

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2 (495)

2008

Издается с 1950 г.

Главный редактор
д.т.н. **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (зам. главного редактора),
д.т.н. **Б.Н. Авдонин** (зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»),
к.т.н. **В.Н. Батыгин**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**, **Б.Ф. Горбик**,
С.И. Гришин, д.ф.-м.н. **Б.Ч. Дюбуа**, д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **Ю.А. Кондрашенков**,
к.т.н. **А.С. Котов**, к.т.н. **Е.А. Котюргин**, к.т.н. **П.В. Куприянов**,
к.т.н. **В.В. Лисс**, д.т.н. **М.И. Лопин**, **В.М. Малыщик**, **В.А. Мальцев**,
к.т.н. **П.М. Мелешкевич**, д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**,
Е.Н. Покровский, к.т.н. **А.В. Потапов**, к.т.н. **С.Е. Рожков**,
д.т.н. **К.Г. Симонов**, **В.П. Стебунов** (ответственный секретарь),
к.т.н. **А.М. Темнов**, д.т.н. **Н.Д. Урсуляк**,
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО НПП «Исток-Система»),
О.А. Морозов (ЗАО НПП «Магратеп»),
к.т.н. **А.Г. Михальченко** (МУП «ДПРН Фрязино»),
д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ РАН),
к.т.н. **В.В. Абрамов** (ФГУП СКБ ИРЭ РАН),
А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

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 ученой степени кандидата наук; ред. июль 2007 г.)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2008 г.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Выпуск 2(495)

2008

ФГУП «НПП «Исток»: 65 лет развития и прогресса 3

Твердотельная электроника

Баранов И.А., Замятина Г.А., Коротков А.Н., Обрезан О.И. – Диагностирование качества полупроводниковых приборов по параметрам температурного поля активной области структур 10

Дутышев И.Н. – Микрополосковые фильтры с подавлением сигналов на частотах вблизи полосы пропускания 27

Дутышев И.Н. – Сверхминиатюрные микрополосковые СВЧ-фильтры 30

Дутышев И.Н. – Сверхширокополосные микрополосковые фильтры 34

Технология

Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А. – Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности..... 41

Ляпин Л.В., Павлова М.А., Сытилин С.Н. – Поликристаллический алмаз в окнах выводов СВЧ-энергии 47

Электровакуумные приборы

Новоселец В.И. – О вакуумных пробоях в многолучевых мощных пролетных клистро-нах, работающих на высшем и основном типах колебаний 53

К 65-летию ФГУП «НПП «Исток»

Попов Р.М. – Совет по радиолокации 62

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise “RPC “Istok”,

The Federal Agency on Industry, The Russian Federation

C O N T E N T S

Issue 2(495)	2008	Founded in 1950
--------------	------	-----------------

FSUE “RPC “Istok”: 65 years of development and progress	3	
Solid-state electronics		
<i>Baranov I.A., Zamyatina G.A., Korotkov A.N., Obrezan O.I.</i> – Diagnostics of semiconductor devices quality by temperature field parameters of the structures active field	10	
<i>Dutyshev I.N.</i> – Microstrip filters with signal suppression at frequencies close to passband ...	27	
<i>Dutyshev I.N.</i> – Superminiature microstrip microwave filters	30	
<i>Dutyshev I.N.</i> – Superwideband microstrip filters	34	
Technology		
<i>Dukhnovsky M.P., Ratnikova A.K., Fyodorov Yu. Yu., Kudryashov O. Yu., Leontyev I.A.</i> – Thermal treatment of polycrystal CVD-diamond to form smooth surface	41	
<i>Lyapin L.V., Pavlova M.A., Sytilin S.N.</i> – Polycrystal diamond in microwave energy output windows	47	
Electrovacuum devices		
<i>Novoselets V.I.</i> – On vacuum breakdowns in multiple-beam high-power transit-time klystrons at higher and principal modes of oscillations.....	53	
To the 65-th anniversary of FSUE “RPC “Istok”		
<i>Popov R.M.</i> – Council on radiolocation	62	

ФГУП «НПП «ИСТОК»:
65 ЛЕТ РАЗВИТИЯ И ПРОГРЕССА

Постановление ГКО СССР «О радиолокации» было первым в нашей стране официальным документом, заложившим основу радиоэлектронной промышленности страны и утвердившим развитие отечественной радиолокационной техники как дело государственной важности, поэтому оно имеет огромное историческое значение, а дата 4 июля 1943 года является днем рождения не только НИИ-160, нынешнего ФГУП «НПП «Исток», но и всей радиоэлектронной отрасли России.

За прошедшие 65 лет ФГУП «НПП «Исток» стал лидером отечественной СВЧ-техники, развил СВЧ-электронику как новейшую область отечественной электроники, предназначенную в первую очередь для решения задач национальной безопасности в части создания радиоэлектронного вооружения различных видов применений.

Предприятие начало свою деятельность с разработки серии приемно-усилительных ламп серии «Анод», отражательных клистронов и импульсных триодов, использовавшихся при создании первых отечественных РЛС в конце 40-х годов.

Для мониторов РЛС на предприятии в 1949 году был разработан первый отечественный кинескоп, на базе которого затем был изготовлен первый советский массовый телевизор КВН-49.

В 50–60-х годах были разработаны мощные импульсные магнетроны с быстрой перестройкой частоты для помехозащищенных РЛС наземных, самолетных и корабельных ЗРК систем ПВО С-25, С-75, С-125 и др.

Разработанные на предприятии сверхмощные предельно-волновые магнетроны обеспечили создание уникальной системы ПВО Москвы и первой системы ПРО страны.

Однолучевые клистроны, разработанные в 60-е годы, были применены в ЗРК С-200, С-225, «Бук», в самолетных радиолокационных прицельных комплексах «Сапфир-23М», в аппаратуре траекторных измерений «Вега».

Не имеющие мировых аналогов электронно-лучевые усилители на быстрых волнах, многолучевые клистроны и ЛБВ разработки 70–80-х годов позволили создать многофункциональные системы и комплексы ЗРК «ТОР», С-225, С-300, ДРЛО «Шмель» самолета А-50, РЛС бокового обзора «Штык», РЛС морского базирования «Кинжал», «Кортик» и др.

Серии комплексированных изделий СВЧ-техники (КИ) на основе мощных ЭВП и твердотельных СВЧ-приборов разработки 80–90-х годов вызвали качественный скачок в дальнейшем развитии систем и комплексов радиоэлектронного вооружения. КИ представляют собой многофункциональные генераторно-преобразовательные, усилительные устройства и синтезаторы частот для когерентной радиолокации и аппаратуры связи. Обеспечивают высокую надежность и улучшенные массогабаритные характеристики аппаратуры.

С середины 70-х годов одним из главнейших направлений развития НПП «Исток» становится твердотельная СВЧ-электроника, вначале на основе гибридных интегральных схем, а затем на монолитных СВЧ-микросхемах и мощных СВЧ-транзисторах. На основе техники и технологии твердотельной электроники созданы миниатюрные многоканальные приемники СВЧ, синтезаторы частот, одно- и многофункциональные модули, инфрадинные преобразователи для радиолокации, радиоэлектронного противодействия и аппаратуры связи.

Развитие многофункциональной СВЧ-техники основывалось на теоретических достижениях созданной в НПП «Исток» научной школы, унифицированных технологических процессах, разработанных в фундаментальной комплексной работе «Операция», и развитом машиностроении. За прошедший период машиностроителями предприятия созданы около 1000 типов прецизионных электроискровых и лазерных станков, специальных технологических и радиотехнических установок, произведено более 7000 единиц этого уникального оборудования.

Коллективом ученых, инженеров и рабочих ФГУП «НПП «Исток» заложены фундаментальные основы теории и проектирования СВЧ-приборов, создан комплекс базовых унифицированных микроволновых технологий, разработано более 600 типов электровакуумных и 500 типов твердотельных СВЧ-приборов для 400 различных систем радиоэлектронного вооружения, включая РЛС обнаружения, системы целеуказания и дозора, системы наведения для зенитных ракетных комплексов, системы предупреждения о ракетном нападении, системы наведения высокоточного оружия, аппаратуру для радиопротиводействия и радиоэлектронной борьбы, СВЧ-приборы для всех видов связи.

Разработаны основы специального машиностроения для производства изделий СВЧ электронной техники и выпущены сотни типов специального технологического оборудования, включая прецизионные электроискровые и высокоточные лазерные обрабатывающие комплексы.

Разработана медицинская и связная аппаратура, радиолокационные датчики скорости и уровнемеры, спасательные радиолокационные маяки-ответчики.

Организован серийный выпуск разработанных приборов и изделий как на самом предприятии, так и на родственных заводах электронной промышленности страны.

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, инженер Л.А. Парышкуро и генеральный директор предприятия С.И. Ребров были удостоены звания Героя Социалистического Труда. Более 100 работников предприятия стали лауреатами Сталинской, Ленинской и Государственной премий СССР и Российской Федерации. Свыше 1500 сотрудников предприятия были награждены орденами и медалями СССР и России.

За прошедшие десятилетия в НПП «Исток» создана научная школа в области физики, математического моделирования и систем автоматизированного проектирования изделий СВЧ-техники. Достижения предприятия в области катодной техники нашли признание на всех предприятиях радиоэлектронной отрасли страны.

На специализированных диссертационных советах предприятия защищено около 500 диссертаций, в том числе 50 докторских. Специалистами предприятия написано более 60 монографий, получено свыше трех тысяч патентов и авторских свидетельств на изобретения. Высокий научно-технический уровень работ, проводимых в НПП «Исток», был впервые в полной мере оценен мировой научной общественностью после частичного раскрытия тематики предприятия в 1990 году. При этом были признаны безусловное лидерство российской СВЧ вакуумной электроники и высокий научный потенциал ученых предприятия, доклады которых на самых престижных отечественных и международных конференциях неизменно вызывают большой интерес.

В настоящее время ФГУП «НПП «Исток» является одним из ведущих предприятий отечественной электронной промышленности с годовым объемом работ около 2 млрд руб. Предприятие является крупным поставщиком СВЧ-приборов гражданского и военного назначений, причем большинство этих приборов может производиться только на ФГУП «НПП «Исток». На предприятии работает уникальный коллектив ученых (12 докторов и 105 кандидатов наук) и высококвалифицированные кадры инженерно-технических работников и рабочих общей численностью около 5000 человек.

Отмечая роль ведущего предприятия Министерства электронной промышленности Советского Союза в создании перспективных систем радиоэлектронного вооружения бортовой, морской и наземной военной техники, таких, как С-23МЛ, «Заслон», С-3ООП, С-3ООВ, «Шмель», «Тор» и «Бук», постановлением Совета Министров СССР в 1985 году на НПП «Исток» были возложены «функции головной организации по обеспечению единой технической политики при создании СВЧ-техники для систем радиоэлектронного вооружения».

За 65 лет, насыщенных крупными научно-техническими достижениями и открытиями, освоением в производстве широкого спектра продукции, научная школа ФГУП «НПП «Исток» вывела отечественную электронику СВЧ на передовые позиции в мире и обогатила ее новыми идеями, современными конструкторскими и технологическими решениями, уникальным оборудованием и специальными материалами.

Среди основных достижений ученых, инженеров и конструкторов ФГУП «НПП «Исток» можно выделить следующие.

Впервые в мире предложена оригинальная идея отражательного клистрона, создана теория и разработана большая серия маломощных вакуумных СВЧ-генераторов, нашедших широкое применение в отечественной радиолокационной, связной и измерительной технике (Н.Д. Девятков, В.Ф. Коваленко, Л.А. Парышкуро, М.Б. Голант, А.А. Негирев, В.А. Парилов, Ю.Н. Кузнецов, В.И. Новоселец, И.И. Бродуленко, А.И. Афанасьев, Г.Н. Алпатов, А.С. Федоров, Г.С. Котовицков, И.К. Викулов, З.Ф. Каплун, В.Н. Лебедев, В.М. Долич, В.А. Мальцев, Ю.В. Дедик, В.А. Павлов, В.И. Рогов и др.).

Разработаны несколько типов оригинальных ламп бегущей волны: маломощные ЛБВ с ленточным пучком для связи и локации, космические ЛБВ с высокой долговечностью, мощные связные ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (В.Ф. Афанасьев, А.А. Шеногин, В.И. Мнойн, В.И. Гуртовой, А.Н. Бакаушин, А.Д. Родионов, Ю.П. Мякинков, К.Г. Ноздрина, Е.П. Хоменкова, В.Я. Эфрос, О.Н. Аристархова, Л.А. Пинчук, Г.В. Рувинский, И.Е. Роговин, Г.В. Курилов и др.).

Созданы теоретические основы и разработан широкий спектр оригинальных приборов магнетронного типа: уникальные супермощные многоэтажные волноводно-запредельные магнетроны (до 30 МВт), миниатюризированные усилительные магнетроны, мощные (до 10 МВт) магнетроны, магнетроны с быстрой перестройкой частоты, мощные (до 100 кВт) магнетроны для промышленного нагрева (С.А. Зусмановский, А.П. Федосеев, Э.А. Гельвич, Ю.А. Вецайлис, Л.Г. Некрасов, И.В. Соколов, Д.Е. Самсонов, О.А. Морозов, А.Н. Каргин, Ю.А. Искренко, Ю.А. Вецайлис, В.И. Индык, А.П. Берест, Т.В. Зиангиров, В.Г. Кармазин, О.И. Обрезан, М.И. Хворов, А.А. Нечаева, И.С. Кинус, А.А. Белокопытов, Г.М. Кауфман, А.М. Цейтлин, В.Н. Бессмертных, В.С. Хаби, В.Г. Габышев, Л.М. Борисов, Г.В. Курилов, Б.С. Гришин, Х.И. Спектр, С.М. Артемьев, В.В. Брусникин и др.).

Впервые в мире предложены, теоретически обоснованы и освоены в производстве несколько классов однолучевых и многолучевых приборов: многолучевые ЛОВ, работающие вплоть до частоты 1,5 ТГц; мощные многолучевые клистроны, обеспечивающие высокие характеристики лучших в мире зенитно-ракетных комплексов С-300 и С-400; низковольтные многорезжимные усилительные цепочки с многолучевой «прозрачной» ЛБВ на выходе; уникальные миниатюризированные многолучевые клистроны, определяющие высокий потенциал АРГС ракет класса «воздух-воздух»; многолучевые лампы с индуктивным выводом энергии (клистроны) для передатчиков дециметрового телевидения (С.А. Зусмановский, С.В. Королев, П.М. Мелешкевич, А.Д. Закурдаев, С.С. Зырин, В.И. Пугнин, Е.В. Жарый, М.И. Лопин, Т.А. Мишкин, В.С. Галкин, В.А. Рыжов, И.И. Голеницкий, Б.Ч. Дюбуа, А.Б. Киселёв, Б.В. Сазонов, М.Б. Голант, А.С. Победоносцев, В.Г. Бороденко, А.С. Тагер, А.А. Негирев, А.М. Алексеенко, Г.И. Гвоздицын, Ю.А. Кутепов, А.А. Белокапытов, М.С. Востров, Л.М. Борисов, Ю.А. Ковалев и др.).

Созданы сверхмощные клистроны для ускорителей с выходной импульсной мощностью 20 МВт (С.А. Зусмановский, В.Г. Кармазин, К.Г. Симонов, В.С. Галкин, Г.П. Щелкунов и др.), широко используемые в линейных ускорителях электронов.

Впервые в мире был изобретен лазер на свободных электронах (1971 г., В.В. Кулиш, Р.А. Силин).

На предприятии созданы оригинальные приборы на циклотронном резонансе: электростатические усилители (ЭСУ) и защитные устройства. Уникальные характеристики этого класса приборов: сверхнизкие шумы, линейность амплитудных и фазовых характеристик, широкий динамический диапазон, способность работы без дополнительных устройств защиты от СВЧ-перегрузок – сделали их незаменимыми в приемниках доплеровских РЛС (С.П. Кантюк, Ю.А. Будзинский, В.В. Лисс и др.).

В ходе НИЭР «Синтез» впервые в СССР была создана теоретическая база и разработаны бортовые РЛС с цифровой обработкой сигнала. С помощью БРЛС «Синтез-10» впервые в СССР в 80-е годы было выполнено картографирование земной поверхности синтезированной апертурой в реальном масштабе времени (С.И. Ребров, А.Н. Королев, С.А. Зайцев, А.В. Потапов, М.Ф. Воскобойник, А.Д. Родионов, А.Н. Бакаушин, М.И. Лопин, В.Н. Русаков, Р.В. Грицук, А.П. Чугуй, В.А. Рыжов, Р.М. Тиращуян, М.И. Лопин, С.В. Королев, Ю.П. Мякинчиков, Б.В. Сазонов, Н.Д. Урсуляк, С.А. Перегонов, А.И. Афанасьев, В.Н. Бессмертных, А.Ф. Хасянов, Б.В. Ракитин, А.Г. Михеев, Ю.В. Феофанов, Д.И. Чукаев и др.).

Важнейшим результатом НИЭР «Синтез» явились разработанные на предприятии в 80-е годы и серийно выпускаемые в настоящее время лучшие в своем классе АРГС для ракеты класса «воздух-воздух» типа РВВ-АЕ (С.И. Ребров, А.Н. Королев, С.А. Зайцев, А.В. Потапов, М.Ф. Воскобойник, М.И. Лопин, В.Н. Русаков, А.Я. Ильин, В.Я. Батаев, А.Ф. Хасянов, А.С. Лисицын, В.Ю. Язан, А.П. Гусев, В.М. Торбик, Л.Ф. Михайлов, А.Д. Закурдаев, Н.Д. Урсуляк, В.А. Мальцев, В.М. Малышук, С.Е. Рожков, М.М. Трифонов, Л.Е. Мишулин, М.А. Иванов, В.А. Париков, А.Н. Бакаушин, Д.Г. Арапов, Б.Ф. Горбик, Е.Н. Покровский, Р.М. Тиращуян, Р.А. Гизатуллин, В.Н. Грудцов, Н.Н. Колесниченко, В.В. Чекурсков, П.В. Гармашов, А.В. Кустов, В.С. Лукошков и др.).

На предприятии впервые в СССР был изготовлен точечный германиевый транзистор (1949 г., А.В. Красилов, С.Г. Мадоян), сделано открытие эффекта СВЧ-генерации при лавинном пробое и впервые в мире создан лавинно-пролетный диод (1959 г., А.С. Тагер, А.И. Мельников, Г.П. Кобельков, А.М. Цибиев).

Одновременно с американскими коллегами и независимо от них изобретен транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT, 1980 г., А.С. Тагер, А.А. Кальфа), ставший основой современной полупроводниковой СВЧ-электроники. Впервые в мире (1994 г.) предложен квантовый каскадный лазер с баллистическим транспортом электронов, предложены (1988 г.) новые виды транзисторов и резонансно-туннельных диодов (А.С. Тагер, А.Б. Пашковский, Е.И. Голант), открывающие возможности создания твердотельных источников и приемников в терагерцовом диапазоне длин волн.

Быстрое становление и развитие твердотельного направления на «Истоке» с конца 60-х годов привело к серийному выпуску многих типов СВЧ полупроводниковых приборов, ГИС и МИС на их основе. В 80-е годы была создана технология ГИС, принятая за основу во всей отрасли. Запуск на предприятии пилотной линии по производству транзисторов и монокристаллических интегральных схем СВЧ позволил разработать и организовать серийный выпуск приемо-передающих СВЧ-модулей АФАР (С.А. Перегонов, А.С. Тагер, Г.А. Крысов, А.М. Темнов, К.Г. Ноздрин, П.М. Мелешкевич, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.А. Красник, К.В. Дудинов, Ю.М. Богданов, А.В. Крутов, В.Е. Земляков и др.).

Создана школа теоретиков НПП «Исток», разработаны эффективные методы моделирования и проектирования СВЧ электровакуумных и полупроводниковых приборов (В.С. Лукошков, В.П. Сазонов, А.С. Тагер, Р.А. Силин, А.С. Победоносцев, Д.М. Петров).

Внедрены в практику проектирования электровакуумных приборов оригинальные методы оптимизации и синтеза, без которых были бы невозможны многие разработки (А.С. Победоносцев, В.Г. Бороденко, А.Н. Варнавский, В.А. Морозова).

Развита теория симметрии в замедляющих системах и впервые в мире предложены среды с необычными законами преломления («левые среды») (1959 г., Р.А. Силин).

Создано уникальное математическое обеспечение для расчета и проектирования СВЧ-приборов (В.Г. Бороденко, К.А. Ведякина, И.М. Блейвас, Т.П. Куцевская, Н.Я. Малькова-Хаимова, И.П. Чепурных, Я.Б. Мартынов, Г.С. Самохин, Н.А. Гусельников, Э.В. Погорелова, В.М. Красноперкин, В.П. Кирюшин).

Впервые в СССР был создан экспериментальный макет ЛОВ (1955 г., В.П. Кирюшин). Выполнены исследования и обоснован ряд новых перспективных направлений развития электровакуумных и твердотельных приборов СВЧ (В.Г. Бороденко, В.Б. Хомич, А.В. Галдецкий, и др.).

Созданы методики электронно-оптических расчетов, пользующиеся авторитетом и за пределами «Истока» (И.И. Голеницкий, Л.А. Сапрынская, Н. Духина).

Разработана теория баллистического транспорта электронов через квантово-размерные структуры в высокочастотных электрических полях (А.С. Тагер, Е.И. Голант, А.Б. Пашковский).

Исследованы, разработаны и запущены в серийное производство несколько типов газовых лазеров, которые нашли широкое применение в промышленности и медицине. Созданы цезиевые атомно-лучевые трубки для квантовых стандартов частоты и времени, используе-

мых в навигационных спутниковых системах, в том числе и в системе ГЛОНАСС (В.П. Беляев, Е.Н. Покровский, Ю.В. Печенин, В.С. Алейников, Я.А. Юхвидин, И.И. Самарцев, М.С. Доманов, С.А. Плешанов и др.).

Впервые в мире создан новый класс приборов – электронные отпаянные пушки (ЭОП). Создано новое поколение ЭОП с ленточным пучком шириной более 300 мм, формируемым протяженным ленточным катодом (А.Н. Королёв, К.Г. Симонов, И.М. Блейвас, А.С. Победоносцев, И.И. Голеницкий, Б.Ч. Дюбуа, М.И. Захаров, А.Б. Киселёв, Г.М. Кузнецова, А.Ф. Худышев и др.).

Совместно с ФГУП «МРТИ РАН» создано новое поколение компактных ускорителей электронов для рентгенографической инспекции крупногабаритных грузов и большегрузных контейнеров, а также для стерилизации медицинских изделий (А.Н. Королёв, К.Г. Симонов и др.).

На ФГУП «НПП «Исток» разработана специальная технология и оборудование, обеспечивающие высокое качество, надёжность и воспроизводимость изделий, выпускаемых предприятием. Сюда относятся: теххимия, катодная и керамическая технологии, ферритовые материалы и приборы, магниты, оригинальный метод диффузионной сварки и др. (В.Н. Батыгин, И.П. Стародубов, И.М. Панас, Б.Ч. Дюбуа, Ю.А. Кондрашенков, Д.Г. Арапов, Н.Д. Урсуляк, Е.И. Каневский, Е.А. Котюргин, Н.В. Черепнин и др.).

Выполнена фундаментальная комплексная ОКР «Операция» по обеспечению надёжности выпускаемых приборов на этапах разработки и производства. Внедрение результатов работы привело к качественному изменению показателей надёжности: количество отказов и рекламаций уменьшилось в десять и более раз, обеспечив безотказную эксплуатацию систем радиоэлектронного вооружения (руководитель работы С.И. Ребров).

Задачи, поставленные перед предприятием, потребовали развития специального машиностроения, разработки и выпуска радиоизмерительного оборудования, оборудования для производства приемно-усилительных ламп и электровакуумных СВЧ-приборов, транзисторов и гибридно-интегральных схем, лазеров и многого другого. Были разработаны теоретические основы прецизионной электроискровой обработки и впервые в мире созданы электроискровые вырезные прецизионные станки. Разработаны лазерные технологические установки, нашедшие применение при изготовлении различных деталей ЭВП и твердотельных модулей (Б.И. Ставицкий, В.Л. Кравченко, К.В. Юрьев, Г.А. Горшков, А.М. Храпко, М.У. Муртазин, В.Н. Ештокин, Р.А. Беляев, Е.П. Демин, К.Н. Алмазов-Долженко, Р.А. Беляков, Н.А. Лабин, П.И. Бойко, А.Н. Ануфриев, и др.).

Медицинские применения передовых технологий: открытие резонансного ответа биологических систем на электромагнитное облучение на дискретных частотах миллиметрового диапазона длин волн, внедрение лазеров в хирургию и терапию, создание компьютеризированных аппаратов «Гастроскан» и «Гастротест», разработка установок СВЧ-гипертермии для нагрева злокачественных новообразований, разработка терапевтических аппаратов «Явь», использующих миллиметровый диапазон длин волн, разработка слуховых аппаратов и др. (Н.Д. Девятков, И.И. Девяткин, А.Н. Королев, Е.Н. Покровский, М.Б. Голант, А.А. Негирев, А.С. Федоров, Ю.В. Дедик, Э.А. Гельвич, В.П. Беляев, В.Н. Калюжный, М.М. Трифонов, Л.Е. Мишулин, Т.Б. Реброва, А.С. Дунаев, Н.С. Макеева, С.А. Новоселец, Л.С. Королев, В.Н. Мазохин, И.И. Климачев и др.).

Квантовые генераторы и СВЧ-приборы, выпускаемые предприятием, нашли применение как в системах радиорелейной связи, так и при автоматизации технологических процессов в различных народно-хозяйственных отраслях промышленности, строительства и транспорта.

Мощные магнетроны на частотах 915 и 2450 МГц используются в установках промышленного СВЧ-нагрева и СВЧ-плазмотронах для структурного и спектрального анализов; генераторы на ЛОВ и ЛПД миллиметрового диапазона – в радиолокационных датчиках скорости и уровнемерах; неоновые лазеры – в нивелирах и зенит-центрирах (И.И. Девяткин, А.М. Цейтлин, В.А. Париков, А.В. Потапов, А.С. Зусмановский, В.С. Смолвик, В.А. Никитин, М.А. Иванов, Н.И. Цемко, О.С. Цемко, Ф.А. Тенн, Ю.Н. Кузнецов, Н.Н. Колесниченко, В.П. Стебунов, В.Н. Грудцов, В.В. Чекурсков, Р.А. Гизатуллин, Ю.П. Кернов, С.А. Перегонов, В.И. Левитин, В.В. Чекурсков, В.С. Лукошков, В.П. Лягушев, А.Г. Далингер, А.Ф. Хасянов, А.П. Дзилиев, В.И. Скопин, А.С. Федоров, В.И. Шустов и др.)

Представители научной школы ФГУП «НПП «Исток», воспитанные на протяжении многих десятилетий, представляют собой главное достояние интеллектуального фонда не только нашего предприятия, но и всего наукограда Фрязино.

Нынешнее поколение ученых предприятия продолжает лучшие традиции по развитию основных направлений СВЧ электронной техники, разработке вакуумных и твердотельных приборов СВЧ, комплексированных изделий, атомно-лучевых трубок, унифицированных базовых технологий, специального технологического оборудования, их приложений военного и гражданского назначения.

≡ НОВЫЕ КНИГИ ≡

ПОПОВ Р.М. **От НИИ-160 до НПП «ИСТОК».** Часть I. Так начинался «Исток» (1941-1951 гг.). - М.: МЕДПРАКТИКА-М, 2008. - 332 с.: ил.

В книге на фоне общего развития электронной промышленности страны излагаются факты, события, комментарии к ним из истории Федерального государственного унитарного предприятия, научно-производственного предприятия «Исток», занимающегося разработкой и производством СВЧ-техники, предназначенной для РЛС различного назначения.

Прослеживается путь предприятия от создания электровакуумных приборов для РЛС первых отечественных станций оружейной наводки, предназначенных для зенитных артиллерийских систем, до первых СВЧ-приборов системы С-25.

Наряду с описанием основных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в период с 1943 по 1951 гг. значительное внимание уделено коллективу специалистов: ученым, инженерам, конструкторам, рабочим и служащим, оставившим заметный след в истории института.

Книга посвящена 65-летию НПП «Исток» и рассчитана как на специалистов, так и на широкий круг читателей.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.019.3

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СТРУКТУР

И. А. Баранов, Г. А. Замятина, А. Н. Коротков, О. И. Обрезан

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Приведен метод диагностики качества полупроводниковых приборов и МИС СВЧ на основе температурных профилей активной зоны, снятых с использованием ИК-микропирометра при различных электрических режимах. Даны примеры применения метода. Показано, что приборы с аномалиями температурного профиля имеют меньшее время наработки до отказа при термоэлектропрогонах в форсированном режиме.

A diagnostics method of semiconductor devices quality in microwave MICs based on active zone temperature profiles recorded using IR micropyrometer at different electric modes is presented. The method application examples are given. It is shown that devices with temperature profile anomalies have less time to failure (MTBF) at thermoelectroruns in a forced mode.

1. ВВЕДЕНИЕ

Видимое температурное поле полупроводниковой структуры (транзистора, диода, микросхемы на кристалле или в модуле) дает единственную возможность визуального контроля наличия скрытых дефектов в готовом приборе и оценки его качества по параметрам пространственного распределения температуры в различных электрических режимах.

Проблема выявления дефектов и определения локальной температуры полупроводниковых структур всегда была предметом внимания исследователей и разработчиков приборов, но в настоящее время она актуализируется, прежде всего, по двум причинам.

Во-первых, происходит наращивание мощности дискретных приборов, в том числе и при продвижении в область высоких частот. Это сопровождается повышением плотности упаковки и уменьшением размеров элементов многотворных структур на одном кристалле и соответственно увеличением плотности тепловыделения в активной области структур. Вероятность появления дефектов в структурах из-за дефектов материалов и ограниченной контролируемости технологических процессов возрастает, так же как возрастает температура в областях естественной концентрации тепловыделения (например, в локальной области исток-сток транзисторов).

Во-вторых, традиционные GaAs полевые транзисторы с барьером Шотки практически вытеснены транзисторами на гетероструктурах $A^{III}B^V$ (HEMT), для которых задача установления предельных электрических параметров (включая предельную температуру канала) с учетом требований к надежности пока еще остается не до конца разрешенной, хотя считается, что новые транзисторы могут работать при более высоких температурах (но при повышенной чувствительности параметров к изменению температуры). В то же время усложнение технологии изготовления транзисторов на гетероструктурах ведет к повышению вероятности проявления дефектов.

В настоящее время требования к надежности дискретных полупроводниковых приборов и сложных МИС СВЧ задаются в виде таких показателей, как вероятность безотказной работы не менее 0,95 в течение 50...100 тыс. ч (что соответствует допустимой интенсивности отказов в течение такой наработки порядка 10^{-6} ч⁻¹ в приближении экспоненциального закона распределения наработки до отказа). Представление о соответствии приборов таким требованиям можно получить только путем ускоренных испытаний, в первую очередь, при повышенных температурах полупроводниковых структур. Для получения достоверных оценок надежности необходимо иметь достоверные сведения о качестве испытываемых приборов (об их дефектности) и фактической температуре в наиболее нагретых областях структур.

Температуру активной области диодов и транзисторов определяют путем расчета аналитическими методами по упрощенным моделям структур, например [1-3], или численными методами, например [4,5], или расчетно-экспериментальными методами по рассеиваемой мощности $P_{\text{расс}}$ и тепловому сопротивлению R_t приборов, которое измеряют одним из многочисленных методов [6]. Расчетные методы, как правило, ориентированы на анализ температурных режимов упорядоченных структур приборов. Наиболее распространенный экспериментальный метод измерения R_t – метод термочувствительного параметра – позволяет определить только среднее по структуре значение. Более сложные методы: ИК-радиометрия и метод жидких кристаллов – позволяют наблюдать реальные (неоднородные) температурные поля, но традиционная разрешающая способность соответствующей измерительной аппаратуры и/или производительность методов ограничивают их возможности для эффективного выявления дефектов на субмикронном уровне и широкого применения для контроля качества полупроводниковых приборов в процессе производства. Для этих целей необходимо применение аппаратуры нового поколения [7-11].

Настоящая публикация преследует цели:

- дать представление об особенностях температурных режимов транзисторов и диодов СВЧ, которые отражают как свойства дискретных приборов, так и качество их применения в модулях по назначению;
- показать целесообразность использования регистрации температурных полей как источника информации для совершенствования качества изготовления и применения транзисторов, диодов и микросхем;
- определить необходимость и возможность совершенствования материально-технического обеспечения диагностирования качества полупроводниковых приборов и модулей и прогнозирования их надежности.

При подготовке публикации использованы материалы исследований, которые выполнялись на ФГУП «НПП «Исток» в течение ряда лет.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Аппаратура и методика измерения температуры

Для наблюдения температурных полей использован ИК-микропирометр 14КИ1* – прибор, регистрирующий интенсивность ИК-излучения нагретого тела в диапазоне 2,0...5,5 мкм. Характеристический параметр оптической системы приемника ИК-излучения – диаметр области «сбора» ИК-излучения в фиксированной точке излучающей поверхности составляет около 40 мкм: приемник регистрирует среднюю интенсивность излучения с «пятна» диаметром 40 мкм. Сканирование исследуемой поверхности осуществляется электромеханическим перемещением платформы с изучаемым объектом с шагом не менее 5 мкм.

В принципе микропирометр 14КИ1 предназначен для измерения температуры поверхностей с фиксированной излучающей способностью и однородным температурным полем в пределах области не менее «пятна» его оптической системы. Но благодаря высокой температурной разрешающей способности прибора (менее 1 °С) с его помощью можно выявлять наличие малоразмерных дефектов (с микронными размерами) или неоднородностей в температурном поле с размерами и меньше диаметра «пятна». Локальные количественные показатели неоднородности – распределение температуры в этих случаях однозначно определить нельзя.

Экспресс-характеристику температурного поля наблюдаемой структуры можно составить по распределению интенсивности ИК-излучения, фиксируемого на экране монитора по штатной цветовой шкале. Для измерения температуры должна быть проведена калибровка измерительного канала для каждого конкретного исследуемого объекта по процедуре, предусмотренной документацией на прибор. В тех случаях, когда интерес представляет распределение температуры в ограниченной области полупроводниковой структуры (в области дефекта или аномальной неоднородности), для повышения точности определения температуры используют прием разностной калибровки, который состоит в следующем.

Калибровку измерительного канала производят по обследуемому объекту при двух значениях температуры в термостате, таких, при которых предполагаемые значения температуры в контролируемой области были заключены между калибровочными температурами. Температуру в фиксированной точке исследуемой области определяют методом линейной интерполяции между значениями градуировочных температур. Процедура вполне реализуема при использовании электронных таблиц в программе Excel.

Результаты наблюдения температурных полей диодов

На рис. 1 представлено схематическое изображение диода на пьедестале, а на рис.2 и 3 – соответственно видеоизображения температурных полей СВЧ-диодов в составе ограничителя СВЧ-мощности и температурные профили (распределение температуры вдоль оси X-X по центру диода, перпендикулярной направлению распространения СВЧ-мощности (см. рис. 1)).

Видеоизображения отражают различия в качестве монтажа диодов пайкой на теплоотводящее основание: размеры «горячих» пятен на температурном поле диода №195.1 больше и «видимая» температура заметно выше, чем для диода № 189.1. При «плохом» монтаже диодов

*Разработан РНИИ «Электронстандарт» в 1980 г.

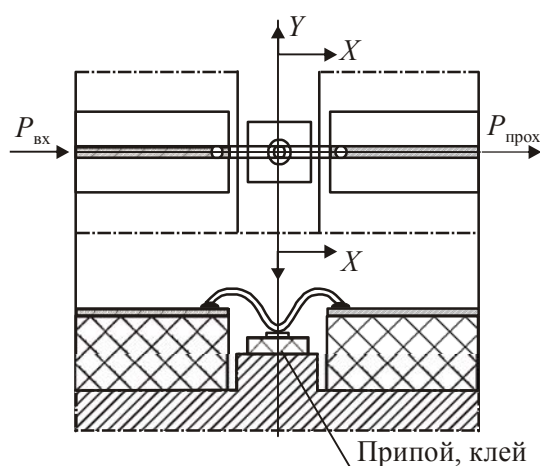


Рис. 1. Схематическое изображение посадочного места диода в ограничителе СВЧ-мощности

отказ ограничителей наблюдался при падающей импульсной СВЧ-мощности порядка 6 Вт; при «хорошем» монтаже ограничители выдерживали мощность не менее 25 Вт (при сопоставимых значениях коэффициента отражения в динамическом режиме).

В табл. 1 приведены данные определения теплового сопротивления диодов при статическом режиме в фиксированной области температурного поля, измеренного с помощью ИК-пирометра.

Таблица 1

Показатели качества монтажа диодов пайкой и клеем

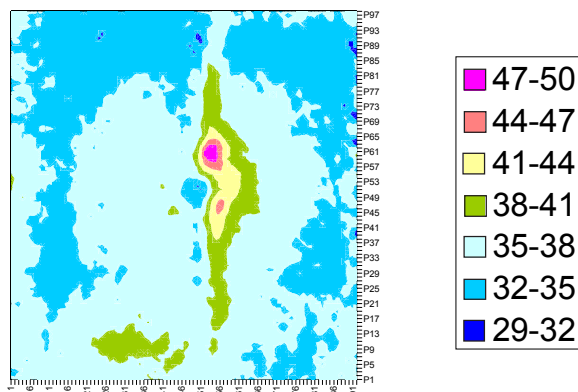
Вид монтажа, материал	Объем партии	Среднее значение условного теплового сопротивления $R_{т.ср}$, °C/Вт	Среднеквадратичное отклонение δ , °C /Вт	$2\delta/R_{т.ср}$
Пайка на «пьедестал», припой	30	55	4,69	0,17
Приклеивание к «пьедесталу», клей	16	48,3	3,82	0,14

Положительный результат применения клея с точки зрения качества монтажа очевиден. Следует отметить, что столь заметный эффект зафиксирован для диодов, монтируемых на металлическое основание в разрыве между поликоровыми платами с микрополосковыми линиями: монтаж осуществляется в «неудобном» месте на хороший теплоотвод. При монтаже диода в разрыве МПЛ на поликоровой плате (на плоскость с умеренным теплоотводом) эффект применения клея может оказаться менее значительным.

В рассматриваемом случае диаметр активной области диода ($p-n$ -перехода) примерно в два раза меньше диаметра «пятна» пирометра и по изображениям можно судить лишь об относитель-

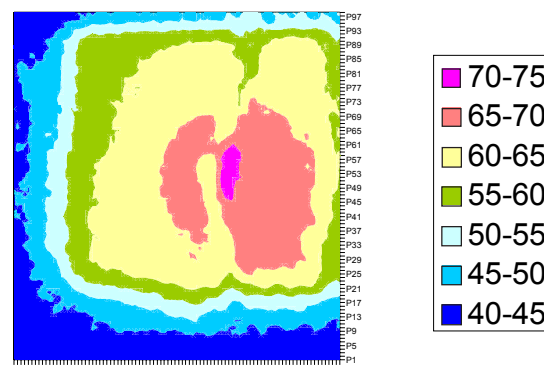
ном уровне температуры переходов. Но и в этом случае удалось установить критерий приемлемого качества монтажа – по величине условного теплового сопротивления, при котором диоды выдерживали максимальную нагрузку СВЧ-мощностью в рабочем режиме.

Диод № 189.1



$$P_{\text{расс}} = 0,15 \text{ Вт}; \Delta T_{\text{max}} \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

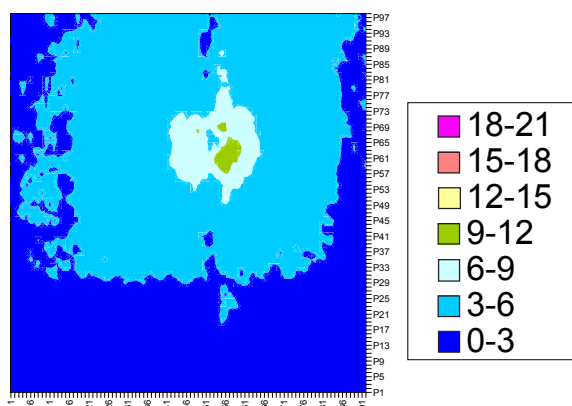
Диод № 195.1



$$P_{\text{расс}} = 0,12 \text{ Вт}; \Delta T_{\text{max}} \approx 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

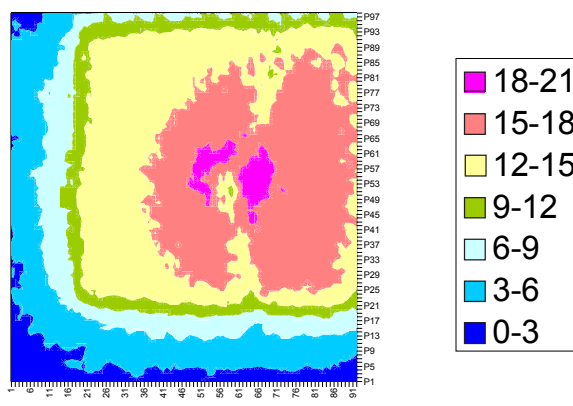
а)

$$P_{\text{пад,ср}} = 2,6 \text{ Вт}$$



$$P_{\text{расс,дин}} = 0,9 \text{ Вт}; \Delta T_{\text{max}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{пад,ср}} = 1,8 \text{ Вт}$$



$$P_{\text{расс,дин}} = 0,6 \text{ Вт}; \Delta T_{\text{max}} \approx 48 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

б)

Рис. 2. Температурные поля диодов в ограничителях СВЧ-мощности при измерительном (а) и динамическом (б) режимах



Рис. 3. Температурные профили ограничительных диодов:

1 – диод №189.1; 2 – диод №195.1

Результаты исследования температурных полей транзисторов

СВЧ-транзисторы. На рис. 4 приведены температурные профили двух образцов многозатворного GaAs ПТШ (количество затворов – 32, размеры кристалла – 0,55×1,508 мм, толщина – 100 мкм) – нормального и с дефектом (с одним разорванным затворным «пальцем»); на рис. 5 – поле ИК-излучения транзистора с дефектом. При штатном визуальном (под микроскопом, ×98) и электрическом контроле «холодного» транзистора (на пластине) дефект априори не был идентифицирован. Только после наблюдения дефекта по ИК-излучению в результате целевого поиска было установлено наличие разрыва «пальца».

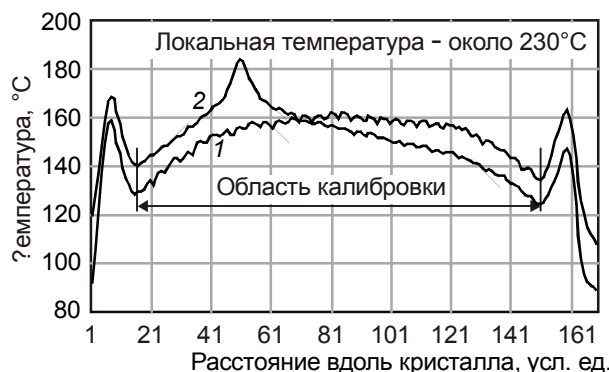


Рис. 4. Температурные профили мощных GaAs ПТШ ($P_{\text{расс}} = 3,0$ Вт):

транзистор № 1 – типовой профиль; транзистор № 2 – профиль с наличием аномалии

На рис. 6 приведены температурные профили транзистора с дефектом – экспериментальный и расчетные (точечный и усредненный по квадрату с площадью «пятна» пирометра) в режиме запирающего тока стока* (напряжение стока – 7,5 В; напряжение затвора – минус 4,5 В; ток стока – 48 мА). Для расчета профилей использован метод [3] в предположении, что область тепловыделения имеет вид прямоугольника с размерами $W_1 \times L_T$ (W_1 – ширина единичного затворного «пальца»; L_T – размер области тепловыделения в зазоре исток-сток по [5]) на кристалле с основанием при фиксированной температуре 25 °С.

* Режим запирающего применяется для дополнительного контроля транзисторов с признаками аномалии температурного профиля, что дает возможность, убрав фоновое ИК-излучение транзистора, более четко выявить дефектные участки структуры.

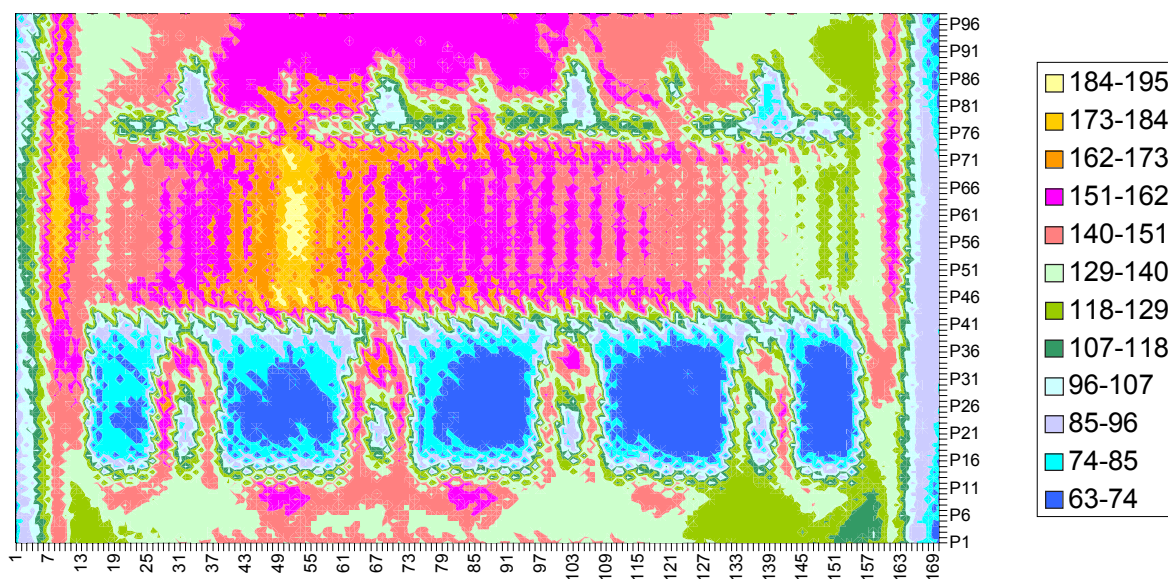


Рис. 5. Поле ИК-излучения транзистора № 2 (см. рис. 4)



а)



б)

Рис. 6. Температурные профили транзистора № 2 (см. рис. 4) в зоне дефекта:
а – эксперимент; б – расчет

Видно, что расчетное значение максимальной температуры примерно в два раза превышает измеренное с помощью микропирометра. Расхождению между усредненным расчетным профилем и экспериментальным можно дать объяснение, но важнее отметить следующее:

1) дефектный и нормальный транзисторы практически не отличались по параметрам электрического статического режима и выходным функциональным параметрам. Различие состояло в том, что характеристика запирающего тока стока дефектного транзистора оказалась гораздо менее резкой по сравнению с характеристикой нормального транзистора;

2) при проведении испытаний в форсированном режиме партии таких транзисторов (мощных GaAs ПТШ) дефектный транзистор отказал после наработки $t_n = 24$ ч при температуре канала ($T_{кан}$) 195°C . Другие транзисторы испытываемой выборки, не имеющие аномалий температурного профиля, показали $t_n = 400 \dots 500$ ч при $T_{кан} = 220 \dots 230^\circ\text{C}$.

На рис. 7 приведены экспериментальные температурные профили многозатворных 8-секционных транзисторов на протяженных тонких кристаллах (размеры кристалла – $0,53 \times 3 \times 0,03$ мм, количество затворов в секции – 24) в статическом режиме при рассеиваемой мощности 2,4 Вт на секцию; на рис. 8 – поле ИК-излучения транзистора.

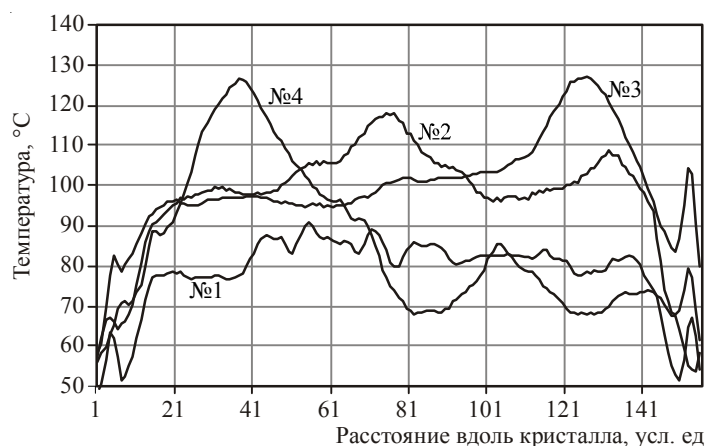


Рис. 7. Температурные профили мощных AlGaAs/GaAs pHEMT:
 № 1...№ 4 – условные номера транзисторов (получены в разное время от разных партий)

Вид температурных профилей свидетельствует о существовании, по крайней мере, двух проблем в решении задачи наращивания мощности единичного многозатворного транзистора: неоднородность свойств кристалла (от секции к секции и в пределах секций) и качества монтажа протяженного кристалла на теплоотвод.

На рис. 9 приведены температурные профили таких же транзисторов в составе выходного каскада усилительного модуля в статическом и динамическом режимах. Связь качества профилей в статическом режиме и функциональных параметров транзистора в динамическом режиме очевидна.

На основании результатов анализа температурных профилей транзисторов, представленных на рис. 7 и 9, можно сделать предположение, что наращивание выходной СВЧ-мощности усилительных модулей за счет наращивания мощности одиночных транзисторов при необходимости обеспечения высокой надежности модулей может быть не всегда оптимальным путем решения проблемы, учитывая отмеченные технологические трудности.

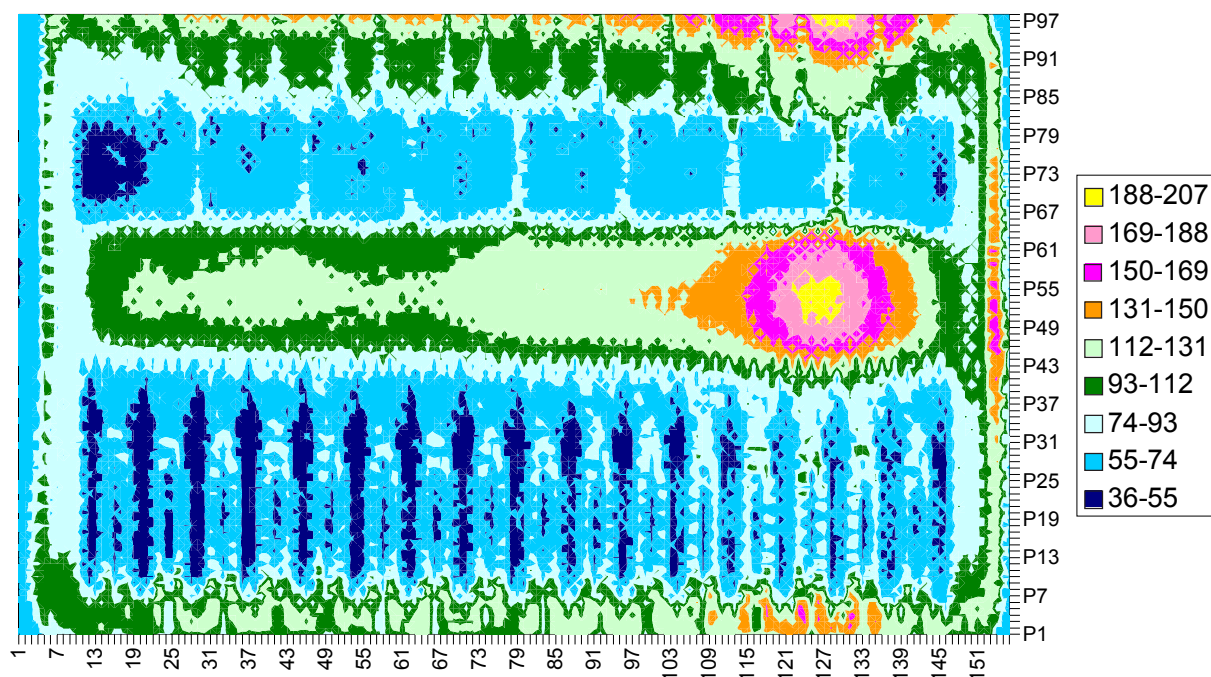


Рис. 8. Поле ИК-излучения транзистора № 3 (см. рис. 7)

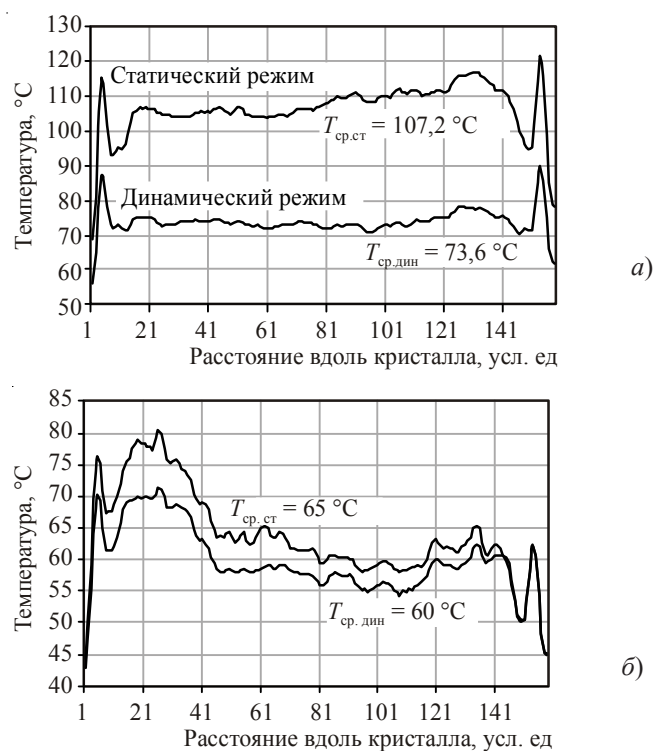


Рис. 9. Температурные профили мощных AlGaAs/GaAs pHEMT в макетах внутрисогласованных сборок:

a – макет № 3, непрерывный режим ($P_{\text{расс.ст}} = 18,3$ Вт; $P_{\text{расс.дин}} = 12,1$ Вт);
б – макет № 1, импульсный режим: $\tau_{\text{и}} = 5$ мкс, $Q = 2$ ($P_{\text{расс.ст}} = 9,1$ Вт; $P_{\text{расс.дин}} = 8,8$ Вт)

На рис. 10 представлены температурные профили пяти образцов 8-секционного транзистора-кристалла с одной задействованной секцией ($P_{\text{расс}} = 2,4$ Вт) из разных партий и по-разному смонтированных на теплоотвод: трех приклеенных и двух припаянных. Видно, что четыре образца имеют нормальные профили, один образец (№ 3) – дефектный. При совпадающей форме профилей четырех образцов и $P_{\text{расс}} = 2,4$ Вт максимальные значения температуры (перегрева), измеренные с помощью ИК-микропиromетра, лежат в пределах 48...75 °С.

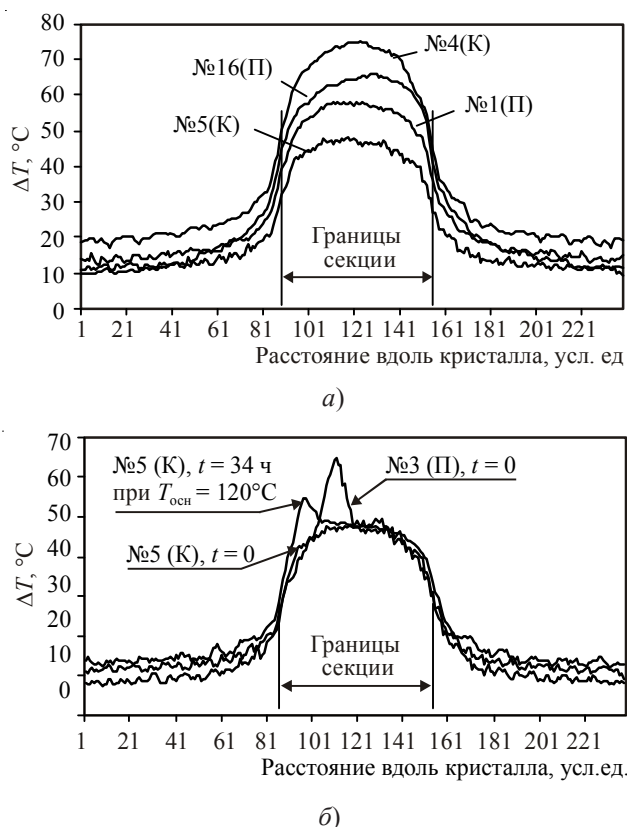


Рис. 10. Температурные профили единичной секции мощных 8-секционных AlGaAs pHEMT ($U_{\text{с.и}} = 8$ В; $J_{\text{с}} = 0,3$ А; $T_{\text{осн}} = 31...33$ °С):

а – типовые профили транзисторов из различных партий;

б – транзисторов с наличием аномалий;

П – крепление к теплоотводу пайкой; К – крепление к теплоотводу клеем

Для одного из обследованных образцов единичной секции (№ 5) на рис. 10,б представлены два профиля: начальный и после термоэлектропрогона в течение 34 ч при температуре основания 120 °С. За это время в образце проявился (или образовался) дефект, который вызвал искажение температурного профиля. Вид дефектного профиля единичной секции аналогичен температурному профилю транзистора № 2 (см. рис. 4) с разрывом затворного «пальца», но визуально и по характеристике отсечки канала дефект на «холодной» секции транзистора обнаружить не удавалось (так же, как и в секции образца № 5).

Секции с дефектными профилями отказали по причине пробоя промежутка затвор-исток через 35...40 ч термоэлектропрогона при температуре основания 120 °С. Остальные секции остались работоспособными после 180...400 ч термоэлектропрогона.

На рис. 11, 12 приведены результаты измерений и расчетов, выполненных для единичной рабочей секции на кристалле 8-секционного транзистора:

- зависимость максимальной температуры для секции транзистора от длины области тепловыделения, рассчитанная методом [3];
- значения максимальной температуры поля секции для пяти образцов кристалла, измеренные с помощью ИК-микропирометра;
- значения среднего, в пределах секции, перегрева структуры, рассчитанные методом [3] для крайних возможных значений толщины H кристалла GaAs и золотой подложки: $T_{\text{ср. max}}$ при $H = 30 \text{ мкм (GaAs)} + 30 \text{ мкм (Au)}$ и $T_{\text{ср. min}}$ при $H = 20 \text{ мкм (GaAs)} + 20 \text{ мкм (Au)}$.

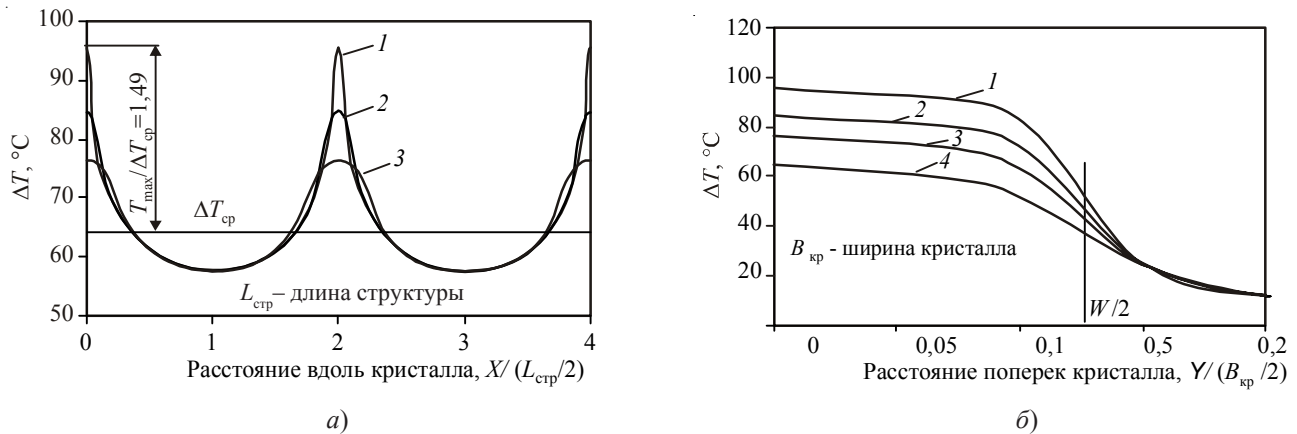


Рис. 11. Расчетные температурные профили кристалла мощного AlGaAs/GaAs pHEMT при различной длине области тепловыделения L_T :

a – продольный; b – поперечный;
 $1 - L_T = 0,5 \text{ мкм}$; $2 - L_T = 1,5 \text{ мкм}$; $3 - L_T = 3,5 \text{ мкм}$; $4 - L_T = 13 \text{ мкм}$

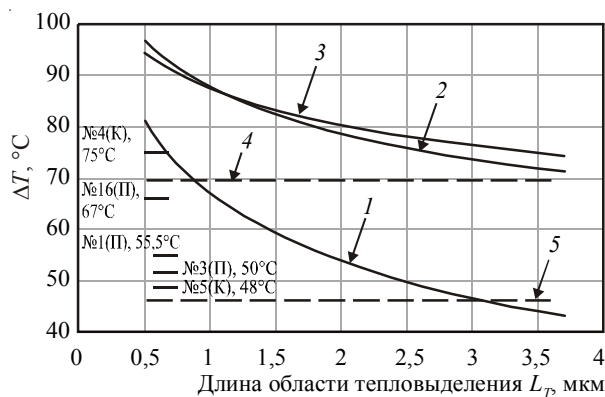


Рис. 12. Расчетные и экспериментальные значения перегрева секции мощного 8-секционного AlGaAs/GaAs pHEMT ($T_{\text{осн}} = 25 \text{ °C}$; $P_{\text{расс}} = 2,4 \text{ Вт}$):

- 1 – двумерная модель [1], $H = 30 \text{ мкм (GaAs)} + 30 \text{ мкм (Au)}$; 2 – двумерная модель [2];
- 3 – трехмерная модель, локальный перегрев [3]; $4 - \Delta T_{\text{ср. max}}$, трехмерная модель, $H = 20 \text{ мкм (GaAs)} + 20 \text{ мкм (Au)}$;
- $5 - \Delta T_{\text{ср. max}}$, трехмерная модель, $H = 40 \text{ мкм (GaAs)} + 40 \text{ мкм (Au)}$

Из представленной на рис. 11, 12 картины видно:

- что измеренные с помощью ИК-микропирометра значения температуры в центре секции лежат в пределах, обусловленных комплексом возможных причин: нестабильностью (ограниченной контролируемостью) процесса монтажа кристаллов на теплоотвод, регламентированным (допустимым) разбросом толщины и возможным (нерегламентированным) диапазоном электрофизических параметров (теплопроводности) кристаллов*;
- разброс возможных значений температуры канала значителен с точки зрения достоверности прогнозирования надежности транзисторов;
- в температурном поле проявляются дефекты кристаллов, не выявляемые штатными приемами их выходного контроля.

Ключевые транзисторы. В преобразователях постоянного напряжения источников вторичного электропитания (ИВЭП) применяются сильноточные ключевые транзисторы типа КП7114В. Такие транзисторы должны иметь малое тепловое сопротивление и высокую надежность в режиме коммутации импульсных токов в десятки – сотни ампер при напряжениях в паузе (в запертом состоянии) в десятки вольт.

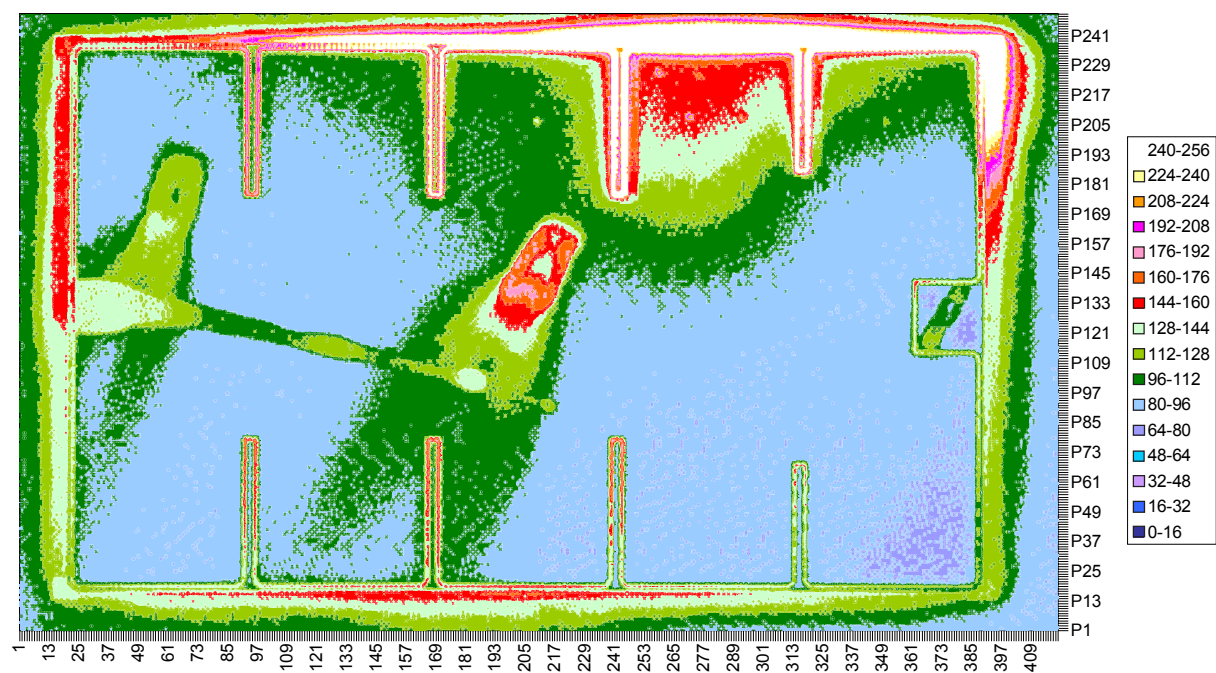
На рис. 13 приведены поля интенсивности ИК-излучения бескорпусных транзисторов КП7114В, применяемых в высоковольтной сборке для схемы инвертора высоковольтного ИВЭП. При норме $R_t \leq 1,3$ °С/Вт исследованные образцы имели R_t порядка 1,65 °С/Вт (интегральное значение теплового сопротивления, измеренное изготовителем сборки методом термочувствительного параметра). В поле ИК-излучения просматриваются области повышенной интенсивности, источниками которой являются дефекты монтажа кристаллов больших размеров (площадь основания – 7,5×4,5 мм²) пайкой на теплоотвод, а также внутренние дефекты структуры транзисторов-кристаллов.

Поля ИК-излучения транзисторов в сборке при измеренном тепловом сопротивлении порядка 1,3 °С/Вт областей с повышенной интенсивностью излучения не имеют.

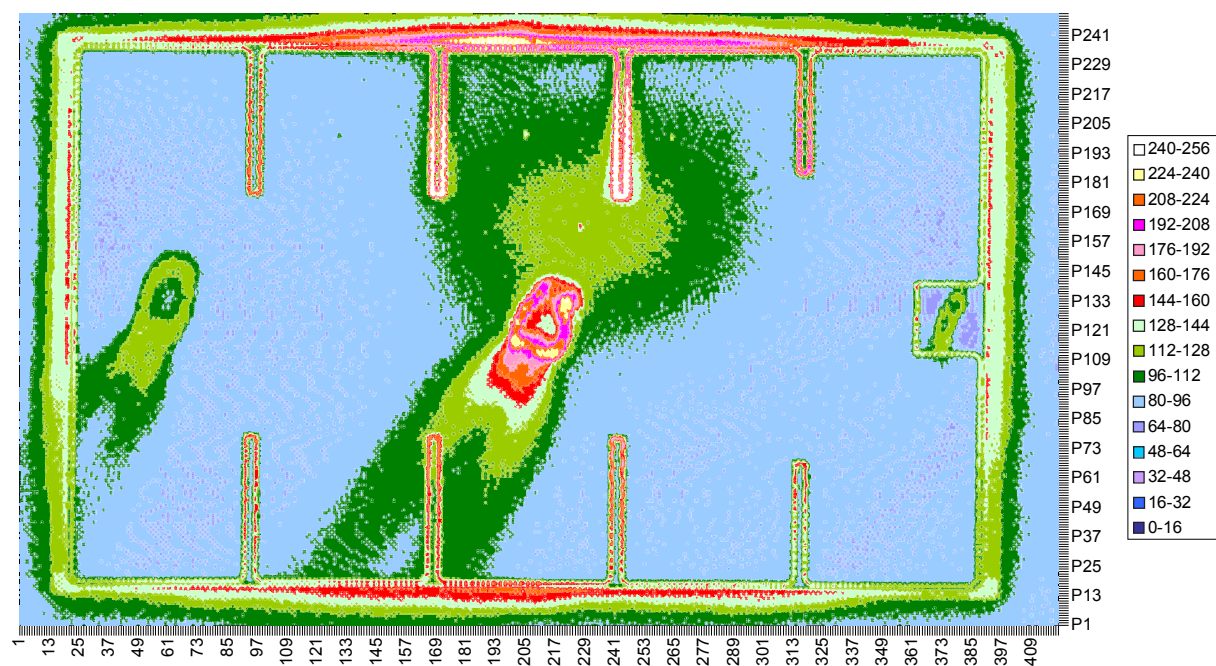
3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Приведенные выше видеоизображения и технические параметры температурных полей структур приборов иллюстрируют их информативность и полезность для выявления дефектов в структурах и диагностирования качества технологических процессов изготовления полупроводниковых активных элементов и функциональных узлов на их основе. Но технические параметры ИК-микропирометра 14КИ1, в первую очередь его пространственное разрешение и производительность, существенно ограничивают возможности эффективного влияния диагностирования на качество процессов изготовления полупроводниковых приборов, узлов и модулей. Для этого необходимо иметь информационно-измерительные устройства с гораздо более высокими техническими характеристиками [7-11].

* По разным источникам коэффициент теплопроводности GaAs в зависимости от концентрации примесей может принимать значения в диапазоне 40...58 Вт/(м·К).



а)



б)

Рис 13. Поле ИК-излучения ключевых транзисторов КП7114В ($P_{\text{расс}} = 40$ Вт):

а – транзистор 2.1, сборка ТС-1, № 2 ($R_{\text{т}} = 1,66^\circ\text{C/Вт}$);

б – транзистор 5.1, сборка ТС-1, № 5 ($R_{\text{т}} = 1,62^\circ\text{C/Вт}$)

Применительно к проблеме оценки и регламентирования рабочих и предельных режимов применения (эксплуатации) полупроводниковых модулей с точки зрения обеспечения их надежности необходимо не только отбраковывать активные элементы с дефектами, но и правильно определять температуру нормальных элементов. Правильное определение температуры является необходимым условием разработки объективных методик ускоренных испытаний и элементов, и модулей на их основе.

С помощью таких измерительных приборов, как ИК-микропирометр 14КИ1, с использованием расчетных данных можно оценивать температуру активной области транзисторных структур, в которых отсутствуют локальные микродефекты. Хотя методы расчета температуры сложных полупроводниковых структур к настоящему времени развиты неплохо [1-5], все они содержат элементы моделирования конфигурации области тепловыделения, которая локализуется в промежутке исток – сток полупроводниковой структуры (3-4 мкм). Пространственное распределение температуры в такой области ИК-микропирометром 4КИ1 с приемлемой достоверностью определить нельзя. Расчетные результаты для наиболее нагретой затворной области структуры транзисторов сравнивать не с чем. Недостатком ИК-микропирометра является также его низкая, по современным меркам, производительность при сканировании температурных полей объектов и обработке результатов.

2. За рубежом, и прежде всего в США, проблеме выявления дефектов и измерения локальной температуры активной области полупроводниковой структуры уделяют большое внимание. Свидетельством тому – публикации о достижениях в создании измерительной аппаратуры с высоким пространственным и температурным разрешением и о наблюдаемых значениях истинной температуры в областях, размеры которых сопоставимы с длиной затвора транзисторов [7-11].

Для измерения температуры используется ряд методов:

- ИК-микрорадиометрия (по интенсивности ИК-излучения);
- флюоресцентная микротермография (по температурной зависимости интенсивности флюоресцентного излучения);
- микрорамановская спектроскопия (по температурному сдвигу фонового спектра рассеяния);
- сканирующая зондовая микроскопия (по изменению сопротивления или ЭДС резисторного или термопарного зондов соответственно);
- лазерное зондирование температурного коэффициента отражения (по зависимости оптического коэффициента отражения от температуры);
- спектроскопия фототермического преломления (по зависимости коэффициента преломления от температуры).

Методы различаются по достижимой разрешающей способности (пространственной, температурной, временной), температурному диапазону, применимости к различным материалам и полупроводниковым приборам и другим характеристикам. На основе этих методов создана коммерчески доступная аппаратура.

Представляют интерес две измерительные системы:

- комбинированная термографическая система «РАМАН-ИК ТС» (ИК-микрорадиометр «Infrascop II» + рамановский спектроскоп «Renishaw»);
- сканирующий зондовый микроскоп типа «Nanoscope III».

«РАМАН-ИК ТС» позволяет производить быстрый (в режиме фотографирования со скоростью 30 кадров в секунду) обзор температурного поля кристалла МИС ИК-методом и детальный анализ обнаруженных температурных аномалий методом рамановской спектроскопии с высоким пространственным разрешением. Размеры поля быстрого обзора можно изменять с помощью сменных линз. Установка оснащена компьютерной системой, позволяющей осуществлять автоматическую градуировку измерительного устройства в реальном масштабе времени (непосредственно на исследуемом образце) и решать широкий набор задач обработки и представления результатов измерений. В табл. 2 представлены основные характеристики измерительной системы, а на рис. 14 и 15 – примеры использования системы в режиме быстрого обзора температурного поля ИС в 3-мерном изображении и в режиме детального анализа температурного поля в структуре GaN HEMT соответственно.

Таблица 2

Характеристика термографической системы «РАМАН-ИК ТС»

Характеристика	Значение					
Режим работы измерителя	ИК-радиометрия					Микрорамановская спектроскопия
Стандартный детектор	JnSb-матрица, 256x256 пикселей					–
Дополнительный (optional) детектор	JnSb-матрица, 500x500 пикселей					–
Чувствительность по температуре	0,1 °C (при 80 °C)					–
Температурный диапазон	300 °C					–
Линзы	x1/5	x1	x5	x15	x25	–
Поле зрения, мм	30,7	6,14	1,23	0,410	0,246	–
Пространственная разрешающая способность, мкм	–	21,8	7,0	2,8	2,5	0,5
		Обзор (рис.14)	Анализ (рис. 15)			

«Nanoscope III» обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность (около 0,1...0,3 мкм) при измерении локальных перегревов с одновременным контролем качества топологии полупроводниковых приборов и микросхем СВЧ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современной аппаратуры для прецизионного измерения локальных перегревов в полупроводниковых структурах позволит предотвратить попадание потенциально ненадежных приборов и МИС в сборку СВЧ-модулей.

Работа выполнена при поддержке руководства ФГУП «НПП «Исток».

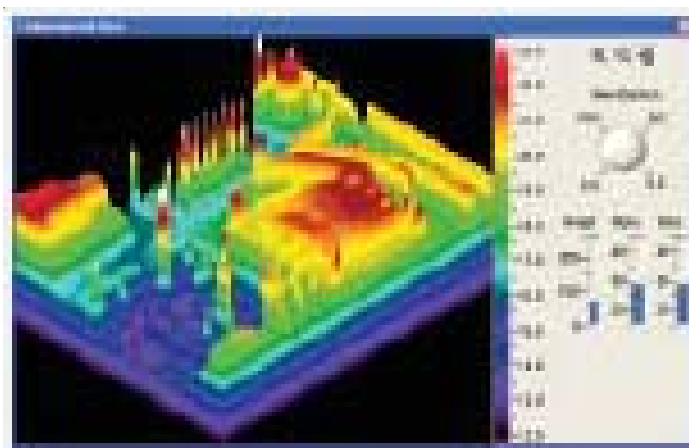


Рис. 14. Пример применения термографической системы «РАМАН-ИК ТС»
в режиме обзора
(температурное поле интегральной микросхемы)

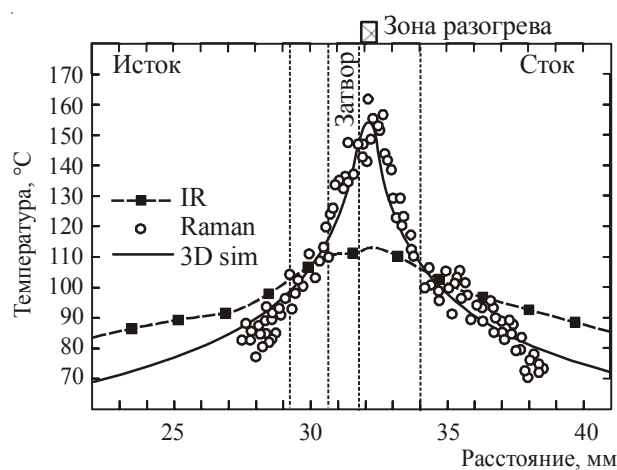


Рис. 15. Пример применения системы «РАМАН-ИК ТС» в режиме анализа
(температурные профили области тепловыделения в AlGaIn/GaN HFET, $P_{\text{расс}} = 1$ Вт):
IR – ИК-измерения; Raman – рамановская спектроскопия;
3D sim – трехмерное моделирование

Авторы выражают благодарность специалистам разрабатывающих подразделений за предоставленные для исследований образцы и интерес, проявленный к результатам исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fukui H. Thermal resistance of GaAs field-effect transistors // Intern. Electron Devices Meeting Tech. Digest. – 1980. – P. 118-121.
2. Cooke H.F. Precise technique finds FET thermal resistance // Microwave & RF. – Aug. 1986. – P. 85-87.

3. *Linsted R.D., Surty R.J.* Steady state junction temperatures of semiconductor chips // IEEE Trans. on Electron Devices. – January 1972. – Vol. ED-19, No 1. – P. 41-44.
4. *Захаров А.Л., Асвадурова Е.И.* Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов.
5. *Дудинов К.В., Ипполитов В.М., Паиковский А.Б.* Оценка размеров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах с субмикронным затвором // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2006. – № 2(488). – С. 5-7.
6. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. ОСТ 11 0944-96.
7. Quantative measurement of channal temperature of GaAs-devices for reliabl life-time prediction / *J.A. Mittereder et al.* // IEEE Transaction on Reliability. – 2004. – Vol. 51, No 4. – P. 482-485.
8. Measurement of temperature in active high-power AlGaIn/GaN HFETs using Raman spectroscopy / *M. Kuball et al.* // IEEE Electron Device Letters &. – 2003. – Vol. 23, No 1. – P. 709.
9. Device temperature measurement of higly biased AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors / *Nactery Saigekawa et al.* // Japan Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 42, part 1, No 4B. – P. 2245-2249.
10. Combined infrared and raman temperature measurements of device structures / *A. Sarua et al.* // CS Mantech Conference, April 24-27, 2006, Vancouver, British Cjambia, Canada. – P. 179-182.
11. Thermal imaging and methods of measurements of electronic materials and devices / *J. Kolzer et al.* // Microelectronic Engineering. – 1996. – Vol. 31 . – P. 251-270.

Статья поступила 10 апреля 2008 г.

≡ НОВЫЕ КНИГИ ≡

НИНГ-ЧЕНГ ЛИ. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2006. – 392 с., ил., табл.

Книга посвящена технологическим инновациям в области монтажа и производства электронных компонентов. Подробно описаны изменения в процессах пайки оплавлением, их влияние на механизмы появления дефектов и, следовательно, методики поиска повреждений во время этих технологических процессов на различных типах плат. Она предназначена для инженеров-технологов по производству электроники, инженеров-конструкторов и студентов технологических специальностей. В книге представлены обширные знания, которые описывают и объясняют новые технологии для инженеров, а также помогают повысить квалификацию производственного персонала.

УДК 621.372.54

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПОДАВЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ НА ЧАСТОТАХ ВБЛИЗИ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ

И. Н. Дутышев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработаны методики расчета и топологии фильтров с подавлением сигнала вблизи полосы пропускания. Приведены топология, расчетная и экспериментальная характеристики фильтра на центральную частоту 2 ГГц.

Methods of calculation and topologies for filters with signal suppression close to passband have been developed. Topologies, calculation and experimental characteristics of the filter are given for 2 GHz center frequency.

Для некоторых малогабаритных радиотехнических систем применение фильтров со специальными параметрами может дать существенный выигрыш в габаритных размерах СВЧ-трактов. Если требуется подавление лишь отдельных частот (сигналов гетеродинов в передающих трактах, побочных сигналов приема в приемных трактах), взамен многозвенных полосовых фильтров, имеющих большие габариты, целесообразно использовать простые малогабаритные фильтры со специальными параметрами, обеспечивающими заданные характеристики.

Для реализации фильтра с подавлением сигнала на частоте, близкой к полосе пропускания, его эквивалентная схема должна содержать хотя бы один режектор, настроенный на необходимую частоту. Добавление режектора к полосовому фильтру как отдельного элемента приводит к увеличению размера фильтра, кроме того, из-за низкой добротности режектора может в значительной мере ухудшиться неравномерность в полосе пропускания полосового фильтра. Особенно это заметно при режекции на частотах, близких к полосе пропускания фильтра. Рассмотрим вариант, когда режектирование сигнала осуществляется элементами полосового фильтра. С этой целью подходят структуры фильтров на полуволновых резонаторах с автотрансформаторным возбуждением первого и последнего резонаторов. В качестве режекторов здесь используются отрезки микрополосковых линий первого и последнего резонаторов длиной от точки подключения нагрузки до свободного конца резонатора. Если длина режектора меньше половины длины резонатора фильтра, т. е. $l_{\text{реж}} < \lambda/4$, то происходит режектирование сигнала выше полос пропускания фильтра. Если длина режектора больше половины длины резонатора фильтра, т. е. $l_{\text{реж}} > \lambda/4$, то происходит режектирование сигнала ниже полос пропускания фильтра. На рис.1-3 показаны топологии фильтров с автотрансформаторным возбуждением на полуволновых резонаторах с режекцией частот выше полосы пропускания, ниже полосы пропускания и выше и ниже полосы пропускания соответственно.

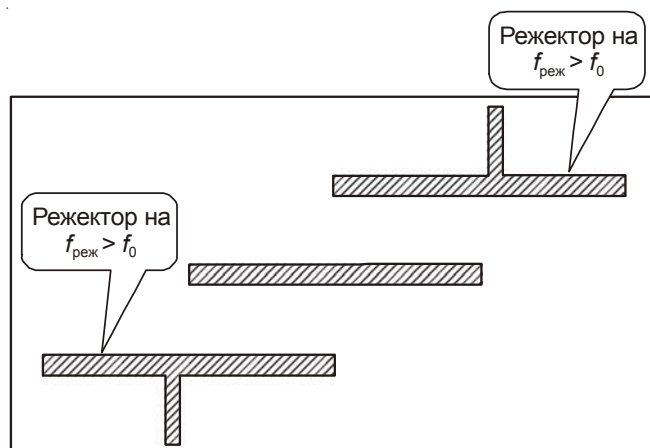


Рис. 1. Топология фильтра с автотрансформаторным возбуждением на полуволновых резонаторах с режекцией частот выше полосы пропускания

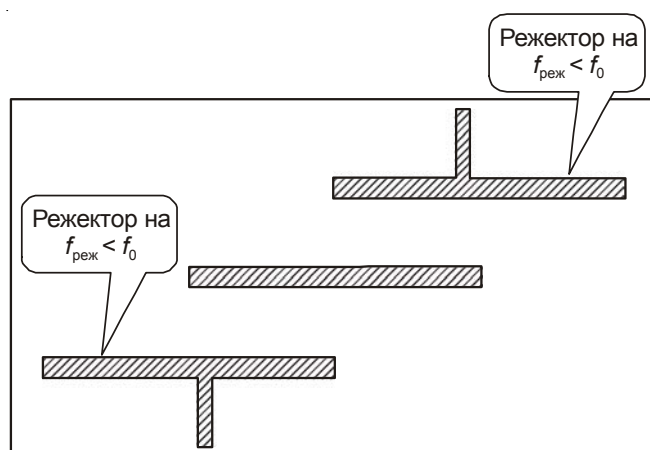


Рис. 2. Топология фильтра с автотрансформаторным возбуждением на полуволновых резонаторах с режекцией частот ниже полосы пропускания

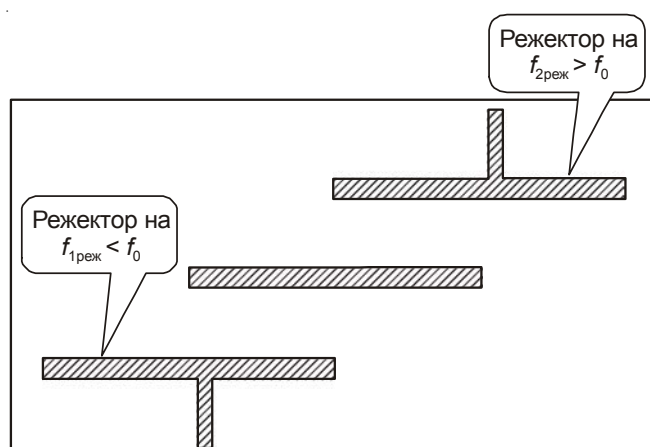


Рис. 3. Топология фильтра с автотрансформаторным возбуждением на полуволновых резонаторах с режекцией частот выше и ниже полосы пропускания

Расчет фильтра с автотрансформаторным возбуждением ведется по формулам из [1], [2]. Длина режектора определяется из выражения:

$$l_{\text{реж}} = \frac{\pi \nu_0}{2\omega_{\text{реж}}\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}.$$

В качестве примера приведем топологию, расчетную и экспериментальную характеристики двухзвенного малогабаритного фильтра с автотрансформаторным включением нагрузки и режекцией частот выше и ниже полосы пропускания. Для уменьшения габаритов в фильтре используются шпилечные резонаторы.

Расчетные параметры фильтра: центральная частота – 2 ГГц, полоса пропускания – 7%, частоты режекции – 1,77 и 2,3 ГГц.

На рис. 4 приведена фотография экспериментального образца фильтра. Фильтр выполнен на подложке ТММ10 толщиной 0,5 мм. Размеры подложки – 10×15 мм. Расчетная амплитудно-частотная характеристика фильтра и экспериментальные измерения приведены на рис. 5. Потери в полосе пропускания – 1,8 дБ. Подавление сигнала на частотах режекции 1,79 и 2,35 ГГц – 46 и 48 дБ соответственно. Полоса пропускания по уровню -1 дБ – около 150 МГц.

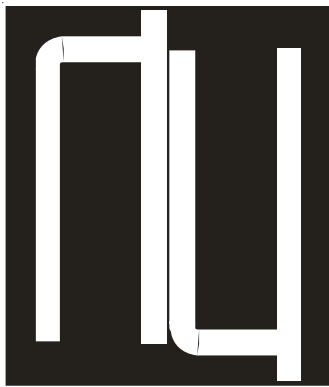


Рис. 4. Экспериментальный образец фильтра с автотрансформаторным включением нагрузки и режекцией частот выше и ниже полосы пропускания

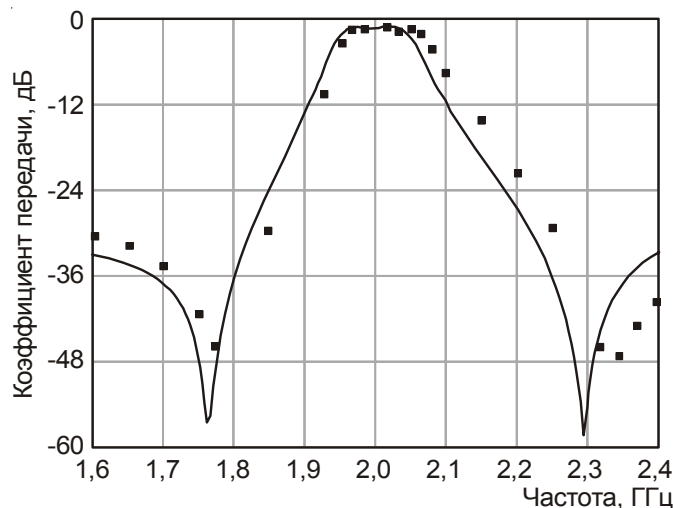


Рис. 5. Расчетная амплитудно-частотная характеристика фильтра и результаты измерений

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Ханзел. Справочник по расчету фильтров / Пер. с англ. В.А. Старостина; под ред. Е.А. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974.
2. Маттей Д.Л., Янг Л.Я., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1972.

Статья поступила 25 марта 2008 г.

УДК 621.372.54

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ СВЧ-ФИЛЬТРЫ

И. Н. Дутышев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработаны топологии сверхминиатюрных микрополосковых фильтров на резонансных отрезках и полусосредоточенных элементах. Приведены топологии и характеристики экспериментальных образцов фильтров.

Topologies of superminiature microstrip filters on resonance segments and semilumped elements have been developed. Topologies and characteristics of experimental filter samples are given.

При разработке современных сверхминиатюрных радиотехнических систем предъявляются высокие требования на размеры отдельных СВЧ-узлов и блоков. Применение современной активной комплектации (многофункциональных монокристаллических микросхем) позволяет в значительной мере улучшить массогабаритные характеристики всей системы в целом. Для таких систем задача уменьшения габаритов и улучшения технологичности пассивных узлов, в частности фильтров, становится весьма актуальной. В данной работе представлены разработанные автором топологии, методики их расчета и приведены экспериментальные характеристики сверхминиатюрных микрополосковых фильтров.

Габариты фильтра зависят от центральной частоты, диэлектрической проницаемости подложки, числа звеньев и топологии. При разработке фильтра необходимо применять подложки с высокой диэлектрической проницаемостью. При проектировании фильтра с минимальными габаритами прежде всего следует определиться в выборе типа фильтра. Для этого рассмотрим некоторые известные типы фильтров, их недостатки и преимущества.

Фильтр на резонансных отрезках. Длина резонаторов фильтра должна быть минимальной. В связи с этим выбираем фильтры с резонаторами длиной $\lambda/4$, короткозамкнутые на землю с одной стороны и с холостым ходом на конце – с другой. Топология фильтра считается оптимальной, если площадь подложки используется в полной мере. Резонаторы могут выполняться в виде спирали или меандра с высоким волновым сопротивлением. Включение генератора и нагрузки в фильтр необходимо осуществлять через автотрансформаторную связь, чтобы исключить трансформаторы на входе и выходе фильтра. Основным недостатком таких фильтров – большие потери в полосе пропускания, вызванные высоким волновым сопротивлением резонаторов и невозможностью получить большие подавления при больших отстройках от центральной частоты из-за перекрестных паразитных связей, которые возникают между витками или элементами меандра резонаторов. Однако этот недостаток может быть вполне приемлем для некоторых трактов радиотехнических устройств.

Автором разработан трехзвенный фильтр на частоту 1,73 ГГц с полосой пропускания около 8 %. Резонаторы фильтра длиной $\lambda/4$ имеют форму меандра, волновое сопротивление состав-

ляет 80 Ом. Применено автотрансформаторное включение генератора и нагрузки. АЧХ фильтра приведена на рис. 1.

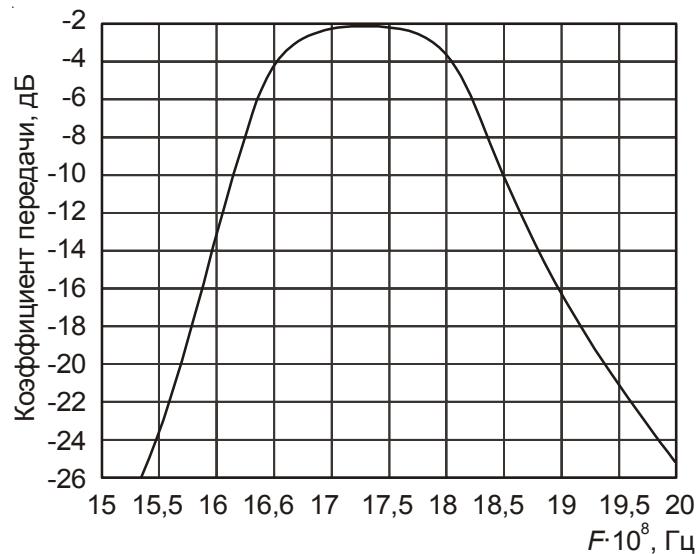


Рис. 1. АЧХ фильтра на резонансных отрезках

Фильтр имеет потери в полосе пропускания приблизительно 2,5 дБ, занимает площадь $5,7 \times 6,5$ мм² на подложке из RO3010 толщиной 0,64 мм с диэлектрической проницаемостью 10,2. Расчет резонаторов фильтра производился по методике, разработанной автором для фильтров с короткозамкнутыми шпилечными резонаторами, величина зазоров связей уточнялась экспериментально. Точность выхода на частоту экспериментального образца составила 7%. Фотография экспериментального образца фильтра приведена на рис. 2.



Рис. 2. Экспериментальный образец фильтра на резонансных отрезках

В литературе встречаются малогабаритные микрополосковые фильтры. Например, в [2] приведена топология двухзвенного фильтра с резонаторами длиной $\lambda/2$, свернутыми в спираль. Волновое сопротивление резонаторов – около 150 Ом. Фильтр выполнен на частоту 1,69 ГГц с полосой пропускания приблизительно 10 %, потери в полосе пропускания – 3,2 дБ; занимает площадь $5,5 \times 6,2$ мм² на подложке из RO3010 толщиной 0,64 мм с диэлектрической проницаемостью 10,2. Данный фильтр отличается от разработанного автором большими потерями из-за

высокого волнового сопротивления резонаторов, большей площадью на один резонатор из-за применения резонаторов длиной $\lambda/2$ и более сложной методикой расчета.

Фильтр на полусосредоточенных элементах. Резонаторы фильтра состоят из индуктивностей, образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением, и емкостей с низким волновым сопротивлением. Соседние резонаторы расположены параллельно относительно друг друга. Длина каждого элемента фильтра меньше четверти длины волны на средней частоте полосы пропускания. Один конец индуктивности короткозамкнут, а другой – соединен с емкостью. Связь между резонаторами осуществляется за счет краевых полей между емкостным и индуктивным отрезками соседних резонаторов. Длина области связи равна сумме длин индуктивной и емкостной частей резонатора. Ширина зазора в области связи определяется по зависимости из [3]. Нагрузка и генератор подключены к части крайних индуктивностей для того, чтобы исключить трансформаторы. Таким образом, топология фильтра получается оптимальной, с использованием всей площади подложки.

Автором разработан трехзвенный фильтр на частоту 1,6 ГГц с полосой пропускания около 10%. Фильтр имеет потери в полосе пропускания приблизительно 0,5 дБ, занимает площадь 8×9 мм² на подложке из RO3010 толщиной 0,2 мм с диэлектрической проницаемостью 10,2. Индуктивные отрезки резонаторов имеют ширину 0,2 мм, емкостные – 3,5 мм. Расчет резонаторов фильтра производился по методике, разработанной в [1] для фильтров на полусосредоточенных элементах с емкостными связями, величина зазоров связей уточнялась экспериментально. Точность выхода на частоту экспериментального образца составила 8 %. АЧХ фильтра приведена на рис. 3.

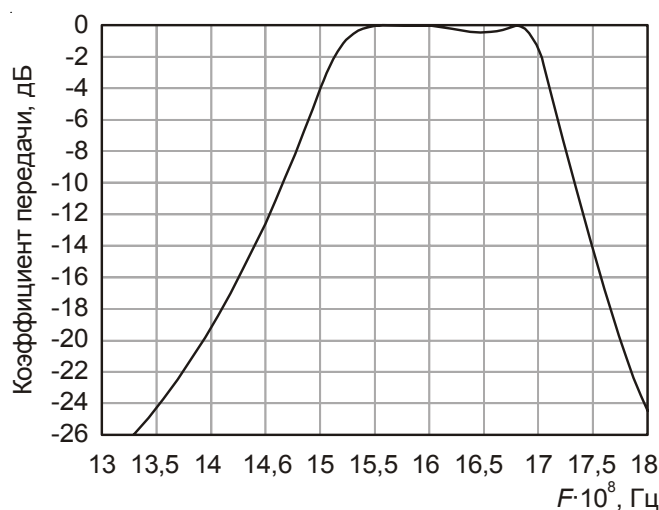


Рис. 3. АЧХ фильтра на полусосредоточенных элементах

В отличие от предыдущей конструкции, данный фильтр имеет малые потери в полосе пропускания (0,5 дБ по сравнению с 2,5 дБ), кроме того, крутизна высокочастотного склона фильтра выше (на 100 МГц – 25 дБ). Фильтр имеет существенно большее подавление сигнала на частотах второй гармоники и не имеет паразитной полосы пропускания по третьей гармонике. Однако этот фильтр по сравнению с предыдущим имеет большие размеры (8×9 мм по сравнению с $5,7 \times 6,5$ мм). Фотография экспериментального образца фильтра приведена на рис. 4.

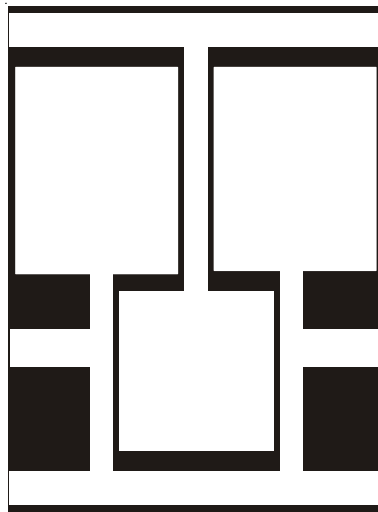


Рис. 4. Экспериментальный образец фильтра на полусосредоточенных элементах

ЛИТЕРАТУРА

1. Дутышев И.Н., Левитин В.И. Полосовые фильтры дециметрового диапазона на гибридных интегральных микросхемах // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 2 (326).
2. Kaixue Ma, Member, IEEE, Kiat Seng Yeo, Jianguo Ma, Senior Member, IEEE, and Manh Anh Do, Senior Member, IEEE. An Ultra-Compact Hairpin Band Pass Filter With Additional Zero Points. IEE Microwave And Wireless Components Letters, Vol. 17, No. 4, April, 2007.
3. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазепова, В.П. Мещанов и др.; под ред. А. Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979.

Статья поступила 25 марта 2008 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

МАЙК ДЖЮД, КЕЙТ БРИНДЛИ. **Пайка при сборке электронных модулей.** – М.: Издательский Дом «Технологии», 2006. – 416 с., ил., табл.

Эта книга написана с целью обеспечить полезными советами инженерно-технический персонал, занятый на практике в операциях сборки электронной техники, и будет интересна для широкого круга читателей, работающих в отраслевых секторах нашей промышленности

УДК 621.372.54

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

И. Н. Дутышев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработаны сверхширокополосные фильтры с использованием ответвителей, делителей мощности и трансформаторов сопротивлений в качестве резонаторов. Приведены экспериментальные характеристики и топологии сверхширокополосных фильтров.

Superwideband filters using couplers, power dividers and resistance transformers as resonators have been developed. Experimental characteristics and topologies of superwideband filters are given.

Фильтры с большими полосами пропускания могут быть реализованы на широкополосных резонансных элементах. При этом в качестве широкополосных элементов можно использовать трансформаторы сопротивлений, делители мощности и ответвители. На рис. 1-4 приводятся АЧХ некоторых типов перечисленных элементов.

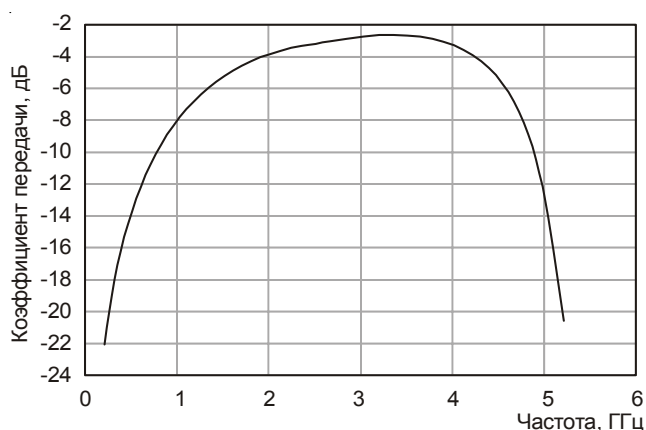


Рис. 1. АЧХ тандемного делителя мощности

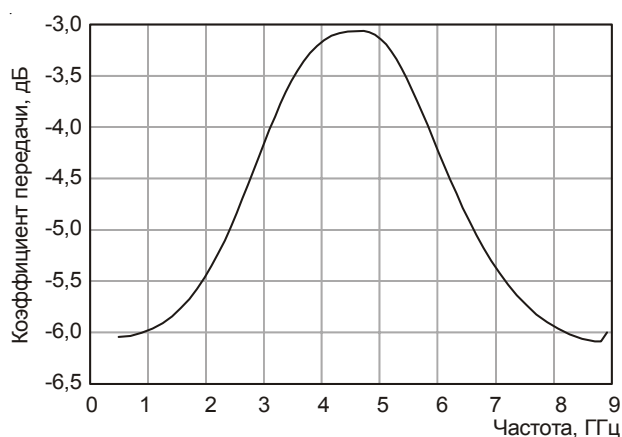


Рис. 2. АЧХ шлейфного делителя мощности

Рис. 3. АЧХ трансформатора сопротивлений 50/5 Ом

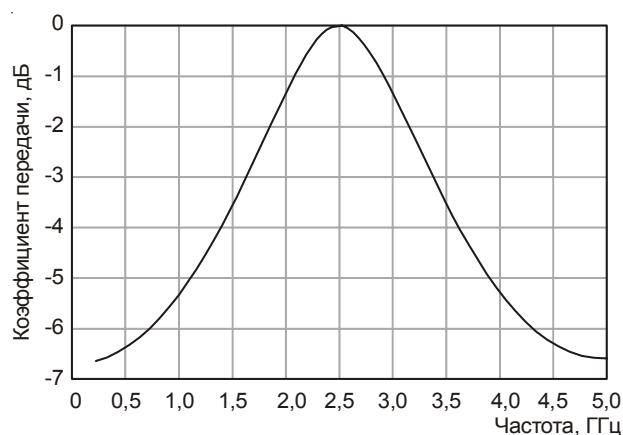
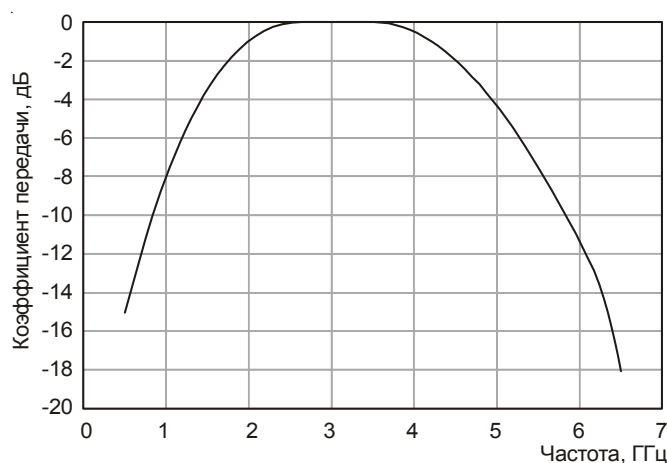


Рис. 4. АЧХ ответвителя на связанных линиях с сильной связью



Тандемный делитель мощности на центральную частоту 3 ГГц имеет полосу пропускания по уровню 3 дБ порядка 3,3 ГГц. Шлейфный делитель имеет полосу пропускания от 1 до 8 ГГц. Трансформатор сопротивлений 50/5 Ом на центральную частоту 2,5 ГГц – 1,5 ГГц. Ответвитель на связанных линиях с сильной связью на центральную частоту 3 ГГц – 3 ГГц. Топологии приведенных элементов показаны на рис. 5-8.

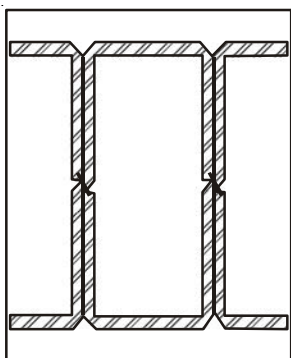


Рис. 5. Топология тандемного делителя

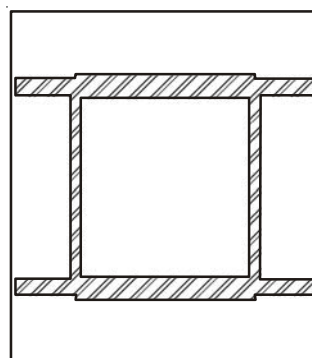


Рис. 6. Топология шлейфного делителя

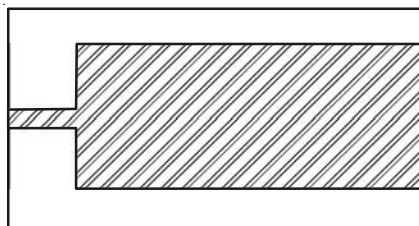


Рис. 7. Топология трансформатора сопротивлений

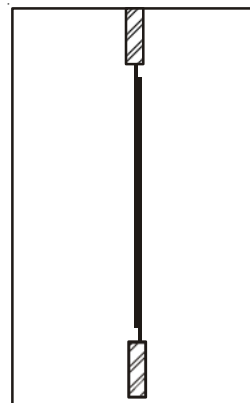


Рис. 8. Топология ответвителя с сильной связью

При каскадном соединении таких элементов можно получить сверхширокополосный фильтр. Полоса пропускания этого фильтра регулируется путем использования реактивностей (емкостных или индуктивных отрезков микрополосковых линий) в качестве соединителей.

Приведем результаты расчета и экспериментальные данные для вариантов фильтров на ответвителях с сильной связью, шлейфных и тандемных делителях и трансформаторах сопротивлений.

Автором разработан сверхширокополосный фильтр на ответвителях с сильной связью. Фильтр имеет шесть резонаторов. Полоса пропускания – от 2 до 8 ГГц. Фильтр выполнен на подложке из поликора толщиной 1 мм. Размеры подложки – 38×12 мм. Топология фильтра приведена на рис. 9, АЧХ – на рис. 10.

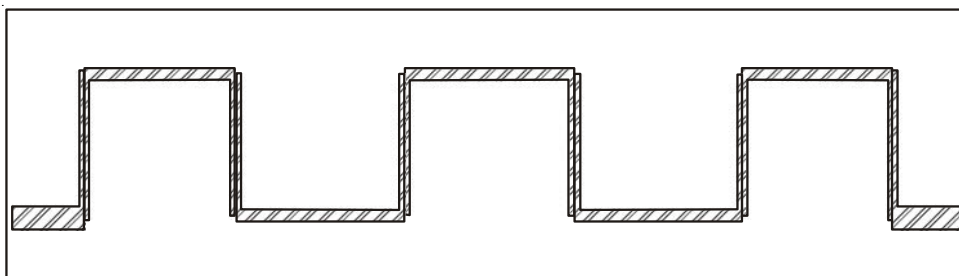


Рис. 9. Топология шестизвенного сверхширокополосного фильтра на ответвителях с сильной связью

Неравномерность в полосе пропускания экспериментального образца фильтра составляет 1,5 дБ. Потери в полосе пропускания – не более 1 дБ. Подавление сигнала при отстройке от края полосы пропускания на 300 МГц – порядка 25 дБ. В качестве сравнения приведем параметры сверхширокополосного фильтра, известного из литературы [1]: полоса пропускания – 3,1...10,6 ГГц, вносимые потери – 0,5 дБ, загораживание – 18 дБ.

Фильтр на четырех шлейфных делителях имеет параметры: полоса пропускания – 3,2...6 ГГц, неравномерность в полосе пропускания – менее 2 дБ, потери – 0,7 дБ, подложка – из материала RO3010 толщиной 0,64 мм, размеры подложки – 16×20 мм. Дополнительные режекторы,

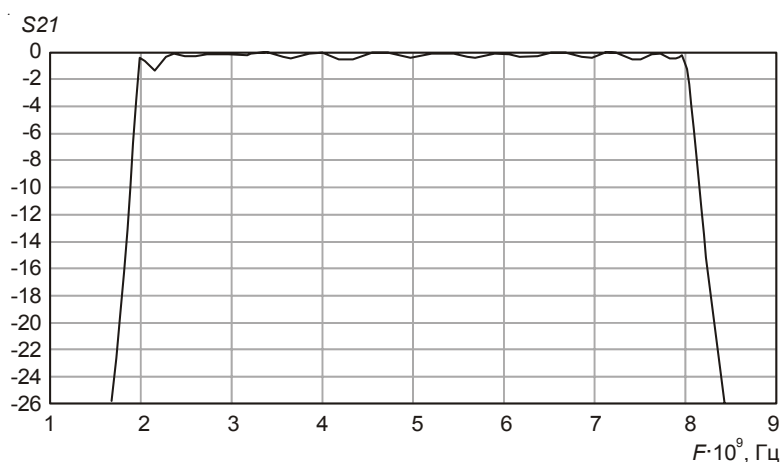


Рис. 10. АЧХ шестизвенного сверхширокополосного фильтра на ответвителях с сильной связью

включенные вместо резисторов нагрузки, обеспечивают дополнительное улучшение высокочастотного склона фильтра. Крутизна высокочастотного склона составляет 25 дБ на 200 МГц. АЧХ фильтра приведена на рис. 11, топология фильтра – на рис. 12.

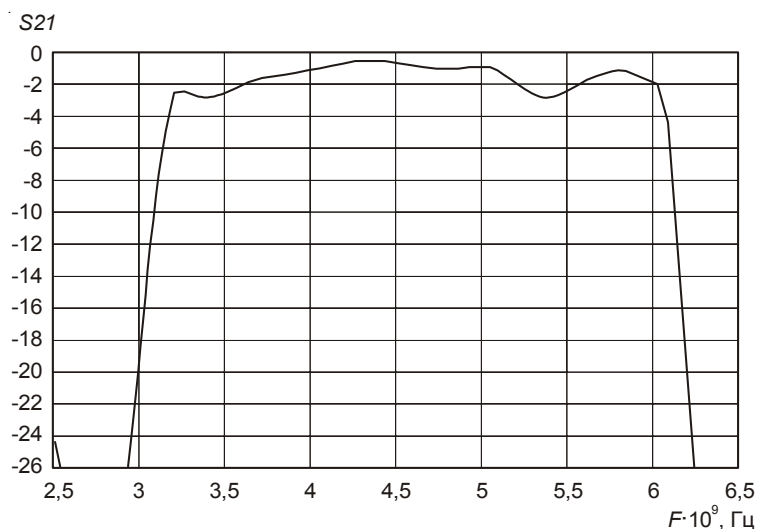


Рис. 11. АЧХ четырехзвенного фильтра на шлейфных делителях

Фильтр на двух тандемных делителях имеет параметры: полоса пропускания – 1,2...4,7 ГГц, неравномерность в полосе пропускания – менее 1 дБ, потери – 0,5 дБ, подложка – из материала RO3010 толщиной 0,64 мм, размеры подложки – 10×12 мм. Дополнительные режекторы, включенные вместо резистора нагрузки, обеспечивают дополнительное улучшение высокочастотного склона фильтра. Крутизна высокочастотного склона составляет 20 дБ на 350 МГц. АЧХ фильтра приведена на рис. 13, топология фильтра – на рис. 14.

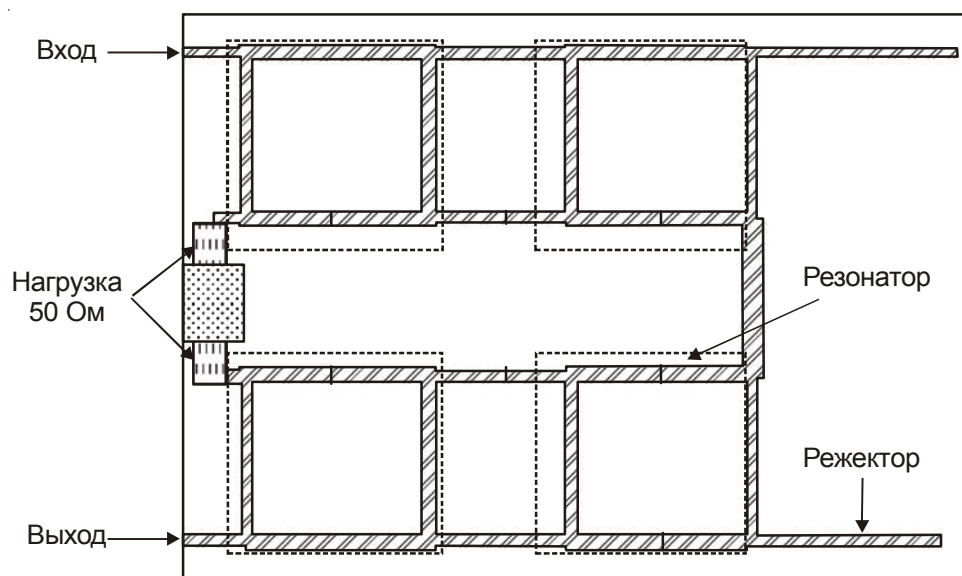


Рис. 12. Топология четырехзвенного фильтра на шлейфных делителях

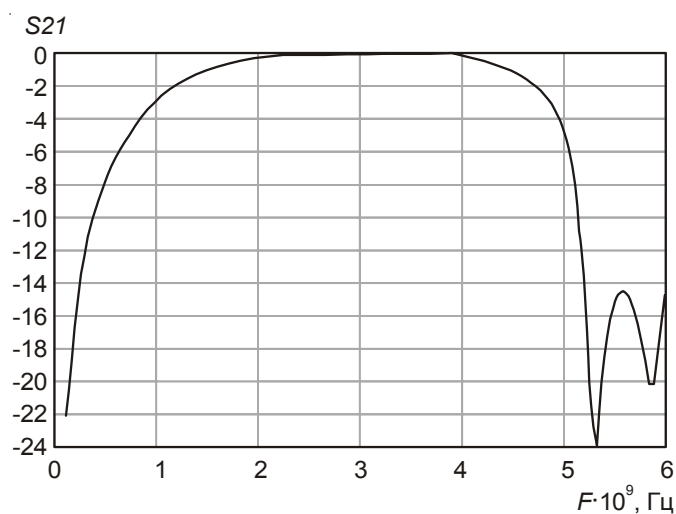


Рис. 13. АЧХ двухзвенного фильтра на тандемных делителях

Фильтр на трансформаторах сопротивлений имеет параметры: полоса пропускания – 3,0...4,3 ГГц, неравномерность в полосе пропускания – менее 1 дБ, потери – 0,8 дБ, подложка – из материала RO3010 толщиной 0,64 мм, размеры подложки – 20×46 мм. АЧХ фильтра приведена на рис. 15, топология фильтра – на рис. 16.

Разработанные сверхширокополосные фильтры (одна – четыре октавы) на основе ответвителей, делителей мощности и трансформаторов сопротивлений могут применяться в приемных и передающих трактах сверхширокополосных радиотехнических систем. К примеру, фильтр

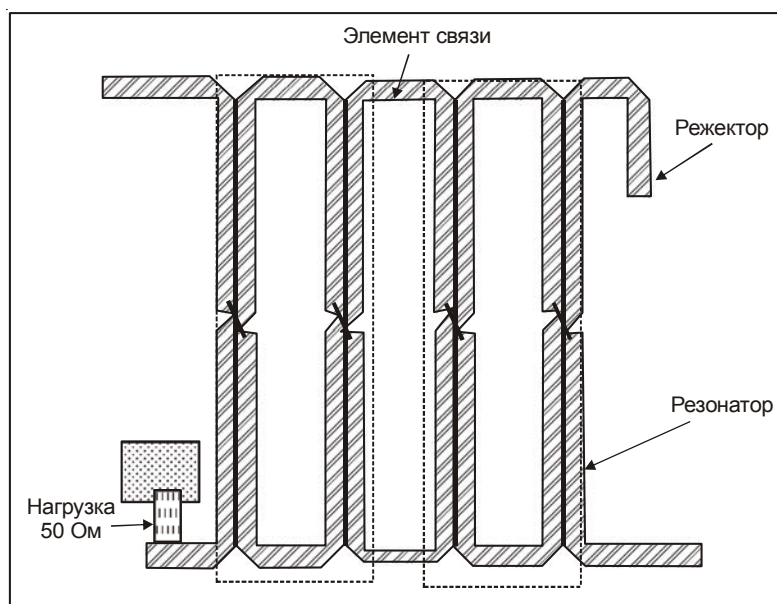


Рис. 14. Топология двухзвенного фильтра на тандемных делителях

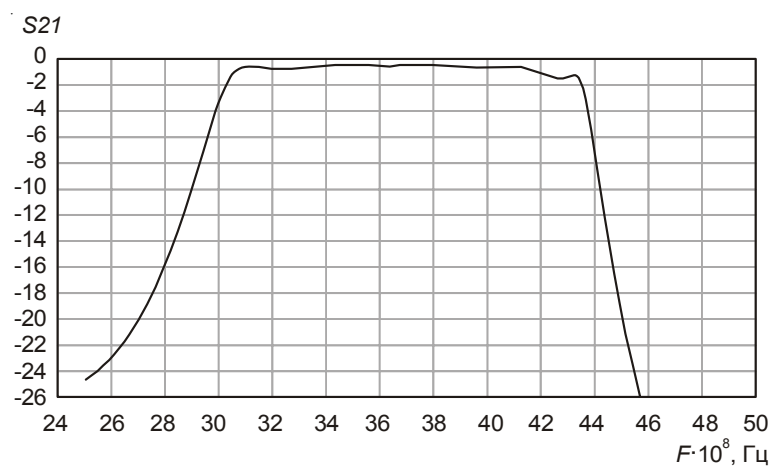


Рис. 15. АЧХ фильтра на трансформаторах сопротивлений

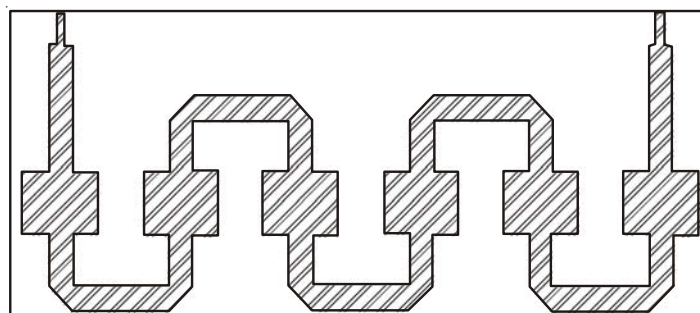


Рис. 16. Топология фильтра на трансформаторах сопротивлений

на основе ответвителей имеет полосу пропускания от 2 до 8 ГГц, подавление сигнала при отстройке от края полосы пропускания на 300 МГц – 25 дБ, габариты фильтра – 38×12 мм. Недостатком широкополосных фильтров является наличие дополнительных полос пропускания при значительной отстройке от рабочей полосы. Фильтры, выполненные на основе тандемных делителей, шлейфных ответвителей и трансформаторов сопротивлений, целесообразно применять совместно с фильтрами нижних частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Planar ultra-wideband bandpass filter using edge coupled microstrip lines and stepped impedance open stub / P.K. Singh et al. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2007. – Vol.17, No 9. – P. 649-651.

Статья поступила 25 марта 2008 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГУСЕВ А. И. **Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.** – 2-е изд., исп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 416 с.

Систематически излагается современное состояние исследований нанокристаллических материалов. Обобщены экспериментальные результаты по влиянию нанокристаллического состояния на микроструктуру и механические, теплофизические, оптические, магнитные свойства металлов, сплавов и твердофазных соединений. Рассмотрены основные методы получения изолированных наночастиц, ультрадисперсных порошков и компактных нанокристаллических материалов. Подробно обсуждены размерные эффекты в изолированных наночастицах и компактных нанокристаллических материалах, показана важная роль границ раздела в формировании структуры и свойств компактных наноматериалов. Проведен анализ модельных представлений, объясняющих особенности строения и аномальные свойства веществ в нанокристаллическом состоянии.

Для специалистов в области физики твердого тела, физической химии, химии твердого тела, материаловедения, для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 546.26:621.385.6.002

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО CVD-АЛМАЗА С ЦЕЛЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. П. Духновский, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Фёдоров

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

О. Ю. Кудряшов, И. А. Леонтьев

ООО «ТВИНН», г. Москва

Разработан процесс термической обработки пластин из поликристаллического CVD-алмаза, основанный на взаимодействии алмаза (углерода) с железом при высокой температуре. Предлагаемый технологический процесс может быть использован для шлифовки и формирования плоской гладкой поверхности алмаза.

A process of thermal treatment of wafers made of polycrystal CVD-diamond based on interconnection of diamond (carbon) with iron at high temperature has been developed. The proposed technological process can be used for grinding and forming diamond smooth surface.

1. ВВЕДЕНИЕ

Поликристаллический CVD-алмаз является перспективным материалом для изготовления теплоотводов в мощных приборах, в том числе СВЧ-приборах и лазерах.

Пластины поликристаллического CVD-алмаза выращиваются методом химического осаждения из газовой смеси метана и водорода на кремниевую пластину при воздействии СВЧ-разряда. Они представляют собой диски диаметром от 50 до 100 мм и толщиной 0,3...2,0 мм. Шероховатость ростовой поверхности – 10...50 мкм, обратная сторона повторяет топологию кремниевой пластины.

Для использования алмазных пластин в качестве теплоотводов необходимо придать им нужную форму и обеспечить необходимую шероховатость поверхности. Так как алмаз самый твердый из всех известных материалов, то его обработка является сложным и трудоемким процессом.

В связи с этим были проанализированы методы обработки поверхности пластин из поликристаллического алмаза.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Известны следующие методы обработки поверхности пластин из поликристаллического алмаза:

- 1) шлифовка и полировка алмазными порошками [1];
- 2) интенсивный нагрев поверхности и испарение материала при воздействии коротким импульсом лазерного излучения [2];
- 3) травление в расплавах солей и щелочей, сжигание в окислительных средах [3];
- 4) термическая обработка в металлах при высоких температурах [4].

Первые три способа имеют ряд существенных недостатков: большая длительность обработки и малая скорость удаления материала ($0,01 \dots 1$ мкм/ч).

В данной работе был исследован и оптимизирован процесс придания пластинам из поликристаллического алмаза гладкой поверхности, основанный на явлении взаимодействия и интенсивного растворения алмаза металлами при высокой температуре.

3. ПРОЦЕСС ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО CVD-АЛМАЗА

Практический интерес могут представлять металлы, у которых температура образования эвтектики с углеродом находится ниже 1200°C (железо, церий, лантан и др.). Выше этой температуры алмаз интенсивно переходит в графит и свойства его начинают изменяться [3].

На двойных диаграммах состояния металл – углерод наблюдается эвтектическое образование жидкой фазы при температуре, которая значительно ниже температуры плавления металла. При этом происходит интенсивное взаимное растворение металла и углерода.

В данной работе была выбрана система железо – углерод. На рис. 1 представлен фрагмент диаграммы состояния железо – углерод [5].

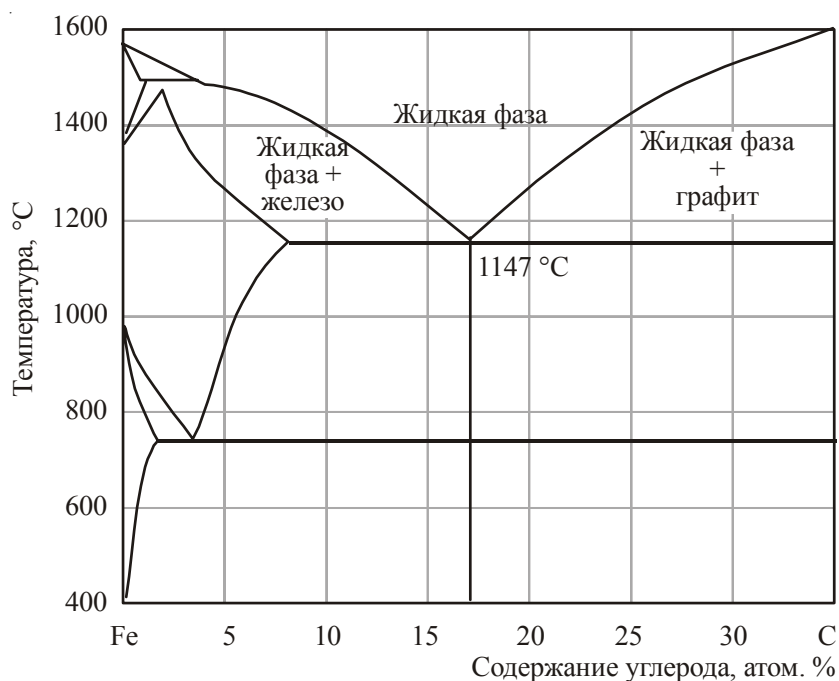


Рис. 1. Фрагмент диаграммы железо – углерод

По-видимому, механизм растворения алмаза железом протекает через стадию перехода алмаза в графит с последующим его взаимодействием с железом.

Для процесса обработки были подготовлены образцы из поликристаллического алмаза размерами 7х7 мм и толщиной 400...700 мкм с шероховатостью ростовой поверхности 30...70 мкм и пластины из железа (сталь 20) размерами 25х25х2,5 мм, предварительно отожженные при 900 °С и отшлифованные до шероховатости 0,32 мкм.

Процесс термообработки проводился в трубчатой ламповой печи, схема которой показана на рис. 2.

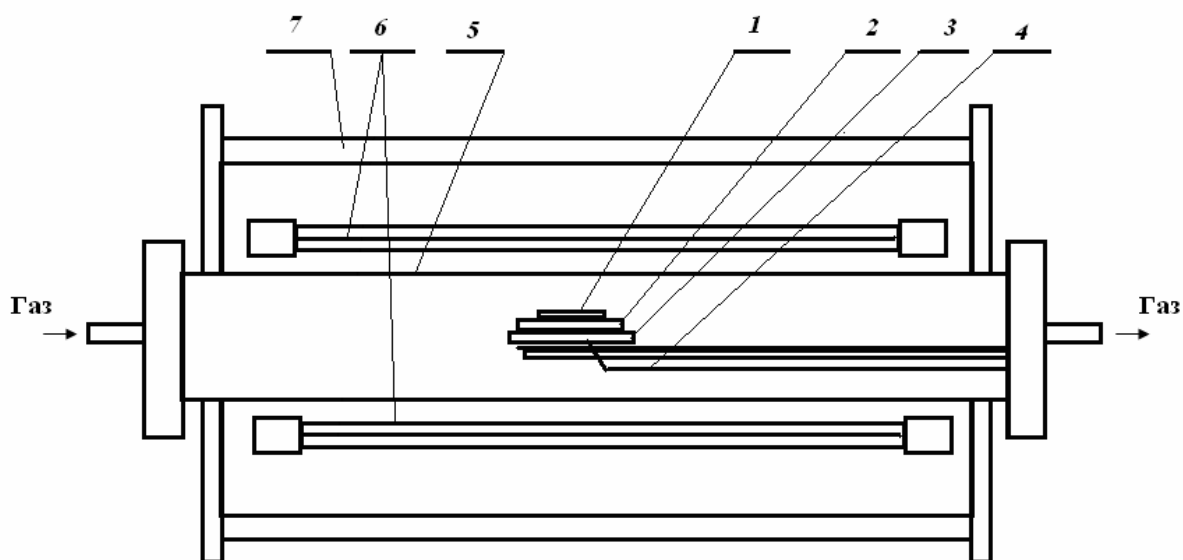


Рис. 2. Схема трубчатой ламповой печи:

1 – пластина из поликристаллического алмаза; 2 – пластина из железа; 3 – пьедестал; 4 – вольфрам-вольфрамовая термопара; 5 – кварцевый реактор; 6 – галогеновые лампы; 7 – водохлаждаемый корпус-рефлектор

Образец поликристаллического алмаза 1 устанавливается ростовой поверхностью вниз на железную пластину 2, помещаемую на пьедестал 3. Температура пьедестала контролируется термопарой 4. Образцы размещаются в герметичном кварцевом реакторе 5, нагрев проводится галогеновыми лампами 6. Кварцевый реактор располагается в водохлаждаемом корпусе-рефлекторе 7.

Процесс, в котором продолжительность высокотемпературной стадии составила 60 с, осуществлялся в инертной атмосфере аргона или азота при температуре 1180 °С.

На рис. 3 приведена зависимость изменения температуры алмазного образца во время процесса термообработки.

Схема стадий процесса растворения поверхностей алмаза и железа показана на рис. 4, а соответствующие ей фотографии – на рис. 5.

Исходная поверхность поликристаллического алмаза контактирует выступающими частями с поверхностью железной пластины (рис. 5,а). При нагреве в первый момент времени в местах контакта пластин алмаза и железа происходит образование жидкой фазы карбида железа. Алмазные острия растворяются, и на их месте образуются плоские участки (рис. 5,б). В следующей фазе процесса пластина алмаза продолжает растворяться в эвтектическом сплаве (рис. 5,в).

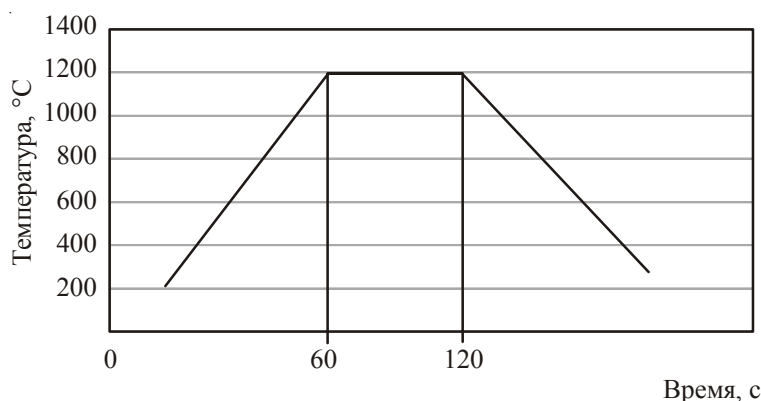


Рис. 3. Характерный температурно-временной режим процесса

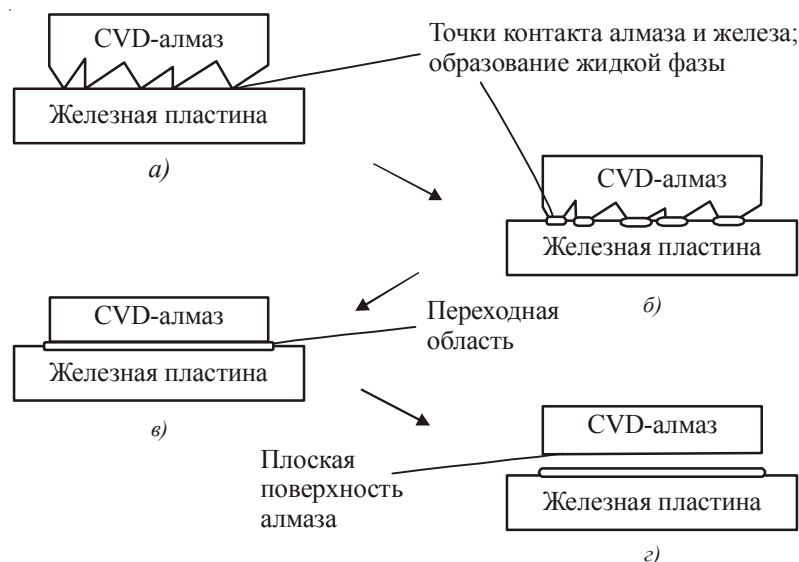


Рис. 4. Схема технологии термической обработки пластин из поликристаллического алмаза

В результате поверхность становится сглаженной, без острых вершин и впадин (рис. 5,г). После остывания алмазный образец легко отделяется от железной пластины.

Морфология поверхности алмазной пластины после проведения такого процесса, полученная при увеличении 5000 раз на растровом электронном микроскопе, показана на рис. 6. Химический состав фрагментов поверхности приведен в таблице.

Элемент	Масс. %
Спектр 1	
C	43,84
Fe	56,16
Спектр 2	
C	89,50
Fe	10,50

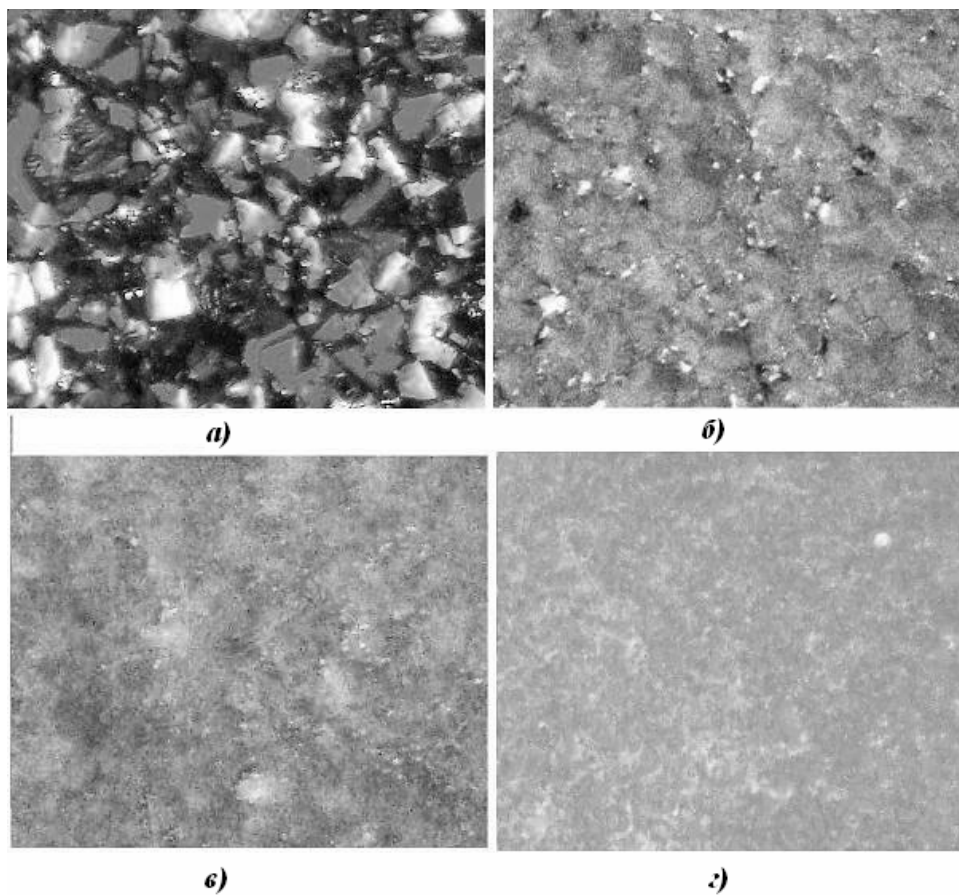


Рис. 5. Микрофотографии алмазной поверхности согласно стадиям процесса обработки

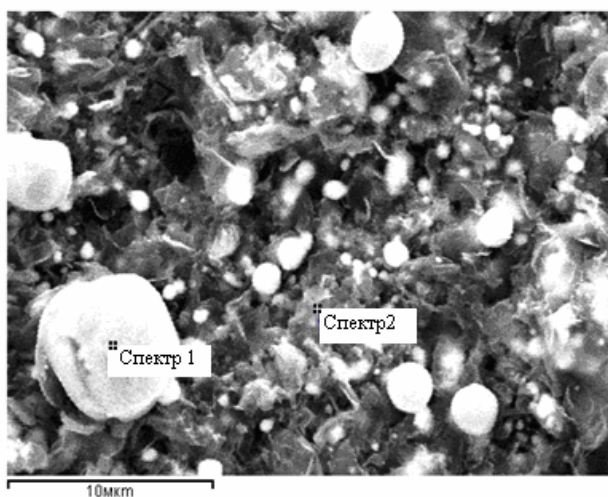


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение поверхности поликристаллического алмаза после проведения процесса термической обработки

Как видно из рисунка, на пластине из поликристаллического алмаза образуется слой графита толщиной до 20 мкм и присутствуют мелкие фрагменты карбида железа диаметром 0,5...10 мкм. Этот слой легко удаляется механической шлифовкой либо химическим травлением.

Таким образом, при контакте алмаза с железом алмазная форма при данной температуре переходит в графит с последующим его растворением железом. Следует отметить, что сторона алмаза, не контактирующая с железом, не графитизируется.

В результате проведенной обработки поверхность получается волнистой с перепадами вершин и впадин до 3...5 мкм. Для того чтобы получить более гладкую поверхность с шероховатостью менее 1 мкм, данный процесс следует повторить несколько раз.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность термической обработки поликристаллического алмаза железом при температуре, превышающей температуру эвтектики.

Процесс является чрезвычайно перспективным с точки зрения формирования гладкой поверхности алмаза и его шлифовки. Шероховатость поверхности поликристаллического алмаза достигает 1 мкм. Скорость процесса – 0,5...1 мкм/с, что в сотни раз выше, чем традиционные методы обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз-нитрид алюминия / В.Г. Ральченко, А.В. Савельев, А.Ф. Попович, И.И. Власов, С.В. Воронина, Е.Е. Ашкинази // Микроэлектроника. – 2006. – Т. 35, № 4. – С. 247.
2. Ральченко В.Г., Конов В.И., Леонтьев И.А. Свойства и применения поликристаллических алмазных пластин // Высокие технологии в промышленности России: сб. тр. 7-й Международной научно-технической конференции, МГУ. – 2001. – С. 251.
3. Милашев В.А. Алмаз. Легенды и действительность. – Л.: Недра, 1981.
4. Соболев Е.В. Тверже алмаза (очерки). – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1989.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в трех томах.: Т.1 / Под общ. ред. Н.П.Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996.

Статья поступила 12 апреля 2008 г.

УДК 546.26

ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ АЛМАЗ В ОКНАХ ВЫВОДОВ СВЧ-ЭНЕРГИИ

Л. В. Ляпин, М. А. Павлова, С. Н. Сытилин

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Приведена краткая характеристика диэлектриков, эффективно используемых в электронной технике. Показаны перспективы применения поликристаллического CVD-алмаза, в частности, в качестве диэлектрика в окнах выводов СВЧ-энергии электровакуумных приборов повышенной мощности. Определены особенности подготовки алмаза и оптимальные условия изготовления герметичных и термомеханически прочных металлоалмазных окон.

Short characteristics of dielectrics effectively used in electronic engineering are presented. The perspectives of using polycrystal CVD-diamond as a dielectric in microwave energy output windows in high-power electrovacuum devices in particular are shown. The peculiarities of diamond preparation and optimal conditions for manufacturing hermetic and thermomechanically durable metal-diamond windows are specified.

Проблема рассеяния тепла является лимитирующей при конструировании и разработке изделий электронной техники (ИЭТ) большой мощности. Отвод тепла, например, в выходном устройстве ИЭТ, в его ведущей части – металлодиэлектрическом окне, напрямую связан с теплопроводностью диэлектрика.

Широко применяемые в вакуумной и твердотельной электронике керамические диэлектрики давно перестали удовлетворять предъявляемым к ним требованиям как по диэлектрическим параметрам и электрической прочности, так и по теплопроводности [1].

В табл. 1 приведены основные параметры диэлектриков, применяемых в приборах малой и средней мощности.

Таблица 1

Параметры диэлектриков

Параметр	ВК94-1 (Al ₂ O ₃)	Лейко- сапфир	BN	ВНА-99-1 (AlN)	ОБ-1 (BeO)
ϵ ($3 \cdot 10^9$ Гц)	9,4-9,7	9,5-11,5	4,4-5,12	8-9	6,7-7
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ (200-400 °C)	6-10	0,5	1-3	45-65	3-5
λ , Вт/(м·К)	14-16	30	45-55	100-180	250 (-20 °C) 130 (-150 °C)
$\alpha \cdot 10^7$, град ⁻¹	60-65	75-95	15-36 196-240	50	78-86
σ , МПа	390	350-500	51	250	200

У перечисленных диэлектрических материалов есть свои преимущества и недостатки, ограничивающие их применение в приборах повышенной мощности [2]. В настоящее время в теплонагруженных элементах ИЭТ еще довольно активно используются оксид бериллия и нитрид бора. Однако возможности этих диэлектриков для дальнейшего развития электроники больших мощностей практически исчерпаны. Материаловедческая база электронной техники, подойдя к насыщению в последнюю четверть прошлого века, остро стимулировала поиск и разработку новых высокотеплопроводных материалов. И в первую очередь, материалов на основе структуры алмаза.

Начало «алмазного бума» относят к 1985–1986 гг. и связывают с началом развития твердотельной электроники и лазерной техники в США и Японии. В дальнейшем алмазная технология активно совершенствуется и доводится до промышленного уровня практически во всех развитых странах [3–5]. Из целого ряда алмазных и алмазоподобных материалов в электронной технике выделяется алмазная теплопроводная керамика (АТК) [6]. Более теплопроводная, чем оксид бериллия, она все же не стала ему серьезным конкурентом, т. к. имеет в 4 раза выше тангенс угла диэлектрических потерь и ряд других существенных технологических недостатков. Другой тип алмазной керамики – поликристаллический материал ОКМАЛ [7]. Оба материала очень критичны к качеству алмазных порошков, из которых производятся, к их дисперсности, чистоте (примесям), однородности и др. Сквозная или закрытая пористость до 10 % и более приводит к снижению теплопроводности, а также не гарантирует получение и сохранение вакуумной плотности. Появление в структуре материалов свободного углерода при отклонении от оптимальных технологических параметров (давления и температуры) в процессе изготовления приводит к дальнейшему ухудшению диэлектрических свойств. Кроме того, малые размеры получаемых заготовок ограничивают их применение в твердотельных приборах СВЧ [3].

Среди алмазных материалов сегодня наибольший интерес представляет искусственный поликристаллический алмаз, получаемый плазмохимическим методом (CVD – chemical vapor deposition) [8]. CVD-алмаз обладает комплексом уникальных свойств, почти не отличающихся от свойств природного алмаза. Рекордная для диэлектриков теплопроводность, электрическая и механическая прочности, радиационная стойкость, прозрачность для микроволн и целый ряд других свойств делают его весьма перспективным материалом для применения в конструкциях как мощных ЭВП СВЧ, так и твердотельных приборов. В табл. 2 приведены некоторые характеристики алмаза CVD*.

Таблица 2

Свойства CVD-алмаза

Характеристика	CVD-алмаз
λ , Вт/(м·К)	1800 (-20 °С) 1300 (-150 °С)
ε ($3 \cdot 10^9$ Гц)	5,7
$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^5$ (200–400 °С)	5
σ_p , МПа	240
ρ , Ом·см	10^{14}
$\alpha \cdot 10^7$, град ⁻¹	10

* В таблице приведены усредненные величины параметров CVD-алмаза согласно данным фирм-исследователей De Beers (Англия), Norton (США), ИПФ (г. Карлсруэ, Германия), ИОФ РАН (г. Москва) и ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) [9].

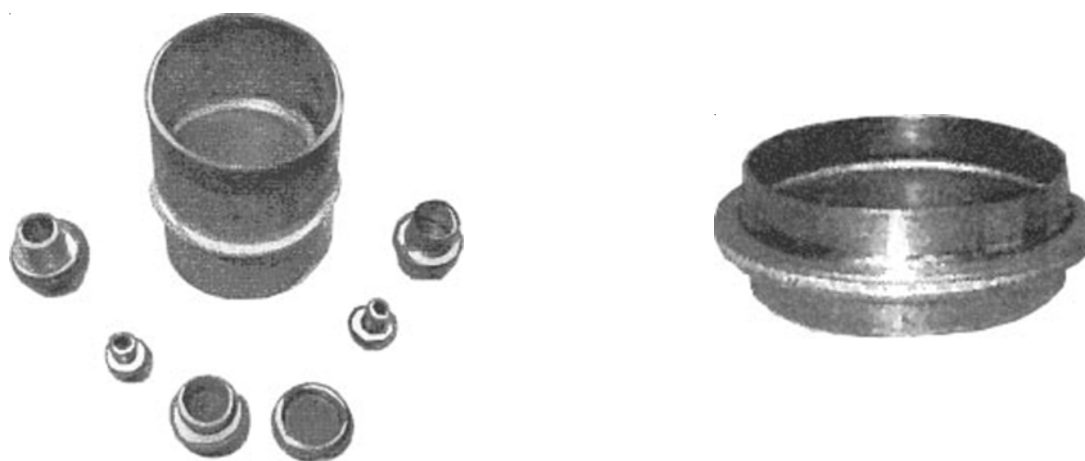
Размеры получаемых дисков-заготовок: диаметр от 50 до 130 мм при толщине от 0,25 до 2,0 мм.

Вместе с тем применение CVD-алмаза наталкивается на необходимость решения ряда технологических проблем, вызванных его химической инертностью и низким термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Несогласованность по ТКЛР алмаза и металлов (сплавов), применяемых в соединении с ним (медь, молибден, никель, ковар и другие), неизбежно приводит к появлению после пайки в металлоалмазных узлах (МАУ) значительных по величине остаточных термомеханических напряжений. Опасные величины напряжений уменьшаются в результате внесения изменений в конструкции узлов и различными технологическими приемами: оптимизацией режимов пайки, процессов нагрева и охлаждения, применением пластичных прокладок и др.

В технической литературе к началу XXI столетия широко освещены решения указанного комплекса проблем для соединений с известными диэлектрическими материалами, например с оксидными керамиками, а также исследования физико-химической природы соединений разнородных материалов и термомеханической надежности металлокерамических узлов с рекомендациями по эксплуатации в приборах и устройствах [1]. Однако особенности CVD-алмаза требовали проведения дополнительных исследований.

К концу прошлого столетия был накоплен большой опыт по изучению, исследованию и практическому использованию в теплонагруженных элементах монокристаллических природных и синтетических алмазов, алмазных пленок и алмазоподобных материалов. Было показано, что прочное соединение содержащих графит материалов с металлами пайкой возможно через химические соединения: карбиды, твердые растворы различного типа. Это, как правило, соединения элементов из групп карбидообразующих переходных металлов, таких, как, например, Ti, Cr, Mn, Mo и др. Они используются вместе с переходными металлами-растворителями, например, Fe, Ni, Cu и др. Широкий выбор переходных элементов позволяет оптимально решать вопрос прочности соединения для каждой конкретной композиции соединяемых материалов с максимальным удовлетворением всех предъявляемых к МАУ требований.

На рисунке представлен ряд экспериментальных окон выводов СВЧ-энергии с CVD-алмазом, расположенным между двумя медными цилиндрами (волноводами). В конструкции исполь-



Образцы окон выводов энергии

зованы молибденовые компенсаторы, припаиваемые с обеих сторон к меди с целью снижения механических напряжений в окне. Размеры элементов экспериментальных окон приведены в табл. 3.

Таблица 3

Размеры (мм) элементов торцевых соединений с алмазным диском*

Диаметр алмазного диска	10	30	50
Толщина алмазного диска	0,6	1,0	1,2
Толщина меди в зоне соединения	0,5	0,8	1,0
Ширина зоны соединения	2	3	5
Высота молибденовых компенсаторов	0,4	0,5	0,5

В процессе исследований определены особые требования к качеству алмазных пластин для окон выводов СВЧ-энергии: шероховатость шлифованной поверхности пластин – не более 1,25...1,5 мкм; рабочее поле окна не должно иметь царапин, а также зон с крупнокристаллической структурой, имеющих макродефекты по границам зерен CVD-алмаза.

Непосредственно же перед металлизацией алмазные детали должны быть тщательно очищены как известными физико-химическими методами [1], так и дополнительной термохимической обработкой в щелочной среде при температуре 250...300 °С с последующим отжигом на воздухе при 550...650 °С. Последняя операция проводится непосредственно перед вакуумной металлизацией алмаза под пайку.

Для оксидных керамических материалов физико-химические процессы в соединении с металлами, определяющие прочную связь, сводятся к образованию новых оксидов или их соединений типа шпинели или твердых растворов различного типа. При этом первоначально существовало устоявшееся мнение об обязательности переходного слоя с макротолщиной в несколько десятков микрометров. Это, однако, оправдано в случае, когда переходные слои из продуктов взаимодействия по основным свойствам (параметрам) согласуются с соединяемыми материалами без опасных градиентов свойств. В дальнейшем в результате многочисленных исследований получен обоснованный вывод о надежности соединения через микропереходные слои [10] толщиной от нескольких десятков ангстрем до единиц микрон и просто адгезионную (поверхностную) связь по границам кристаллических решеток [11].

Герметичные экспериментальные окна (рисунок) паялись как в вакууме не хуже $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, так и в среде осушенного водорода твердым припоем ПСр-72В. Не смачиваемый жидким припоем, чистый CVD-алмаз предварительно металлизировался напылением, например, вакуумным плазменно-дуговым способом на холодную подложку композиции металлов, содержащих карбидообразующий элемент (элементы) [11]. Суммарная толщина нанесенного напылением

*CVD-алмаз фирмы ООО «Дигаэкрон» при содействии ИОФ РАН.

слоя – до 1 мкм. Присутствие в металлизации химически активного карбидообразующего металла, например титана, должно ограничиваться моноатомными слоями, прочно сцепленными с алмазом. В противном случае высокая интенсивность растворения в титане углерода с ростом толщины переходного слоя приводит к быстрому росту жесткости, появлению диффузионной пористости, хрупкости, а также высокой вероятности графитизации. Опасность графитизации выявлена и тогда, когда поверхность алмаза имеет крупнокристаллическую структуру роста с микродефектами по границам зерен и частицами аморфного углерода. Такая структура убирается шлифовкой до появления более плотно упакованной и бездефектной. Меньшая жесткость и хрупкость карбидного слоя имеют место при замене титана, например, железом, хромом или марганцем, но при этом для их взаимодействия с алмазом необходима значительно более высокая температура.

Герметичные экспериментальные окна (табл. 3) были подвергнуты испытанию на термомеханическую и вакуумную надежность в следующих режимах:

- непрерывный нагрев в вакууме до температур 450...500 °С в течение 48 ч;
- 5-кратный нагрев в вакууме (водороде) до 600...650 °С с выдержкой при этом 5 мин;
- прогрев в водороде при 600...650 °С в течение 8 ч;
- 10-кратное термоциклирование на воздухе (+150... -60 °С) с выдержкой 10 мин при нагреве и 5 мин – в холоде.

Контроль герметичности окон производился после каждого испытания на гелиевом течеискателе типа ПТИ-10 (скорость натекания – не хуже $1,3 \cdot 10^{-11}$ м³·Па/с).

После испытаний окна сохраняли герметичность и механическую прочность, а следовательно, и надежность.

Механическая прочность на статический изгиб торцевых соединений алмаза с медью (с двух сторон) толщиной 0,5 мм достигает значений 145...150 МПа с разрушением алмаза как более напряженного, жесткого и хрупкого элемента соединения.

ВЫВОДЫ

1. Поликристаллический CVD-алмаз, обладающий исключительными электронными свойствами, перспективен при создании как ЭВП, так и твердотельных приборов нового поколения повышенной мощности.

2. Определены требования к качеству пластин из CVD-алмаза и условия их подготовки для надежного герметичного соединения с металлом.

3. Показана возможность получения надежных металлоалмазных окон выходных устройств для ЭВП СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М. Вакуумноплотная керамика и ее спаи с металлами. – М.: Энергия, 1973. – 408 с.
2. Термостойкие диэлектрики и их спаи с металлом в новой технике / М.А. Рубашев, Г.И. Бердов, В.Н. Гаврилов, М.Л. Любимов, М.И. Мусатов, В.А. Преснов, Ю.М. Ротнер. – М.: Атомиздат, 1980. – 246 с.
3. Алмаз в электронной технике / Под ред. В.Б. Кваскова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
4. Manz D. // Microwaves and RF. – 1988. – Vol. 27, No 5. – P. 37-45.

5. Вавилов В.С., Гиппиус А.А., Конорова Е.А. Электронные и оптические свойства алмаза. – М.: Наука, 1985.
6. Преснов В.А. Основные задачи микроэлектроники и области ее применения // Тез. докл. и реком. науч.-техн. конф. Сер.3. Микроэлектроника. – 1976. – Вып. 3 (58). – С. 57-60.
7. Ротнер Ю.М., Ротнер С.М. Поликристаллические алмазы в электронной технике // Алмаз в электронной технике. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 186-210.
8. Large-area diamond deposition by microwave plasma / V.G. Ralchenko, A.A. Smolin, V.J. Konov et al. // Diamond and Related Materials. – 1997. – Vol. 6. – P. 417-421.
9. Поликристаллический CVD алмаз – новый диэлектрический материал для СВЧ электроники / В.Г. Ральченко, В.И. Конов, В.В. Паришин и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 13-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2003). – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 547-548.
10. Соединение разнородных материалов без видимых переходных зон / И.И. Метелкин, А.М. Решетников, М.А. Павлова, Г.А. Парилова, В.П. Скальская // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1978. – Вып. 7. – С. 79-82.
11. Пат. 2300162 РФ. Способ изготовления окна вывода энергии / Л.В. Ляпин, С.Н. Сытилин, М.А. Павлова; опубл. 27.05. 07, Бюл. №15.

Статья поступила 23 апреля 2008 г.

≡ **НОВЫЕ КНИГИ** ≡

ВИЛЬНАВ Ж.-Ж. Клеевые соединения. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.

Книга состоит из двух частей: теоретической и практической. В первой рассматриваются теоретические модели адгезии, комплекс проблем, связанных с обеспечением межфазного контакта, и влияние структуры полимеров на когезионную прочность. Во второй части приведены практические рекомендации по склеиванию. Подробно рассмотрены методы подготовки поверхностей, изложены общие принципы выбора клеев и приведены характеристики основных видов клеящих материалов. В каждой главе читатель найдет ссылки на web-ресурсы.

Книга предназначена для преподавателей, студентов, конструкторов и технологов промышленных предприятий.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.624

О ВАКУУМНЫХ ПРОБОЯХ В МНОГОЛУЧЕВЫХ МОЩНЫХ ПРОЛЕТНЫХ КЛИСТРОНАХ НА ВЫСШЕМ И ОСНОВНОМ ТИПАХ КОЛЕБАНИЙ

В. И. Новоселец

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

В реальных конструкциях мощных МЛК на основном виде колебаний, работающих с длинными импульсами, дополнительная энергия, выделившаяся на одном катоде в ионном луче, может стать причиной вакуумного пробоя. С целью исключения этого эффекта в конструкциях электронно-оптических систем МЛК необходимо создавать ионные ловушки или специальные коллекторы ионов.

In actually existing designs of high-power multiple-beam klystrons operating at principal mode of oscillations with high pulses, the additional energy generated on one cathode in ion beam can cause vacuum breakdown. To avoid this effect it is necessary to create ion traps or special ion collectors in multiple-beam klystrons when designing electron-optical systems.

При разработке мощных электровакуумных приборов СВЧ с импульсной мощностью более 100...200 кВт при скважности 10...20 и ускоряющих напряжениях более 20 кВ в качестве основного приоритета стоит задача повышения электропрочности путем устранения электровакуумных пробоев.

Среди известных механизмов электровакуумных пробоев решающую роль играют процессы взаимной вторичной эмиссии заряженных частиц (электронов и ионов) между анодом и катодом, приводящие к импульсу предпробойного тока (микроразряду), что, в свою очередь, приводит к ухудшению вакуума (локального), а значит, к дальнейшему увеличению предпробойного тока и возникновению дуги.

Отличительной особенностью электронно-оптических систем (ЭОС) пролетных клистронов является наличие за анодом протяженного пространства дрейфа электронного луча в продольном фокусирующем магнитном поле. При такой конфигурации пролетного пространства процессы взаимодействия между электронами и образованными ионами значительно отличаются от процессов в обычных диодных режимах.

Мощные многолучевые клистроны (МЛК) конструктивно разделяются на два типа.

1. Мощные МЛК на высшем виде колебаний. Пролетные каналы ЭОС этих клистронов расположены друг относительно друга на значительном расстоянии. В состав клистрона входят несколько катодов, каждый диаметром порядка 10 мм, с управляющим неэмитирующим электродом, расположенным в центре катода. Плотность тока с каждого катода – порядка 15 А/см². В сущности, такие конструкции можно рассматривать как несколько однолуче-

вых ЭОС, собранных в одну систему пространства взаимодействия. Этот тип приборов в условиях эксплуатации отличается достаточной долговечностью и электрической прочностью.

2. Мощные МЛК на основном виде колебаний. Их пролетные каналы выполнены при близком расположении большого количества лучей. ЭОС МЛК состоит из нескольких катодов диаметром около 4 мм, плотность тока с каждого катода – порядка $15 \dots 30 \text{ А/см}^2$. В МЛК, построенных на этом виде колебаний, площадь катода, как правило, близка к площади поперечного сечения электронного луча. Этот класс приборов при значительных достоинствах перед аналогичными по параметрам: увеличенная полоса усиления, малые габариты – значительно уступает им по долговечности и электрической прочности, особенно, при работе с длинными импульсами при малых скважностях.

В большинстве рассмотренных типов МЛК электронные пушки работают в импульсном режиме за счет модуляции напряжения смещения на управляющем фокусирующем электроде при запирающем луч напряжении около $-4 \dots -8 \text{ кВ}$ и напряженности электрического поля между катодом и управляющим электродом около $6 \dots 8 \text{ кВ/мм}$.

Электронно-оптические системы первого и второго типов МЛК значительно отличаются друг от друга. В ЭОС первого типа, как правило, в центре катода имеется неэмитирующий управляющий электрод, играющий роль коллектора потока положительных ионов, поступающих из пространства взаимодействия; в ЭОС второго типа катод сплошной и является одновременно эмиттером электронов и коллектором положительных ионов, поступающих из пространства взаимодействия (рис. 1).

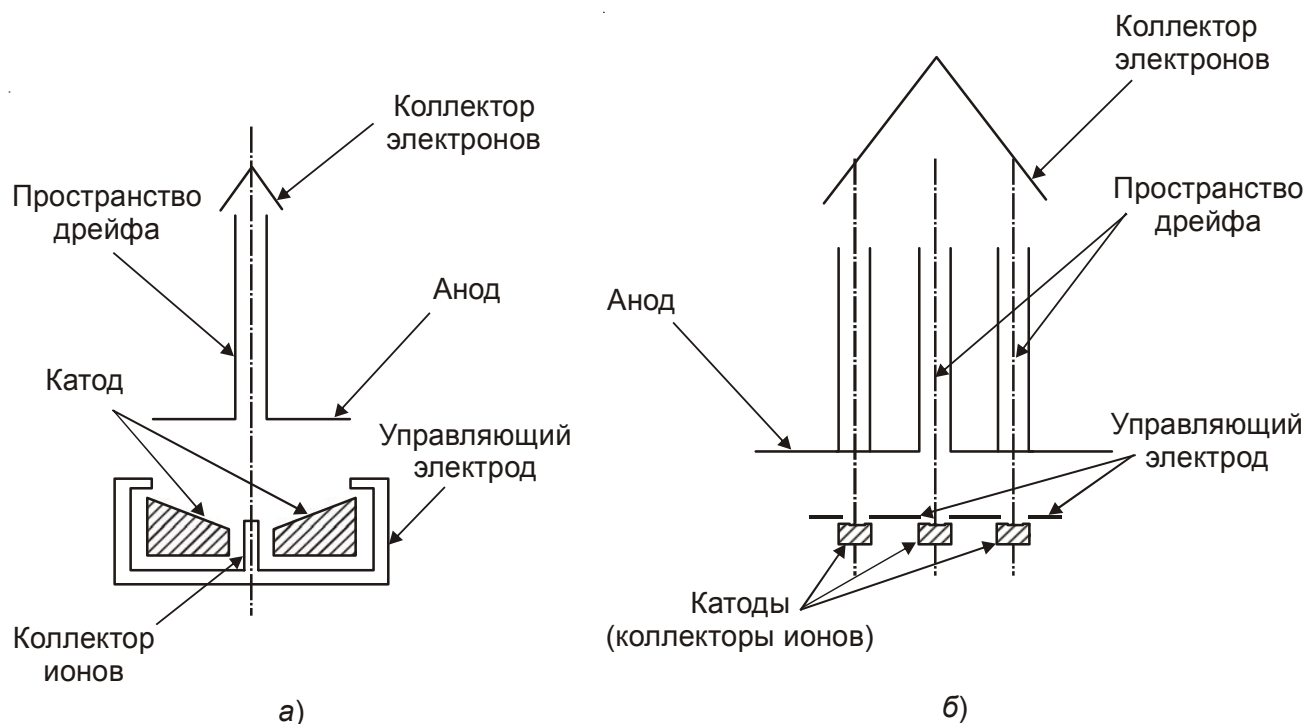


Рис. 1. Геометрия пушек, формирующих электронный луч, электронно-оптических систем МЛК:

а – на высшем виде колебаний; б – на основном виде колебаний

Наиболее вероятная и признанная гипотеза возникновения внутривакуумных пробоев [1, 2] заключается в том, что пробой появляется в том случае, когда на отрицательном электроде (катоде) образуется высокоэффективное эмиссионное пятно, а положительные электроды (аноды) выделяют в межэлектродное пространство необходимое количество материала для плазмы в результате ионизации.

При исследовании вакуумных пробоев в мощных МЛК на высшем виде колебаний, работающих в импульсном режиме при модуляции по управляющему электроду, выявлены следующие тенденции:

- худшими условиями для вакуумных пробоев является работа клистрона в режиме длинных импульсов (100...1000 мкс);
- при уменьшении частоты повторения импульсов (увеличении скважности) вероятность пробоев уменьшается;
- наиболее вероятным моментом начала пробоя является состояние, когда на управляющем электроде клистрона потенциал отрицательный, электронный луч заперт; пробой развивается между управляющим отрицательным электродом (в этот период являющимся катодом) и катодом (играющим в это время роль анода).

Существует экспериментально установленный факт бомбардировки катодов мощных пролетных клистронов ионным потоком с образованием на катодах неэмитирующих пятен диаметром примерно 0,5 мм (рис. 2), что недопустимо, особенно, в мощных приборах при напряжениях более 20 кВ [3].

Рассмотрим, что может происходить в МЛК при несовершенном вакууме на основании работ [2–7].

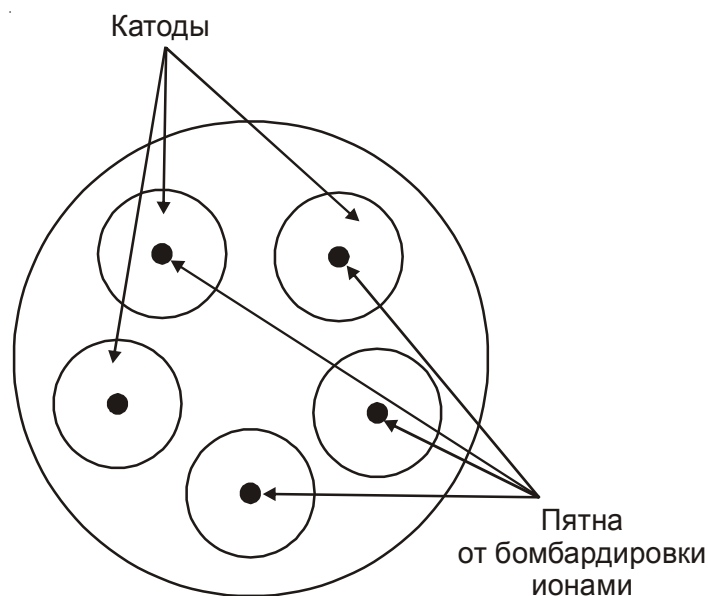


Рис. 2. Типичный вид катодов МЛК на основном виде колебаний с пятнами, образованными бомбардировкой ионами

Эти ионы концентрируются по оси электронного луча, создавая плотный ионный луч при значительном магнитном поле из-за поперечного градиента, который возникает в результате провисания потенциала, созданного электронным пространственным зарядом между каналом дрейфа радиусом R и осью луча радиусом r , описываемого известной формулой:

$$\Delta v/v \approx 0,015\rho_m(1+2 \ln R/r), \quad (2)$$

где ρ_m – микропервеанс электронного луча.

При микропервеансе, близком к 1, это отношение близко к 10^{-2} на входе в трубу дрейфа при любой степени нейтрализации ионами электронного луча в самой трубе.

Из условия, что плотность пространственного заряда $\rho_0(z)$ в точке z' пространства дрейфа складывается из составляющих

$$\rho_0(z) = \rho_e(z') + \rho_i(z') = -\frac{I_e}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_e(z')}} + \frac{I_i}{\sqrt{2 \frac{q}{M} U_i(z')}}, \quad (3)$$

где $\rho_e(z')$ и $\rho_i(z')$ – плотности электронов и ионов в луче в точке z' пространства дрейфа; q/M – отношение заряда к массе иона, следует:

$$I_i = \left(\frac{m}{M}\right)^{1/2} \left(\frac{U_i(z')}{U_e(z')}\right)^{1/2} I_e \frac{\rho_i(z')}{\rho_e(z')}. \quad (4)$$

Эта зависимость ионного тока от тока луча и степени нейтрализации луча ионами позволяет оценить ионный ток, поступающий из пространства дрейфа на катод, и дополнительную энергию, выделившуюся на катоде.

При оценке ионного тока необходимо учитывать следующее.

1. При магнитной фокусировке электронного луча степень нейтрализации электронного заряда ионами в луче достигает 50% при давлении 10^{-6} торр, 10% – при давлении 10^{-7} торр, 1% – при давлении 10^{-8} торр [6, 7].

2. В пространстве дрейфа электронного луча отношение $\left(\frac{U_i(z')}{U_e(z')}\right)^{1/2}$ равно примерно 10^{-1} ,

а в ускоряющем пространстве катод-анод это отношение равно 1.

3. Принято считать, что M соответствует массе молекулы CO (28), а $(m/M)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^{-3}$.

4. Время дрейфа ионов в сторону катода определяется длиной пространства дрейфа и потенциалом дрейфа, который находится из выражения (2), и для реальных конструкций МЛК составляет примерно 10^{-6} с.

С учетом принятых допущений формула (4) для расчета ионного тока, поступающего на катод в диапазоне давлений остаточных газов $10^{-6} \dots 10^{-8}$ торр, принимает вид

$$I_i \approx (5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-5}) I_e. \quad (5)$$

Рассмотренный процесс образования ионного тока относится к непрерывному режиму работы МЛК. В реальных условиях мощные МЛК работают в импульсном режиме при скважности порядка 10...20.

Оценим, как создается ионный ток при импульсной работе приборов.

Для расчета времени накопления ионов в пространстве дрейфа электронного луча используется следующая формула [6]:

$$T = \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{p \zeta(U_e) V_e^{1/2}} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}, \quad (6)$$

где T – время накопления, мкс; p – давление, торр; $\zeta(U_e)$ – вероятность ионизации, $\text{см}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$; V_e – ускоряющее напряжение, В; ρ_i, ρ_e – плотности ионов и электронов в луче.

Для обычных составов газов и ускоряющих напряжений (10^4 В) полная нейтрализация электронного объемного заряда при $p \approx 10^{-6} \dots 10^{-8}$ торр может быть достигнута при $T \approx 10^{-4} \dots 10^{-2}$ с. Эти цифры с достаточной для оценки этого явления точностью подтверждены экспериментально при изучении спектра СВЧ-колебаний ЛОВ в условиях ионной нейтрализации электронного объемного заряда [8] и в ряде других работ.

За время импульса тока τ_n число образовавшихся ионов при скорости электронов U_e определяется следующим образом [6]:

$$dN_i = \int_0^{\tau_n} n_e \zeta(U_e) U_e p d\tau.$$

В период отсутствия электронного тока за время $T_{\text{СКВ}}$ число рекомбинированных ионов находится по формуле

$$dN_{\text{рек}} = \int_0^{T_{\text{СКВ}}} -\gamma n_i n_e^* dT.$$

Здесь n_i, n_e – плотности ионов и медленных электронов в луче; $\zeta(U_e)$ – вероятность ионизации; γ – коэффициент рекомбинации; p – давление остаточных газов.

Отношение числа образовавшихся ионов к числу рекомбинированных равно

$$\frac{dN_i}{dN_{\text{рек}}} = \frac{n_e \zeta(U_e) p U_e \tau_n}{\gamma n_i n_e^* T_{\text{СКВ}}}. \quad (7)$$

При реальной плотности электронов в луче $10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$, давлении остаточных газов $10^{-6} \dots 10^{-8}$ торр, ускоряющем напряжении $\sim 10^4$ В, $\tau_n / T_{\text{СКВ}} \approx 10^{-1}$, $\zeta(U_e) \approx 10^{-1} \text{ см}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$ [5], $\gamma \approx 10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ отношение числа образовавшихся ионов в течение импульса тока к числу рекомбинированных ионов во время отсутствия тока составляет $10^3 \dots 10^5$.

Учитывая, что время накопления ионов в луче при вакууме $10^{-6} \dots 10^{-8}$ торр ($10^{-4} \dots 10^{-2}$ с) значительно превосходит время дрейфа ионов в сторону катода ($\sim 10^{-6}$ с), а число образовавшихся ионов в течение импульса тока на несколько порядков превосходит число рекомбинированных ($10^3 \dots 10^5$), можно утверждать, что при длинных импульсах (100...1000 мкс) возможно накопление значительного количества ионов в луче в пространстве дрейфа и импульсный ионный ток будет равен величине, полученной для непрерывного режима: $I_i \approx (5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-5}) I_e$.

При этом дополнительная энергия, выделившаяся на катоде в ионном луче очень малого диаметра (0,3...0,5 мм) за время импульса τ , будет определяться как

$$W = I_i U_0 \tau = (5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-5}) I_e V_e \tau. \quad (8)$$

Влияние рассмотренного эффекта на работу МЛК при более коротких импульсах может сказываться за счет накопления ионов в пространстве дрейфа при значительном превышении времени накопления ионов над временем рекомбинации.

Для реальных конструкций МЛК на основном виде колебаний с током одного луча около 2 А при ускоряющем напряжении $2 \cdot 10^4$ В и $\tau \approx 10^{-3}$ с дополнительная энергия, выделившаяся на одном катоде в ионном луче, может составлять $10^{-1} \dots 10^{-4}$ Дж при $p \approx 10^{-6} \dots 10^{-8}$ торр.

Были исследованы термические и термопрочностные эффекты в металлопористом многолучевом катоде, вызванные импульсной ионной бомбардировкой его поверхности (Захаров М.И. и Ипполитов В.М., ФГУП «НПП «Исток»).

На компьютере смоделирован процесс воздействия импульсного ионного потока на одиночный катод многолучевого клистрона – цилиндрический выступ диаметром 4 мм и высотой 2 мм. След ионного потока (пятно) – круг диаметром 0,3 мм.

Ионный импульс длительностью 1 мс (скважность 20) выделяет тепловую энергию 10^{-2} Дж (взято среднее значение), равномерно распределенную по поверхности пятна. Температура на всех поверхностях модели катода принята постоянной и равной средней рабочей температуре катода ($I_{\text{кат}} = 1200$ °С). Материал катода - вольфрамовая губка.

Установлено:

1. Во время воздействия импульса температура «пятна» резко повышается, достигая в его центре 1350 °С, следовательно, максимум местного перегрева катода периодически достигает 150 °С.

2. Импульсный перегрев эмитирующей поверхности катода в области «пятна» достаточно велик, чтобы вызвать повышенное испарение бария и периодическое снижение эмиссии в этой области.

3. Тепловые и термомеханические изменения состояния области «пятна» под действием одиночного импульса, очевидно, не могут вызвать ни заметного испарения вольфрама, ни механических разрушений (типа кратеров) поверхности катода.

4. Расчеты перегрева катода в «пятне» при ионной бомбардировке проведены при дополнительной тепловой энергии 10^{-2} Дж. Согласно формуле (8), выделенная энергия на катоде в ионном луче в реальных условиях работы МЛК может составлять 10^{-1} Дж. Не исключено, что в этом случае может возникнуть испарение материала катода.

Рассмотрим, как установленные процессы ионной бомбардировки катодов и испарения бария могут повлиять на процесс развития вакуумного пробоя в МЛК на основном виде колебаний.

В импульсном режиме работы МЛК при достаточно длинном импульсе в результате тепловых процессов может ухудшаться вакуум и концентрация ионов n_i в пространстве дрейфа, согласно [4,5], достигнет концентрации электронов в луче n_e . Ионный ток на катоде достигнет максимального значения ($I_i \approx 10^{-3} I_e$) при значительной плотности тока в луче диаметром не более 0,3 мм. Это, как показано выше, вызовет испарение материала катода (бария) с еще большим локальным ухудшением вакуума в промежутке управляющий электрод – катод. При этом необходимо учитывать, что испарившийся материал в значительной степени ионизирован [2].

Управляющий электрод при запирающем электронный луч отрицательном потенциале начинает играть роль катода по отношению к эмитирующему катоду с положительным потенциалом (который в этот момент играет роль анода). Если на отрицательном управляющем электроде при резком локальном ухудшении вакуума образуется высокоэффективное эмиссионное пятно (для этого имеется достаточно причин технологического характера), а около положительного электрода имеется достаточное количество распыленного материала – бария, то в межэлектродном пространстве катод – управляющий электрод при значительной напряженности электрического поля, согласно [1, 2], может возникнуть достаточное количество материала для плазмы в результате его ионизации.

Это явление обычно и наблюдается в реальных условиях работы мощных МЛК на высших видах колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема вакуумного пробоя наиболее актуальна для МЛК на основном виде колебаний, так как в этом случае наряду с бомбардировкой катодов ионным потоком имеются очень большие напряженности электрических полей на значительных площадях электродов при малых зазорах между ними.

В связи с этим электронно-оптическая система мощных МЛК на основном виде колебаний должна иметь такую конструкцию, чтобы не допустить попадания ионов, образованных в пространстве дрейфа, на катод. Так как дополнительная энергия, выделяющаяся в ионном «пятне» на катоде, может достигать значительных величин ($0,1 \dots 0,01$ Дж), то все изложенные доводы особенно актуальны при работе МЛК в режиме длинных импульсов при малых скважностях.

К числу рекомендаций, которые могут способствовать решению проблемы предотвращения вакуумного пробоя в МЛК на основном виде колебаний, можно отнести:

1. Получение и сохранение высокого вакуума ($10^{-8} \dots 10^{-10}$ торр) во всех режимах работы приборов в процессе длительной эксплуатации.
2. Создание ионных ловушек на входе в пространство взаимодействия, поставив электрод с положительным потенциалом по отношению к корпусу прибора. Это давно известный путь устранения бомбардировки катода ионами остаточного газа и применяется при создании долговечных (более 100 тыс. ч) приборов.
3. Создание ЭОС МЛК с неэмитирующими электродами в центре катода (коллекторов ионов). Наиболее простой способ – применение катодов с отверстиями в центре и коллекторов ионов за катодом. Это также известный путь устранения бомбардировки катода ионами остаточного газа. При этом особенно точно надо совмещать центры катодов и пролетных каналов.
4. Проведение работ по антиэмиссионным покрытиям управляющих электродов.

Для более полного понимания сущности происходящих явлений в мощных МЛК на основном виде колебаний необходимо изготовить макет упрощенной ЭОС, в котором можно было бы измерить ионный ток на катоде в реальных режимах работы МЛК, изучить влияние парциального состава газа на вакуумные пробои, действие ионных ловушек, временное развитие пробоя от микрозаряда к дуге, связав это с временным изменением потенциала на электродах, а также начать более глубокие теоретические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоиздат, 1986.
2. Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. – М.: Сов. радио, 1973.
3. Сливков И.Н., Михайлов В.И. Электрический пробой и разряд в вакууме. – М.: Атомиздат, 1966.
4. Fildl SL Comm. – 1947. – Vol. 24, No 1.
5. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Сов. радио, 1966.
6. Nines M.E., Hoffman G.W., Saloom J. A positive - ion drainage in magnetically focused electron beams // J. Appl. Phys. – 1955. – Vol. 26, No 9. – P. 1155-1162.
7. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – М.: Энергия, 1972.
8. Новоселец В.И. Влияние ионной нейтрализации объемного заряда на спектр импульсных колебаний ЛОВ типа «О» // Вопросы электроники. – 1959. – № 5.

Статья поступила 17 апреля 2008 г.

≡≡≡ НОВЫЕ КНИГИ ≡≡≡

ЛЭЙ Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов: практическое руководство; пер. с англ. Н.С. Соголюб – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 3366 с., ил., табл.

В издании рассмотрены практические аспекты применения цифровой обработки сигналов (ЦОС), особое внимание уделено их реализации, просчетам и диагностике. Основы ЦОС представлены на практических примерах, с подробными разъяснениями и минимумом формул. Использование ЦОС изложено в аспекте применения в различных областях промышленности - от управления процессом до техники связи.

Книга будет полезна инженерам систем управления и систем связи, электротехникам, инженерам по электронике и мониторингу текущего состояния систем, а также другим техническим специалистам.

К 65-ЛЕТИЮ ФГУП «НПП «ИСТОК»

УДК 621.396.96

СОВЕТ ПО РАДИОЛОКАЦИИ

Р. М. Попов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

В статье рассматривается история создания при Государственном комитете обороны в 1943 г. Совета по радиолокации, который сыграл большую роль в дальнейшем ее развитии, в частности в организации Электровакуумного НИИ-160, в настоящее время – ФГУП «НПП «Исток».

The article gives the history of foundation of the Council on Radiolocation at the State Defense Committee in 1943, which played a great role in its further development and in arranging electrovacuum NII-160 in particular – FSUE “RPC”Istok” nowadays.

В марте 1943 г. в отделе электропромышленности ЦК ВКП(б) началось всестороннее обсуждение мероприятий, нацеленных на обеспечение развития радиолокации для оснащения этой аппаратурой зенитной артиллерии ПВО, самолетных и корабельных бортовых станций. В результате обсуждения было предложено для координации действий всех ведомств, занятых разработкой радиолокационных средств, создать при Государственном комитете обороны (ГКО) специальный Совет по радиолокации. 4 июля 1943 г. постановлением ГКО Совет был утвержден.

В готовящемся постановлении для обеспечения радиолокационной техники радиолампами предусматривалась организация Электровакуумного НИИ, включающего в себя несколько предприятий.

Идея организации Совета по радиолокации не могла возникнуть как-то вдруг. В отечественной литературе одним из основных факторов, повлиявших на принятие решения, считается успех радиолокации в обороне Москвы, в частности действия опытной зенитной батареи по отражению налетов немецких бомбардировщиков.

Конечно, это сыграло определенную роль в формировании положительного мнения о пользе радиолокации. Так, например, организуется специальный завод по производству станций оружейной наводки. Но этого было явно недостаточно для оснащения армии радиолокационными средствами.

Та практика, когда каждый наркомат сам решал проблемы, связанные с радиолокацией, к началу войны себя не оправдала. Малочисленные научные организации разных ведомств, ведущие разработку радиолокационных средств, с 1934 по 1941 год фактически так и не смогли создать что-либо путное.

Первая принятая на вооружение в сентябре 1939 г. станция непрерывного действия «Ревень» (РУС-1) из-за своих ограниченных тактических возможностей не нашла широкого примене-

ния в войсках. Еще до войны после выпуска сорока четырех комплектов этой станции ее производство прекратилось.

26 июля 1940 г. была принята на вооружение импульсная станция «Редут» (РУС-2), до войны таких станций выпустили всего двенадцать. А в начале 1942 года принимается на вооружение ее одноантенный вариант – станция «Пегматит» (РУС-2с).

Различные ведомственные неувязки привели к тому, что опытный образец РЛС дальнего обнаружения «Редут» был создан почти на два года позже, чем это было возможно. Это имело свои негативные последствия, поскольку импульсная аппаратура станции являлась исходной для создания корабельных («Редут-К») и самолетных («Гнейс-2») РЛС. Такая задержка с ее выпуском не могла не сказаться на оснащении ВМФ и ВВС радиолокационными станциями.

Неудовлетворительные результаты в разработке и производстве РЛС, связанные с разобщенностью и несогласованностью действий ряда организаций, не могли не натолкнуть на мысль о создании единого органа по управлению всем процессом развития отечественной радиолокации.

Несомненно и то, что идея организации такого органа возникла на основе зарубежного опыта применения радиолокации, и особенно во время битвы за Британию, в которой ее преимущества перед другими средствами обнаружения противника были наглядно доказаны при отражении воздушных налетов на Англию бомбардировщиков «люфтваффе».

Сокрушительное поражение немецкой авиации в небе Англии широко обсуждалось во всем мире. Опыт англичан анализировался и обобщался. США срочно начали перестраивать всю свою систему ПВО. Используя оборудование и персонал Корпуса связи, в спешном порядке устанавливаются станции на берегах Атлантического и Тихого океанов и на важных морских базах за океаном. Были увеличены дальность действия и перекрываемая площадь РЛС. К сожалению, подобной активности не наблюдалось в СССР, хотя вполне возможно, что успешные действия английских РЛС способствовали, наконец-то, принятию решения по выпуску в НИИ радиопромышленности двух опытных образцов станции «Редут», изготовленных в рекордно короткий срок – всего за один год.

Мнение о достоинствах английской радиолокационной техники укрепились с поставками из Англии по ленд-лизу станций орудийной наводки. В конце 1941 года 337-й отдельный радиобатальон ВНОС, входивший в состав Московского фронта ПВО, имел десять станций радиобнаружения: четыре РУС-2, три РУС-2с и три английских РЛС МРУ-105, которые прибыли в СССР в декабре 1941 г. в качестве личного дара И. Сталину от У. Черчилля. Их установили в районе Кубинки, Внукова и Химок, и они исправно несли службу до конца войны.

Но надеяться только на ленд-лизовские поставки союзников было нельзя. В любой момент они могли прекратиться, как это случилось, например, в июне 1942 г., когда по вине руководства главного штаба Британского адмиралтейства был разгромлен конвой PQ-17 (из 36 судов потоплено 24), после чего поставки прекратились. Очередной конвой PQ-18 вышел из Лох-Ю только спустя два месяца (2 сентября 1942 г.). Но и ему не повезло – из 40 судов он потерял 13. И снова поставки остановились. Они возобновились 15 декабря, когда в путь отправился очередной конвой JW-51A (с этого конвоя литер PQ был заменен литером JW). Таким образом, с июня по декабрь 1942 г. пришел только один конвой PQ-18, тогда как их, согласно обещанию У. Черчилля отправлять конвои каждые три недели, должно было быть, по крайней мере, восемь. Задержка поставок произошла в трудное для СССР время, когда на Волге шла Сталинградская битва. В сложившейся ситуации очень-то надеяться на ленд-лизовские поставки

не приходилось. Это хорошо понимало военно-политическое руководство страны и делало все возможное для увеличения производства собственной военной техники.

В отделе электропромышленности ЦК ВКП(б), наконец-то, убедились в эффективности радиолокации и начали проработку мероприятий, призванных наладить выпуск отечественной радиолокационной техники. В первую очередь приступили к подготовке доклада на имя И. В. Сталина с проектом постановления ГКО. Для участия в этом из Астрахани вызывается в Москву Аксель Иванович Берг.

* * *

Телеграмма из наркомата ВМФ пришла в 5 часов вечера. В ней приказывалось А. И. Бергу немедленно выехать в Москву. Аксель Иванович задумался: «Что-то случилось? Нарком не будет вызывать по пустякам». Из репродуктора голос Левитана сообщал последнюю сводку Совинформбюро: «Сегодня, 10 марта 1943 г., войска Центрального фронта, успешно развивая наступление, вышли на реку Десна севернее Новгорода-Северского...»

Несколько дней ушло на завершение некоторых дел в Военно-морской академии, где он преподавал. С началом войны академия эвакуируется из Ленинграда в Астрахань. И вот Аксель Иванович в поезде. За окном проплывает унылый пейзаж, а в голове одна и та же мысль: «Для чего его вызвали в Москву?» Но что бы там ни было, он все равно пойдет по инстанциям снова доказывать, что радиолокационное вооружение нужно стране как воздух, как хлеб, оно необходимо для победы.

Глядя в окно, он вспоминал, как в 1927 году был назначен руководителем работ по перевооружению ВМФ средствами связи и как на решающем совете у Ворошилова он горячо отстаивал свою идею оснащения флота совершенно новой радиоаппаратурой. Старую выбросить и установить принципиально новую. Флот должен иметь свою специальную радиоаппаратуру. Тогда противники его идеи возражали, что молодая советская страна не так богата, чтобы отдельно вооружать радиосредствами флот, армию и авиацию. Но Берга поддержал начальник штаба РККА Тухачевский.

Началась многолетняя кропотливая работа по оснащению каждого корабля, каждой подводной лодки, каждого берегового наблюдательного пункта радиостанциями и другой радиоаппаратурой. Для этого надо спроектировать эту аппаратуру, сделать опытные образцы, испытать, наладить серийный выпуск на заводах, снабдить их деталями и радиолампами – короче, предстояло создать радиотехническую промышленность. Вместо маленьких заводиков и лабораторий – крупные промышленные предприятия, работающие на флот, на армию, на авиацию.

Начало выпуска радиостанций корабельных типов было организовано в 1927–1928 гг. на заводе им. Козицкого в Ленинграде. Для обеспечения судостроительной программы первой пятилетки предприятие пришлось расширить в два раза. До войны завод № 210 оставался основным поставщиком радиотехнической аппаратуры для флота.

Первая единая система радиовооружения ВМФ, разработанная под руководством А. И. Берга, получила наименование «Блокада-1». Ее приняли на вооружение в 1931 году. В систему входили: девять типов вновь разработанных радиопередатчиков мощностью от 50 Вт до 7,5 кВт и диапазоном длин волн от 1900 до 20 м, а также четыре типа приемников с диапазоном длин волн от 25000 до 10 м.

В 1928 году по инициативе Берга организуется Научно-испытательный полигон связи Военно-Морских Сил РККА, который в 1932 году стал Научно-исследовательским морским институтом связи. Берг назначается его начальником. Институт разрабатывал образцы для вооружения флота радиотехнической аппаратурой и гидроакустическими средствами, телемеханическими устройствами и приборами, использующими ультракороткие волны и инфракрасные лучи.

В ходе эксплуатации системы радиосвязи «Блокада-1» выявились существенные недостатки, поэтому под руководством Берга началась разработка более надежной системы «Блокада-2». Оснащение кораблей и частей береговой обороны новыми средствами радиосвязи, в которых уже широко использовались коротковолновый и даже ультракоротковолновый диапазоны, началось в 1937 году. К июню 1941 г. большая часть боевых кораблей и береговых объектов имела новую аппаратуру.

Плодотворная научно-производственная деятельность Акселя Ивановича была прервана в годы репрессий. Берга арестовывают. Как он говорил в последние годы жизни: «Почему я попал в заключение контрреволюционером, причины мне непонятные, но вышел на свободу я контр-адмиралом».

После реабилитации в 1940 г. местом работы Берга становится Военно-морская академия в Ленинграде. Когда началась война, Берга назначают членом Комиссии ленинградского обкома партии по оборонным вопросам. Вместе с академиками М. Н. Семеновым и А. Ф. Иоффе он включается в работу по изучению проблем в области радиообнаружения самолетов. Комиссия посетила одну из первых в Союзе радиолокационную станцию, установленную под Ленинградом в местечке Токсово. Станция была разработана в ЛФТИ под руководством Ю. Б. Кобзарева. Берг впервые осматривал такую установку, хотя идею размещения радиолокатора на подводной лодке он обсуждал с Кобзаревым еще до войны.

14 августа 1941 г. Военно-морскую академию эвакуируют в Астрахань. Но и вдали от фронта Берга продолжают волновать вопросы, связанные с радиолокацией. В июне 1942 г. он приезжает в Москву, где в Главном управлении связи ВМФ делает обстоятельный доклад, посвященный развитию радиолокации. Проект по этому вопросу он представляет заместителю наркома ВМФ Л. М. Галлеру. Проект был дерзок, актуален, он производил впечатление. В то время Аксель Иванович записал в своем дневнике: «Радиолокация, радиолокация и еще раз радиолокация – вот что нужно сегодня».

Но руководство Управления сомневалось в полезности радиолокации для кораблей. Так, в итоговом отчете о деятельности Управления в годы войны в области создания радиолокационной техники для ВМФ отмечено: «К серийному выпуску корабельных станций типа «Редут-К» промышленность не приступила, так как представители ВМФ выражали сомнения в целесообразности развития корабельной радиолокационной техники из-за боязни пеленгования работы корабельных станций противником». Не встретив особого понимания, Берг возвращается в Астрахань.

О крупном ученом с огромным практическим опытом и отличными организаторскими способностями вспомнили в 1943 году, когда возникла острая необходимость в ускорении работ по выпуску отечественных средств радиолокации.

А. И. Берг прибыл в Москву 23 марта и сразу направился к Л. М. Галлеру. Тот тепло встретил его – они давно были знакомы. Расспрашивал о делах в академии, о житье-бытье – и ни слова о деле. Только вскользь намекнул о предполагаемой работе в электропромышленности и возможном назначении на должность заместителя наркома. «Вот так так! – запишет Берг в своем

дневнике. – Никак не ожидал... Все это здорово, но... пугает меня...» Ему – специалисту по оснащению флота радиосредствами придется включиться в работу промышленности, с которой он был связан очень слабо. «Справлюсь ли?» – думал он. Вечером у наркома электропромышленности И. Г. Кабанова намечаются основные этапы предстоящей работы: изучить заказчиков, их требования, нужды фронта; изучить заводы и их возможности; уменьшить количество типов радиосредств обнаружения, повысить их надежность и удобства эксплуатации; подобрать нужных людей, а главное, показать, наконец, на что способна радиолокация.

Дни и вечера Берг проводит в наркомате. Он понимает, чтобы решить проблему современного радиолокационного вооружения, нужна целая промышленность, огромные коллективы, новейшая техника.

Первое, что предпринимает Берг – собирает коллектив единомышленников. «Люди, люди – самое главное. Тогда можно начать работать», – запишет он в дневнике. Со всего Союза он выписывает в Москву специалистов, на опыт и знания которых можно положиться. Это – Кобзарев, Леонтович, Фок, Пистолькорс, Щукин, Архипов, Кугушев, Векшинский и многие другие, до этого разрабатывающие теорию передачи, распространения и приема радиоволн, строившие первые советские радиозаводы, создававшие первые отечественные радиолампы, возводившие первые радиовещательные станции страны, создававшие первые радиолокаторы.

Постепенно обсуждения и споры о лучшей координации работ в области радиолокации приводят к твердому убеждению, что сосредоточивать эти работы в рамках одного наркомата нецелесообразно. Но если авиационный наркомат будет вести только вопросами авиационной радиолокации, судпром – только радиолокацией для кораблей и подводных лодок, артиллеристы будут самостоятельно разрабатывать проблемы радиолокационной наводки, то будет трудно всем этим руководить. Для этого нужно иметь единый центр! Так родилась идея создания первого государственного координационного органа в области радиолокации – Совета по радиолокации при ГКО.

В процессе обсуждения возникало много вопросов, требующих своего решения. Среди них был и вопрос по обеспечению предприятий, выпускающих радиолокационную технику, электровакуумными приборами. Члены комиссии пришли к общему мнению о необходимости создания не просто специального электровакуумного завода, а НИИ с опытным заводом. Организацию такого предприятия решили поручить крупному специалисту электровакуумной промышленности С. А. Векшинскому. В мае его вызывают в Москву.

В августе 1942 г. Сергей Аркадьевич Векшинский уже приезжал в Москву, где он встречался с наркомом электропромышленности И. Г. Кабановым и начальником отдела электропромышленности ЦК ВКП(б) А. А. Турчаниным. Тогда решался вопрос о руководимом им спецбюро, которое находилось в Новосибирске, на заводе № 617, и в силу ряда объективных причин его сотрудники не могли продолжать работы по исследованию сплавов переменного состава. Вместо своей основной деятельности они были консультантами в цехах завода. Сам Векшинский – в цехе приемно-усилительных ламп, которым руководил Николай Васильевич Черепнин, в дальнейшем известный специалист электровакуумной промышленности, много лет проработавший в НИИ-160.

После обсуждения в наркомате и ЦК создавшегося положения была достигнута предварительная договоренность о переводе спецбюро в Москву. Окрыленный новыми перспективами С. А. Векшинский возвращается в Новосибирск. Но прошли осень, зима, а вопрос о переводе все еще не был решен. Наступила весна 1943 года. И вот наконец-то пришел долгожданный вызов.

Москва встретила Векшинского ярким, по-летнему теплым солнцем. Сергей Аркадьевич заметил, что, когда каких-то десять месяцев назад он был здесь, все выглядело более сурово и пасмурно. И хотя многое вокруг напоминало трудности военного времени, лица людей посветлели. Слышались оживленные разговоры, смех.

Нарком А. Г. Кабанов принял без задержки. В кабинете находился хорошо знакомый Векшинскому А. И. Берг. После короткой неофициальной части сразу перешли к делу. Кабанов сказал, что Центральный Комитет партии поставил перед наркоматом задачу расширения работ в области разработки современных радиолокационных систем, иначе, радиоуправляемых самолетов – РУСов. В Москве уже действует завод по производству по английскому образцу станций орудийной наводки. Для их комплектации необходимы специальные радиолампы. Лаборатория при заводе не может обеспечить их серийный выпуск в достаточном количестве, для этого нужно организовать более крупное производство. Разумеется, в нынешних условиях создать новое предприятие невозможно. Надо попытаться приспособить для этих целей один из действующих заводов наркомата.

Разговор продолжил А. И. Берг:

– В настоящее время выпуск электровакуумной продукции ведется на Московском электроламповом (МЭЛЗе) и под Москвой, на фрязинском № 747. Новосибирский и Ташкентский очень далеко. Московский удалось частично перепрофилировать, и кроме специальных источников света на нем в начале 1942 года было начато производство радиоламп, электронно-лучевых трубок, восстановление генераторных ламп ИГ-8, но все это для обеспечения отечественных радиолокаторов РУС-2 и РУС-2с.

Продолжая, Берг отметил, что для станций орудийной наводки, которые изготавливаются на 465-м заводе, надо выпускать, как минимум, тридцать типов радиоламп метрового диапазона длин волн. Но от разведки поступают сведения, что американцы разрабатывают радиолокаторы и станции орудийной наводки, работающие в сантиметровом диапазоне, в котором используются типы ламп, к освоению производства которых наша промышленность практически не приступала. Необходимо срочно наверстывать упущенное. Так или иначе, сейчас надо организовать производство не только английских радиоламп для СОН, но и начать разработку электровакуумных приборов СВЧ-диапазона. Имеется несколько организаций, которые могут принять в этом участие: лаборатория Александрова на МЭЛЗе, вакуумная лаборатория 465-го завода, Отраслевая вакуумная лаборатория и спецбюро в Новосибирске и фрязинский завод. Всех их надо объединить и на их базе создать специальный научно-исследовательский электровакуумный институт с опытным производством, разместив его на территории завода во Фрязине.

В заключение Берг сказал, что Векшинскому, как опытному специалисту и организатору электровакуумной промышленности, предлагается возглавить это дело.

Предложение для Сергея Аркадьевича было неожиданным. Когда он ехал в Москву, то думал, что будет обсуждаться вопрос о переводе его спецбюро из Новосибирска. Но война потребовала решения иных задач. Придет время, и он продолжит свою работу по сплавам переменного состава.

Векшинский сразу включился в работу комиссии по подготовке доклада и проекта постановления для ГКО. И хотя его еще официально не назначили директором НИИ, он приступил к поиску нужных специалистов и начал знакомиться с организациями, которые предполагалось включить в состав будущего Электровакуумного института. Первым делом он отправился во Фрязино на завод № 747, где намечалось разместить НИИ.

* * *

Видавший виды ЗИС-101, поскрипывая рессорами на выбоинах, двигался по Щелковскому шоссе в поселок Фрязино. С. А. Векшинский и заместитель начальника 8-го Главного управления наркомата электропромышленности А. Т. Гусев ехали на электроламповый завод № 747. Сергей Аркадьевич смотрел из машины на поля, леса, серенькие домишки деревень и думал: «Как-то ему придется на новом месте?» Вспомнились молодые годы, когда 20 лет назад он вместе с М. М. Богословским обходил помещения бывшего завода Русского общества беспроволочных телеграфов и телефонов, в которых должен был разместиться первый в России завод по производству радиоламп, и как профессор тогда ему говорил: «Ты молод, тебе по плечу большие задачи. В России в такое тяжелое время мы наладим промышленный выпуск вакуумных радиоламп, и это будет делом твоих рук, твоего ума». И вот теперь, спустя 20 лет, ему предстоит организовать первый в стране научно-исследовательский институт электровакуумной техники.

Директор завода №747 И. И. Каминский встретил Векшинского как старого знакомого. Несколько лет они вместе работали на «Светлане» и хорошо знали друг друга. От взаимных расспросов на житейские темы с той поры, как началась война, перешли к цели визита. Здесь Векшинский сообщил, что готовится постановление ГКО, по которому на территории завода будет организован научно-исследовательский институт, для чего сюда планируется перевести ряд организаций. Вот они и приехали, чтобы выяснить возможности завода и какую помощь тот может оказать в организации НИИ.

Каминский, отвечая на вопросы, рассказал, что на заводе работают всего 49 инженеров и 42 техника. В некоторых цехах нет старших технологов, не говоря уже о рядовых. Мастера, в большинстве, практики, не имеющие специального образования. Ряд отделов не укомплектован ИТР. На заводе имеется 270 единиц оборудования. Изготовлено оно ленинградской «Светланой» еще в 1931-1936 гг., смонтировано в начале 1943 года, в настоящее время сильно изношено и требует капитального ремонта и модернизации. «График работ по расширению завода, – продолжал Каминский, – несмотря на многочисленные решения и постановления постоянно срывается. Корпус № 8 должен быть закончен к концу этого года. Но при таких темпах строительства это вряд ли удастся».

И. И. Каминский еще долго перечислял заводские проблемы. Когда он закончил, Векшинский заметил: «Да, я вижу, что у тебя и без нас хватает забот. Придется все начинать с нуля. Место для науки, надеюсь, найдется?»

– Найдется, но немного. В красном корпусе на третьем этаже левого крыла есть около 600 квадратных метров.

– Ну и за это спасибо. Для начала хватит.

Они обсудили еще некоторые вопросы и в конце договорились вместе посетить вакуумную лабораторию завода №465, которую предполагается перевести во Фрязино.

На следующий день Векшинский доложил А. И. Бергу о результатах поездки. Аксель Иванович внимательно выслушал и сказал: «Не мне вас учить, Сергей Аркадьевич, вы опытный организатор. Я понимаю, что будет трудно, даже очень трудно, но вам не привыкать, вы справитесь. Нужна будет помощь, сразу обращайтесь».

* * *

Ранним утром к дому, находившемуся недалеко от Московского электролампового завода, подкатила старенькая, довоенного выпуска «эмка». Из нее вышел И. И. Каминский и направился в подъезд здания. На втором этаже он постучал в дверь квартиры, где в небольшой комнате проживал С. А. Векшинский. Через несколько минут они спустились к машине, и та двинулась в сторону Ленинградского шоссе. Они ехали знакомиться с производством радиоламп на заводе №465.

На 3-й Миусской улице «эмка» остановилась у здания Физического института им. П. Н. Лебедева Академии Наук СССР (ФИАН). Сам институт был эвакуирован еще в ноябре 1941 г., затем в его корпусах хотели разместить один из московских заводов. Но тот, успев только отремонтировать помещения, также эвакуируется на Восток. Таким образом, заводу №465 достались вполне приличные здания. В них разместились общезаводская лаборатория, вакуумное и макетное производство. Для организации основного серийного выпуска станций оружейной наводки заводу передаются корпуса и здания эвакуированного авиационного завода № 305, которые располагались на развилке Ленинградского и Волоколамского шоссе. Научная часть разместилась в арендованных помещениях Ветеринарного института экспериментальной медицины, расположенного около станции метро «Сокол». В начале 1943 года сюда из ФИАН перевели отдел главного конструктора и ряд лабораторий. В результате вакуумщикам фактически достались почти все здания института.

Векшинский и Каминский, предъявив охране документы, прошли на территорию. Сразу поразило то, что она вся была занята огородами. Здесь хлебнувшие лиха ленинградцы выращивали овощи. У входа с величественными ребристыми колоннами их встретил начальник лаборатории № 5 В. И. Егиазаров. Они обнялись, приветствуя друг друга. Многолетняя совместная работа на «Светлане» сдружила их. Война разбросала бывших сослуживцев: кого в Новосибирск, кого в Ташкент, а кто-то остался в блокадном Ленинграде. После недолгих взаимных расспросов все отправились на второй этаж, где размещалось опытное производство лаборатории. Здесь было много знакомых ленинградцев, которые радостно приветствовали гостей. Переходя от участка к участку, где в основном работали парни и девчата школьного возраста, Векшинский опытным взглядом подмечал множество недостатков в проведении различных технологических операций. Он прекрасно понимал, что большинство этих нарушений происходит не по вине руководства, а оттого, что нет опытных рабочих, необходимого оборудования, приборов, инструментов и т.д. На испытательных стендах провода, подводящие напряжение к электродам радиоламп, из-за отсутствия ламповых панелей просто прикручивались. Девочки-монтажницы обыкновенными ножницами вырезали из слюды детали, требующие особой точности. Откачные посты были изготовлены из какого-то металлолома, и стоило только удивляться, как они вообще работают. Все это скорее напоминало какую-то кустарную мастерскую, а не опытное производство лаборатории. И вот на базе всего этого надо было организовать серийный выпуск специальных радиоламп.

Егиазаров – опытный разработчик с почти 15-летним стажем – знал все недостатки и недочеты своего производства. Под его руководством лаборатория № 5 делала все возможное и невозможное. Но брак был велик. С большим трудом удавалось хотя бы приблизиться к параметрам английских прототипов. А тут еще при копировании схем блоков в других лабораториях

постоянно вносились поправки, связанные с переводом схем на отечественную элементную базу, параметры радиодеталей которой зачастую не соответствовали английским. Все это сказывалось на работе радиоламп. Векшинский с Каминским хорошо понимали коллегу и очень сочувствовали ему. Но в то же время мысль о том, что это производство со всеми его многочисленными проблемами и недостатками передадут в организуемый институт, не давала им покоя.

Закончив осмотр, они вышли в теплый летний вечер. Очертания зданий с окнами, крест-накрест заклеенными полосками белой бумаги, чтобы они не разбились во время бомбежки, уже расплывались в сумерках. Во дворе свободные от работы вакуумщики обрабатывали свои грядки с будущим урожаем.

За проходной, попрощавшись и пожелав друг другу успехов в их нелегкой работе, Векшинский и Каминский сели на заднее сидение «эмки», и та, фыркнув мотором, покатила по затемненным улицам Москвы. Некоторое время они ехали молча. Потом Векшинский спросил: «Ну, что думаешь, Иван?» «А что тут думать, – ответил тот, – увязнем мы с этим делом по самые уши». «Если вообще не утонем», – сказал Векшинский и тяжело вздохнул.

На следующий день Каминский собрал совещание, на котором Векшинский рассказал присутствующим: главному инженеру завода К. И. Бухарину, главному технологу А. Г. Мишкину и парторгу ЦК на заводе К. С. Горбачеву – о результатах посещения лаборатории №5. Когда Векшинский закончил, посыпались вопросы, на которые Сергей Аркадьевич, как мог, ответил.

В результате дальнейшего обсуждения сообщения Векшинского собравшиеся пришли к общему мнению, что, испытывая многочисленные трудности, связанные с производством на заводе более чем 20-ти типов радиоламп, брать на себя еще дополнительные обязанности было бы неразумно. Каждый понимал, что на завод ляжет большая ответственность по выполнению правительственного задания, за срыв которого «по головке не погладят». Но что делать? Поговорить с Бергом? Тот наверняка скажет, что НИИ как раз и создается, чтобы разрабатывать и выпускать ЭВП для радиолокационных станций, а на просьбу поспособствовать, чтобы завод освободить от производства некоторых типов радиоламп для приемных и передающих радиостанций, ответит, что это, мол, не в его компетенции, и посоветует обратиться в наркомат. Так, или приблизительно так, рассуждали участники совещания. В заключение было принято решение пока не поздно обратиться с этим вопросом к наркому.

На следующий день, с утра, Векшинский был на Китайском проезде, где находился НКЭП. И. Г. Кабанов встретил его приветливо. Они сели напротив друг друга за столом для заседаний, и Векшинский сразу начал с проблемы, которая привела его к наркому. Иван Григорьевич внимательно его слушал.

Нарком электропромышленности И. Г. Кабанов родился в 1898 году в семье рабочего. В 1917 вступил в РСДРП(б). Участник гражданской войны, комиссар. Образование получил в Коммунистическом университете им. Я. М. Свердлова и Московском электромашиностроительном институте им. Я. Н. Каган-Шабшай. С 1932 года работал в системе наркомата тяжелой промышленности СССР, затем - на Московском заводе «Динамо», который выпускал электрические машины для электрифицированных железных дорог, трамвайного и троллейбусного подвижного состава, а также для различных подъемных устройств. В 1937 году он назначается наркомом коммунального хозяйства РСФСР, а через год, в августе 1938 г., – наркомом пищевой промышленности СССР. Однако уже в январе 1939 г. был переведен старшим инженером на «Динамо», в 1940-1941 гг. – он директор завода. С 21 августа 1941 г. – нарком электропромышленности СССР.

Как видно из послужного списка И. Г. Кабанова, он был весьма далек от вопросов, связанных с производством электровакуумных приборов, но суть страстной речи Векшинского он понял. Сергей Аркадьевич не знал, что нарком на различных заседаниях неоднократно пытался доказать необходимость расширения уже имеющегося на заводе №465 вакуумного производства, а не передавать его на другое, под завязку загруженное предприятие. Нарком доказывал, что связисты для своих радиостанций требуют все больше и больше радиоламп, а электровакуумные заводы и так работают на пределе. Когда в системе наркомата создавали завод №465, считали, что он сам будет обеспечивать себя необходимыми радиолампами. Затратили столько сил, чтобы обеспечить его вакуумное производство необходимыми кадрами, материалами и оборудованием. И вот теперь надо все начинать практически сначала. Тот факт, что изготовлены два опытных образца станции, еще ничего не значит. Для выполнения задания ГКО о выпуске в 1943 году 10 комплектов СОН требуется организация серийного производства радиоламп, а это на заводе №465 пока не совсем получается.

Разумеется, нарком не мог рассказать обо всех тонкостях во взаимоотношениях между наркоматами и управлениями. Он явно сочувствовал Сергею Аркадьевичу, прекрасно понимая, какой груз проблем свалится на того, когда вакуумная лаборатория завода № 465 будет переведена в НИИ. Конечно, он будет бороться и дальше.

В один из дней Векшинский посетил на МЭЛЗе лабораторию А. Г. Александрова с целью обсудить с ним вопросы, связанные с ее переводом во Фрязино. Они были знакомы еще с 1925 года, когда Александров руководил отделом генераторных ламп на Электровакуумном заводе в Ленинграде, где Векшинский был главным инженером. Затем они работали в Отраслевой вакуумной лаборатории.

Одновременно с посещением лабораторий, которые планировалось ввести в состав будущего НИИ, Векшинский проводит большую работу по обеспечению будущего института квалифицированными кадрами инженеров, ученых и рабочих. Он понимает, что их придется отыскивать по всей стране: на электровакуумных предприятиях, институтах АН СССР, в воинских частях. Много проблем будет связано с оснащением научной части приборами и оборудованием производственных помещений, а когда появятся новые кадры ИТР, то и со строительством жилья. Но вначале надо создать костяк научной части.

В первую очередь Векшинский обращается к тем, кого хорошо знает по прежней совместной работе. Как и десятилетие назад при создании ОВЛ, С. А. Векшинский старается привлечь для работы в институте физиков, специализирующихся на исследованиях электронно-ионных явлений. По его предложению наркомат посылает в Алма-Ату запрос о командировании в Москву сотрудников Харьковского физико-технического института К. Д. Синельникова, А. К. Вальтера, И. И. Головина и др. С предложением присылать специалистов он обращается также к находящимся в Казани физикам П. И. Лукирскому и Н. Д. Моргулису. Большие надежды Векшинский возлагает на Отраслевую вакуумную лабораторию, которая в это время находилась в Новосибирске. В конце мая 1943 года вызывается в Москву начальник лаборатории С. А. Зусмановский. Ему предстоит подготовить переезд ОВЛ во Фрязино. 16 июня 1943 г. выходит приказ НКЭП за № 353сс о переводе лаборатории на завод № 747 в составе шести отделов: разработки приемно-усилительных ламп, генераторных ламп, газоразрядных приборов, мощных генераторных ламп с водяным охлаждением, а также измерительного и химического. ОВЛ стала первым шагом в создании в будущем НИИ-160 научной части.

* * *

Работа комиссии над докладом и проектом постановления ГКО на имя И. В. Сталина была завершена к середине июня 1943 года. В своей книге «Министр невероятной промышленности СССР» (Москва, 1999) директор конструкторского бюро полупроводникового машиностроения А. А. Шокин, сын министра электронной промышленности А. И. Шокина, рассказывая об участии отца в работе Совета по радиолокации, пишет: «...Через Г. М. Маленкова на имя И. В. Сталина был подан соответствующий доклад с проектом постановления. Сталин принял А. И. Берга, который и изложил суть радиолокации, необходимость развертывания широкого производства радиолокационных станций, проблемы, которые этому препятствуют, и необходимые государственные меры. Говорить он умел, и, по полупроизводственным сведениям, беседа продолжалась три часа, закончившись одобрением».

Этой же версии придерживается и Г. Б. Реутов, крупный ученый и конструктор в области радиолокации, средств информатики, методов обработки радиосигналов, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, генерал-майор, который в 1965 году за разработку радиолокатора для системы ПРО С-225 стал лауреатом Государственной премии СССР. В уникальном, не имеющем аналогов издании «Советская военная мощь от Сталина до Горбачева» (М.: Издательский дом «Военный парад», 1999), авторами которого являются ученые с мировым именем, руководители оборонной промышленности СССР, крупные военачальники и дипломаты, Реутов пишет (С. 487): «...Дальнейшее развитие радиолокационной техники требовало крупных государственных решений. Естественно, должно быть решение И. В. Сталина. Ему нужно было доложить, что представляет собой радиолокационная техника, что она дает, каковы ее перспективы... Кто мог взять на себя смелость в грозное время войны первым доложить Сталину? Мне трудно сейчас сказать точно, кто это был. Но долгие годы работы в области радиоэлектронного вооружения в заказывающих органах вооруженных сил и радиопромышленности, знакомство со многими учеными, инженерами, высококвалифицированными специалистами позволяют мне высказать мнение, что таким человеком мог быть Аксель Иванович Берг... Как рассказывал А. И. Берг, когда он заговорил у Сталина о радиолокации, радиопромышленности, состоящей из научно-исследовательских институтов и заводов, и вообще о широком применении радио в военном деле, и в первую очередь при управлении оружием, Сталин многого не понял, начал раздражаться. Но настойчивость А. И. Берга, очевидно, взяла свое, и он убедил Сталина, что речь идет о новом виде вооружения для армии. Особенно повлиял при этой встрече показ результатов применения радиолокационных станций в сложных метеоусловиях для наведения стволов зенитной артиллерии на цели и эффективности их поражения...»

Здесь не совсем понятно: с одной стороны, Г. Б. Реутов пишет, что, по его мнению, таким человеком мог быть А. И. Берг, а с другой – передает рассказ самого Берга о его встрече со Сталиным. В то же время в своих автобиографических заметках, фрагменты из которых были опубликованы в журнале «Радиотехника» (1998. № 10), один из основоположников отечественной радиолокации академик Ю. Б. Кобзарев, рассказывая об эпизоде, связанном с принятием постановления, пишет: «...вопрос, в конце концов, должен был решиться на совещании у Сталина. И вот наступил долгожданный день. Все причастные к проблеме были собраны поздно вечером в ЦК. Среди собравшихся были А. И. Берг, А. А. Турчанин, М. Л. Слиозберг, А. А. Форштер и ряд лиц мне не известных. Нам принесли бутерброды и чай и просили ждать.

Ожидание было долгим. Наконец было объявлено, что Сталин приглашает таких-то из числа собравшихся. Не помню, кто пошел еще кроме Берга и Турчанина. Помню только, что вызванные скоро вернулись. Все было решено. На совещании у Сталина было принято решение создать Совет по радиолокации, персональный состав которого должны были объявить в ближайшее время. Первый этап создания базы для радиолокации был пройден.

На следующий день, 5 июля 1943 г., А. И. Бергу принесли лист, на котором было отпечатано постановление Государственного комитета обороны, принятое ночью. Я присутствовал при чтении А. И. Бергом этого постановления в его кабинете в наркомате электропромышленности. В нем перечислялись члены Совета по радиолокации при Государственном комитете обороны: Г. М. Маленков – председатель, А. И. Берг – заместитель председателя, затем – Г. А. Угер, А. И. Шокин, Ю. Б. Кобзарев, ряд министров. Наконец А. А. Турчанин – ответственный секретарь – был назван в конце».

В приведенном отрывке имеется ряд неточностей, связанных с ошибками то ли редакции, то ли самого академика. Во-первых, во время войны Сталин вел прием в своем кремлевском служебном кабинете, а также иногда на дачах, но никак не в ЦК на Старой площади, как это утверждает Кобзарев. Далее вызывает большое сомнение приглашение на прием к Сталину директора и главного инженера завода № 465 (А. А. Форштера и М. Л. Слиозберга).

На следующий день, 5 июля, как пишет Кобзарев, А. И. Бергу принесли лист с постановлением ГКО. Отсюда следует, что постановление было принято 4 июля. Но согласно документу, хранящемуся ныне в архиве Президента Российской Федерации, «Журнал записи лиц, принятых И. В. Сталиным с 22 июня 1941 г. по 9 мая 1945 г.», 3 и 4 июля 1943 г. он приема не вел (Исторический архив. 1996. № 2-4).

В списке членов Совета также есть неточности. Так, А. И. Шокин не был членом Совета, а был начальником его промышленного отдела, назначенным решением Секретариата ЦК ВКП(б). И наконец, в 1943 году еще не было министров, а были наркомы. Можно предположить, что в своих воспоминаниях Ю. Б. Кобзарев посещение представителями завода № 465 отдела электропромышленности ЦК ВКП(б) в 1942 году, о чем рассказано выше, из-за давности события принял за прием у Сталина.

Теперь следует разобраться с вопросом, был ли А. И. Берг у Сталина, о чем повествуют вышеназванные авторы. Прямых доказательств этому нет. По крайней мере, в журнале записи лиц, принятых И. В. Сталиным в годы войны, фамилия А. И. Берга отсутствует. Но тогда как же утверждение Г. Б. Реутова о том, что об этом ему рассказывал сам Аксель Иванович? Дело, очевидно, в том, что Берг был на приеме у Сталина, но позже, уже после войны, о чем он и поведал Г. Б. Реутову.

Тогда Берг рассказал ему, что однажды группа ученых обратилась к Сталину с письмом, в котором предлагалось создать установку, которая могла бы фокусировать энергию в радиочастотном диапазоне с тем, чтобы на значительном расстоянии сжигать обнаруженные самолеты противника. Сталин вызвал Берга и поинтересовался у него, в какой степени это важно и реально ли вообще? На что Аксель Иванович ответил, что в ближайшие 40 лет на тех расстояниях, о которых говорится в предложении, нельзя будет сжечь даже муху.

Вполне вероятно, что именно эта встреча послужила поводом для рождения легенды о беседе Берга со Сталиным в течение трех часов перед принятием постановления о совете по радиолокации.

В мемуарной литературе существует твердое мнение о том, что Сталин досконально разбирался во всех вопросах, связанных с вооружением. Отсюда вытекает, что он подробно ознакомился и с проблемами в области развития радиолокации перед тем, как подписал постановление. Только остается открытым вопрос, кто ему мог рассказать об этих проблемах или он узнал о них из предоставленного доклада? А, может быть, он вообще не придавал этому постановлению того значения, которое оно сыграло в развитии отечественной радиолокационной техники.

Государственный комитет обороны был создан совместным постановлением Президиума Верховного Совета, Совнаркома и ЦК ВКП(б) от 30 июня 1941 года. До ноября 1942 г. ГКО через Ставку Верховного Главнокомандования руководил военными действиями, а также военной промышленностью и лишь частью базовых отраслей промышленности. Но 8 декабря 1942 г. постановлением ГКО было утверждено Оперативное бюро ГКО, к ведению которого было отнесено 14 наркоматов, включая военную промышленность, и все базовые отрасли промышленности. За время войны по военным вопросам этим Бюро было принято 2256 постановлений и примерно столько же – по отраслям оборонной промышленности, которые до настоящего времени еще не рассекречены. Всего же за время войны ГКО принял 9971 постановление, которые укладываются в 536 дел Российского центра хранения и изучения документов новейшей истории (РЦХИДНИ). Исследователь роли и значения ГКО в годы Великой Отечественной войны генерал-полковник Ю. А. Горьков, консультант историко-архивного и военно-мемориального центра Генерального штаба по военным вопросам, ознакомившись со всеми постановлениями, пришел к следующим выводам, что из 9971 постановления более половины приняты способом голосования, а не лично Сталиным. Правда, здесь Горьков пишет, что часть их, не требующая согласования, в интересах оперативности подписывалась Сталиным или его заместителями – Молотовым и Берией.

Из всех постановлений почти 2256, касающихся Вооруженных Сил, Сталин подписал лично. И не просто подписал: одни он написал сам, другие подготовлены под его диктовку, третьи он существенно переработал, что-то добавил и уточнил (Горьков Ю. А. Государственный Комитет Обороны постановляет. М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2002).

В постановлении ГКО № 3686 от 4 июля 1943 г., хранящемся в архиве РЦХИДНИ, нет никаких пометок, исправлений или дополнений. На нем нет и личной подписи Сталина, хотя в статье В. М. Пролейко «О значении электроники», опубликованной в журнале «Электроника: Наука, Технология, Бизнес» (2003. № 4), в которой впервые приведен с некоторыми купюрами текст постановления ГКО «О радиолокации», личная подпись Сталина есть.

Правда, сам Пролейко, который более 20 лет возглавлял Главное научно-техническое управление Министерства электронной промышленности, это постановление в архиве, очевидно, не видел, его текст ему передал директор ЦНИРТИ (бывший НИИ-108) Ю. Н. Мажоров. Что касается личной подписи Сталина, то вполне возможно ее добавили в редакции журнала, так как во всех публикациях, в которых упоминается это постановление, говорится, что оно вышло за личной подписью Сталина. Вообще Сталин, как правило, не подписывал документы лично. Так, например, на приведенной в книге С. Пестова «Бомба. Тайны и страсти атомной преисподни» (С-П.: Шанс, 1995) фотокопии Постановления ГКО от 20 августа 1945 г. № 9887 об образовании при ГКО Специального комитета по руководству всеми работами по использованию внутриатомной энергии урана – другими словами – атомной бомбы, также нет личной подписи Сталина.

Отсюда возникает вопрос, все ли постановления, в конце которых напечатано «Председатель государственного комитета обороны И. Сталин», он читал? В частности, постановление «О радиолокации»?

В. М. Молотов, вспоминая о том, что у Сталина была поразительная работоспособность, в то же время отмечает, что «...с другой стороны, стоит вспомнить постановления... Их принимали очень много, в неделю иногда до сотни. Эти все постановления Поскребышев в большом пакете направлял на дачу, на подпись. И пакеты, нераспечатанные, лежали на даче месяцами. А выходили все за подписью Сталина. Громадная куча, которая просто не распаковывалась. ...Читать ему все эти бумаги, конечно, было бессмысленно. Потому что просто он стал бы бюрократом. Он был не в состоянии все это прочитать. ...Все выходило за его подписью, ну а все эти пакеты валялись в углу не распакованными. Приходишь на дачу, и месяц назад они валялись, а теперь еще новая куча. ...Сталин спросит: «Важный вопрос?» – «Важный». Он тогда лезет до запятой. А так, конечно, принять постановление о том, сколько кому дать на одно, на другое, на третье, – все это знать невозможно. Но централизация нужна. Значит, тут на доверии к его заместителям, а то и наркомам, членам ЦК» (Чуев Ф. Молотов. Полудержавный властелин. М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2002. С. 315-316). Сомнения в том, знакомился ли Сталин с постановлением «О радиолокации», вызывает и содержание этого документа. Ниже полностью приводится его текст*.

ПОСТАНОВЛЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА ОБОРОНЫ
«О РАДИОЛОКАЦИИ»

№ ГОКО-3686сс

4 июля 1943 г.

г. Москва

Учитывая исключительно важное значение радиолокации для повышения боеспособности Красной Армии и Военно-Морского Флота, Государственный Комитет Оборона постановляет:

1. Создать при Государственном Комитете Оборона Совет по радиолокации

Возложить на Совет по радиолокации при ГОКО следующие задачи:

а) подготовку проектов военно-технических заданий ГОКО для конструкторов по вопросам системы вооружения средствами радиолокации Красной Армии и Военно-Морского Флота;

б) всемерное развитие радиолокационной промышленности и техники, обеспечение создания новых средств радиолокации и усовершенствования существующих типов радиолокаторов, а также обеспечение серийного выпуска промышленностью высококачественных радиолокаторов;

в) привлечение к делу радиолокации наиболее крупных научных, конструкторских и инженерно-технических сил, способных двигать вперед радиолокационную технику;

г) систематизацию и обобщение всех достижений науки и техники в области радиолокации как в СССР, так и за границей путем использования научно-технической литературы и всех источников информации;

д) подготовку предложений для ГОКО по вопросам импорта средств радиолокации.

2. Утвердить Совет по радиолокации в следующем составе: тт. Маленков (председатель), Архипов, Берг, Голованов, Горохов, Данилин, Кабанов, Калмыков, Кобзарев, Стогов, Тереньгев, Угер, Шахурин, Щукин.

3. Поставить перед Советом по радиолокации в качестве ближайших задач:

а) обеспечение улучшения качества и увеличения серийного производства выпускаемых промышленностью следующих радиолокаторов – установки обнаружения, опознавания самолетов и наведения на них истребительной авиации в системе ПВО – «Пегматит-3» и «Редут» с высотной приставкой; станции орудийной наводки СОН для обеспечения стрельбы зенитных дивизионов в системе ПВО; самолетных радиолокационных установок радионаведения для двухмоторных самолетов «Гнейс-2»; радиолокационных приборов опознавания самолетов и кораблей «свой - чужой».

*В приведенном постановлении сохранены стиль и орфография оригинала.

б) Обеспечение создания и испытания опытных образцов и подготовки серийного производства следующих радиолокаторов – установки наведения прожекторов для ведения заградительного огня зенитной артиллерией в системе ПВО; станции орудийной наводки СОН-3 для обеспечения стрельбы зенитным дивизионом в системе ПВО; радиолокационной установки для наведения на цель бомбардировочной авиации дальнего действия; радиолокационной установки наведения для одномоторного истребителя; универсальной морской установки обнаружения для всех типов кораблей, включая подводные лодки и торпедные катера; корабельной и береговой установки для обнаружения и обеспечения стрельбы главным калибром надводных кораблей и береговых батарей в любых условиях видимости.

4. В целях обеспечения новых разработок и серийного производства радиолокаторов современными высококачественными электровакуумными изделиями создать электровакуумный институт с опытным заводом, объединить в электровакуумном институте научно-технические, инженерные кадры и лабораторное оборудование:

- а) Отраслевой вакуумной лаборатории НКЭП;
- б) электровакуумной лаборатории завода № 465 НКЭП;
- в) электровакуумной лаборатории профессора Александрова А.Г.;
- г) специальной электровакуумной лаборатории т. Векшинского С.А.;
- д) электровакуумной лаборатории Физико-Технического Института АН СССР;
- е) электровакуумного завода № 747 НКЭП.

Разместить этот институт на площадях завода № 747 НКЭП.

Утвердить начальником института т. Векшинского С.А.

5. Для решения задач комплексного проектирования радиолокационного оборудования объектов, разработки тактико-технических заданий на радиолокационные приборы и координации работ отделов главных конструкторов заводов радиолокационной промышленности организовать Проектно-Конструкторское Бюро по радиолокации.

Утвердить начальником Проектно-Конструкторского Бюро по радиолокации т. Попова Н.Л.

6. Организовать в Наркомате электропромышленности Главное управление радиолокационной промышленности в составе:

- а) Всесоюзного научно-исследовательского института радиолокации;
- б) Электровакуумного института;
- в) Проектно-Конструкторского Бюро;
- г) заводов Наркомэлектропрома №№ 465, 747, 498, 208 и 830.

7. Утвердить т. Берга А.И. заместителем наркома электропромышленности по вопросам радиолокации.

8. Восстановить в Московском энергетическом институте факультет радиотехники.

9. Обязать Главное управление трудовых резервов при СНК СССР (тт. Москатов и Зеленко) совместно с ЦК ВЛКСМ (т. Михайлов) организовать 15 ремесленных училищ с контингентом учащихся 10 тысяч человек с целью подготовки в этих училищах квалифицированных рабочих кадров для заводов радиолокационной промышленности.

10. Установить для крупных научных, конструкторских и инженерно-технических работников по радиолокации 30 персональных окладов в размере до 5 000 рублей каждый и 70 окладов в размере до 3 000 рублей.

11. Разрешить председателю Совета по радиолокации утвердить штаты аппарата Совета.

12. Обязать Совет по радиолокации совместно с Госпланом при СНК СССР (т. Вознесенский), Наркомэлектропромом (т. Кабанов), Наркомавиапромом (т. Шахурин), Наркомминвооружения (т. Паршин), Наркомсудпромом (т. Носенко), Наркомсредмашем (т. Акопов), Наркомвооружения (т. Устинов) к 15 июля с.г. представить на утверждение Государственного Комитета Обороны предложения о мероприятиях по организации производства радиолокационной аппаратуры.

Председатель Государственного
Комитета Обороны

И. Сталин

При знакомстве с текстом этого постановления может возникнуть ряд вопросов, на которые мы попытаемся ответить. На протяжении четырех лет войны с 30 июня 1941 г. по 4 сентября 1945 г. Государственным комитетом обороны было создано 13 основных подразделений, из которых большинство составляют Комитеты (по эвакуации, разгрузке железных дорог, транспортный, трофейный, особый, спецкомитет) и только один Совет – по радиолокации.

Комитет является выборным органом, руководящим какой-либо работой и как орган государственного управления выполняющим определенные функции. С другой стороны, Совет – это распорядительный или совещательный орган при учреждении, организации, обществе, имеющий право обсуждения каких-либо дел, но не решения их. Отсюда выходит, что Совет по радиолокации был только совещательным, а не руководящим органом, что подтверждается в первом пункте постановления.

В связи с поставленными перед Советом задачами, очевидно, и формировался его состав. М. М. Лобанов пишет, что «...в состав постоянных членов Совета были введены народные комиссары оборонных отраслей промышленности Д. Ф. Устинов, М. В. Хруничев, А. А. Горегляд, И. Г. Кабанов, руководящие работники Госплана СССР, НКО и ВМФ, включая заместителя начальника Генерального штаба, а также видные инженеры и ученые промышленности и военные инженеры» (Лобанов М. М. Развитие советской радиолокационной техники. М.: Воениздат, 1982. С. 155). Повторяя Лобанова, эти данные приводят и другие авторы.

Но в постановлении мы видим абсолютно другой состав Совета. Чтобы установить, кто есть кто, пришлось встретиться с определенными трудностями. Сначала рассмотрим тех членов Совета, которых приводит Лобанов.

Д. Ф. Устинов с 1941 по 1953 г. был наркомом (министром) вооружения СССР и вполне мог входить в состав Совета.

М. В. Хруничев с 1942 по 1946 г. – зам. наркома боеприпасов.

А. А. Горегляд с 1943 по 1945 г. – зам. наркома танковой промышленности, не имеющей отношения к радиолокации. С марта 1946 г. он – министр судостроительной промышленности.

И. Г. Кабанов с 1941 по 1951 г. – нарком (министр) электропромышленности, напрямую связанной с радиолокацией.

Все вышеперечисленные члены Совета (кроме И. Г. Кабанова) отсутствуют в его составе, приведенном в постановлении. Этот факт можно объяснить, очевидно, тем, что М. М. Лобанов перечисляет не членов Совета, а членов Комитета по радиолокации при Совете Министров СССР, в который был преобразован Совет в июне 1947 г. Руководил Комитетом председатель Госплана СССР М. З. Сабуров. Но вернемся к членам Совета, перечисленным в постановлении.

Назначение председателем Совета Г. М. Маленкова, прежде всего, вызвано тем, что каждый образуемый при ГКО орган должен был возглавлять кто-нибудь из его членов (в официальной биографии Маленкова не говорится, что он был председателем Совета по радиолокации). В ГКО Маленков занимался вопросами авиации, хотя плохо знал дела ВВС и авиапромышленности. Присутствуя на встречах Сталина с наркомом авиапромышленности А. И. Шахуриным, его заместителем А. С. Яковлевым и конструкторами, Маленков больше молчал, но скрупулезно, до мелочей, записывал все подробности совещания в своей книжке. А потом пунктуально выполнял указания или замечания Сталина, который никогда его не критиковал, но за спиной высказывался о нем нелестно. В частной беседе с А. И. Микояном он о Маленкове говорил следующее: «Кто такой Маленков? Он не крупный руководитель. Какой у него опыт работы? Он был заведующим ЦК и Секретарем ЦК, а это опыт канцелярский, никогда Маленков не бывал на заводах, не руководил областью, не был наркомом... Так что не надо преувеличивать Маленкова».

Почти аналогичную характеристику дает Маленкову В. М. Молотов: «...Маленков – очень хороший исполнитель, «телефонщик», как мы его называли, – он всегда сидел на телефоне: где что узнать, пробить, это он умел. По организационно-административным делам, кадры перераспределить – это Маленков. Передать указания на места, договориться по всем вопросам. Он нажимал – оперативная работа. Очень активный, живой, обходительный. В главных вопросах отмалчивался. Он никогда не руководил ни одной парторганизацией...»

Несмотря на такие не совсем лестные характеристики, Г. М. Маленкову Указом Президиума Верховного Совета СССР от 30 сентября 1943 г. за особые заслуги «в усилении производства вооружения и боеприпасов» присвоено звание Героя Советского Союза.

Роль Маленкова в Совете заключалась не в выработке его решений и предложений, а в «проталкивании» их в нужных инстанциях. Основной же работой Совета руководил А. И. Берг.

Теперь коротко о других членах Совета.

С. Н. Архипов в момент принятия постановления – руководитель кафедры радиотехники в Военно-морской академии. Начиная с 1938 года он проводил работы по исследованию возможностей обнаружения самолетов с помощью ультракоротких волн. Долгое время работал вместе с Бергом. В начале войны служил флагманским связистом Северного флота.

А. Е. Голованов – командующий авиацией дальнего действия. В январе 1941 года написал письмо Сталину, в котором изложил идею организации крупного авиационного соединения, способного выполнять боевые задачи в глубоком тылу противника в сложных метеоусловиях в любое время суток. Впоследствии – сначала командир отдельного дальнебомбардировочного авиационного полка, затем дивизии и, наконец, командующий всей авиацией дальнего действия, Главный маршал авиации (1944 г.)

А. Ф. Горохов – генерал-лейтенант, с марта 1944 г. – командующий зенитной артиллерией.

С. А. Данилин – генерал-майор, начальник НИИ ВВС, инициатор оснащения истребительной авиации бортовыми радиолокационными станциями.

И. Г. Кабанов – нарком электропромышленности.

В. Д. Калмыков – директор НИИ-10, занимавшегося вопросами оснащения системами вооружения ВМФ. Впоследствии – министр радиотехнической промышленности.

Ю. Б. Кобзарев – нач. лаборатории ЛФТИ, руководитель работ по созданию первой отечественной импульсной РЛС «Редут» (РУС-2), принятой на вооружение в 1940 году. Академик (1970 г.), Герой Социалистического Труда (1975 г.).

Д. С. Стогов – сотрудник НИИИС КА, разработчик первой РЛС непрерывного действия «Ревень» (РУС-1), принятой на вооружение в 1939 году.

В. П. Терентьев – руководитель 4-го Главного управления наркомата судостроительной промышленности.

Г. А. Угер – научный сотрудник НИИ ВВС, заместитель С. А. Данилина.

А. И. Шахурин – нарком авиационной промышленности.

А. Н. Щукин – теоретик по распространению коротких волн, теории и методов расчета дальней связи, профессор Военно-морской академии.

Таким образом, в состав Совета были включены пять представителей ВМФ (Архипов, Берг, Калмыков, Терентьев, Щукин), четыре представителя ВВС (Голованов, Данилин, Угер, Шахурин), 2 разработчика РЛС (Кобзарев, Стогов), один артиллерист (Горохов) и один представитель от электропромышленности, которой предстояло разрабатывать и изготавливать радиолокационное вооружение (Кабанов).

Среди членов Совета были только два наркома: Шахурин и Кабанов, которые имели возможность руководить и давать указания. Остальные одиннадцать членов могли участвовать в подготовке различных проектов, систематизации и обобщении достижений науки и техники в области радиолокации, рекомендовать кандидатуры ученых инженеров и конструкторов для привлечения их к работам по радиолокации.

Как ни стараются некоторые авторы показать значительную роль Совета в увеличении выпуска РЛС, организации их серийного производства, развертывании радиолокационной промышленности, подготовке научных и инженерных кадров и т. д., факты говорят о том, что на начальном этапе деятельности Совета (в период войны) эта роль была незначительна. Так, например, несмотря на то, что в его составе было пять представителей ВМФ, до конца войны ни один корабль не был оснащен отечественной РЛС, и только поставки их по ленд-лизу как-то спасли положение. Корабельная станция «Гюйс-1М» принята на вооружение только в конце января 1945 г., а ее модернизированный вариант «Гюйс-1Б» – в декабре 1945 г.

Такое же положение мы наблюдаем и в оснащении радиолокационными средствами ВВС. Первая бортовая самолетная РЛС «Гнейс-2» принята на вооружение в июне 1943 г. Следующая, более совершенная модификация «Гнейс-5» – только во второй половине 1945 г. Всего в годы войны было выпущено около 250 станций. В то время как в Германии и у наших союзников: Англии и США – они практически стояли на каждом самолете.

За годы войны наша промышленность не намного продвинулась в создании РЛС дальнего обнаружения, продолжая выпускать станции РУС-2 (двухантенную, одноантенную автомобильную и одноантенную разборную), работающие в 4-метровом диапазоне. Новая РЛС П-3 этого же диапазона была принята на вооружение в конце 1945 г.

Попытка создания станции орудийной наводки в 1,5-метровом диапазоне («Турмалин», «Нептун») до окончания войны не увенчалась успехом, и завод №465 совместно с НИИ-160 продолжал выпускать прототип английской СОН.

Справедливости ради следует сказать, что та работа, которую проводил Совет в военное время, способствовала бурному развитию отечественной радиолокации в послевоенные годы. Большая заслуга Совета, на наш взгляд, заключается в том, что он сумел, используя различные источники информации, в том числе и разведанные, собрать обширный материал по состоянию работ в области радиолокации за рубежом. В дальнейшем эти материалы позволили советским ученым и инженерам по некоторым разработкам не только выйти на мировой уровень, но и превзойти его. Но вернемся к тексту постановления.

Пункт 3, в котором поставлены перед Советом ближайшие задачи, практически не был выполнен, не создан ряд установок РЛС «Пегматит-3», СОН-3, РЛС для одномоторного истребителя, универсальной морской установки обнаружения для всех типов кораблей и т. д.

Пункт 4 расписан более детально и конкретно. По существу, все постановление можно было бы назвать «О радиолокации и создании Электровакуумного института». Специалисты, готовившие проект постановления, прекрасно понимали, что производство радиолокационных средств невозможно без соответствующих электровакуумных приборов, поэтому по их предложению в состав нового НИИ были включены фактически все организации, связанные с разработкой и выпуском ЭВП. К сожалению, и этот пункт не был выполнен. Из всех перечисленных организаций только Отраслевой вакуумной лаборатории, переведенной из Новосибирска в НИИ-160, пришлось осваивать новые типы электровакуумных приборов. Лаборатория № 5 завода № 465 была преобразована в один из цехов опытного завода НИИ-160 и занималась

только выпуском радиоламп для копируемой английской СОН. Другие лаборатории по ряду причин так и не вошли в состав НИИ. Остальные пункты постановления – об организации Проектно-конструкторского бюро по радиолокации, Главного управления радиолокационной промышленности в НКЭП, Всесоюзного НИИ радиолокации и т. д. – были выполнены, но приобрели свое значение уже в послевоенное время.

В заключение хотелось бы коротко сказать, что постановление ГКО было первым в нашей стране официальным документом, утвердившим развитие отечественной радиолокации как дело государственной важности, поэтому оно имеет историческое значение.

Статья поступила 12 мая 2008 г.

≡ НОВЫЕ КНИГИ ≡

КЕЧИЕВ Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. - М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. - 616 с., ил. - (Библиотека ЭМС).

Впервые в отечественной литературе рассматривается полный комплекс вопросов проектирования печатных плат для быстродействующей цифровой аппаратуры. Дается характеристика современной и перспективной элементной базы, рассматриваются электрофизические параметры печатных плат и линий передач в их составе. Большое внимание уделено методам анализа помех в цифровых узлах. Отдельно рассмотрен один из важнейших вопросов - проектирование шин питания и заземления в составе плат. Детально представлен материал по проектированию дифференциальных пар, которые все шире применяются в печатных платах. Излучения от печатных плат и их восприимчивость к электромагнитным помехам рассмотрены в контексте электромагнитной совместимости, базовые сведения о которой необходимы каждому разработчику. В завершение рассматриваются некоторые аспекты САПР печатных плат, применение которых важно для создания быстродействующих печатных узлов, а также влияние технологии на конечные показатели плат.

Изложение материала ориентировано на инженерную аудиторию, иллюстрируется многочисленными практическими примерами и сопровождается конкретными рекомендациями и правилами проектирования.

Книгу можно рассматривать как развернутый справочник. Она может быть полезна разработчикам печатных плат, студентам и аспирантам соответствующих специальностей, а также ее можно рекомендовать в качестве учебного пособия в системе повышения квалификации и профессионального мастерства.

Издание книги одобрено Гильдией профессиональных технологов приборостроения.

КАТАЛОГ
информационных изданий на 2008 г.

Проводится подписка на следующие виды изданий:

- «**Электронная техника**», серия 1 «**СВЧ-техника**» (4 вып. в год). Стоимость подписки – 1180 руб., включая НДС (18 %).

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 ученой степени кандидата наук)

- «**Новости СВЧ-техники**» – информационный сборник (12 вып. в год). Стоимость подписки – 1180 руб., включая НДС (18 %).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам:

ФГУП «НПП «Исток», ИНН 5052002576, р/с 40502810640480100019, «Сбербанк России» г. Москва,
БИК 044525225, к/с 30101810400000000225, ОКПО 07622667,
ОКОНХ 95120, КПП 509950001, ОСБ 2575 г. Щелково
и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу:
141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а,
ФГУП «НПП «Исток», НПО-100; тел./факс: (495)465-86-12.

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

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на «_____» на 2008 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.

Компьютерная верстка Земскова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати	Усл. п. л. 10	Формат 60×88 ^{1/8}
9.06.2008 г.	Уч.-изд. л. 10,5	Тираж 250
Заказ № 225	Индекс 36292	8 статей

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istok-info@flexuser.ru