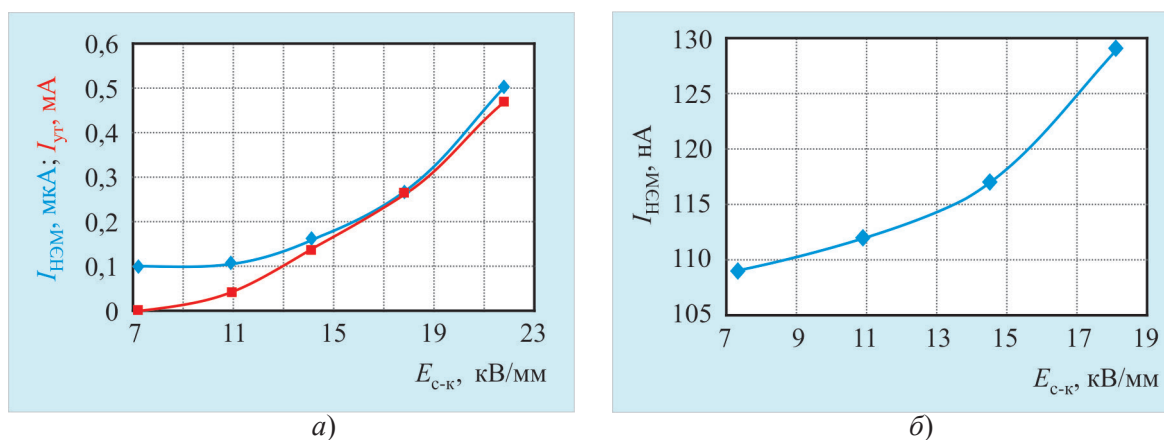


Рис. 5. Изменение десорбции газов от напряженности электрического поля вакуумного промежутка сетка-катод:
а – минус на сетке; б – плюс на сетке

Исследование полевой десорбции ЭВП с повышенным газосодержанием поверхностей электродов при напряженности поля $E_{с-к} = 21,8$ кВ/мм (минус на сетке) показывает, что максимальное значение газовыделения (рис. 6, кривые 1 и 2) достигается не сразу, а спустя некоторое время и зависит от количества сорбированного газа на поверхности электрода. После выдержки прибора 24 ч (с выключенным НЭМ) значение зафиксированной максимальной полевой десорбции газа (рис. 6, кривая 2) меньше значения после первого измерения (рис. 6, кривая 1). Максимумы кривых 1 и 2 не совпадают во времени, что свидетельствует о новом динамическом равновесии сорбированного газа после 24-часовой выдержки, при котором сорбция газа электродами и его десорбция электрическим полем становятся одинаковыми при данной величине напряженности поля. Изменение сорбционного равновесия привело к сдвигу максимума кривой влево и снижению величины десорбированного газа. Кроме этого, конечное значение зафиксированного газа по току НЭМ (см. рис. 6, кривая 1) не совпадает с максимальным значением потока газа, измеренного после выдержки прибора без включения

(см. рис. 6, кривая 2). Данное исследование показывает наличие миграции газов в ЭВП, в том числе и на поверхностях электродов, на которые подавалось высокое напряжение за относительно небольшое время. Пробоев вакуумного промежутка и изменения тока утечки в эксперименте при исследовании десорбции газа (см. рис. 6, кривая 3) не наблюдалось.

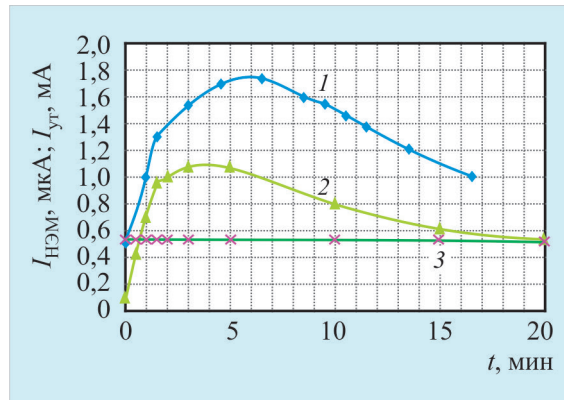


Рис. 6. Изменение десорбции газа и тока утечки от времени выдержки ЭВП при напряженности поля $E_{c-к} = 21,8$ кВ/мм (минус на сетке):
 1 – после первого включения; 2 – после 24 ч выдержки; 3 – ток утечки

Возникновение электрического пробоя на исследуемом вакуумном промежутке приводит к большему увеличению количества выделившегося газа (рис. 7), что доказывает взаимосвязь пробоев и критической величины выделяемого газа с поверхности электрода. Процесс возникновения пробоев связан с большим значением напряженности электрического поля при незначительных значениях полевой микродесорбции газов. Возможно, что микропробой формируются в порах и дефектах электрода (катода) за счет глубоко сорбированных газов в его поверхности [1, 3].

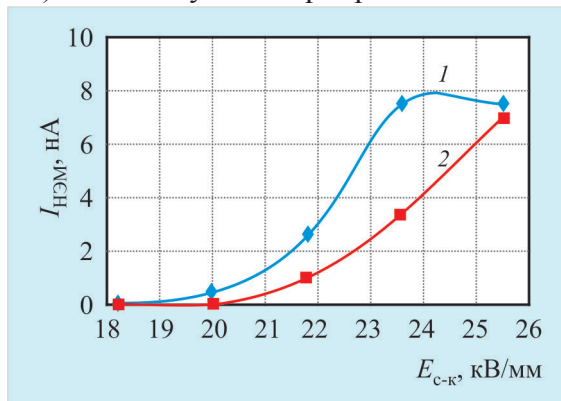


Рис. 7. Изменение десорбции газов от напряженности электрического поля вакуумного промежутка сетка-катод (минус на сетке):
 1 – до пробоя; 2 – после пробоя

Исследование частоты пробоев в единицу времени (в минуту) на вакуумном промежутке ясно показывает (рис. 8), что пробой и полевая десорбция газа возникают при критической напряженности электрического поля $E_{c-к} = 18$ кВ/мм (минус на сетке), при этом необходимым условием возникновения пробоев является давление газа в вакуумном объеме ЭВП выше $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Это условие можно использовать во время высоковольтной тренировки в статическом режиме с целью уменьшения автоэмиссионной составляющей токов утечки вакуумных промежутков [17].

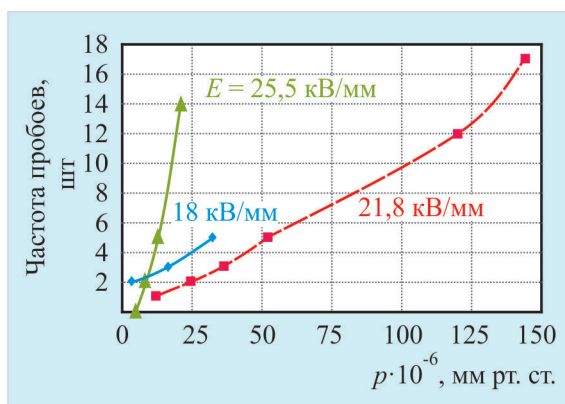


Рис. 8. Зависимости частоты пробоев от давления газа в вакуумном объеме ЭВП при различных значениях напряженности электрического поля (минус на сетке)

3. ВЫВОДЫ

1. Возникновению электрических пробоев между электродами вакуумного объема ЭВП предшествует микро- или макродесорбция газа под действием электрического поля, превышающего критическую величину. На критическую величину напряженности электрического поля, при которой возникают пробои, могут влиять следующие факторы: степень обезгаживания поверхности электродов; площадь поверхности электродов; способность материалов электродов сорбировать газы; микрогеометрия поверхности (поры, дефекты, острия и др.); давление газа в ЭВП.

2. Минимальная напряженность электрического поля на одном из ЭВП, при которой наблюдалась полевая десорбция газа, составляет $E_{c-a} = 5,9$ кВ/мм (минус на сетке) для промежутков более 1 мм.

3. Продолжительность возникшей полевой десорбция газа зависит от критического значения напряженности электрического поля и газосодержания поверхностей электродов ЭВП и является индивидуальной особенностью каждой конкретной конструкции прибора.

4. Миграция газа в вакуумном объеме тренированного ЭВП и повышенное давление газа в этом объеме приводят к росту вероятности возникновения пробоев.

5. Для снижения вероятности возникновения пробоев необходимо:

- снижать давление газа вакуумного объема откачиваемого ЭВП, что снизит количество сорбированных электродами ЭВП газов;

- снижать действие обратного потока газов в процессе откачки;

- снижать давление газа вакуумного объема отпаянного ЭВП, сокращая воздействие сорбированных газов обратного потока после предшествующих процессов откачки и обезгаживания;

- следует ввести новые индивидуальные критерии ввода в рабочий режим эксплуатации конкретного вида ЭВП после длительного хранения, с учетом явлений переноса и сорбции газов на поверхности электродов.

6. При исследовании полевой десорбции газов необходимо отделять ее от десорбции газов электронным или ионным потоком и разогрева изолятора исследуемого промежутка между электродами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Татарина, Н. В.** Вакуумная электроизоляция (обзор) / Н. В. Татарина // Вакуумная техника и технология. – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 3 – 28.
2. **Черепнин, Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1973.
3. **Татарина, Н. В.** Влияние процессов в порах поверхностей электродов на вакуумную электроизоляцию: дис. на соиск. уч. ст. д.ф.-м.н. / Н. В. Татарина – М.: МИФИ, 1998.
4. **Латам, Р.** Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Перевод с англ. Р. Латам. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
5. **Сливков, И. Н.** Электрический пробой и разряд в вакууме // И. Н. Сливков, В. И. Михайлов, Н. И. Сидоров, А. И. Настюха. – М.: Атомиздат, 1966.
6. **Корепин, Г. Ф.** Термовакuumная обработка электронной пушки и вероятность электрических пробоев высоковольтных ЭВП / Г. Ф. Корепин // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т.17, № 2. – С.123 – 130.
7. **Татарина, Н. В.** Эрозионно-эмиссионные процессы, индуцированные плазмой в микропорах поверхности / Н. В. Татарина, Н. Е. Новиков, В. С. Соколов, Н. В. Волков, В. Л. Воробьев // Известия РАН. Сер. физическая. – 1992. – Т.16, № 7. – С. 65 – 66.
8. **Чистяков, П. Н.** Пробой вакуума при контролируемом состоянии поверхностей электродов / П. Н. Чистяков, А. Л. Радиановский, Н. В. Татарина, Н. Е. Новиков, Д. С. Трещикова // Журнал технической физики. – 1972. – Т. XL11, № 4. – С. 821 – 825.
9. **Корепин, Г. Ф.** Определение источника газовой выделения в процессе высоковольтной тренировки ЭВП / Г. Ф. Корепин, В. И. Пугнин, А. Н. Юнаков // Наукоемкие технологии – 2005. – Т. 6, № 5. – С. 47 – 50.
10. **Корепин, Г. Ф.** Поверхностное газосодержание отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т.17, № 4. – С. 285 – 292.
11. **Корепин, Г. Ф.** Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин, А. Н. Юнаков // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 71 – 76.
12. **Новоселец, В. И.** О вакуумных пробоях в многолучевых мощных пролетных клистродах на высшем и основном виде колебаний / В. И. Новоселец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2008. – № 2. – С. 53 – 61.
13. **Корепин, Г. Ф.** Исследование газосодержания электровакуумных приборов СВЧ среднего и высокого уровня мощности с целью снижения остаточных газов и сохранения вакуума в отпаянных приборах: дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. / Г. Ф. Корепин. – Фрязино, 2012.
14. **Розанов, Л. Н.** Десорбционное газовыделение конструкционных вакуумных материалов / Л. Н. Розанов // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21, № 2. – С.143 – 150.
15. **Розанов, Л. Н.** Десорбционное газовыделение вакуумных систем / Л. Н. Розанов // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т.14, № 2. – С. 205 – 211.
16. **Водяницкий, В. И.** Предварительная высоковольтная тренировка ЭВП СВЧ среднего уровня выходной мощности / В. И. Водяницкий, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова, Н. И. Суходолова, А. А. Стефаненко // Тезисы докладов Всероссийского семинара «Вакуумная техника и технология-2002». – Санкт-Петербург. – 2002. – С.14 – 15.
17. **Заявка 2017107384 РФ.** – Приоритет 6.03.2017.

Статья поступила 18 мая 2017 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.317.765.8

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСХЕМ В КАЧЕСТВЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ШУМОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Б. Е. Кяргинский

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

Представлены экспериментальные данные о генерации шумоподобных широкополосных сигналов с помощью микросхем, работающих в СВЧ-диапазоне.

КС: частота, мощность, напряжение, ток, сигнал

INVESTIGATION OF MICROCIRCUITS AS BROADBAND NOISE GENERATORS

B. E. Kyarginsky

FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS

Experimental data on generation of noise-like broadband signals using microcircuits operating in microwave range are presented.

Keywords: frequency, power, voltage, current, signal

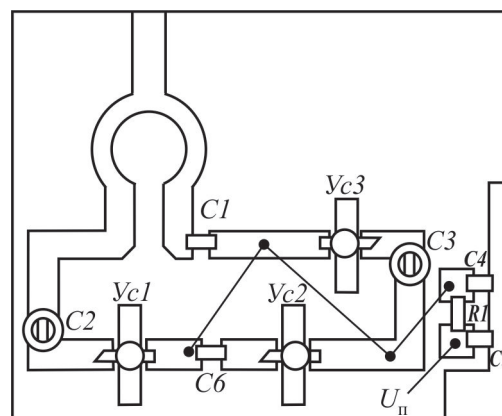
Исследования генераторов проводились давно. В области сверхвысоких частот они проводились на основе ламп бегущей волны, генераторов с обратной волной, клистронов, магнетронов. В твердотельной электронике исследовались генераторы на основе транзисторов, диодов. Для формирования шумоподобных колебаний применялись транзисторные усилители, которые соединялись цепочкой в кольцо [1...3].

Применяемые интегральные микросхемы работают в широком диапазоне СВЧ-сигналов. Для своей работы они требуют хорошего согласования и обычно работают при волновом сопротивлении 50 Ом. При ухудшении согласования на выходе появляются паразитные колебания, которые при подаче внешнего сигнала иногда исчезают, а иногда присутствуют наряду с усиливаемым сигналом. Если соединить последовательно несколько таких усилителей, замкнуть их в обратную связь и при этом в определенных местах расположить возмущающие элементы, например переменные емкости, изменяющие согласование в цепях, то возникнет генерация сигналов. Сначала будет многочастотная генерация, при перестройке переменных емкостей и подстройке питающего напряжения она перейдет в широкополосный шумоподобный режим.

Схема генератора состояла из трех интегральных усилителей типа MSA-0986 (рис. 1), включенных в микрополосковую линию (материал – ФАФ, толщина – 1 мм, диэлектрическая

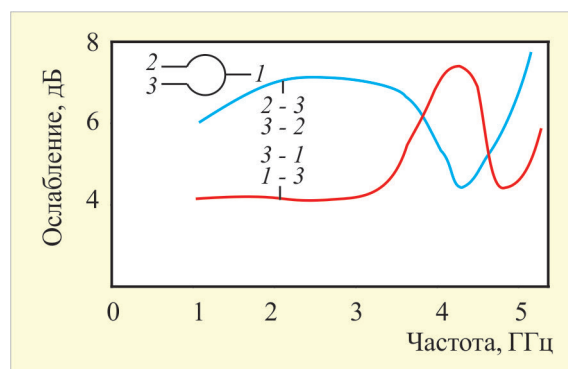
проницаемость – 2,8). Обратная связь осуществлялась через кольцевой сумматор, рассчитанный на центральную частоту 4 ГГц. С сумматора сигнал, ослабленный на 6 дБ, поступает на входной усилитель U_{c1} через переменную емкость $C2$ типа TZCO3 величиной 2...6 пФ. Такая же переменная емкость $C3$ поставлена между вторым U_{c2} и третьим U_{c3} усилителями. Две постоянные емкости по 50 пФ, $C1$ и $C6$, типа К10-9 разделяют усилители U_{c1} и U_{c2} и выход усилителя U_{c3} с кольцевым сумматором. Напряжение питания усилителей, равное 7,3 В при токе 0,1 А, подавалось через сопротивление $R1$ величиной 5 Ом, блокированное емкостями $C4$ и $C5$ величиной 0,01 мкФ.

Рис. 1. Схема генератора на микросхемах



На рис. 2 приведена зависимость ослабления от частоты сигнала для кольцевого сумматора, рассчитанного на частоту 2,1 ГГц. В схеме на рис. 1 применялись сумматоры, рассчитанные на частоты от 1 до 6 ГГц. Наименьшую изрезанность шумоподобного широкополосного сигнала удалось получить при сумматоре, рассчитанном на 4 ГГц [4, 5].

Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика кольцевого сумматора



Зависимость спектральной плотности широкополосного шумоподобного сигнала от частоты при выходной мощности 8,4 мВт показана на рис. 3. При напряжении питания 7,8 В и токе 0,035 А была измерена АЧХ одного усилителя (MSA-0986) на панорамном измерителе P2-78 (рис. 4), она спадает от 6 дБ на частоте 1 ГГц до 2 дБ на частоте 5 ГГц.

В случае применения в этой схеме интегральных усилителей типа SGA-6286 можно было наблюдать генерацию широкополосного шумоподобного сигнала мощностью 7 мВт при напряжении питания 3 В и токе 0,15 А (рис. 5). Измеренная амплитудно-частотная характеристика одного из усилителей типа SGA-6286 дана на рис. 6, а; зависимость выходной мощности усилителя от входной мощности для различных частот сигналов показана на рис. 6, б. Из приведенных графиков видно, что в схеме (см. рис. 1) усилители работают в нелинейном режиме.

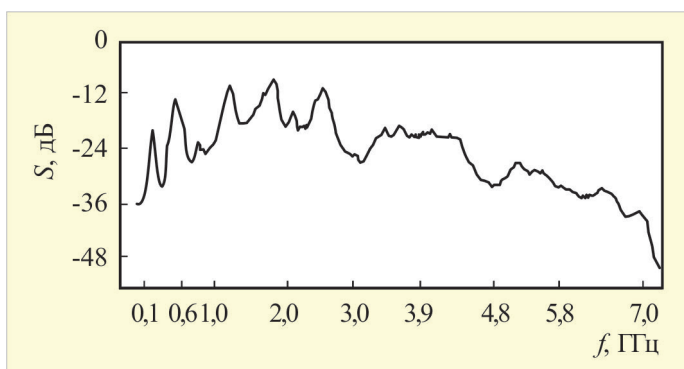


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности сигнала от частоты при генерации с микросхемами MSA-0986

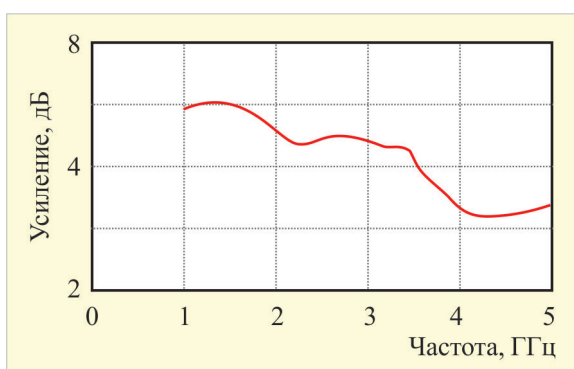


Рис. 4. Зависимость усиления от частоты для микросхемы MSA-0986

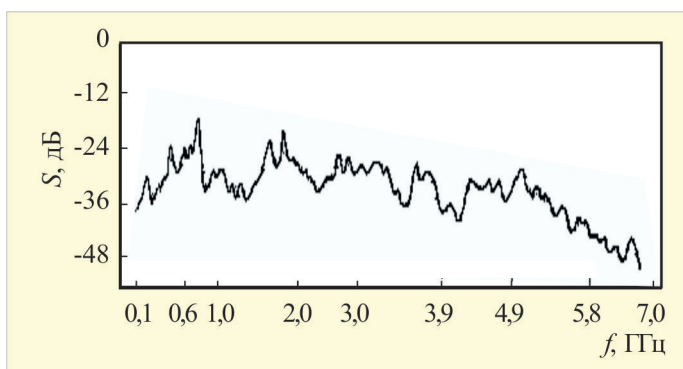


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности сигнала от частоты с микросхемами SGA-6286

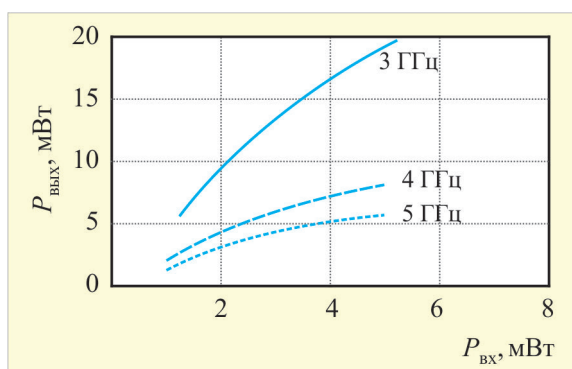
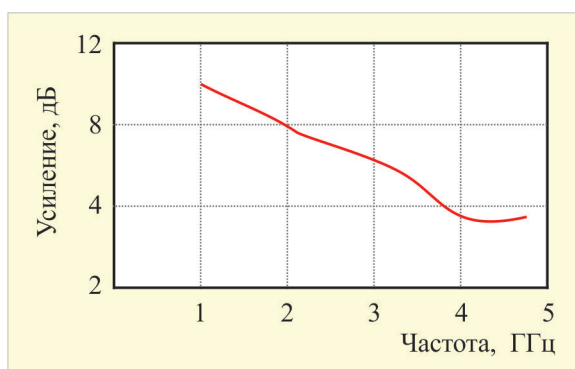


Рис. 6. Зависимость усиления от частоты (а), а также выходной мощности от входной на различных частотах (б) для микросхемы SGA-6286

Если применить в данной схеме интегральные усилители типа MSA-2743, то генерируется широкополосный шумоподобный сигнал мощностью 9,4 мВт при напряжении питания 3,48 В и токе 0,15 А (рис. 7). Измеренная амплитудно-частотная характеристика усилителя MSA-2743 показана на рис. 8, усиление сигнала с 14 дБ на частоте 1 ГГц опускается до 9 дБ на частоте 5 ГГц. Здесь же дана зависимость выходной мощности от входной для нескольких частот, при этом на схему подавалось питание 4 В при токе 0,05 А.

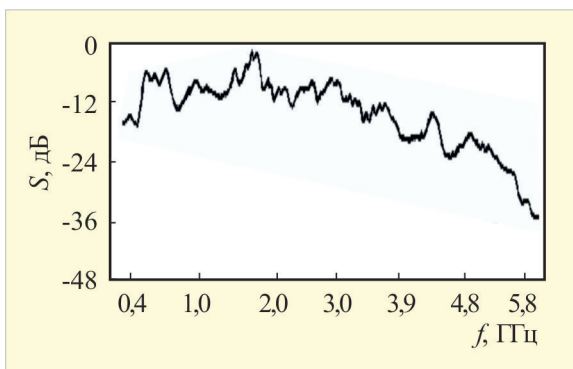


Рис. 7. Зависимость спектральной плотности сигнала от частоты с микросхемами MSA-2743

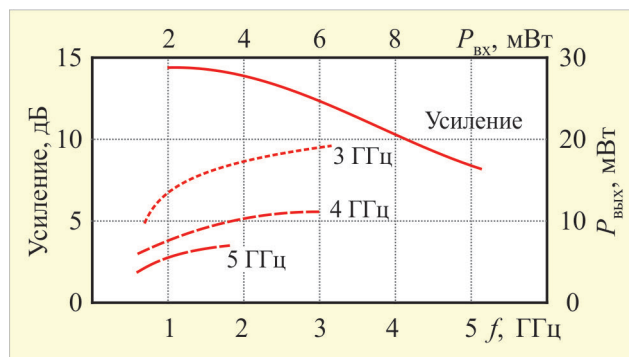
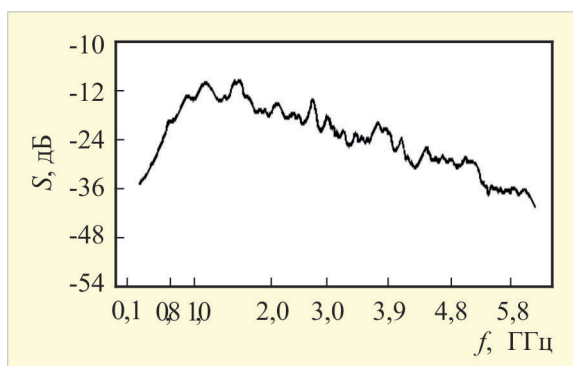
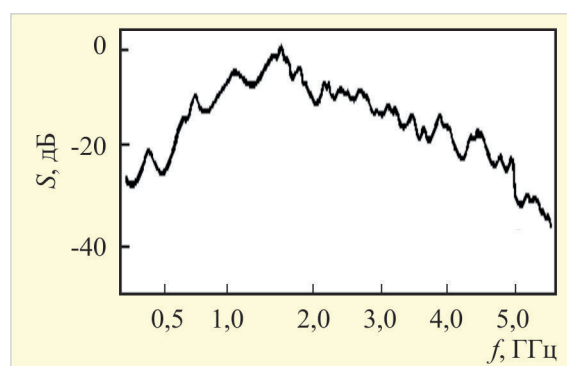


Рис. 8. Зависимость усиления от частоты и выходной мощности от входной для микросхемы MSA-2743

Использование интегральных усилителей типа ADA-4743 также позволяет получить широкополосный шумоподобный сигнал мощностью 21,8 мВт при напряжении питания 3,44 В и токе 0,16 А (рис. 9, а). В этом случае для увеличения выходной мощности после сумматора на выходе поставлен еще один усилитель типа ADA-4743. Приведенная амплитудно-частотная характеристика для одного из усилителей типа ADA-4743 (рис. 10, а) и зависимости выходной мощности от входной при различных частотах (рис. 10, б) позволяют сказать, что и здесь усилители в схеме работают в нелинейном режиме. Напряжение питания при измерении характеристик составляло 3,8 В при токе 0,03 А.



а)



б)

Рис. 9. Зависимость спектральной плотности сигнала от частоты с микросхемами ADA-4743 (а) и ADA-4543 (б)

Если в схеме применить микросхемы типа ADA-4543, имеющие меньшие токи потребления и соответственно меньшие выходные мощности, чем микросхемы типа ADA-4743, то можно

получить на выходе шумоподобный широкополосный сигнал мощностью 4,7 мВт при питающем напряжении 2,66 В и токе 0,12 А (рис. 9, б). Исследования показали, что с помощью таких микросхем можно получать широкополосные шумовые сигналы, причем чем выше по частотам работает микросхема, тем выше по частотам генерируется шумовой сигнал.

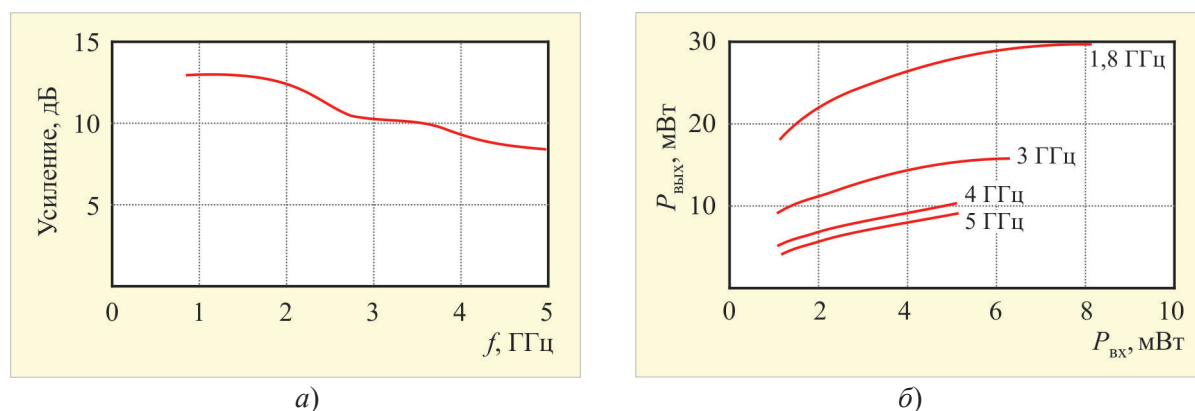


Рис. 10. Зависимость усиления от частоты (а), а также выходной мощности от входной на различных частотах (б) для микросхемы ADA-4743

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кальянов, Э. В.** Кольцевая многокаскадная автоколебательная система с хаотической динамикой / Э. В. Кальянов и др. // Радиотехника. – 2005. – № 3.
2. **Беляев, Р. В.** Бифуркация и хаос в системе связанных генераторов с запаздыванием и инерционностью / Р. В. Беляев и др. // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 6.
3. **Дмитриев, А. С.** Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах / Дмитриев А. С. и др. // Радиотехника. – 2000. – № 3.
4. **Фуско, В.** СВЧ-цепи / В. Фуско; пер. англ. – М.: Радио и связь, 1990.
5. **Ковалев, И. С.** Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И. С. Ковалева. – Изд. Связь, 1974.

Статья поступила 9 июня 2017 г.

ИСТОРИЯ

УДК 621.38(09)

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ РЕБРОВ – ДИРЕКТОР И ЧЕЛОВЕК

В этом году исполняется 10 лет, как с нами нет Сергея Ивановича Реброва, директора НПО «Исток», ныне АО «НПП «Исток» им. Шокина».

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

С. И. Ребров

Эти слова были сказаны С. И. Ребровым в канун его 70-летнего юбилея, в 1999 году... Более четверти века Сергей Иванович возглавлял одно из крупнейших в стране предприятий СВЧ-приборостроения – НПО «Исток». На предприятии тогда работало более 14 000 человек. Помимо управления предприятием он был и подлинным хозяином города Фрязино. Ведь почти все жилищное и коммунальное хозяйство в городе, в котором проживало более 40 000 человек, принадлежало градообразующему предприятию. И все эти годы на всех уровнях власти, науки и техники было неразделимо знаковое сочетание: Фрязино – «Исток» – Ребров. И то, что в декабре 2003 года Указом Президента Российской Федерации В.В. Путина городу Фрязино был присвоен статус Наукограда России – это тоже огромная заслуга Сергея Ивановича Реброва, сыгравшего тогда вместе с генеральным директором ФГУП «НПП «Исток» А. Н. Королевым и главой города В. В. Ухалкиным главную роль в реализации этого проекта.

С. И. Ребров родился 9 февраля 1929 года в городе Твери в семье крупного советского и хозяйственного руководителя. В 1938 году отца Сергея Ивановича назначают заместителем Председателя Совета Министров Киргизской ССР и семья переезжает в город Фрунзе. Здесь Сергей Ребров с золотой медалью оканчивает среднюю школу и приезжает в Москву для продолжения учебы в Московском энергетическом институте. Шел первый год после окончания Великой Отечественной войны, самый тяжелый, пожалуй, послевоенный год для всей страны. Страна в развалинах, карточная система... Студенты недоедали, но желание учиться спасало от всех невзгод и лишений. На третьем курсе учебы в МЭИ Сергей Ребров устраивается работать на кафедру «Электронные приборы СВЧ» к доценту Игорю Всеволодовичу Лебедеву, под руководством которого позднее пишет и с блеском защищает дипломный проект.

В 1952 году молодой инженер С. И. Ребров с красным дипломом об окончании МЭИ по распределению приезжает во Фрязино и поступает на работу в НИИ-160, в лабораторию Давида Яковлевича Ашкенази, где занимается разработкой и исследованием газоразрядных

антенных СВЧ-переключателей для РЛС, в том числе и сверхмощной противоракетной РЛС Генерального конструктора Г. В. Кисунько, при помощи которой в 1962 году впервые в мире противоракетой была поражена боеголовка межконтинентальной баллистической ракеты. Пытливый и трудолюбивый инженер сразу же проявляет незаурядные способности исследователя и руководителя.



Сергей Иванович Ребров
(1929 – 2007)

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

Молодого, но уже проявившего себя с самой лучшей стороны начальника отдела, разрабатывающего газоразрядные антенные СВЧ-переключатели для защиты СВЧ-приемников РЛС от проникновения мощных импульсов передатчика, директор предприятия М. М. Федоров часто берет с собой на важные совещания в Министерство и на заседания Комиссии Президиума Совета Министров СССР по военно-промышленным вопросам, где Сергей Иванович выступает с докладами перед руководителями министерств и крупными военачальниками.

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

Приказом председателя Государственного комитета СССР по электронной технике А. И. Шокина 1 января 1962 года С. И. Ребров назначается на должность директора предприятия п/я 17, ныне АО «НПП «Исток» им. Шокина». В то время ему еще не исполнилось и 33 года. В «Экономической газете» появляется статья «Самый молодой директор отрасли». Это о Сергее Ивановиче Реброве, шестом директоре предприятия. Не все удается молодому директору сразу, но он с головой погружается в проблемы вверенного ему коллектива.

В сжатые сроки, ознакомившись с обстановкой на предприятии, он принимает решение – в первую очередь провести реорганизацию опытного завода с целью создания надежной базы для масштабного выпуска различных изделий СВЧ электронной техники. В этой работе огромную помощь ему оказали директора опытного завода Овчинников Алексей Иванович, Маклаков Александр Александрович, Панас Иван Михайлович; главные инженеры завода Астафьев Александр Яковлевич, Панкин Гелий Федорович, Покровский Евгений Николаевич; руководители службы качества Кауфман Юрий Моисеевич, Полухин Тихон Никитович, Бердинев Виктор Федорович, Авдиенко Григорий Григорьевич; главные технологи завода Гапонов Степан Ионович, Окшин Владимир Васильевич, Куликов Владимир Иванович; начальники цехов Эфрос Владимир Яковлевич, Белокопытов Алексей Арсентьевич, Решетина Любовь Моисеевна. Тесные комнатушки цехов реконструируются и превращаются в просторные, светлые и чистые помещения, в соответствии с требованиями вакуумной гигиены. Одновременно начинается внедрение на опытном заводе комплексной системы контроля качества производства изделий, заметно повышается технологическая дисциплина, снижается процент брака.

Фундаментальная комплексная работа «Операция», проведенная под руководством С. И. Реброва с целью повышения качества выпускаемых приборов на всех этапах разработки и производства, привела к существенному улучшению показателей надежности. Так, количество отказов и рекламаций уменьшилось по некоторым изделиям в десять раз, обеспечив безотказную эксплуатацию систем радиоэлектронного вооружения, в которые входили СВЧ-приборы, выпускаемые на предприятии.

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

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

При реализации своих планов Сергей Иванович всегда опирался на опыт, знания, авторитет и поддержку членов своей команды – заместителя по научной работе Николая Дмитриевича Девяткова, главных инженеров Ивана Ивановича Девяткина, Юрия Петровича Уточкина и Виталия Николаевича Батыгина, директоров опытного завода Александра Александровича Маклакова и Ивана Михайловича Панаса, заместителя генерального директора Константина Алексеевича Амосова и начальников тематического отдела Юрия Альфредовича Вецгайлуса и отдела научно-технической информации Василия Борисовича Степанищева и Исаия Самойловича Фельдблюма.

На предприятии были созданы новые организационные формы коллективного научного руководства: секция программного тематического планирования и отраслевой семинар Главных конструкторов.

Сквозь прошедшие десятилетия видно, что эти нововведения С.И. Реброва были абсолютно

верны и способствовали тому, что к концу 80-х годов НПО «Исток» стал одним из лучших предприятий СВЧ-приборостроения не только в стране, но и во всем мире.

Главным в научной деятельности предприятия в эти годы был последовательный переход от разработки электровакуумных приборов СВЧ к созданию твердотельных СВЧ-приборов и модулей в виде гибридно-интегральных схем (ГИС) на полупроводниковых приборах. Надежными помощниками Сергея Ивановича в этом революционном повороте стали начальники отделов Виктор Иванович Гуртовой, Сергей Александрович Перегонов, Анатолий Гаврилович Михальченков, Александр Семенович Тагер, Георгий Александрович Крысов, Клара Георгиевна Ноздрин и многие другие. Знаменательно, что при этом масштабном переходе предприятие не только сохранило кадры, но и избежало серьезных конфликтных ситуаций.

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

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

А произошло это при следующих обстоятельствах.

Для самолета МиГ-23МЛ в 70-е годы в НПО «Фазотрон» Минрадиопрома была разработана новая бортовая РЛС «Сапфир», в СВЧ-передатчике которой впервые использовалась трехкаскадная цепочка на клистронах. Для решения основной задачи, стоящей перед разработчиками РЛС, – обнаружение подвижной цели на фоне земной поверхности, применяя принцип селекции движущихся целей, – требовалась стабильность частоты от импульса к импульсу в сотни герц, что принципиально было невозможно получить, используя традиционные магнетронные автогенераторы. Решив задачу обнаружения цели на фоне земли, используя высокостабильные СВЧ-генераторы на клистронах, разработчики РЛС не учли взаимных радиопомех при атаке звена истребителей, с работающими на одной частоте РЛС. Главный конструктор РЛС был освобожден от должности, но сразу возник вопрос, как быть с перспективным истребителем, разработка которого уже стоила стране многих сотен миллионов рублей?

Главком ВВС, Главный маршал авиации Павел Степанович Кутахов и министр радиопромышленности СССР Валерий Дмитриевич Калмыков собрали экстренное совещание по дальнейшей

судьбе радиоэлектронного вооружения новейшего истребителя МиГ-23МЛ, на которое был приглашен и директор НПО «Исток» С. И. Ребров. Сергей Иванович уже был знаком с этой проблемой и совместно с выдающимся разработчиком клистронов Станиславом Васильевичем Королевым разработал план, который и изложил на совещании.

Было предложено разработать в НПО «Исток» моноблок СВЧ-передатчика для бортовой РЛС в виде комплексированного многочастотного СВЧ-устройства, состоящего из трех клистронов и необходимых волноводных соединений. Выступив на совещании с этой, еще не опробованной идеей, С. И. Ребров взял на себя не только разработку СВЧ-передатчика, но и часть работы, традиционно выполняемой предприятиями Минрадиопрома. При этом всю ответственность за достижение требуемых параметров СВЧ-передатчика и всей РЛС в целом он также возложил на себя. Тут же было оформлено решение о создании двухчастотного СВЧ-передатчика для РЛС самолета МиГ-23МЛ. Так родился моноблок «Альтернатива», ставший первым отечественным комплексированным СВЧ-устройством, при разработке которого теперь уже радисты стали изготовителями и поставщиками электронных компонентов для НПО «Исток». В кратчайшие сроки был создан четырехчастотный СВЧ-приемопередатчик, решивший судьбу истребителя МиГ-23МЛ. Предложенная миниатюризация СВЧ-передатчика позволила разместить в отсеке БРЛС, при тех же массогабаритных характеристиках РЛПК, два моноблока «Альтернатива» и полностью удовлетворить всем тактико-техническим требованиям. Серийные поставки были начаты в 1975 году, и было выпущено более 5000 моноблоков. Пожалуй, впервые в истории разработок бортовых РЛС кардинальное техническое решение полностью было реализовано усилиями высококвалифицированных специалистов НПО «Исток», среди которых следует назвать Александра Сергеевича Победоносцева, Юрия Петровича Мякинкова, Ларису Анатольевну Парышкуро, Михаила Борисовича Голанта, Виктора Исидоровича Новосельца и многих других. Огромный комплекс работ был выполнен в срок и в полном объеме. Впервые на предприятии Минэлектронпрома была выполнена работа по модернизации сложнейшей системы бортового авиационного радиоэлектронного вооружения. Решение по созданию комплексированных устройств для авиационных средств радиоэлектронного вооружения было настолько удачным, что все дальнейшие разработки пошли по этому пути. Результаты этой уникальной работы, нашедшей самое широкое практическое применение на многих предприятиях отрасли, легли в основу докторской диссертации С. И. Реброва.

Моноблок «Альтернатива»



В дальнейшем под руководством С. И. Реброва был проведен целый ряд уникальных работ по созданию СВЧ-приборов и комплексированных устройств для БРЛС "Шмель" самолета дальнего радиолокационного обнаружения А-50, зенитно-ракетных систем С-300П (главный конструктор Б. В. Бункин), С-300В (главный конструктор В. П. Ефремов) и других. Эти системы и сейчас остаются лучшими в мире.

Следующим этапом по созданию комплексированных устройств в конце 70-х годов стала работа над СВЧ-передатчиком радиолокационного прицельного комплекса «Заслон» для истребителя-перехватчика МиГ-31. Работой руководил Владимир Гаврилович Кармазин. «По моноблоку «Заслон», – как говорил С. И. Ребров, – мы буквально выворачивали «радистов» наизнанку, заставляя их работать с полной отдачей. Работа была выполнена совместно с НИИП им. В. В. Тихомирова в установленные сроки, система «Заслон» была принята на вооружение и высоко оценена специалистами, как лучший в мире радиолокационный прицельный комплекс для истребителей-перехватчиков, позволяющий одновременно поражать четыре цели ракетами класса «воздух-воздух» с полуактивным наведением. Всего было выпущено более 1500 комплектов моноблоков».

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

В конце 70-х годов, учитывая нарастающее отставание СССР в области радиоэлектронного вооружения для истребительной авиации, министр электронной промышленности СССР А. И. Шокин на совещании по обсуждению путей построения нового поколения систем авиационного радиоэлектронного вооружения выслушал представителей целого ряда предприятий и принял решение поручить это направление работ «предприятию Реброва», как наиболее подготовленному в научно-технической и технологической части. Александр Иванович часто бывал во Фрязино и знал НПО «Исток» не понаслышке.



С. И. Ребров и А. И. Шокин

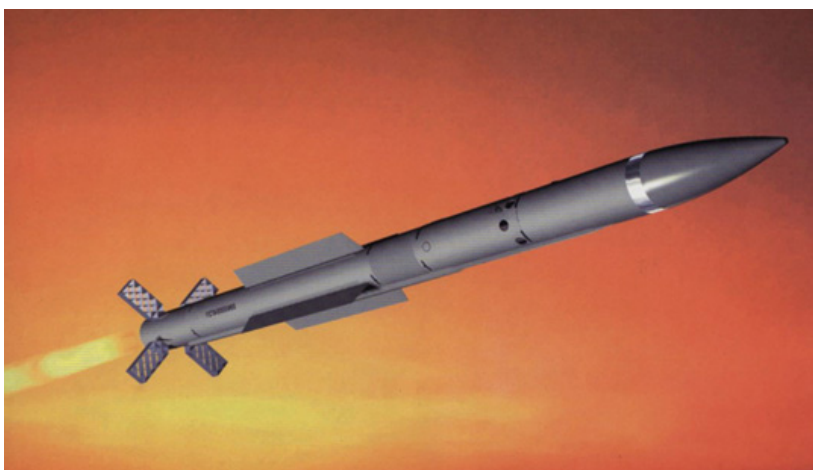
Так в 1980 году родилось известное распоряжение Комиссии Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам о постановке НИЭР «Союз – Синтез», где головная роль по созданию экспериментального образца БРЛС для истребителя и активной радиолокационной головки самонаведения для ракет класса «воздух-воздух» среднего радиуса действия была поручена НПО «Исток».

На предприятии сразу же определилась группа единомышленников в лице Владимира Никитича Русакова, Александра Николаевича Королева, Сергея Алексеевича Зайцева, Александра Васильевича Потапова, Михаила Ивановича Лопина, Виктора Ивановича Гуртового, Михаила Филипповича Воскобойника и других крупных ученых и руководителей подразделений, которые поддержали С. И. Реброва в столь крутом развороте в тематике предприятия.

Выполняя НИЭР «Союз – Синтез», специалисты НПО «Исток» проявили уникальную способность, не жалея сил и времени, работать в совершенно новом для них направлении. Сейчас можно только удивляться глубокой интуиции и прозорливости Сергея Ивановича. Впервые в СССР под его руководством и совместно со многими предприятиями страны был создан экспериментальный образец БРЛС и осуществлена программируемая цифровая обработка сигнала на основе отечественных быстродействующих процессоров, проведено картографирование земной поверхности с использованием щелевой антенны БРЛС с синтезированной апертурой в реальном масштабе времени. АРГС, разработанная в ходе выполнения этой работы, по своим параметрам не уступала лучшим зарубежным образцам. Высокая чувствительность АРГС обеспечивалась разработанными на предприятии малогабаритными многолучевыми клистродами и малолучевыми приемными устройствами.

Сформулированные С. И. Ребровым принципы создания сложных радиолокационных комплексов были использованы и позднее при построении СВЧ-части радиоэлектронных систем вооружения наземного и бортового базирования. Уникальные работы, выполненные на предприятии много лет назад, подтвержденные результатами полигонных испытаний, стали хорошим заделом для основных источников финансовых поступлений на предприятие в тяжелые 90-е годы при выполнении экспортных заказов на изделие 50Э.

Ракета класса «воздух-воздух» РВВ-АЕ, оснащённая активной радиолокационной головкой самонаведения 50Э, разработанной в ГНПП «Исток» на основании результатов, полученных в ходе выполнения НИЭР «Союз – Синтез», и модернизированной в 90-е годы с использованием современной ЭКБ, была принята на вооружение Российских ВВС.



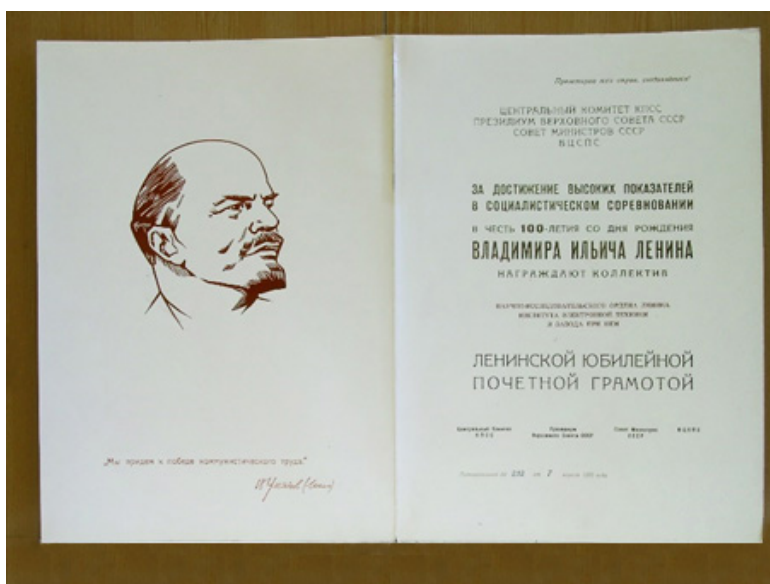
Ракета РВВ-АЕ с АРГС 50Э

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

Сергей Иванович Ребров руководил предприятием 26 лет, с 1962 по 1988 год, а с 1985 по 2007 год работал в должности генерального конструктора ФГУП «НПП «Исток». Предприятие в эти годы стало ведущим предприятием СВЧ-приборостроения в стране. За высокие производственные показатели и создание новой техники в 1966 году НИИ электронной техники с опытным заводом Указом Президиума Верховного Совета СССР был награжден орденом Ленина, в 1970 году – Ленинской юбилейной почетной грамотой, а в 1981 году за заслуги в создании средств специальной техники НПО «Исток» был награжден орденом Трудового Красного Знамени.



Вручение ордена Ленина НИИ электронной техники, 1966 г.



Ленинская юбилейная почетная грамота, 1970 г.

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



С. И. Ребров (четвертый слева во втором ряду)
среди лауреатов Ленинской и Государственной премий СССР

Здесь уместно отметить тот вклад, который был сделан во все новые направления и разработки учеными теоретического отдела предприятия под руководством заслуженного деятеля науки и техники, доктора технических наук Вилиора Павловича Сазонова и его первого помощника, руководителя САПР в области ЭВП СВЧ, доктора технических наук Александра Сергеевича Победоносцева, Владимира Сергеевича Лукошкова, Александра Семеновича Тагера, Роберта Андреевича Силина, Ивана Ивановича Голеницкого, Ильи Марковича Блейваса и др.

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

В начале 60-х годов на предприятии выпускалось всего пять типов электровакуумных СВЧ-приборов: магнетроны, отражательные и пролетные клистроны, ЛБВ и лампы обратной волны. К концу 80-х годов были разработаны совершенно новые классы и типы СВЧ-приборов и устройств. Так, были созданы несколько типов оригинальных ламп бегущей волны: малошумящие ЛБВ с ленточным пучком, «космические» ЛБВ с высокой долговечностью, мощные связные ЛБВ (В. И. Мнойн, Ю. П. Мякинков, О. А. Аристархова, Г. В. Рувинский, И. Е. Роговин, В. Ф. Афанасьев и др.); многолучевые приборы – клистроны и ЛБВ, а также ЛОВ, работающие на частотах до 1,4 ТГц (С. В. Королев, А. Д. Закурдаев, Е. В. Жарый, В. И. Пугнин, Б. В. Сазонов, С. С. Зырин, С. А. Зусмановский, М. И. Лопин, А. С. Победоносцев, А. А. Негирев, М. Б. Голант, И. И. Бродуленко и др.); оригинальные приборы на циклотронном резонансе – электростатические усилители и малошумящие усилители с циклотронными защитными устройствами для приемников РЛС зенитно-ракетных систем и комплексов С-300П, С-300В, «ТОР-М» и ЗРПК «Панцирь» (С. П. Кантюк, Ю. А. Будзинский и др.); комплексированные изделия СВЧ на основе электровакуумных приборов (С. В. Королев, В. Г. Кармазин, Э. А. Гельвич, С. С. Зырин, А. Д. Закурдаев и др.); была создана технология ГИС, принятая за основу во всей отрасли, разработан транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), предложены новые виды транзисторов и СВЧ-диодов (А. С. Тагер, С. А. Перегонов, Г. А. Крысов, А. М. Темнов, К. Г. Ноздрина, А. Г. Михальченков и др.); разработаны и освоены в серийном производстве газовые лазеры, нашедшие широкое применение в строительстве (возведение Останкинской телебашни, прокладка туннелей) и медицине (В. П. Беляев, Ю. В. Печенин, М. С. Доманов, В. С. Алейников, Е. Н. Покровский и др.); созданы атомно-лучевые трубки для квантовых стандартов частоты и времени в системе ГЛОНАСС (Я. А. Юхвидин, И. И. Самарцев, С. А. Плешанов и др.); разработаны специальные технологии, обеспечивающие высокое качество, надежность и воспроизводимость изделий, выпускаемых на предприятии: катодная и керамическая технологии, теххимия; разработаны ферриты и магниты (В. Н. Батыгин, И. П. Стародубов, Б. Ч. Дюбуа, Ю. А. Кондрашенков, Д. Г. Арапов, Н. Д. Урсуляк, Е. И. Каневский, Е. А. Котюргин, Н. В. Черепнин и др.); развито специальное машиностроение (Б. И. Ставицкий, К. В. Юрьев, Г. А. Горшков, А. М. Храпко, М. У. Муртазин, Р. А. Беляев, К. Н. Алмазов-Долженко, Р. А. Беляков и др.); медицинское применение СВЧ-электроники (Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, Т. Б. Реброва, В. П. Беляев, А. С. Дунаев, Н. С. Макеева и др.).

Следует отметить и еще одно важное направление работы, которое было поручено С. И. Реброву. Постановлением СМ СССР в 1985 году на предприятие были возложены функции головной организации по обеспечению единой технической политики при создании СВЧ-техники для систем радиоэлектронного вооружения, а генеральный директор Ребров С. И. был назначен

генеральным конструктором НПО «Исток». При НПО «Исток», как головном предприятии, в 1986 году был организован межведомственный Совет главных конструкторов (Совет ГК) по СВЧ-электронике, бессменным председателем которого был С. И. Ребров.

Деятельность Совета ГК была направлена на формирование научно-обоснованной технической политики, направленной на развитие СВЧ ЭКБ для перспективных радиоэлектронных систем вооружения, систем управления и радиоэлектронных комплексов, средств связи, телекоммуникационных и информационных систем, специальной радиоэлектронной аппаратуры.

Членами Совета ГК являлись: руководители предприятий – генеральные конструкторы приоритетных направлений СВЧ-электроники, главные конструкторы предприятий – заказчиков СВЧ-техники, крупные ученые в данной области науки и техники, представители Минобороны СССР.

Для обеспечения выполнения предприятием головных функций по СВЧ-электронике и работы Совета ГК по приказу МЭП СССР в ноябре 1986 года на предприятии был создан координационно-аналитический отдел. Начальником координационно-аналитического отдела был назначен В. В. Рожков при непосредственном подчинении С. И. Реброву. Генеральному директору – генеральному конструктору НПО «Исток» необходимо было обеспечить выполнение отраслевых функций по следующим направлениям:

- Определение перспективных направлений развития СВЧ-электроники и технического уровня каждого из них с использованием научно-технического потенциала предприятий МЭП СССР и институтов Академии наук СССР и Высшей школы.

- Исследование технического уровня планируемых и разрабатываемых ИЭТ и групп приборов СВЧ. Исследование структурных схем построения РЭА и комплексное обеспечение их необходимой ЭКБ СВЧ.

- Разработка с участием всех заинтересованных предприятий и организаций долгосрочных комплексно-целевых и аппаратурно-ориентированных программ по электронике СВЧ, прогнозов, заданий и годовых планов важнейших НИОКР по разработке приборов, оборудования и новых технологий применительно к задачам использования их в военной технике и в народном хозяйстве.

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

Все работы по прогнозированию, анализу и координации развития СВЧ-техники, как правило, проводились при непосредственном участии представителей 22 ЦНИИИ МО и заказывающих управлений Минобороны, а их результаты представлялись в МЭП, Комиссию Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам и в 16 Управление Минобороны.

Как правило, на рассмотрение Совета ГК направлялись важнейшие программы, согласованные с Комиссией Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам. За период работы Советом ГК, руководимым С. И. Ребровым, были рассмотрены более 80 структурных схем построения СВЧ-части важнейших радиоэлектронных систем вооружения и приняты решения или сформированы аппаратурно-ориентированные программы по созданию СВЧ-приборов для применения в перспективных радиоэлектронных системах вооружения с высокими тактико-техническими характеристиками.

После ликвидации союзных министерств и реформирования министерств Российской Федерации в 1998 году на предприятии начала действовать межведомственная секция «СВЧ-электроника» при НТС Российского Агентства по системам управления (РАСУ), которую

до 2007 года возглавлял генеральный конструктор ФГУП «НПП «Исток» С. И. Ребров. Приказом РАСУ в 2004 году на ФГУП «НПП «Исток» были возложены функции базового научного центра РАСУ по направлению «СВЧ-техника и технологии».

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

Отдельно следует остановиться на организации в 1974 году С. И. Ребровым по предложению авторитетных ученых и ведущих специалистов предприятия ежегодно проводимого научно-технического семинара-совещания по рассмотрению результатов научных достижений и перспектив дальнейшего развития всех основных направлений деятельности предприятия. Семинары традиционно проводились на островной базе отдыха «Электрон» в Московском море. Это обеспечивало режим конфиденциальности и возможность свободного обсуждения научных тем и общения участников. Эти научно-технические семинары-совещания ученых и ведущих специалистов предприятия позволяли сохранять и развивать сформировавшиеся «научные школы» в области радиоэлектроники СВЧ, проводить обсуждения с потенциальными потребителями перспектив развития ЭКБ СВЧ и современных требований к электрическим параметрам и свойствам приборов для применения в различной РЭА с целью обеспечения безопасности страны и потребностей народного хозяйства.

В последние годы на семинары приглашаются представители предприятий и организаций – потребителей нашей продукции. Свободный обмен мнениями позволяет оптимизировать процесс разработки новых СВЧ-приборов и устройств, ускоряет процесс согласования технических требований. В 2017 году прошел уже 42-й семинар-совещание. Дело, начатое Сергеем Ивановичем, живет!



С. И. Ребров (второй справа в первом ряду)
с участниками островного семинара-совещания, 2005 г.

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

За заслуги перед отечественной наукой и техникой С. И. Ребров был награжден тремя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, ему было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда, присуждены премия Министерства оборонной промышленности РФ, Ленинская и Государственная премии СССР. Его научная и педагогическая деятельность отмечены ученой степенью доктора технических наук и званием профессора. Сергей Иванович автор 2 монографий, около 200 научных трудов, 25 авторских свидетельств на изобретения.

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

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

При С.И. Реброве было создано 15 новых заводов по производству СВЧ-приборов, разработанных в НПО «Исток», по всему Советскому Союзу: в Рязани, Орджоникидзе, Калуге, Киеве, Полтаве и других городах. Два новых предприятия – НИИ «Циклон» и НИИ «Платан» – были созданы и во Фрязино. Все эти новые предприятия были укомплектованы кадрами, подготовленными в НПО «Исток». Свыше 200 высококвалифицированных специалистов было направлено на эти предприятия на руководящие должности.

В городе в эти годы на средства МЭП СССР были построены десятки жилых домов, две котельные, десять детских садов, две базы отдыха (на берегах Волги и Черного моря), профилакторий на берегу озера Большое, Дворец культуры на 800 мест, спорткомплекс со стадионом, реконструирован загородный пионерский лагерь. За каждым этим объектом масса крупных и мелких дел, в которые Сергей Иванович предпочитал вникать сам, рассматривая их с позиции рачительного хозяина.

На протяжении многих лет он являлся членом координационного совета Лиги содействия предприятиям оборонных отраслей промышленности России, возглавлял Совет директоров промышленных предприятий города, являлся уважаемым членом Администрации г. Фрязино, председателем НТС города, к его мнению всегда прислушивались, его богатый опыт широко используется руководителями города до сегодняшнего времени.

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

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

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

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



Бюст С. И. Реброва на Аллее Героев Социалистического труда

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

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

А. К. Балыко, Р. М. Попов, В. В. Рожков

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

Статья поступила 28 июня 2017 г.

УДК 378.4(09)

**ВЗАИМНО ОБОГАЩАЮЩИЙ СОЮЗ
НАУКИ, ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАЗОВАНИЯ**

Т. А. Кузнецова, К. И. Алмазов-Долженко

Филиал МИРЭА, г. Фрязино

**MUTUALLY ENRICHING UNION
OF SCIENCE, PRODUCTION AND EDUCATION**

T. A. Kuznetsova, K. I. Almazov-Dolzhenko

Branch of the Moscow Institute of Radioelectronics and Automation (MIREA), Fryazino

Пятидесятые – шестидесятые годы прошлого столетия ознаменовались в СССР бурным развитием науки и техники. Советский Союз выходит на передовые позиции научно-технического прогресса в ходе третьей научно-технической революции. СССР первым использует атомную энергию в мирных целях: в 1954 г. построена первая атомная электростанция, в 1959 г. – первый в мире атомный ледокол «Ленин». Создаются тяжелые ракеты для полетов в космос. 4 октября 1957 г. запущен первый искусственный спутник Земли. 12 апреля 1961 г. в космос вышел первый землянин – Юрий Алексеевич Гагарин, гражданин СССР. Все эти достижения были бы невозможны без решения важных научных и технических задач в области математики, электроники, радиотехники и автоматики.

В подмосковном городе Фрязино по постановлению Госкомитета по обороне № 3686сс от 4 июля 1943 года, подписанному И. В. Сталиным, на базе завода «Радиолампа», основанного еще в 1933 году, был создан Электровакуумный институт НИИ-160 (прародитель современного АО «НПП «Исток» им. Шокина»). Основной задачей, поставленной перед НИИ-160, было «...обеспечение новых разработок и серийного производства радиолокаторов современными электровакуумными изделиями».

Началось становление отечественной СВЧ электронной отрасли, развитие которой возглавил вновь созданный институт. Во времена СССР НПП «Исток» – головное предприятие страны в области СВЧ-электроники.

За выдающиеся успехи в развитии отечественной СВЧ-электроники и за создание новой техники коллектив предприятия был награжден в 1966 году орденом Ленина, а в 1981 году орденом Трудового Красного Знамени. Академик Н. Д. Девятков, рабочий В. И. Волк, начальник лаборатории Л. А. Парышкуро и генеральный директор предприятия С. И. Ребров были удостоены высокого звания Героя Социалистического Труда. Более 100 сотрудников предприятия стали лауреатами Сталинской, Ленинской и Государственных премий СССР и Российской Федерации, премий Правительства Российской Федерации. Свыше 1500 человек награждены орденами и медалями СССР и России. За прошедшие десятилетия на предприятии создана научная школа в области физики, математического моделирования и систем автоматизированного проектирования изделий СВЧ-техники. Достижения «Истока» в области катодной техники нашли признание на

всех предприятиях радиоэлектронной отрасли страны. Научной школе НПП «Исток» принадлежит мировой приоритет в создании ряда новых классов и типов электронных приборов СВЧ.

Можно долго перечислять имена известных учёных и инженеров, длительное время работавших на «Исток»: Герой Социалистического Труда академик Н. Д. Девятков; Герой Советского Союза А. Г. Дудкин; Герой Социалистического Труда доктор технических наук, лауреат Ленинской премии С. И. Ребров; разработчик отражательных клистронов, ЛОВ и аппаратуры КВЧ-терапии доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской и Государственных премий М. Б. Голант; доктор технических наук, профессор В. С. Лукошков; соавтор открытия (СССР) эффекта генерации в ЛПД доктор технических наук, профессор А. С. Тагер; автор изобретения отражательного клистрона кандидат технических наук В. Ф. Коваленко и многие, многие другие.

Однако для решения поставленных перед предприятием задач требовался приток новых научных и инженерных специалистов, хорошо знающих производство, готовых без адаптационного периода включиться в работу. С целью повышения качества подготовки инженерных кадров 30 декабря 1959 г. вышло постановление Совета Министров СССР № 1425 «Об организации заводов-втузов при наиболее крупных и передовых в техническом отношении промышленных предприятиях страны».

Одно из таких учебных заведений – «Завод-втуз Московского ордена Ленина энергетического института при НИИ электронной техники» при колоссальных усилиях директора НИИЭТ Сергея Ивановича Реброва был создан в г. Фрязино, согласно совместному приказу Государственного комитета по электронной технике и Минвуза РСФСР № 657/172 от 19.09.1962 года.

Первым ректором «Завода-втуза МЭИ» был назначен И. П. Бономорский, в дальнейшем много сил отдавший становлению системы высшего образования в г. Фрязино.

Первый набор студентов прошел в 1962 г. – было принято 75 человек с очной формой обучения по специальностям «Конструирование и производство радиоаппаратуры» (0705) и «Электронные приборы» (0611). В 1963 г. было принято 50 человек с очной формой обучения на те же специальности и 30 человек с вечерней формой обучения на специальность «Электронные приборы». Студентами первых наборов для обучения во втузе были сотрудники предприятия, имеющие большой практический опыт работы, но не обладающие достаточными теоретическими знаниями. Система обучения в заводе-втузе предполагала наряду с приобретением глубоких фундаментальных теоретических знаний существенную практику в различных подразделениях предприятия. Огромным преимуществом обучения в системе завод-втуз было наличие среди профессорско-преподавательского состава ведущих ученых и инженеров, работающих на предприятии, на самом передовом рубеже науки. Постоянная производственная практика (для студентов очной формы обучения в течение семестра половина учебного времени отводилось на работу в подразделениях предприятия), курсовые и дипломные работы, выполняемые в рамках НИОКР, проводимых на предприятии, были гарантией подготовки специалистов, которые органично вливались в производственные коллективы предприятия после защиты дипломного проекта.

С 1 июля 1972 года завод-втуз был преобразован. Студенты очной формы обучения перешли в МЭИ, студенты вечерней формы обучения – в состав филиала Московского института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА). На протяжении многих лет в основу деятельности МИРЭА был заложен инновационный принцип: базовый вуз – базовая кафедра – базовое предприятие, предполагающий в процессе обучения сочетание углубленной общена-

учной подготовки и подготовки по специальным дисциплинам непосредственно на будущих рабочих местах. Учебная практика и производственное обучение студентов и слушателей при такой организации учебного процесса проводятся в подразделениях базового предприятия, что позволяет знакомить обучающихся с современным оборудованием, реальными технологическими процессами и последними научными разработками. Вместе с тем базовое предприятие получает возможность в процессе обучения познакомиться со своим будущим работником и подобрать ему тот вид деятельности, который наиболее полно отвечает его желаниям и способностям.

Таким образом, перевод завода-втуза при «НПП «Исток» в ранг филиала МИРЭА в г. Фрязино был вполне естественным и обусловлен одинаковым видением процесса подготовки будущих инженеров. Вот уже 45 лет Филиал работает в тесном сотрудничестве с головным Московским технологическим университетом (МИРЭА). За эти годы наше образование и наш Университет, в частности, переживали разные времена: и безнадежные «девяностые», и тяжелые «нулевые» и обнадеживающие «десятые».

Но все годы существования сначала завода-втуза, а затем филиала МИРЭА руководство головного предприятия НПП «Исток» в лице генеральных директоров С. И. Реброва, А. Н. Королева, А. А. Борисова постоянно помогало и поддерживало коллектив преподавателей и сотрудников.

В 2014 году филиал МИРЭА в г. Фрязино стал победителем проекта по подготовке кадров для оборонно-промышленного комплекса Московского региона.

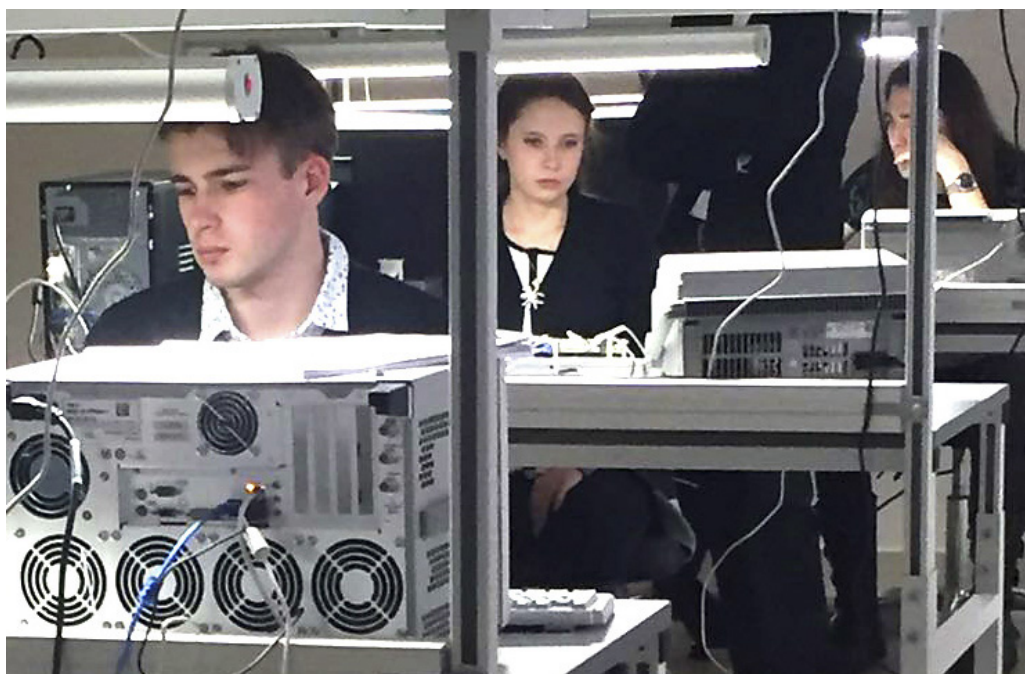
В рамках настоящего проекта по инфраструктурному обеспечению в 2015 году был создан Учебно-научный комплекс «Конструирование и производство электронных средств», в состав которого вошли 5 лабораторий, оснащенных современным измерительным оборудованием и специализированным программным обеспечением. Созданный учебно-научный комплекс позволяет охватить полный цикл обработки информации о современных радиоэлектронных и микроволновых системах и изучать, исследовать, проектировать самые сложные радиотехнические и СВЧ-системы.

Лаборатории предназначены для выполнения не только учебных лабораторных работ, но и студенческих исследовательских НИР и хозяйственных ОКР по заказам предприятий радиоэлектронной промышленности.

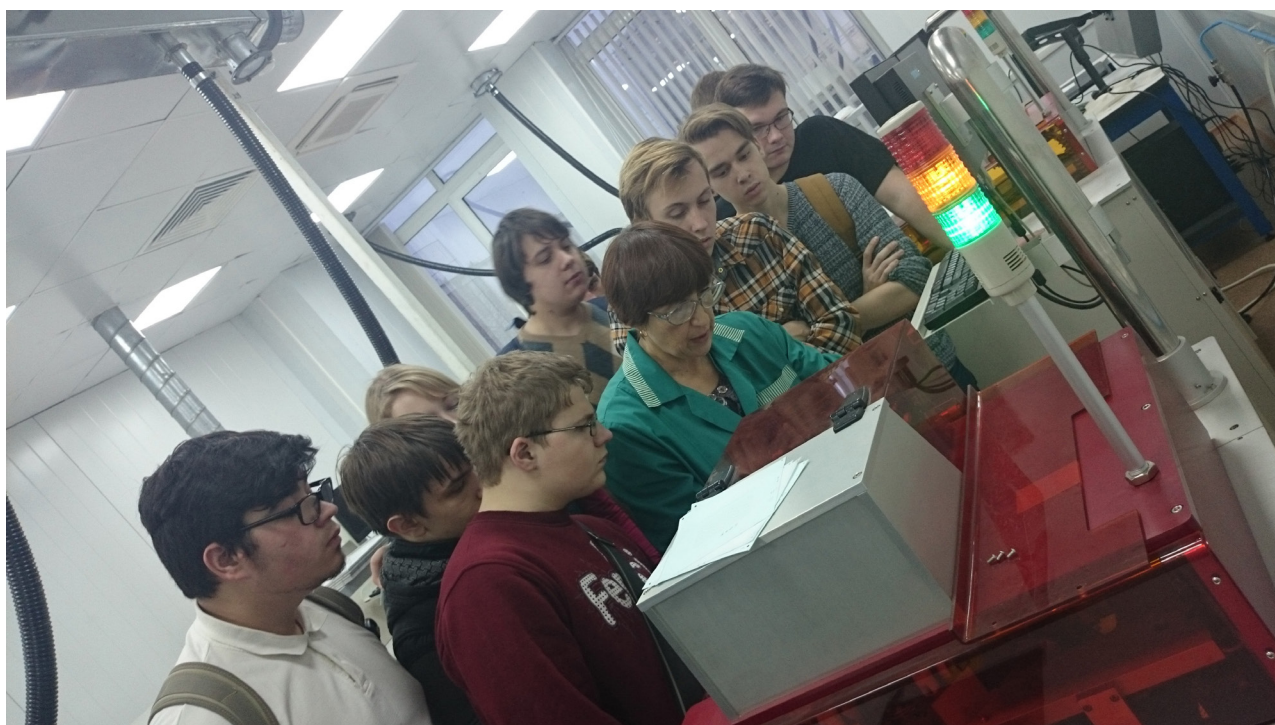
Лаборатории филиала МИРЭА соответствуют основным направлениям технологий, применяемых при обработке сигнала в современных СВЧ-устройствах. Они представляют собой элементы единой технологической цепочки, существующей при реальных разработках и производстве. В процессе выполнения лабораторных, курсовых и дипломных работ студенты смогут проектировать СВЧ-устройства, аналоговые низкочастотные устройства и цифровые схемы, конструировать для них печатные платы, изготовить и протестировать их, а затем внедрить в реальное производство базового предприятия.

При планировании состава лабораторий предполагались высокий уровень автоматизации и компьютеризации при проведении проектирования и измерений, сопряженность оборудования с имеющимся оборудованием на АО «НПП «Исток» им. Шокина» для дальнейшей работы выпускников в научно-производственных подразделениях предприятия, было закуплено новейшее лицензионное программное обеспечение для данного оборудования.

Комплектность лабораторий позволит в будущем увеличивать как число рабочих мест в них, так и номенклатуру выполняемых работ в соответствии с возрастающими требованиями подготовки специалистов.



Студенты в одной из лабораторий



Практический семинар для студентов филиала

Создание современного образовательного центра на базе филиала МИРЭА в г. Фрязино позволяет достигать нового уровня в подготовке кадров в областях радиотехники, электроники, приборостроения, а также в разработке новых технологий и их эффективном внедрении

Неоценимый вклад в обучение студентов вносит базовое предприятие Филиала, обеспечивая учебный процесс высококвалифицированными научно-педагогическими кадрами. Лучшие специалисты АО «НПП «Исток» им. Шокина» не только читают лекции и проводят лабораторные занятия, но в процессе учебных и производственных практик ближе знакомятся со студентами и в процессе индивидуальной работы приобщают наиболее способных студентов к научной и исследовательской работе. Эти студенты участвуют в ежегодных научных конференциях молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина» и в научно-технических конференциях МИРЭА. В 2015 году студенты филиала МИРЭА в г. Фрязино в составе делегации АО «НПП «Исток» им. Шокина» приняли участие в салоне МАКС-2015, продемонстрировав систему реалистического управления самолетом в 3D-формате и сложный алгоритм машинного зрения. Неоднократно генеральный директор АО «НПП «Исток» им. Шокина» А. А. Борисов организовывал стажировки преподавателей и студентов филиала для обучения работе на новом лабораторном оборудовании.

Регулярно АО «НПП «Исток» им. Шокина» и Московский технологический университет (МИРЭА) при поддержке холдинговой компании АО «Росэлектроника» во дворце культуры «Исток» наукограда Фрязино проводят встречи с учениками старших классов школ с целью их профориентации. Холл во дворце культуры превращается в выставочный зал, где представлены материалы и видеопрезентации АО «НПП «Исток им. Шокина», АО «Росэлектроника» и филиала МИРЭА в г. Фрязино. Перед школьниками выступают руководители предприятия НПП «Исток» и АО «Росэлектроника», представители дирекции Наукограда, городской администрации и образовательных учреждений города. Прежде всего в рамках мероприятий учеников городских школ ориентируют на работу на градообразующем предприятии НПП «Исток» и поступление в филиал МИРЭА г. Фрязино. Базовое предприятие АО «НПП «Исток им. Шокина» создает все необходимые условия для реализации потенциала молодежи как в профессиональном, так и в личностном плане. Ориентация руководства предприятия на организацию целевого обучения дает возможность в полном объеме реализовать данные инициативы.

Инновационная модель базовый вуз – базовая кафедра – базовое предприятие постоянно развивается и совершенствуется. Современное российское образование ориентируется на компетентностный подход в процессе подготовки специалистов. Это ставит перед базовыми кафедрами филиала новые задачи:

- сформулировать профессиональные компетенции, которые должны быть сформированы в процессе обучения;
- на основе этих компетенций сформировать учебный план по соответствующей специальности (поскольку базовому предприятию требуются специалисты с конкретным набором компетенций, первостепенное значение имеет адаптация образовательных программ базовых кафедр к потребностям предприятия);
- создать лабораторные практикумы на основе уникального технологического и измерительного оборудования базового предприятия и разработать их методическое обеспечение;
- разработать тематику курсового и дипломного проектирования по реальным задачам базового предприятия;
- признать обязательным элементом учебного процесса, проводимого на базовых кафедрах, организацию непрерывной системы производственных практик, позволяющих студентам осу-

ществовать последовательную смену рабочих мест в подразделениях базового предприятия, что является важнейшим условием формирования широкого спектра требуемого набора компетенций;

- обеспечить программную и методическую основу подготовки специалистов более высокого магистерского уровня.

Отечественная система подготовки инженеров всегда представляла собой сочетание теоретического обучения с научно-исследовательской работой и практической деятельностью студентов в производственных условиях. Примером такого содружества высшего образования, науки и производства служит филиал МИРЭА в г. Фрязино, коллектив которого под руководством Л. А. Макаровой, опираясь на поддержку ректора Московского технологического университета (МИРЭА) С. А. Куджа и генерального директора АО «НПП «Исток» им. Шокина» А. А. Борисова с оптимизмом смотрит в будущее.



Выпуск 2016 г.

Статья поступила 31 марта 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ПОПОВ Р.М. **От НИИ-160 до НПП «Исток».** Часть 2. Холодная война (1950 – 1960 гг.). – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2016. – 352 с.: ил.

В данном издании рассказывается как о системах радиоэлектронного вооружения, так и об электровакуумных приборах, используемых в них. В описываемый период (1950 – 1960 годы) из-за секретности не все сотрудники НИИ-160, принимавшие участие в создании электронных приборов, могли знать, для каких систем вооружения их разрабатывали. Спустя годы автором книги приоткрывается эта тайна.

Книга состоит из отдельных очерков, рассказывающих о различных системах радиоэлектронного вооружения, в которых использовались в основном четыре класса приборов – электронные лампы, СВЧ-приборы, электронно-лучевые приборы и несколько типов газоразрядных приборов.

В изложении событий автор пытался, по возможности, отойти от языка технических отчетов, сделать книгу понятной для обычных читателей.



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

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

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

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

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

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

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

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12. Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2018 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____
на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

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

Подписано к печати 15.9.2017 г.
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"
г. Москва

Усл. п. л. 11,0
Уч.-изд. л. 11,5
Индекс 36292

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

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



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2017, вып. 3(534), с. 1-90

**Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»**

