

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1
СВЧ-ТЕХНИКА
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4 (492)

2007

Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

д.т.н. **С.И. Ребров** (зам. главного редактора),
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», 2007 г.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Выпуск 4(492)

2007

Памяти Сергея Ивановича Реброва 4

Твердотельная электроника

Дутышев И.Н. – 100-ваттный усилитель мощности с уменьшенным уровнем интермодуляционных искажений и защитой выходных транзисторов от пробоя при работе в двухсигнальном режиме 7

Васильев Я.О., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. – Усилители мощности для АФАР X-диапазона в ГИС-исполнении..... 13

Паиковский А.Б. – Квантовые переходы между расщепленными уровнями симметричных трехбарьерных структур в неоднородных полях 17

Автоматизированное проектирование

Бережнова П.В., Паиковский А.Б., Ратникова А.К., Лукашин В.М. – Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах .. 21

Красник В.А., Манченко Л.В., Паиковский А.Б., Потапова Т.И., Пчелин В.А. – Нелинейная модель полевых транзисторов с субмикронным затвором на гетероструктурах с селективным легированием 25

Медицинская электроника

Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д. – Биологические мембраны – первичные мишени рецепции электромагнитных полей в медико-биологическом эксперименте 29

К 65-летию ФГУП «НПП «Исток»

Попов Р.М. – Под шифром «Кобальт» 42

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 4(492)	2007	Founded in 1950
In memory of Sergey Ivanovich Rebrov		4
Solid-state electronics		
<i>Dutyshev I.N.</i> – 100 W power amplifier with a reduced level of intermodulation distortions and protection of output transistors against breakdown at operation in two-signal mode ..		7
<i>Vasilyev Ya.O., Manchenko L.V., Pchelin V.A., Tregubov V.B.</i> – Power amplifiers for X-ray phased arrays in HIC design		13
<i>Pashkovsky A.B.</i> – Quantum transitions between split levels of symmetrical three-barrier structures in non-uniform fields		17
Automated design		
<i>Berezhnova P.V., Pashkovsky A.B., Ratnikova A.K., Lukashin V.M.</i> – Valuation of non-local heat generation area in power field-effect transistors on heterostructures		21
<i>Krasnik V.A., Manchenko L.V., Pashkovsky A.B., Potapova T.I., Pchelin V.A.</i> – Nonlinear model of field-effect transistors on heterostructures (pHEMT) with selective doping and submicrometer gate		25
Medical electronics		
<i>Borisenko G.G., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.</i> – Biological membranes – the first aims of electromagnetic field reception in medicine-biological experiment		29
To the 65-th anniversary of FSUE RPC "Istok"		
<i>Popov R.M.</i> – «Kobalt» in cipher		42



Сергей Иванович Ребров
1929 – 2007 гг.

ПАМЯТИ СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА РЕБРОВА

Коллектив ФГУП «НПП «Исток», общественность города Фрязино, семья покойного понесли невосполнимую утрату – 4 октября 2007 г. на 79-м году жизни после тяжелой и продолжительной болезни скончался Герой Социалистического Труда, кавалер трех орденов Ленина и ордена Октябрьской Революции, лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, лауреат премии Миноборонпрома России, почетный радист СССР, почетный гражданин города Фрязино, бывший генеральный директор НПО «Исток», генеральный конструктор ФГУП «НПП «Исток», заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, известный ученый в области вакуумной и твердотельной электроники сверхвысоких частот, крупный организатор отечественной электронной промышленности Сергей Иванович Ребров.

Сергей Иванович Ребров родился 9 февраля 1929 года в г. Тверь. В 1952 г., после окончания с «красным дипломом» Московского энергетического института по специальности инженер-электрик, он начал работать в НПП «Исток» (тогда НИИ-160). Молодой, энергичный специалист был замечен, и в 1953 г. он уже начальник лаборатории, а в 1959 г. – начальник отдела. В 1962 г. Сергея Ивановича Реброва назначают директором огромного предприятия. В это время в «Экономической газете» появляется статья о Сергее Ивановиче Реброве – «Самый молодой директор отрасли». Ему всего 33 года.

Отныне вся жизнь Сергея Ивановича подчинена интересам предприятия и города Фрязино. Уже в 1964 г. под его руководством был разработан план по благоустройству города, неукоснительное выполнение которого он требовал от подчиненных.

Вначале было очень трудно. Тянула к себе наука. Его не без оснований считали «человеком для науки». Хорошо подготовленный по математике и физике, он также легко разбирался в электронной технике, процессах в электровакуумных приборах и мог квалифицированно принимать научные и технические решения.

Масштабность мышления С.И. Реброва не случайна. Его отец много лет был первым заместителем Председателя Совета Министров Киргизской ССР, государственные заботы были постоянными темами домашних разговоров и обсуждений. И работа была главным содержанием его жизни. Но для успешного управления крупным предприятием надо было иметь талант руководителя, а не только желание работать.

Первые работы С.И. Реброва были посвящены исследованиям и разработкам газоразрядных антенных переключателей радиолокационных станций, в том числе и сверхмощной противоракетной РЛС (генеральный конструктор Кисунько Г.В.), при помощи которой в 1962 г. впервые в мире была поражена головка межконтинентальной баллистической ракеты. В США смогли повторить это только 20 лет спустя. В дальнейшем созданные заделы в области газоразрядной СВЧ-техники послужили основой для создания мощных газовых лазеров, развитие которых продолжается и в настоящее время. За этот комплекс работ С.И. Ребров в 1968 г. был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР.

С.И. Ребров был не только научным руководителем, но и создателем различных изделий электронной техники, а в течение многих лет и главным конструктором электронных приборов для современных систем радиоэлектронного вооружения. Под его руководством и при его личном участии НПП «Исток» стало лидером отечественной СВЧ-электроники и вывело ее в самостоятельную и новейшую область радиоэлектроники, предназначенную в первую

очередь для решения задач национальной безопасности страны в части создания современного радиоэлектронного вооружения. Огромная заслуга С.И. Реброва в том, что он создал научную школу в области электродинамики, математического моделирования и автоматизированного проектирования вакуумных и твердотельных приборов СВЧ. На предприятии были созданы уникальные, не имеющие аналогов в мировой практике СВЧ-приборы, обеспечивающие надежную и высокоточную работу современных радиолокационных систем. С.И. Ребров принял личное и непосредственное участие в разработке СВЧ-приборов для ныне всемирно известных зенитно-ракетных комплексов С-300П, С-300В и «Тор», БРЛС дальнего радиолокационного обнаружения «Шмель», установленной на самолете А-50, радиолокационного прицельного комплекса «Заслон», установленного на непревзойденных и ныне истребителях-перехватчиках МиГ-31. Созданные под руководством Сергея Ивановича Реброва СВЧ-приборы позволили не только надежно защитить небо нашей страны, но и создать системы радиоэлектронного вооружения, не имеющие равных в мире.

Круг научных интересов Сергея Ивановича Реброва охватывал важнейшие проблемы современной электронной техники. Он – один из родоначальников комплексированных устройств – нового класса радиоэлектронных изделий, оптимально сочетающих требования радиотехники с возможностями электроники. Необходимость в этих устройствах вызывалась требованиями резкого сокращения массы и габаритов бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Эти устройства и по сей день широко применяются в современных системах радиоэлектронного вооружения. За создание этих изделий Сергей Иванович в 1980 г. был удостоен звания лауреата Ленинской премии. По результатам этих работ была успешно защищена докторская диссертация, а в дальнейшем С.И. Реброву было присвоено ученое звание профессора. Многие годы Сергей Иванович руководил кафедрой завода-вуза, открытого по его инициативе на предприятии. Ныне филиал МИРЭА – это солидное учебное заведение, в течение многих десятилетий готовящее кадры для «Истока» и других предприятий города.

Под его руководством и при непосредственном участии разработаны основные принципы системы обеспечения производственной надежности и качества продукции с использованием операционного контроля унифицированных технологических процессов в СВЧ-приборостроении. В результате были решены проблемы стабилизации частично неуправляемых процессов в СВЧ-приборостроении. Эти работы нашли широкое применение практически на всех предприятиях СВЧ-подотрасли и в значительной степени гарантировали получение высоких показателей надежности вакуумной СВЧ-техники в процессе ее производства и эксплуатации.

В связи с создавшимся в конце 70-х годов отставанием СССР в создании бортовых авиационных радиолокационных прицельных комплексов, «Истоку» как головному предприятию было поручено решение этой проблемы. Под руководством С.И. Реброва ученые и инженеры предприятия успешно справились с этой задачей. Впервые в стране была создана БРЛС с цифровой обработкой сигнала, позволившая реализовать режим радиолокационного картографирования местности; сформулированы принципы системотехнического решения бортовых радиоэлектронных комплексов, которые и сейчас успешно используются при разработке новейших видов радиоэлектронного вооружения; разработана активная радиолокационная головка самонаведения ракет класса «воздух-воздух», до сих пор успешно выпускаемая предприятием.

На предприятии постоянно открывались и развивались новые научно-технические направления как по основной приборной тематике, так и по технологии, медицине, машиностроению и пр.

С.И. Ребров много сил и энергии отдавал социально-экономическому развитию объединения и общественной деятельности, избирался депутатом Верховного Совета СССР, Московского областного Совета.

С.И. Ребров обеспечивал стабильную работу всего многотысячного коллектива объединения, непрерывно улучшая производственные показатели и качество выпускаемой продукции, которые неоднократно отмечались Президиумом Верховного Совета СССР, Советом Министров СССР и ВЦСПС. НПО «Исток» при генеральном директоре Реброве С.И. неоднократно поощрялось высокими званиями и государственными наградами - орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, переходящими Красными знаменами. Директору предприятия С.И. Реброву было присвоено звание Героя Социалистического Труда, он награжден тремя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, медалями.

Сергей Иванович был разносторонне одаренным человеком, обыкновенным и необыкновенным, увлекающимся новыми идеями, искусством, волейболом, теннисом. Но все время – в напряжении, даже дома, даже на отдыхе. Была, правда, отдушина – рыбалка. Привлекало Сергея Ивановича и фотоискусство, живопись. Успех во всех этих занятиях присущ незаурядным людям, умеющим заставлять душу и ум трудиться.

Параллельно с колоссальной по широте и ответственности производственной деятельностью С.И. Ребров интенсивно занимался проблемами города Фрязино. За его бытность директором «Исток» стал крупнейшим градообразующим предприятием города, произошло не только существенное расширение производственных площадей предприятия, но и в городе были построены десятки жилых домов, несколько детских садов, яслей, базы отдыха предприятия «Электрон» и «Самшит», профилакторий «Приозерный», Дворец культуры «Исток», спорткомплекс «Олимп», реконструирован пионерский лагерь. За каждым этим объектом скрывалась масса крупных и мелких дел, в которые Сергей Иванович предпочитал вникать сам, рассматривая их с позиции рачительного хозяина.

С.И. Ребров – из тех людей, чья титаническая работа в различных областях человеческой деятельности не поддается простому осмыслению и пониманию. Просматривая, даже в общих чертах, свершенные им дела, невольно возникает вопрос: неужели это все было по силам охватить одному человеку. Нужно было обладать колоссальной внутренней энергией, трудолюбием, решительностью и верой в свою правоту, чтобы на протяжении многих лет самому двигаться вперед и вести за собой могучее предприятие, которое и сейчас по праву считается лидером отечественной СВЧ-электроники. При С.И. Реброве было создано около 15 новых заводов по производству СВЧ-приборов по всему Советскому Союзу. Все эти новые предприятия были укомплектованы кадрами, подготовленными на «Истоке». Свыше 200 специалистов было направлено на руководящие должности на эти заводы. Да и в нашем городе появилось несколько предприятий, отделившихся от «Истока», в том числе «Платан», «Циклон» и экспериментальный завод.

26 лет Сергей Иванович возглавлял наше предприятие. Перейдя в 1988 г. на должность генерального конструктора, он продолжал уделять огромное внимание развитию предприятия и сохранению высокого уровня отечественной СВЧ-электроники.

Светлая память о Сергее Ивановиче Реброве, директоре, ученом и замечательном человеке сохранится в наших сердцах навечно.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.375.4

100-ВАТТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ С УМЕНЬШЕННЫМ УРОВНЕМ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ И ЗАЩИТОЙ ВЫХОДНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ОТ ПРОБОЯ ПРИ РАБОТЕ В ДВУХСИГНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

И. Н. Дутышев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Указаны причины возникновения нелинейных явлений в усилителях мощности и способы их снижения. Приведены результаты практических измерений, подтверждающие правильность найденных технических решений.

The reasons of nonlinear phenomena generation in power amplifiers and means for their reduction are shown. The results of practical measurements confirming the correctness of the found technical solutions are given.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно с целью экономии выходной тракт передающего канала работает в режиме, максимально близком к насыщению. При таком режиме возникает опасность появления интермодуляционных искажений (ИМИ) третьего порядка слишком высокого уровня, которые увеличивают ширину спектра сигнала, что может привести к нарушениям связей в соседних каналах. Борьба с ИМИ является важной частью при решении проблемы увеличения количества передаваемой информации на единицу ширины спектра сигнала. Появившиеся в последнее время линеаризаторы, которые позволяют работать с квадратурной амплитудной модуляцией вблизи насыщения [1], все же не решают проблему возникновения и негативного влияния ИМИ на соседние каналы.

В данной работе рассмотрена возможность уменьшения ИМИ путем анализа эквивалентной схемы усилителя на полевом транзисторе, выявления нелинейных элементов и уменьшения их влияния.

Экспериментальные измерения показывают, что при работе транзистора в режиме, близком к насыщению, происходит изменение рабочей точки транзистора. Очевидно, этот эффект связан с нелинейной ёмкостью затвора и детектированием части входного сигнала на нелинейном $p-n$ -переходе затвора транзистора, что приводит к образованию дополнительного напряжения смещения. Для различных типов транзисторов нелинейные свойства затвора могут привести к различным последствиям. Для одних транзисторов с увеличением входного сигнала происходит увеличение тока стока, для других – уменьшение. В любом случае тот и другой эффект оказывает отрицательное влияние на линейные характеристики усилителя. В первом случае мак-

симальный ток стока достигается при максимальной выходной мощности. С уменьшением выходной мощности будет происходить уменьшение тока стока. Этот эффект в значительной степени ухудшает линейные свойства усилителя в малосигнальном режиме, увеличивается уровень ИМИ третьего и высших порядков. Если ток стока падает при увеличении выходной мощности и в режиме насыщения ток будет минимальным, то это приведёт к появлению ранней нелинейности амплитудной характеристики транзистора. Часто совокупность нелинейных свойств затвора приводит к сложной зависимости тока стока от выходной мощности. В этом случае анализ работы усилителя с учетом совокупности нелинейных свойств затвора, и особенно синтез оптимальных цепей их компенсации, реализуется значительно сложнее. В данной работе рассмотрен метод компенсации нелинейности путём стабилизации тока транзистора.

При работе усилителя в двухсигнальном режиме возникает модуляция тока стока транзистора с частотой, равной разности частот входных сигналов ($\omega_1 - \omega_2$). С той же частотой наблюдается модуляция напряжения затвора. При росте выходной мощности усилителя и приближении её к насыщению в спектре модуляции возникают вторые гармоники и гармоники высших порядков. Модуляция тока стока транзистора вызвана образованием ИМИ второго порядка на нелинейном затворе транзистора. Такой режим работы транзистора является опасным. (В 100-ваттном усилителе напряжение ИМИ второго порядка может достигать 10 В и более.) Мгновенное значение напряжения на стоке транзистора может превышать допустимые нормы и вызвать его пробой. Для защиты выходных транзисторов от пробоя напряжением ИМИ второго порядка автором разработана схема усилителя с обратной связью.

2. СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА ТРАНЗИСТОРА

Для того чтобы достаточно эффективно стабилизировать ток стока, можно использовать отрицательную обратную связь по постоянному току. На рис. 1 показана упрощенная принципиальная схема усилителя на полевом транзисторе со стабилизацией тока.

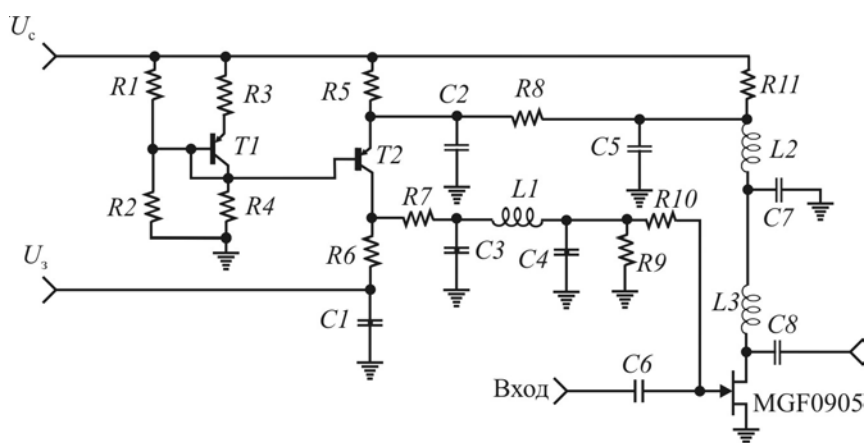


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема усилителя на полевом транзисторе со стабилизацией тока

Напряжение, пропорциональное току стока, снимается с токового резистора R11, усиливается транзистором T2 и через дополнительные элементы схемы отрицательной обратной связи

усилителя подается на затвор транзистора для нейтрализации изменения рабочей точки транзистора.

Транзистор $T1$ предназначен для стабилизации тока при изменении температуры. Индуктивности $L1, L2$ и ёмкости $C2, C3, C4, C5, C7$ предотвращают самовозбуждение СВЧ-транзистора. В результате при изменении выходной мощности ток стока остаётся постоянным, в значительной степени улучшается эффективность работы транзистора, достигаются минимальная нелинейность амплитудной характеристики и максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку.

Амплитудные характеристики усилителя на полевом транзисторе со стабилизацией и без стабилизации тока приведены на рис. 2.

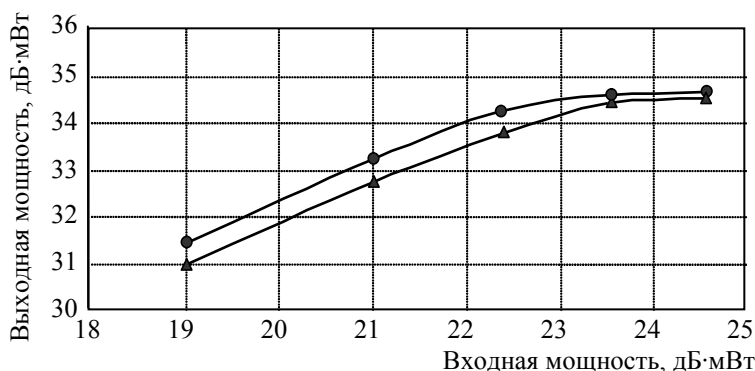


Рис. 2. Амплитудные характеристики усилителя со стабилизацией (—●—) и без стабилизации (—▲—) тока

Измерения проводились для транзистора MGF0905 в диапазоне частот 1,75...1,95 ГГц. Отметим, что максимальная выходная мощность усилителя со стабилизацией тока больше на 0,4...0,5 дБ по сравнению с усилителем без стабилизации. Уровень точки нелинейности амплитудной характеристики по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ также больше на 0,4...0,5 дБ. Кроме того, отмечается небольшое увеличение коэффициента передачи (приблизительно на 0,5 дБ). Проводились измерения уровня ИМИ третьего порядка усилителей со стабилизацией и без стабилизации тока. На рис. 3 приведены зависимости уровня ИМИ третьего

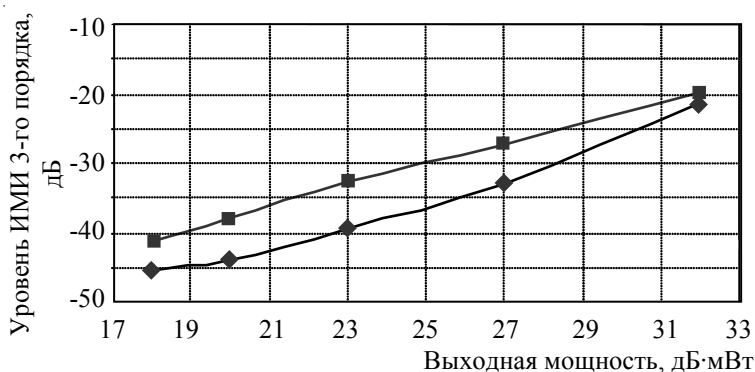


Рис. 3. Зависимости уровня ИМИ третьего порядка от выходной мощности в двухсигнальном режиме работы для транзистора MGF0905: —◆— — со стабилизацией; —■— — без стабилизации тока

порядка от выходной мощности в двухсигнальном режиме работы. Уменьшение ИМИ третьего порядка составляет 3...6 дБ, что позволяет увеличить выходную мощность на 4 дБ при заданном допустимом уровне ИМИ 35...40 дБ.

3. 100-ВАТТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Усилитель обеспечивает выходную мощность 100 Вт в диапазоне частот 5,9...6,4 ГГц. Структурная схема усилителя приведена на рис. 4.

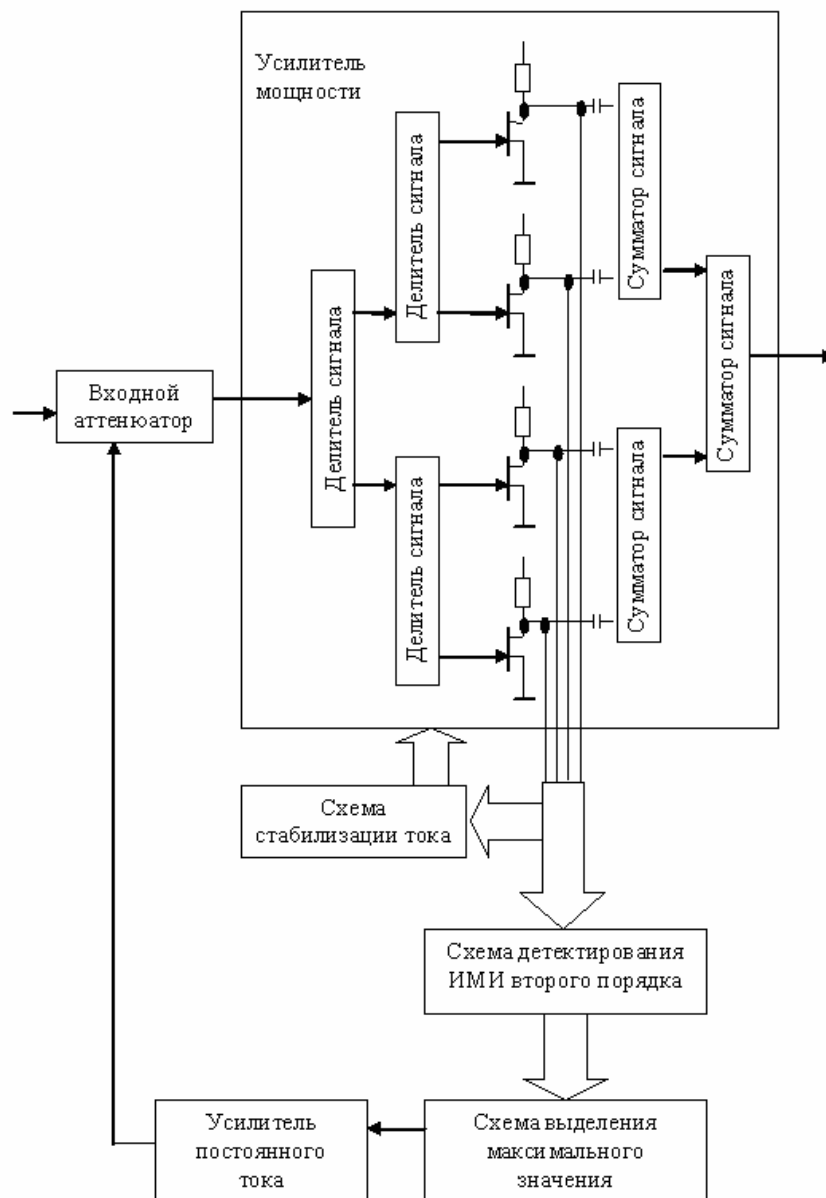


Рис. 4. Структурная схема усилителя с выходной мощностью 100 Вт в диапазоне частот 5,9...6,4 ГГц

СВЧ-сигнал с предварительного усилителя через входной аттенюатор поступает на усилитель мощности. Усилитель мощности представляет собой балансную схему на четырех транзисторах. Деление сигнала на входе и суммирование на выходе осуществляются на основе гибридного противофазного кольца. Сначала сигнал делится на два канала, затем каждый канал делится еще на два. Образованные четыре сигнала поступают соответственно на затворы четырех транзисторов TMM5964–30SL. Усиленный сигнал суммируется аналогичным способом с учетом их фаз. Для стабилизации токов стоков каждого транзистора в усилителе применена схема, показанная на рис. 1.

Работа обратной связи заключается в следующем. Сигналы ИМИ второго порядка через индуктивность снимаются со стоков транзисторов. Далее эти сигналы детектируются и поступают на схему выделения максимального значения. В этой схеме происходит выделение из четырех поступающих продетектированного сигнала с большим напряжением. Выделенный сигнал поступает на усилитель постоянного тока и далее на управление аттенюатором. Аттенюатор выполнен на $p-i-n$ -диодах, включенных параллельно. Для улучшения КСВН в аттенюаторе применена балансная схема включения $p-i-n$ -диодов. В качестве делителя и сумматора используется шлейфный мост. Как только напряжение на диодах достигает 0,5...0,7 В, аттенюатор прикрывается и уменьшает сигнал на входе усилителя. При этом ограничивается выходная мощность усилителя, что предотвращает возникновение слишком больших уровней ИМИ второго порядка. Схема обратной связи для 100-ваттного усилителя настраивается таким образом, чтобы суммарное напряжение на стоках транзисторов не превышало 16 В (максимально допустимое для выходных транзисторов).

В двухсигнальном режиме усилитель имеет выходную мощность 90 Вт. Ниже, на рис. 5, приведены зависимости уровней ИМИ третьего порядка от выходной мощности, на рис. 6 – внешний вид усилителя.

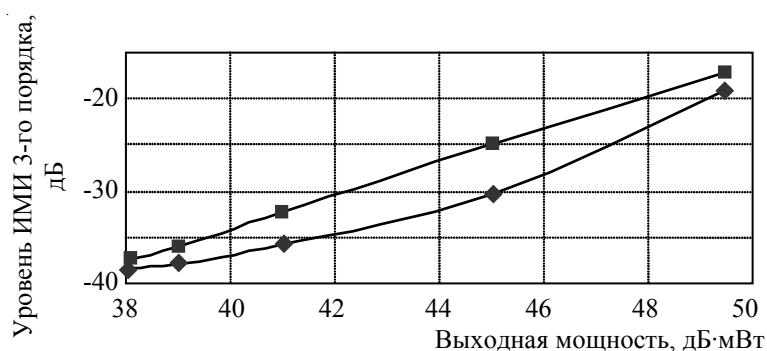


Рис. 5. Зависимости уровней ИМИ третьего порядка от выходной мощности усилителя:
 ◆ – со стабилизацией; ■ – без стабилизации тока

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный автором метод позволяет для усилителя на полевом транзисторе путем стабилизации тока стока транзистора уменьшить уровень ИМИ третьего порядка на 5...6 дБ,

увеличить максимальную выходную мощность на 0,4...0,5 дБ, увеличить уровень точки нелинейности амплитудной характеристики по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ также на 0,4...0,5 дБ.

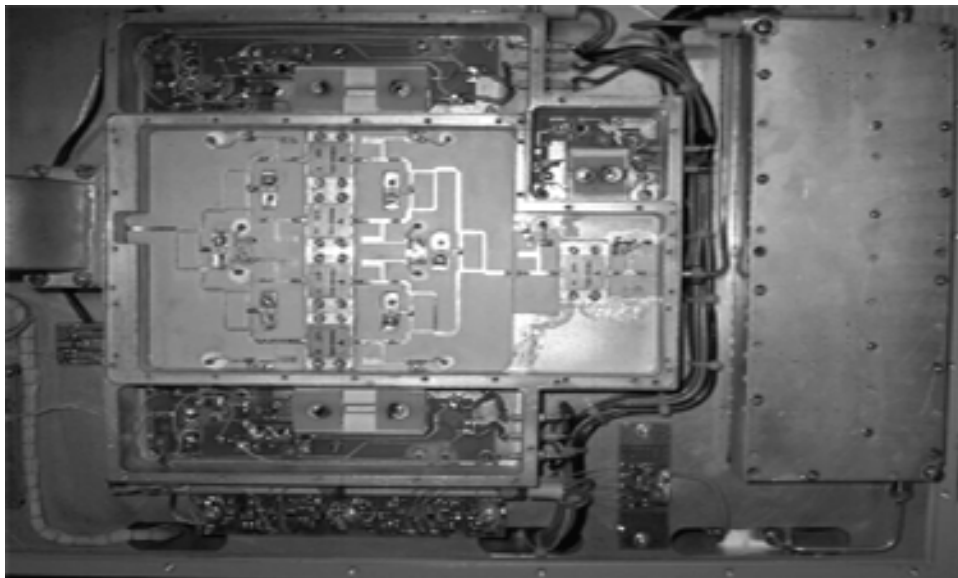


Рис. 6. Внешний вид усилителя

Создан 100-ваттный усилитель с пониженными на 5...6 дБ ИМИ третьего порядка и обратной связью для защиты выходных транзисторов от пробоя напряжением ИМИ второго порядка. Это дает возможность использовать усилитель с большей выходной мощностью (на 2...2,5 дБ) при тех же уровнях ИМИ и увеличить надежность работы усилителя в двухсигнальном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Applications of 8PSK and 16 QAM for satellite using Dynamic Pre-Correction // Tanbderg Television Pre-release Product Information, IBC 2000. – Sept. 2000.

Статья поступила 27 июля 2007 г.

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ДЛЯ АФАР X-ДИАПАЗОНА В ГИС-ИСПОЛНЕНИИ

Я. О. Васильев, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработаны предварительный и выходной усилители мощности 3-см диапазона длин волн для АФАР. Коэффициент усиления предварительного усилителя – не менее 20 дБ, выходная мощность – не менее 1 Вт. Выходной усилитель имеет коэффициент усиления 8...10 дБ и выходную мощность 8...10 Вт. Приведены расчетные и экспериментальные характеристики усилителей и затронуты вопросы, связанные с конструкцией изделий.

X-band pre- and output amplifiers for phased array have been designed and fabricated. The power gain of pre-amplifier is greater than 20 dB; output power is greater than 1 Watt. Output amplifier show 8...10 dB power gain and 8...10 Watt output power. The theoretical and practical characteristics are presented. Design considerations for power amplifiers are discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных аналогах АФАР широко используются усилители мощности в монолитном исполнении. В настоящей работе для проектирования макета АФАР использовались традиционные гибридно-интегральные схемы, обеспечивающие получение максимальных выходных характеристик. При проектировании усилителей необходимо было решить несколько задач: выбрать активные элементы, спроектировать цепи согласования, решить проблемы измерения электрических характеристик, создать конструкции корпусов и технологии монтажа, обеспечивающие требуемые габариты усилителей.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Предварительный усилитель мощности (ПУМ) разработан на основе гибридно-интегральной технологии с использованием собственной элементной базы ФГУП «НПП» Исток». В качестве активных элементов применялись мощные полевые транзисторы (ПТШ) производства ФГУП «НПП» Исток» с шириной затвора 0,5; 2,2; 5 мм и коэффициентом усиления соответственно не менее 8; 6; 6 дБ.

Основной проблемой при разработке ПУМ были малые габариты канала. Поэтому в качестве согласующих цепей были выбраны ступенчатые трансформаторы (шлейфы) на микрополосковых линиях (МПЛ). Применение в качестве материала подложки керамики БСТ (барий-самарий-титан) с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 80$) позволило уменьшить размеры согласующих шлейфов и вписаться в габариты канала.

Структурная схема ПУМ представляет собой 3-каскадный усилитель мощности.

Во входном каскаде ПУМ использован кристалл транзистора с шириной затвора 0,5 мм. При такой небольшой ширине затвора транзистора цепи согласования входного каскада удалось спроектировать на поликоровой подложке.

В промежуточном каскаде использован транзистор с шириной затвора 2,2 мм. В этом каскаде в согласующих цепях пришлось применять МПЛ на подложке БСТ толщиной 0,3 мм, так как размеры трансформаторов на поликоре были неприемлемыми. Схемы питания, однако, были выполнены на поликоровой подложке, так как на керамике БСТ МПЛ с требуемым волновым сопротивлением были слишком узкие (менее 30 мкм). Применение таких узких проводников нецелесообразно из-за больших токов, протекающих по ним, и технологических трудностей в их изготовлении.

В выходном каскаде использован транзистор с шириной затвора 5 мм. Его габариты составляют 3×0,6 мм. Определение S -параметров транзистора, у которого ширина кристалла в шесть раз больше 50-омной линии измерительного тракта (0,5 мм) аппаратуры, представляет собой трудную задачу. Достоверность измерений S -параметров уменьшается из-за различий фазовых набегов в центре и на краях транзистора. Эта проблема усугубляется еще и тем, что данный транзистор работает в режиме большого сигнала (в насыщении), который невозможно реализовать при измерениях S -параметров. Поэтому характеристики транзистора определялись по методике [1].

В схему усилителя транзисторы разваривались с помощью балочных выводов. Это позволило обеспечить низкотемпературный монтаж схемы и улучшить электрические параметры усилителя. Балочные выводы монтировались на кристаллы транзисторов до сборки усилителя [2].

Внешний вид предварительного усилителя мощности показан на рис. 1.

Разработанный ПУМ потребляет мощность 7 Вт, при этом его КПД составляет 14 %. Режим работы ПУМ может быть как импульсным, так и непрерывным.

Выходной усилитель мощности (ВУМ) был изготовлен с учетом результатов, приведенных в работе [3], и представляет собой внутрисогласованный транзистор (ВСТ), в котором суммируется мощность двух кристаллов мощных ПТШ, разработанных на ФГУП «НПП »Исток». Кристаллы заключены в герметичный металлокерамический корпус с балочными 50-омными вы-

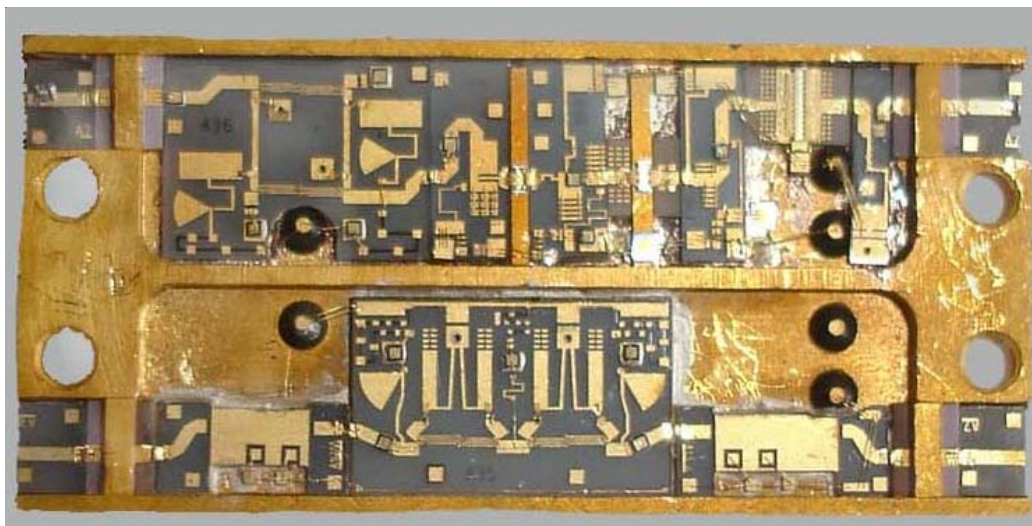


Рис. 1. Предварительный усилитель мощности

водами. Методика расчета, конструкция и технология сборки ВУМ описаны в работе [3]. Согласующе-суммирующие цепи изготовлены с применением подложек из поликора и керамики БСТ. Импульсный режим обеспечивался модулятором, который включен в цепь питания стока. Длительность фронта и спада импульса огибающей СВЧ не превышала 40 нс. Электрические характеристики ВУМ приведены на рис. 2, внешний вид – на рис. 3.

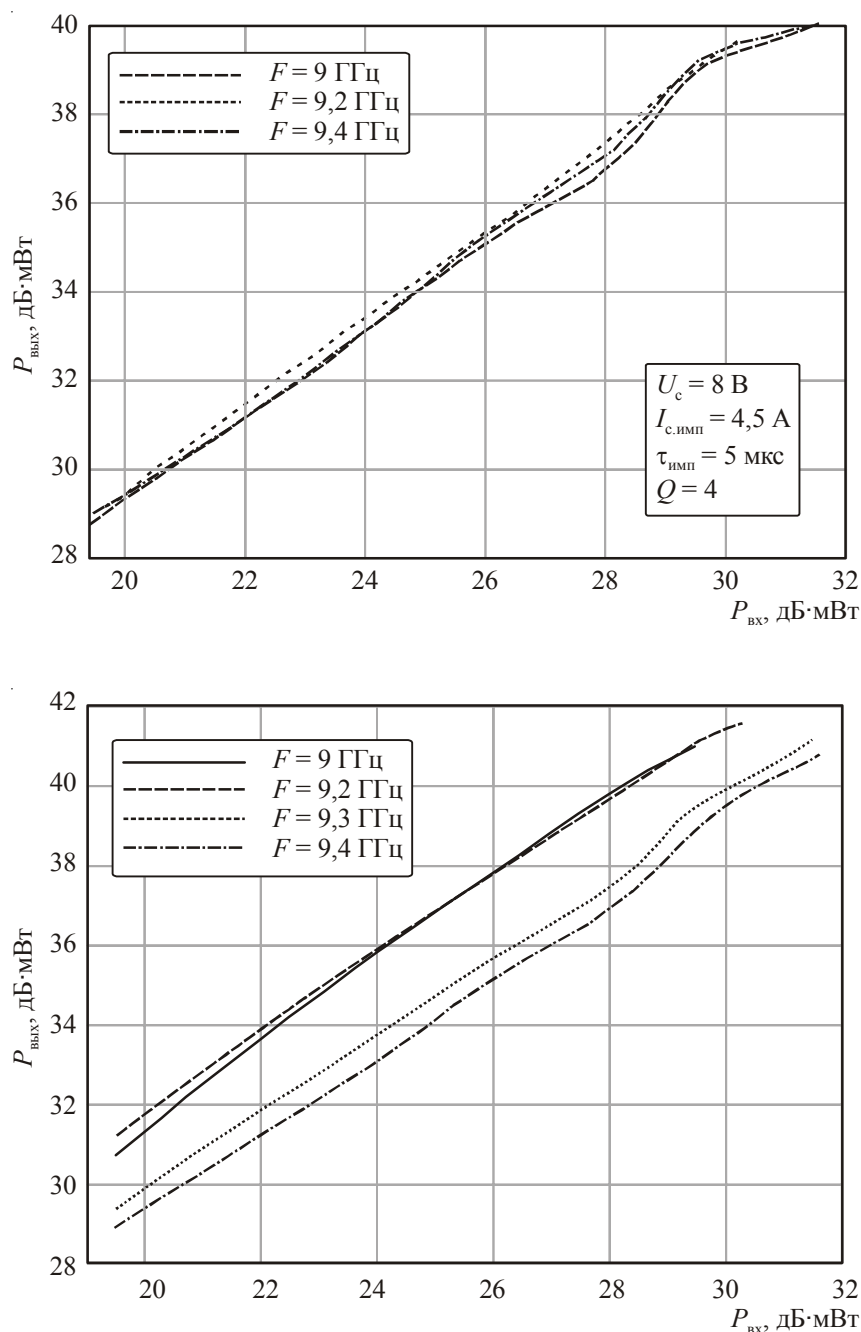


Рис. 2. Амплитудные характеристики ВУМ

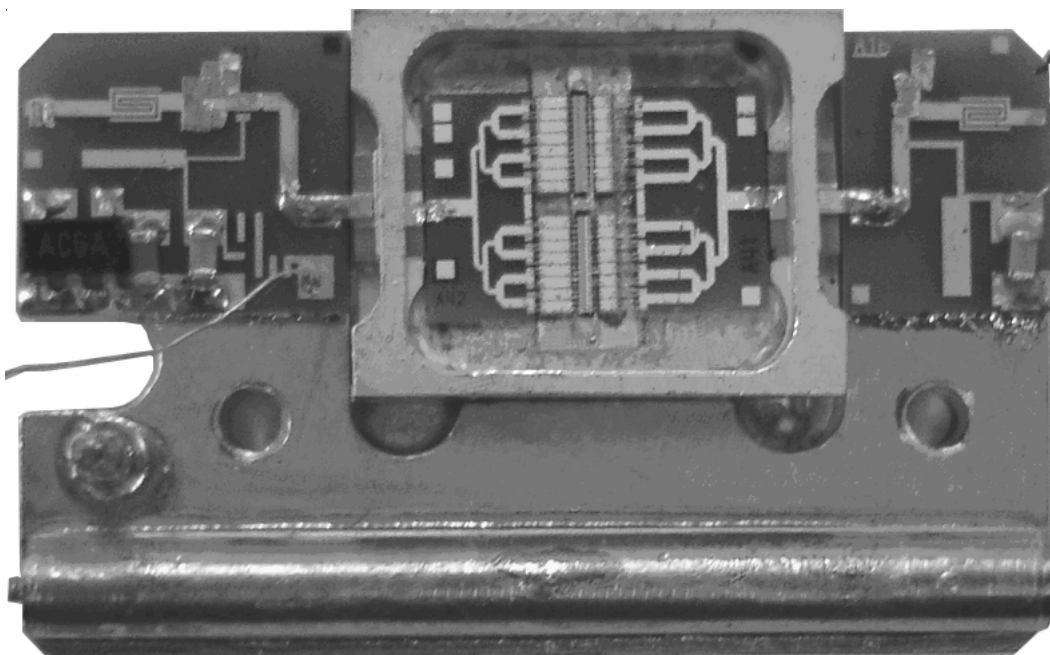


Рис. 3. Выходной усилитель мощности

Выходная импульсная мощность ВУМ при длительности импульса $\tau = 5$ мкс и $Q = 4$ составляла 8...10 Вт в диапазоне частот 9,0...9,4 ГГц при коэффициенте усиления 8...10 дБ и КПД 25...28 %.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены предварительный и выходной усилители мощности для передающего канала АФАР X-диапазона и их характеристики. Усилители выполнены по гибридно-интегральной технологии. Применение материалов с высокой диэлектрической проницаемостью и специальных методик расчета позволило получить изделия с высоким уровнем выходных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пчелин В.А. СВЧ-усилители мощности на сосредоточенных элементах // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 1. – С. 5-9.
2. Пат. 2191492 РФ. Выводная рамка для СВЧ и КВЧ полупроводникового прибора / В.А. Иовдальский, В.А. Пчелин; приоритет 17.04.00.
3. Мощные корпусированные внутрисогласованные транзисторы S-, C-, X- и Ku-диапазонов длин волн / А.Н. Королёв, А.В. Климова, В.А. Красник, Л.В. Ляпин, В.М. Малыщук, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 53-56.

Статья поступила 7 сентября 2007 г.

КВАНТОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ РАСЩЕПЛЕННЫМИ УРОВНЯМИ СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЯХ

А. Б. Пашковский

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Для симметричных трехбарьерных резонансно-туннельных структур с тонкими высокими барьерами исследованы резонансные переходы между расщепленными уровнями в слабом неоднородном высокочастотном поле. Показано, что, в отличие от переходов между обычными уровнями, как в двух-, так и в трехбарьерных структурах вероятность переходов между расщепленными уровнями принципиальным образом зависит не только от четности возмущения, но и от его формы. Обнаруженный эффект поднимает вопрос о верхней границе высокочастотной проводимости в таких системах.

For symmetric three-barrier resonance tunnel structures with thin high barriers resonant transitions between the split levels in a weak non-uniform high-frequency field are investigated. It is shown, that unlike transitions between usual levels both in two, and in three-barrier structures the probability of transitions between the split levels depends essentially not only on parity of perturbation but also on its form. The found out effect brings up a question on the top limit of high-frequency conductivity in such systems.

1. ВВЕДЕНИЕ

Принципиальной трудностью при создании лазеров на баллистическом транспорте электронов является продвижение вниз по частоте, в область порядка нескольких терагерц. Один из предложенных способов решения данной задачи заключается в использовании переходов между расщепленными уровнями симметричных трехбарьерных структур. Ранее было показано, что максимальная величина высокочастотной проводимости как в двухбарьерных [1-2], так и в несимметричных трехбарьерных структурах [3], связанная с переменным пространственным зарядом, существенным образом зависит от номеров уровней, между которыми совершаются переходы. Представляет интерес исследование особенностей переходов в неоднородном высокочастотном поле и между расщепленными уровнями симметричных трехбарьерных структур.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим симметричную трехбарьерную структуру (рисунок) с тонкими δ -образными барьерами, к которой приложено высокочастотное электрическое поле, изменяющееся со временем по закону $2E(x)\cos\omega t = E(x)(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$. Для определенности будем считать, что моноэнергетический поток электронов с энергией ϵ падает слева на расщепленный резонансный уровень с номером K , а частота ВЧ-поля соответствует переходам на нижний расщепленный

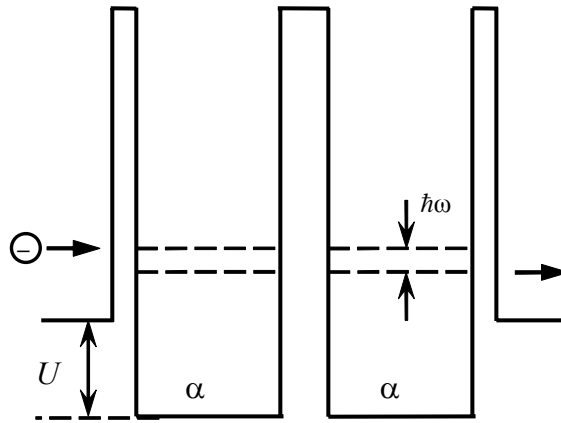
уровень этой же структуры (см. рисунок). Тогда нестационарное уравнение Шредингера имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + H(x)\psi + H(x,t)\psi,$$

$$H(x) = U(\theta(x) - \theta(x-2a)) + \alpha\delta(x) + \alpha\rho\delta(x-a) + \alpha\delta(x-a-l),$$

$$H(x,t) = -q\varphi(x)(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}).$$

Здесь q, m^* – заряд и масса электрона; $\alpha = \phi_b b$ – мощность первого барьера; ϕ_b, b – его высота и ширина; $\theta(x)$ – единичная функция; ρ – численный коэффициент; a – расстояние между барьерами; U – величина скачка дна зоны проводимости на барьерах.



Схематическая зонная диаграмма симметричной трехбарьерной структуры

В приближении малого сигнала поправка первого порядка к волновой функции в структурах с достаточно мощными барьерами ($y \gg k$, $y = \frac{2m^* \alpha}{\hbar^2}$, здесь k – волновой вектор электронов внутри структуры, а величина y выступает в роли резонансного параметра), где существенны переходы только между резонансными уровнями, имеет вид [1]

$$\psi_-(x) = \begin{cases} D_- \cos(k_{0-}x) & , \quad x < 0, \\ A_- \sin(k_-x) + B_- \cos(k_-x) + \xi_-(x) & , \quad 0 < x < a, \\ Z_- \sin(k_-(x-a)) + W_- \cos(k_-(x-a)) + \chi_-(x) & , \quad a < x < 2a, \\ C_- \exp(ik_{0-}(x-2a)) + P_- \exp(ik_{0-}(x-2a)) & , \quad x > 2a, \end{cases}$$

где $k_{0-} = (2m^*(\varepsilon - \hbar\omega)/\hbar^2)^{1/2}$, $k_- = (2m^*(\varepsilon + U - \hbar\omega)/\hbar^2)^{1/2}$ – волновые векторы;

$P_{\pm} = \mp \frac{q\varphi(2a)}{\hbar\omega} \psi_0(2a)$, χ и ξ – соответствующие частные решения уравнений для $\psi_{\pm}$ (см.[1,4]).

Надо сразу отметить важную особенность такой структуры: расстояние между соседними расщепленными уровнями составляет

$$\hbar\omega = \frac{4\hbar\omega_0 k}{\pi K \rho y}$$

и мало по сравнению с энергией электронов на уровне

$$\hbar\omega_0 = \frac{\hbar^2 \pi^2 K^2}{2m^* a^2}$$

или расстоянием между парами уровней с номерами K и L :

$$\hbar(\omega_K - \omega_L) = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} (K^2 - L^2),$$

что, по сути, и делает их вырожденными.

Для переходов, изображенных на рисунке, поправка к волновой функции, соответствующая поглощению фотонов ψ_+ , мала. Определитель системы уравнений в матричной форме для определения коэффициентов A_- , B_- , C_- , D_- , Z_- , W_- становится мал (а коэффициент прохождения через верхний резонансный уровень равен 1) при выполнении условий: $y \gg k$, $|\cos ka| \approx 1$, $\sin ka \approx -\beta(k/y)$.

В этом случае определители для рассеянных волн в однородном поле имеют вид

$$\Delta D_- = \Delta C_- \approx \frac{8qEk_-^4 k_0}{(k_0 + k_1)m^* \rho^2 \omega^2}$$

и не содержат большого резонансного параметра y .

При переходах в ВЧ-поле из-за полной внутренней симметрии структуры переменный пространственный заряд тоже будет симметричен (по крайней мере, по членам с максимальной степенью резонансного параметра).

Для простоты рассмотрим возмущение, соответствующее равномерному пространственному заряду в каждой яме:

$$\begin{aligned} n(x) &= N, \quad 0 < x < a; \\ n(x) &= -N, \quad a < x < 2a. \end{aligned}$$

В этом случае возмущение имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= -\frac{Vx^2}{2}, \quad 0 < x < a; \\ \varphi(x) &= \frac{Vx^2}{2} - 2Vax + Va^2, \quad a < x < 2a; \\ V &= \frac{q^2 N}{\epsilon}. \end{aligned}$$

Что с учетом вида частных решений уравнения [4] дает:

$$\Delta D_- = \Delta C_- \approx -\frac{2Vk_-^2 k_0 (3 + \rho) y}{(k_0 + k_1) m^* \rho \omega^2}.$$

Видно, что в этом случае, в отличие от случая с однородным полем, коэффициенты волновой функции для рассеянных на структуре электронов пропорциональны большому резонансному параметру y/k . Этот момент принципиально отличает переходы между вырожденными уровнями от переходов между невырожденными. При переходах между невырожденными уровнями двух- и трехбарьерных структур интенсивность переходов зависела от формы возмущения только количественно (имеется в виду возмущение соответствующей четности, чтобы матричный элемент не обращался в нуль). Это настолько принципиальный факт, что представляет интерес выяснить, какая форма возмущения приводит к такому резкому росту интенсивности переходов. Можно показать, что это свойственно возмущениям, пространственная зависимость которых квадратична или имеет более высокие степени от координаты x .

Данная особенность переходов между расщепленными уровнями поднимает вопрос о верхней границе высокочастотной проводимости в таких системах и о применимости таких структур в квантовых каскадных лазерах или резонансно-туннельных диодах.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для симметричных трехбарьерных резонансно-туннельных структур с тонкими высокими барьерами исследованы резонансные переходы между расщепленными уровнями в слабом неоднородном высокочастотном поле. Показано, что, в отличие от переходов между обычными уровнями, как в двух-, так и в трехбарьерных структурах вероятность переходов между расщепленными уровнями принципиальным образом зависит не только от четности возмущения, но и от его формы. Обнаруженный эффект поднимает вопрос о верхней границе высокочастотной проводимости в таких системах и о применимости таких структур в квантовых каскадных лазерах или резонансно-туннельных диодах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07 – 02 – 01121).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашковский А.Б. Аномальное подавление плазменными колебаниями вероятности резонансного взаимодействия электронов с высокочастотным полем в несимметричных двухбарьерных структурах // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т.64, вып. 12. – С. 829-834.
2. Пашковский А.Б. Переменный пространственный заряд и неоднозначность квантовых состояний в двухбарьерных структурах // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, вып. 3. – С. 330-338.
3. Пашковский А. Б. Формирование токовых неустойчивостей в трехбарьерных квантовых структурах в сильном высокочастотном электрическом поле // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 15-я Международная Крымская конференция [Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.]. – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 615-616.
4. Пашковский А.Б. Прохождение электронов через квантоворазмерные структуры в высокочастотных полях // ЖЭТФ. – 1996. – Т. 109, вып. 5. – С. 1779-1805.

Статья поступила 7 сентября 2007 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.382.323

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ НЕЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В МОЩНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

П. В. Бережнова, А. Б. Пашковский, А. К. Ратникова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

В. М. Лукашин

НИИ «МЭИИТ МИЭМ», г. Москва

Разработана простая модель, позволяющая оценивать размеры области тепловыделения в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием в зависимости от параметров структуры и топологии транзистора. Показано, что реальная область тепловыделения в этих транзисторах заметно меньше, чем в обычных, а значит, гораздо меньше не только размеров периодической структуры транзистора, но и размеров затвор-сток.

Simple model for heat generation area size depending on HEMT topology and active layers properties is developed. It is shown that real heat generation area size is much less than transistor structure period and the gate drain distance.

1. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании мощных СВЧ-усилителей и мощных полевых транзисторов для продвижения вверх по частотному диапазону и улучшения характеристик часто требуется максимальная плотность упаковки прибора, которая ограничена, с одной стороны, максимально возможным размером кристалла, а с другой – максимальной температурой канала 150 °С (при превышении которой начинаются интенсивные деградационные процессы). В этих условиях очень важна правильная оценка максимальной температуры канала активного элемента, которая, в свою очередь, определяется размерами области наиболее интенсивного тепловыделения.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Известно [1], что в области со стационарным дрейфом электронов тепловыделение почти на порядок меньше полной рассеиваемой в транзисторе мощности. Основная энергия получается и рассеивается электронами в области домена сильного поля, размер и форма которого существенно зависят от параметров активного слоя, топологии транзистора и режима работы прибора.

Плотность источников тепла Q_s в сечении транзистора при гидродинамическом приближении [2] пропорциональна энергии, рассеиваемой электронами в единицу времени, и для транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием может быть вычислена по формуле: для узкозонного материала

$$Q_{s1} = \frac{\partial W_1}{\partial t} = n_{s1} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\tau_{e1}(\varepsilon_1)} = q n_{s1} E_{s1}(\varepsilon_1) v_{s1}(\varepsilon_1);$$

для широкозонного материала

$$Q_{s2} = \frac{\partial W_2}{\partial t} = n_{s2} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_0}{\tau_{e2}(\varepsilon_2)} = q n_{s2} E_{s2}(\varepsilon_2) v_{s2}(\varepsilon_2).$$

Здесь $n_{s1,2}$ – поверхностные плотности электронов в узкозонном и широкозонном материалах; q, n, ε, v – заряд, концентрация, энергия и скорость электронов; ε_0 – энергия электронов при температуре решетки; $\tau_e(\varepsilon)$ – время релаксации электронов по энергии; $E_s(\varepsilon), v_s(\varepsilon)$ – статические значения напряженности электрического поля и скорости.

В обычных полевых транзисторах размеры области интенсивного тепловыделения существенно зависят от параметров структуры и режима работы прибора. В случае полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием для всех рассмотренных структур типа $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$, режимов работы и длин затвора размеры области тепловыделения примерно одинаковы.

Результаты расчетов распределений плотности источников тепла, дрейфовых скоростей, энергий и поверхностных плотностей электронов в широкозонном и узкозонном материалах для транзистора с длиной затвора $L = 0,25$ мкм и шириной $W = 100$ мкм в режиме: напряжение исток-затвор $U_{и.з} = 0$; напряжение исток-сток $U_{и.с} = 2$ В – приведены на рис.1-4.

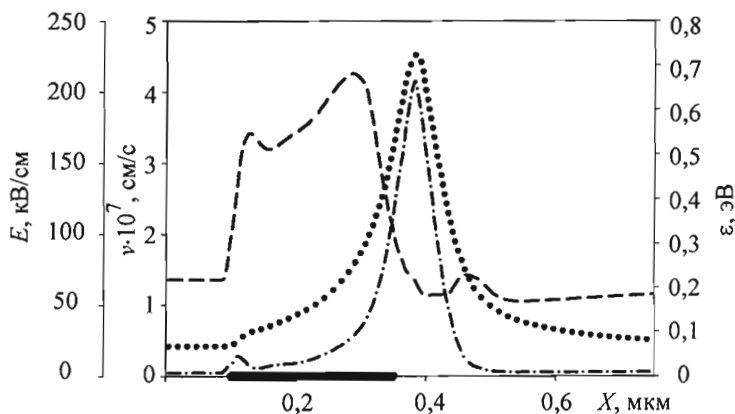


Рис. 1. Распределения в канале транзистора дрейфовой скорости v (---), напряженности электрического поля E (- · -) и энергии ε (···) в узкозонном материале

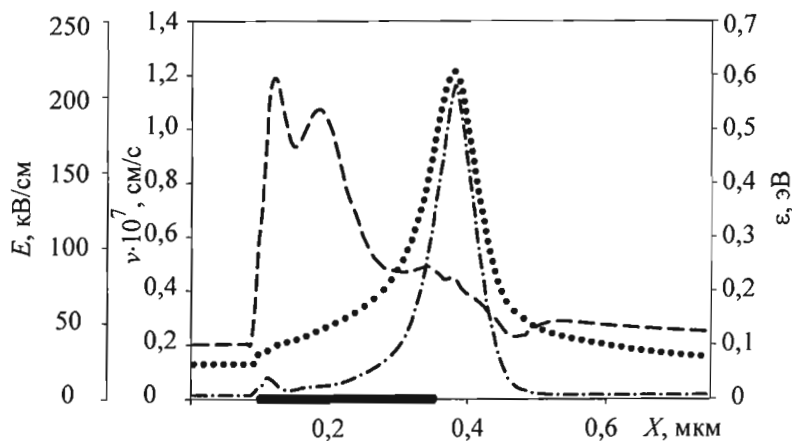


Рис. 2. Распределения в канале транзистора дрейфовой скорости v (---), напряженности электрического поля E (- · -) и энергии ε (···) в широкозонном материале

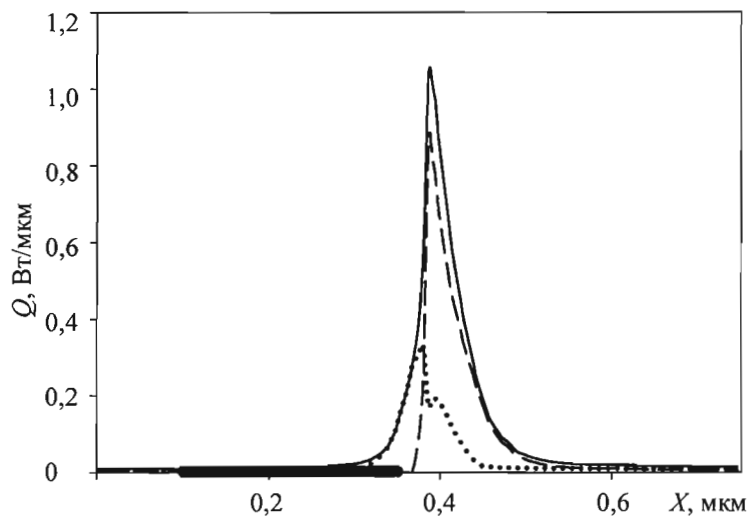


Рис. 3. Распределения в канале транзистора мощности тепловыделения в узкозонном Q_{s1} (•••) и широкозонном Q_{s2} (— — —) материалах.

Q_s — общая мощность тепловыделения (—)

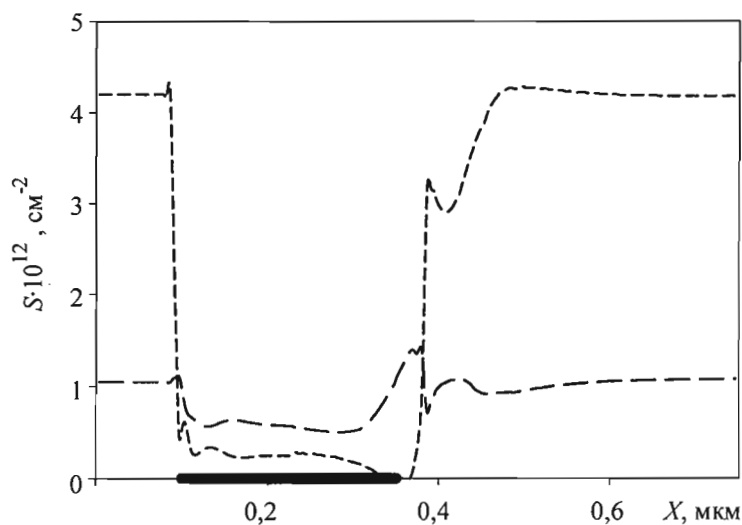


Рис. 4. Распределения в канале транзистора поверхностной плотности электронов в узкозонном (— — —) и широкозонном (- - -) материалах

Концентрация доноров и подвижность электронов в широкозонном материале равны соответственно $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; толщина широкозонного материала — $365 \text{ \AA}$; толщина спейсера — $10 \text{ \AA}$; концентрация доноров в спейсере и узкозонном материале — $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; подвижность электронов в узкозонном материале — $5400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Видно, что даже с учетом погрешности упрощенной модели характерные размеры области тепловыделения существенно меньше одного микрона и заметно уже, чем в обычных транзисторах. Кроме того:

1. Под самим затвором, где скорость электронов максимальна, плотность рассеиваемой энергии мала. Область интенсивного тепловыделения смещена за затвор, в то время как сам домен сильного поля и область высоких энергий электронов существенно заходят под затвор. Это объясняется низкой концентрацией электронов под затвором.

2. Область интенсивного тепловыделения уже не только области высоких энергий электронов, но и области домена сильного поля. Это происходит как по причине указанной выше, так и из-за резкого падения интенсивности рассеяния с уменьшением энергии до величин междолинного зазора.

3. Большая часть тепла выделяется в широкозонном материале, хотя под затвором основная часть электронов проходит по узкозонному материалу.

Ранее [1] было показано, что учет локальности области тепловыделения в обычных транзисторах приводит к уменьшению максимально допустимого напряжения на затворе в стандартных режимах примерно на 1...1,5 В (или занижению температуры рабочей области примерно на 10...30 °С). Очевидно, что из-за уменьшения области тепловыделения для полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием эта проблема встает еще более остро.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана простая гидродинамическая модель, позволяющая оценивать размеры области тепловыделения в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием в зависимости от параметров структуры и топологии транзистора. Показано, что реальная область тепловыделения в этих транзисторах заметно меньше, чем в обычных, а значит, гораздо меньше не только размеров периодической структуры транзистора, но и размеров затвор-сток. Обнаружено, что большая часть тепла выделяется в широкозонном материале, хотя под затвором основная часть электронов проходит по узкозонному материалу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07 – 02 – 01121).

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности тепловыделения в мощных полевых транзисторах / К.В. Дудинов, В.М. Ипполитов, А.В. Климова, А.Б. Пашковский, И.В. Самсонова // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 60-62.

2. Кальфа А.А., Пашковский А.Б., Тагер А.С. Влияние поперечного пространственного переноса электронов на высокочастотные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов с селективным легированием // Микроэлектроника. – 1991. – Т. 20, вып. 4. – С. 383-391.

Статья поступила 7 сентября 2007 г.

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С СУБМИКРОННЫМ ЗАТВОРОМ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С СЕЛЕКТИВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

В. А. Красник, Л. В. Манченко, А. Б. Пашковский, Т. И. Потапова, В. А. Пчелин

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Приведены результаты построения нелинейной модели транзисторов с субмикронным затвором на псевдоморфных гетероструктурах с селективным легированием, разработанных на ФГУП «НПП «Исток» и позволяющих получать мощность более 8 Вт в 3-см диапазоне. Описаны ее особенности, показано, что результаты расчетов дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

For the submicrometer gate pHEMT's developed in R&PC «Istok» and delivered 8 W output power in three centimeter wave length band nonlinear models have beeng developed. It is shown that this model provided satisfactory agreement between calculated and experimental data.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение нелинейных моделей является одним из основных способов описания полевых транзисторов при проектировании усилителей мощности в наиболее распространенных современных компьютерных пакетах. Анализ большинства типов моделей показывает, что практически все они имеют ряд недостатков в описании современных транзисторов с субмикронными затворами (не более 0,25 мкм), предназначенных для работы при длинах волн менее 3 см. Поэтому возникает необходимость проверки точности нелинейных моделей для каждой новой (с точки зрения технологии и структуры) группы транзисторов. Далее вниманию читателей предлагаются результаты сравнения экспериментальных данных с расчетами по нелинейной модели для полевых транзисторов с субмикронным затвором на псевдоморфных гетероструктурах с селективным легированием, разработанных на ФГУП «НПП «Исток» и позволяющих получать мощность более 8 Вт в 3-см диапазоне длин волн.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для транзисторов на гомоструктурах, разработанных на ФГУП «НПП «Исток» и обеспечивающих мощность более 5 Вт в 2- и 3-см диапазоне длин волн, ранее [1] было проведено сравнение основных типов нелинейных моделей, встречающихся в общепринятых пакетах моделирования МИС. Сравнение показало, что, несмотря на видимые недостатки, при корректном построении все рассмотренные модели дают удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментом. Поэтому для проектирования схем согласования ПТШ с длинами

затворов около 0,25 мкм на обычных гомоструктурах достаточно использовать, с вполне приемлемой точностью, простые и быстрые нелинейные модели типа «Curtice – Ettenberg» [2] или «Materka – Kasparzak» [3]. При использовании ПТШ на гетероструктурах ситуация меняется принципиальным образом. Во-первых, максимум крутизны таких транзисторов часто соответствует не нулевому напряжению на затворе, а лежит где-то в центре ВАХ; во-вторых, входная емкость, по крайней мере при субмикронных длинах затвора, начинает сильно зависеть от напряжения на стоке транзистора. Последний эффект наблюдался и для мощных гомоструктурных полевых транзисторов. Однако там рост входной емкости с увеличением напряжения на стоке был невелик. Его удавалось компенсировать некоторым уменьшением зависимости входной емкости от напряжения на затворе так, чтобы вдоль нагрузочной кривой измеренные S -параметры максимально соответствовали S -параметрам нелинейной модели. В-третьих, эта зависимость входной емкости для гетероструктурного ПТШ (во всяком случае модельная с данной системой ВАХ) может иметь максимум где-то в области максимальной крутизны. Поэтому для описания таких транзисторов приходится использовать модели типа «Angelov» [4] или «Fujii» [5]. Однако возможностей этих моделей явно недостаточно, чтобы корректно описать ряд особенностей ВАХ как в области рабочей точки, так и вблизи перекрытия, например увеличение напряжения запирания транзистора с ростом напряжения на стоке (эффект разгибания обедненной области полем статического домена).

Рассмотрим первые результаты разработки нелинейной модели для полевых транзисторов на псевдоморфных гетероструктурах с селективным легированием и длиной затвора около 0,25 мкм, изготовленных на ФГУП «НПП «Исток». Транзистор состоит из 8 ячеек с шириной затвора 1680 мкм каждая, расположенных на GaAs-подложке толщиной 25 мкм. Такой ПТШ имеет коэффициент усиления около 10 дБ и выходную мощность более 8 Вт на частотах 10 ГГц и более. Нелинейная модель для каждой ячейки разрабатывалась стандартным образом с использованием измеренных сопротивлений истока, стока, затвора, ВАХ и S -параметров. Следует отметить, что для данной группы транзисторов все вышеописанные особенности поведения элементов модели проявились в полной мере. Результаты сравнения ВАХ и S -параметров в рабочей точке представлены на рис. 1-3.

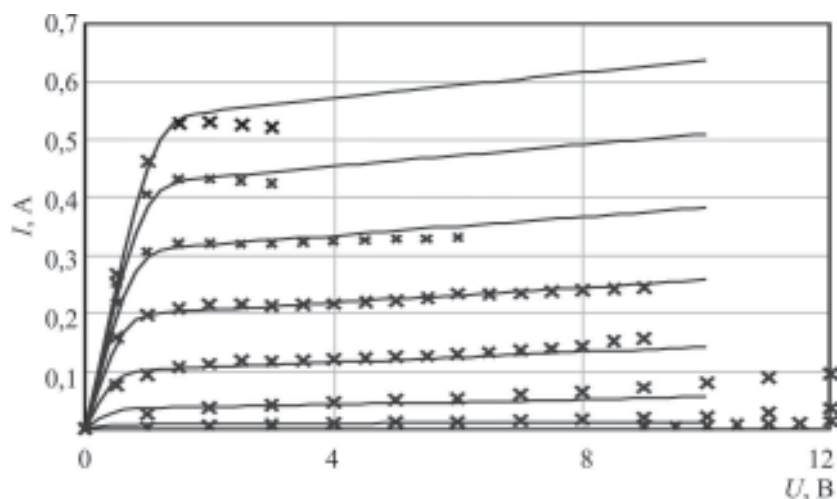


Рис. 1. ВАХ транзистора:
— — расчет; × — эксперимент

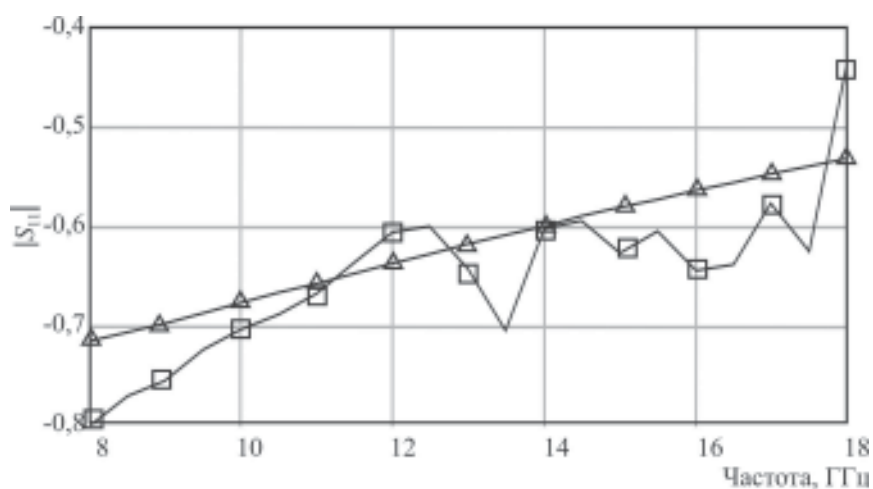


Рис. 2. Зависимость $|S_{11}|$ от частоты:
 Δ – расчет; $\square$ – эксперимент

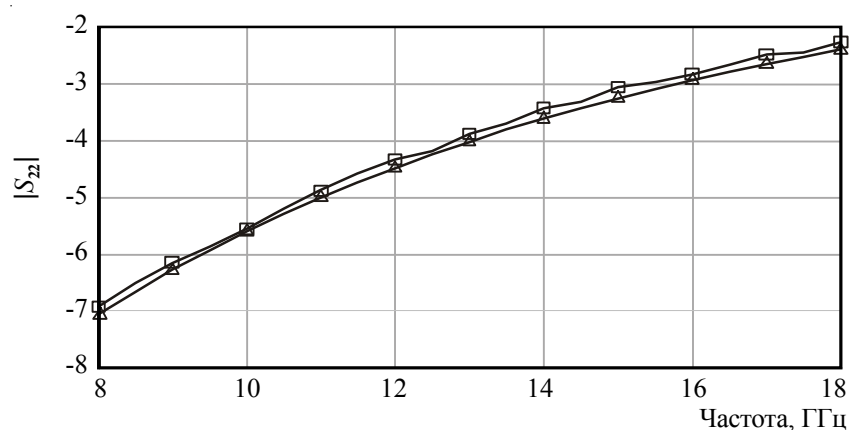


Рис. 3. Зависимость $|S_{22}|$ от частоты:
 Δ – расчет; $\square$ – эксперимент

Для проверки точности модели в режиме большого сигнала несколько чипов гетероструктурного транзистора помещались в схему внутрисогласованного транзистора (ВСТ), разработанную ранее для обычного ПТШ. Затем схема подстраивалась по входу для сдвига АЧХ в диапазон 9...10 ГГц и моделировалась с использованием разработанной нелинейной модели ПТШ и с учетом подстроечных элементов.

Расчетные и экспериментальные значения выходной мощности ВСТ приведены на рис. 4. Из рисунка видно хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментом как по частотному диапазону, так и по уровню отдаваемой мощности. Эти результаты позволяют сделать вывод о корректности нелинейной модели, построенной для данной группы транзисторов. Рабочая полоса частот экспериментальной схемы более узкая, чем в расчете. Этот факт объясняется сложностью адекватного моделирования используемых в схеме индиевых подстроек.

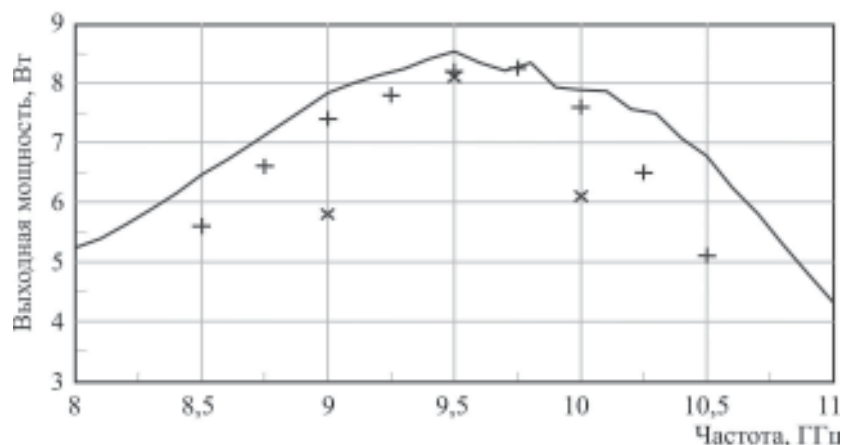


Рис. 4. Зависимость выходной мощности от частоты ($P_{\text{вх}} = 800$ мВт):
 — — расчет; +, x — эксперимент

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены первые результаты разработки на ФГУП «НПП «Исток» мощных транзисторов на псевдоморфных гетероструктурах с селективным легированием. Эти ПТШ позволяют получать мощность более 8 Вт в 3-см диапазоне длин волн с коэффициентом усиления около 10 дБ. Для группы транзисторов приведены результаты построения нелинейной модели, описаны ее особенности. Показано, что результаты расчетов выходных характеристик самосогласованных полевых транзисторов дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнение нелинейных моделей для транзисторов с субмикронным затвором / А.В. Климова, А.Н. Королев, В.А. Красник, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин // Радиотехника. — 2006. — № 3. — С. 72-77.
2. Curtice W.R. and Ettenberg M. A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — Dec. 1985. — Vol. MTT-33, No 12. — P. 1383-1394.
3. Materka A. and Kasprzak T. Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — Feb. 1985. — Vol. MTT-33, No 2. — P. 129-135.
4. Angelov I., Zirath H., Rorsman N. A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — Dec. 1992. — Vol. 40, No 12. — P. 2258-2266.
5. A nonlinear GaAs FET model suitable for active and passive mm-wave applications / K. Fujii, Y. Hara, F. M. Ghannouchi, T. Yakabe and H. Yabe // IEICE Trans. — Feb. 2000. — Vol. E83-A, No 2. — P. 228.

Статья поступила 7 сентября 2007 г.

УДК 538.56

БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ – ПЕРВИЧНЫЕ МИШЕНИ РЕЦЕПЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов

ФИРЭ РАН, г. Фрязино

Предлагаются результаты исследований, выполненных авторами за последние 20 лет и посвященных изучению чувствительности мембранных биологических и модельных систем к электромагнитному излучению в широком диапазоне частот, включая КВЧ-излучение.

A review of the investigation results made by the authors for the recent 20 years and devoted to study of membrane and model systems sensitivity to electromagnetic radiation in a wide frequency range including ENF-radiation has been proposed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важность исследований биологического действия электромагнитного излучения (ЭМИ) в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений. С каждым годом растет число публикаций в этом обширном научном направлении и появляются все новые и новые идеи использования ЭМИ в медицинских и биотехнологических приложениях. Кроме того, важная роль в данных исследованиях отводится вопросам безопасности воздействия этого вида излучения на человека.

Такая ситуация требует подробного изучения взаимодействия электромагнитных полей (ЭМП) с биологическими объектами на самых различных структурных и функциональных уровнях, и прежде всего, конечно, на клеточном и субклеточном уровнях.

Во многих научных публикациях особое внимание акцентируется на структурной и функциональной модификации мембранных структур клеток организма человека и животных при действии ЭМП. При этом ряд авторов обращают внимание на то, что изучение мембранной активности широкого диапазона длин волн ЭМП оправданно еще и потому, что природа процессов, протекающих в клетках и субклеточных органеллах при участии мембран, электромагнитная.

Исследуя на протяжении значительного времени действие ЭМП на биологические объекты в различных частотных диапазонах (от постоянных до диапазона видимого света), авторы настоящей статьи то и дело сталкивались с фактами, подтверждающими определяющее участие

клеточных или же модельных мембранных систем в рецепции ЭМП. В данной работе мы предлагаем результаты экспериментальных работ, которые позволили бы сформулировать некоторую первоначальную гипотезу универсальности мембранной системы как первичного звена взаимодействия ЭМП с биологическими объектами.

2. МЕХАНИЗМ АКТИВАЦИИ ФАГОЦИТАРНЫХ КЛЕТОК ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Изучая длительное время явление пробоя модельных биологических мембран, мы решили использовать хемилюминесцентные методы регистрации свободных радикалов, которые, по нашему мнению, должны были бы сопровождать эти процессы в нативных клетках.

Электрический пробой биологических мембран – это нарушение их барьерной функции, которое обычно определяют по входу или выходу из клетки важных биологических веществ. Электрический пробой все чаще используют как метод введения в клетки лекарственных веществ, а также изучения клеточной физиологии.

В работах [1-3] впервые изучалось нарушение барьерных функций мембран при пробое по хемилюминесценции объектов – сверхслабому свечению, которое сопровождает некоторые реакции во вне- или внутриклеточном пространстве.

В качестве объектов исследования использовалась суспензия лейкоцитов (нейтрофилов или макрофагов) крови человека, в которых были обнаружены признаки электроактивации высоковольтными импульсами электрического поля микросекундной длительности.

Удалось экспериментально подтвердить, что нейтрофилы и макрофаги крови человека отвечают вспышкой хемилюминесценции на действие одиночного импульса электрического поля высокой напряженности [1]. На рис. 1 представлена кинетическая кривая люминолзависимой хемилюминесценции суспензии лейкоцитов при воздействии электрического импульса (момент разряда отмечен изломанной стрелкой). Хемилюминесцентный ответ клеток имеет достаточно сложную форму. На характерной кривой можно выделить не менее трех фаз.

Первая фаза ответа – «сверхбыстрая вспышка», которая развивается за 1...2 с. Она практически не зависит от присутствия клеток в водном растворе, пропорциональна амплитуде импульса и обусловлена электрохемилюминесценцией раствора.

Вторая фаза – «быстрая вспышка», максимум которой развивается через 10 ... 15 с. Отличается относительно небольшой амплитудой. Ее выраженность сильно зависит от условий эксперимента. Так, при больших амплитудах электрического импульса может наблюдаться отсутствие быстрой вспышки и даже кратковременное угнетение свечения.

Третья фаза – «медленная вспышка» хемилюминесцентных клеток, максимум которой развивается через 1,5...2 мин после действия электрического импульса. Этот участок кривой является наиболее выраженным, информативным и хорошо воспроизводимым ответом клеток на воздействие электрического поля. При наиболее оптимальных условиях электроактивации максимальная амплитуда медленной вспышки сравнима с величиной хемилюминесцентного ответа клеток на добавление зимозана – вещества, традиционно используемого в хемилюминесцентных медико-биологических исследованиях.

Для количественных оценок активации нейтрофилов и макрофагов была выбрана не абсолютная величина хемилюминесцентного свечения, а отношение максимального прираще-

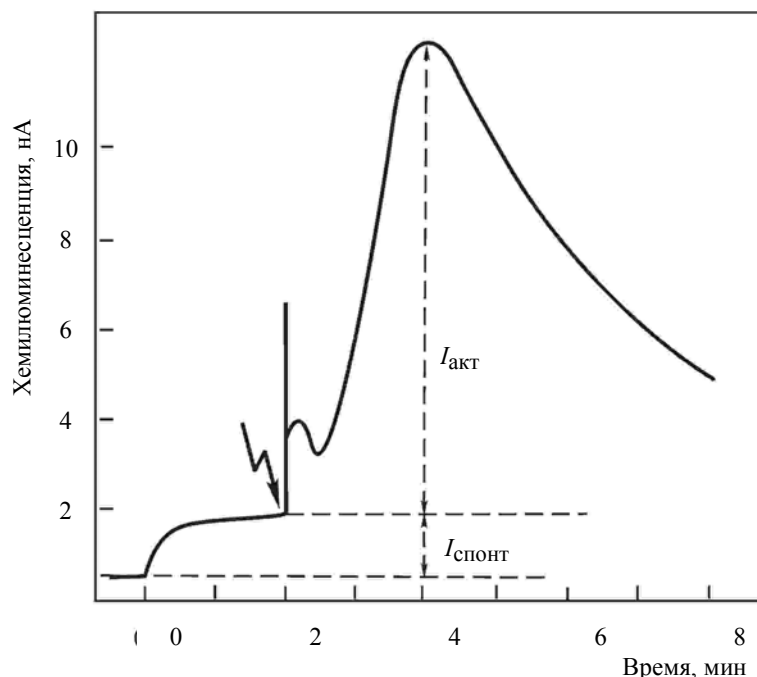


Рис. 1. Типичная кинетика хемилюминесценции суспензии нейтрофилов после воздействия на нее импульсом электрического поля (амплитуда напряженности электрического поля – 4 кВ/см; длительность импульса – 1 мкс)

ния медленной вспышки над уровнем спонтанного свечения клеток к величине этого уровня (рис. 1). Этот параметр получил название степень активации нейтрофилов.

Эксперименты показали, что именно этот параметр дает наиболее воспроизводимые результаты, т.к. позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с изменением функциональной активности клеток в условиях длительного эксперимента, а также неточность дозирования клеток и люминола в каждом отдельном опыте.

Оказалось, что степень активации нейтрофилов и макрофагов зависит от целого ряда условий эксперимента: амплитуды импульса электрического поля, концентрации двухвалентных ионов в среде – и сильно отличается для клеток разных доноров. Последнее обстоятельство привело к необходимости усреднять результаты только в пределах серии измерений, выполненных на одном препарате клеток.

На рис. 2 представлена зависимость степени активации нейтрофилов от амплитуды импульса электрического поля в стандартной среде Хенкса. К особенностям этой зависимости следует отнести в первую очередь наличие порога активации при амплитуде импульса 1 кВ/см. Этот порог соответствует, вероятно, минимальному трансмембранному потенциалу, наведенному на полюсах клетки (примерно 0,75 В), который вызывает образование пор в мембране (электропорацию).

Необходимо отметить, что при амплитуде электрического поля в импульсе от 1 до 5 кВ/см зависимость имеет S-образный вид. При дальнейшем повышении амплитуды до 7 кВ/см степень активации снижается, что связано, по-видимому, с разрушением клеток.

Одним из проявлений электропорации (пробоя) клеточных мембран является неселективное увеличение проницаемости для низкомолекулярных веществ и ионов. Снижение барьер-

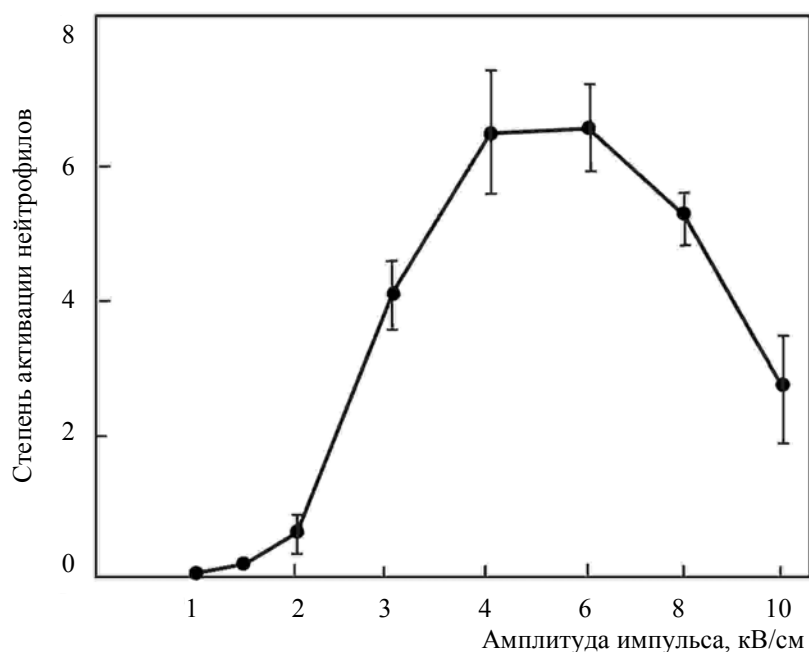


Рис. 2. Зависимость степени активации нейтрофилов от амплитуды напряженности импульса электрического поля

ной функции мембран для ионов при неравновесном распределении высокомолекулярных соединений (прежде всего белков, не проникающих через поры) приводит к осмотическому набуханию клеток. Такое набухание сопровождается снижением мутности клеточной суспензии (или увеличением светопропускания). Действительно, обработка высоковольтными импульсами электрического поля вызывает увеличение светопропускания T суспензии нейтрофилов примерно от 27 до 35%.

Кинетика светопропускания зависит от амплитуды импульса. Чем выше амплитуда, тем больше скорость набухания и абсолютное значение T . Скорость набухания можно определить как изменение светопропускания за 1 мин от момента подачи импульса в суспензию клеток. Результаты зависимости скорости набухания клеток от амплитуды приложенного импульса представлены на рис. 3. Видно, что эта зависимость имеет порог при напряженности поля 1 кВ/см и с ростом амплитуды скорость набухания монотонно возрастает. Вероятно, скорость набухания отражает увеличение количества пор и/или их площади (на одну клетку) при увеличении напряженности электрического поля в импульсе. Если сравнить рис. 3 с результатами стимуляции хемилюминесценции суспензии клеток электрическими импульсами различной амплитуды (рис. 2), то увидим, что обе зависимости имеют примерно одинаковый порог для нейтрофилов – около 1 кВ/см. Из этого можно заключить, что активация хемилюминесценции нейтрофилов и осмотическое набухание при электрическом пробое реализуются через общий механизм – увеличение проницаемости пор в мембранах.

Результаты экспериментов показали, что для регистрации хемилюминесцентного ответа при электростимуляции нейтрофилов присутствие в среде ионов кальция (Ca^{2+}) является обязательным. На основании этого факта можно предположить, что в результате электропорации биоло-

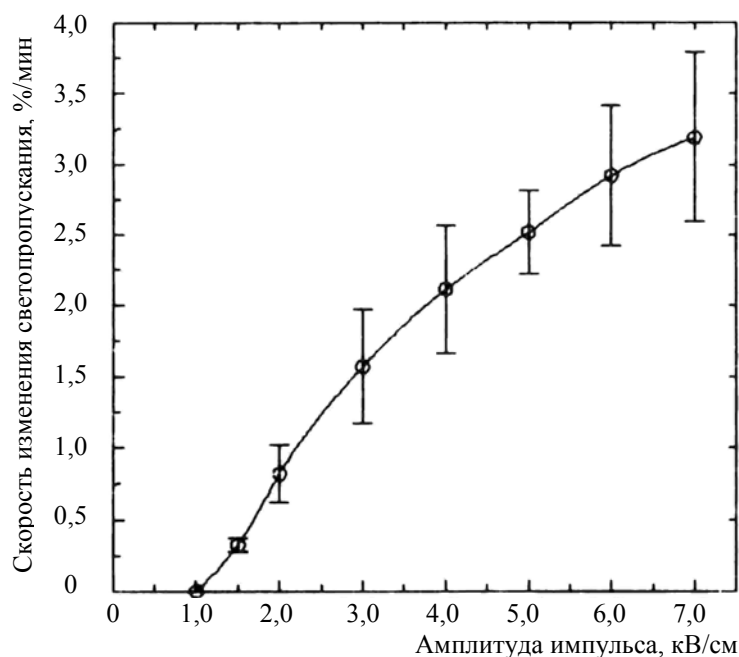


Рис. 3. Зависимость скорости изменения светопропускания суспензии нейтрофилов от амплитуды напряженности импульса электрического поля

гических мембран внутрь клеток попадают двухвалентные ионы кальция, которые и запускают стереотипные физиологические реакции клеток, продукты которых и вызывают сверхслабое свечение, регистрируемое фотоэлектронным умножителем нашего хемилюминометра.

3. МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ И МОДЕЛЬНЫЕ МЕМБРАННЫЕ СИСТЕМЫ

3.1. Термотропные структурные фазовые перестройки в моделях биологических мембран при КВЧ-облучении

Если биологические эффекты от воздействия мм-волн рассматривать в аспекте биологической активности всего радио- и СВЧ-диапазона, то следует отметить, что большинство исследователей указывают на тепловые эффекты. Однако часто эффекты ЭМИ не удается объяснить регистрируемым интегральным нагревом. Свидетельством тому — появившийся термин «температурный эквивалент» наблюдаемого эффекта.

Особую важность оценка теплового эквивалента приобретает в том случае, когда объект очень чувствителен к изменению температуры. В некоторых случаях это может происходить из-за того, что температура окружающей среды, при которой проводится облучение биологического объекта, близка к температуре фазового перехода некоторых его молекулярных образований. Тогда повышение температуры в результате КВЧ-облучения даже на 0,2 °С может привести к новому фазовому состоянию биологической структуры (например, белково-липидного комплекса биологической мембраны) и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом.

Для выяснения подобной ситуации была сделана попытка найти модель, обладающую температурным порогом структурных изменений [4]. В качестве такой модели мы использовали мембраны из насыщенных фосфолипидов: димиристоиллецитина (ДМЛ) и дипальмитоиллецитина (ДПЛ) – с температурами фазовых переходов (гель – жидкий кристалл) соответственно в области 25 и 42 °С (рис. 1). Схема установки для КВЧ-облучения биологических объектов приведена в работе [5].

Как видно из рис. 4, гистерезис, обнаруживаемый по светорассеянию при переходе гель – жидкий кристалл и обратно, оказывается при КВЧ-нагреве (показан пунктиром) более узким, примерно в два раза, чем при обычном ИК-нагреве (сплошная линия). Полученный в работе результат легко объяснить, если предположить, что теплообмен между мембранами липосом и водой при плавлении происходит достаточно медленно.

В случае ИК-нагрева энергия поглощается в основном стенкой кюветы, а липосомы нагреваются в результате теплопередачи из внешней водной среды. Средняя температура липосом должна при этом отставать от температуры в кювете.

При облучении мм-волнами липосомы, попадая в область поглощения КВЧ, нагреваются изнутри также, как и среда в этой области, и в этом случае передача тепла для плавления мембран идет эффективнее.

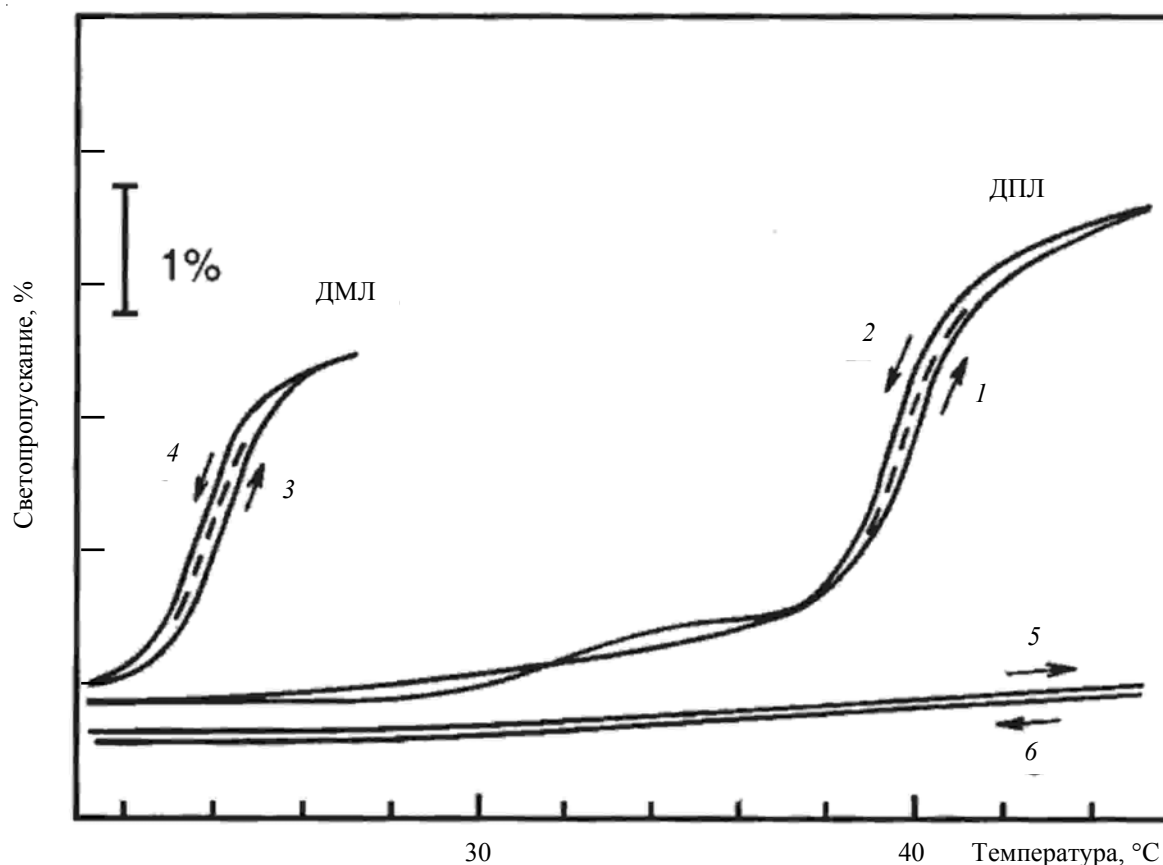


Рис. 4. Фазовый переход в мембранах липосом из ДПЛ (1,2) и ДМЛ (3,4) при КВЧ- и ИК-нагреве. Кривые 5 и 6 относятся к липосомам из яичного лецитина, которые не претерпевают в данном интервале температур фазовых структурных перестроек (интенсивность облучения – 3 Вт/см²; длина волны – 8,5 мм)

Экспериментальная проверка подтверждает это объяснение. В кювете быстро смешивались две порции липосом (рис. 5): одна с температурой, превышающей температуру плавления, т.е. в жидкокристаллическом состоянии, другая – охлажденная до такой температуры, чтобы температура смеси двух порций была чуть ниже температуры фазового перехода. Оказалось, что температура в кювете устанавливается за 2...3 с (рис. 5,б), а переход гель – жидкий кристалл, судя по светорассеянию, происходит в течение 6...8 с (рис. 5,а). Этот результат, по-видимому, означает, что теплопередача из раствора в мембраны ограничивает скорость структурного перехода в липосомах.

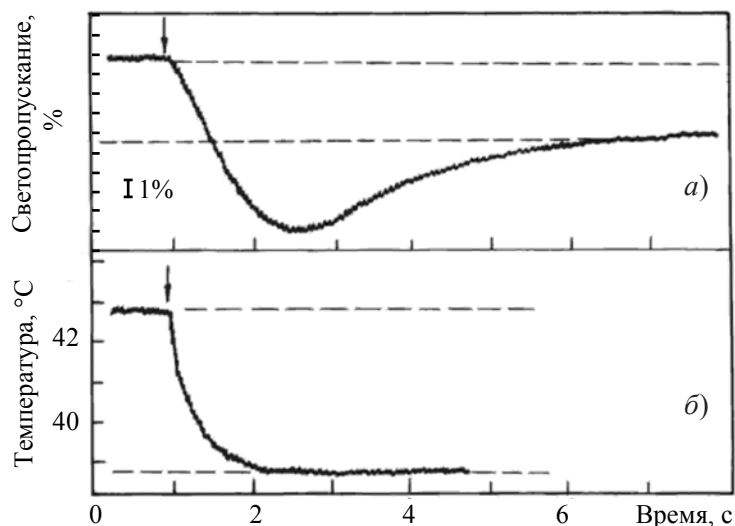


Рис. 5. Зависимость светопропускания (а) и температуры (б) суспензии ДПЛ при введении в нагретую пробу (7 мл, 43 °C) холодной порции (1 мл, 1 °C). Момент введения указан стрелкой

Таким образом, наблюдаемое в экспериментах изменение температуры средней точки фазового перехода модельной биологической мембраны при КВЧ-нагреве можно связать с нагревом липосомы как извне, так и изнутри, в отличие от ИК-нагрева, когда мембрана греется только снаружи, причем размытость фазового перехода обусловлена плохим теплообменом между водой и мембраной липосомы.

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

Нагревание водных слоев вследствие поглощения ими электромагнитного излучения соответствующего диапазона, возможно, никогда не было новостью для специалистов в области электромагнитобиологии. Однако последствие этого процесса в виде движения разогретых слоев у поверхности раздела фаз вода – липидный бислой мембраны клетки долгое время не обращало на себя внимание исследователей механизмов биологического действия ЭМИ.

Мы начали простые опыты с наблюдения за движением в воде «тушевых нитей» вблизи вертикальной стенки кварцевой кюветы или размытием границы «сахароза – вода» при облуче-

нии мм-волнами, которые свидетельствуют о перемешивании водных слоев вблизи поверхности, на которую падает КВЧ-излучение.

Исследование профиля температуры, образующегося при облучении тонких слоев воды оптическими методами, показало, что распределение температуры при поглощении КВЧ-излучения указывает на движение жидкости [6,7].

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

Результаты экспериментов свидетельствовали (рис. 6) о возрастании полярографического тока для O_2 при КВЧ-облучении приэлектродного слоя [6]. В системе с вытеснением кислорода из воздуха аргоном эффект КВЧ проявлялся гораздо ярче. Оказалось, что КВЧ-облучение при плотности потока мощности 1 мВт/см^2 ускоряет нарастание концентрации O_2 в растворе почти в два раза [7]. Итак, следует ожидать, что под действием мм-волн может увеличиваться скорость пассивного переноса ионов и молекул в водных средах за счет изменения гидродинамической устойчивости.

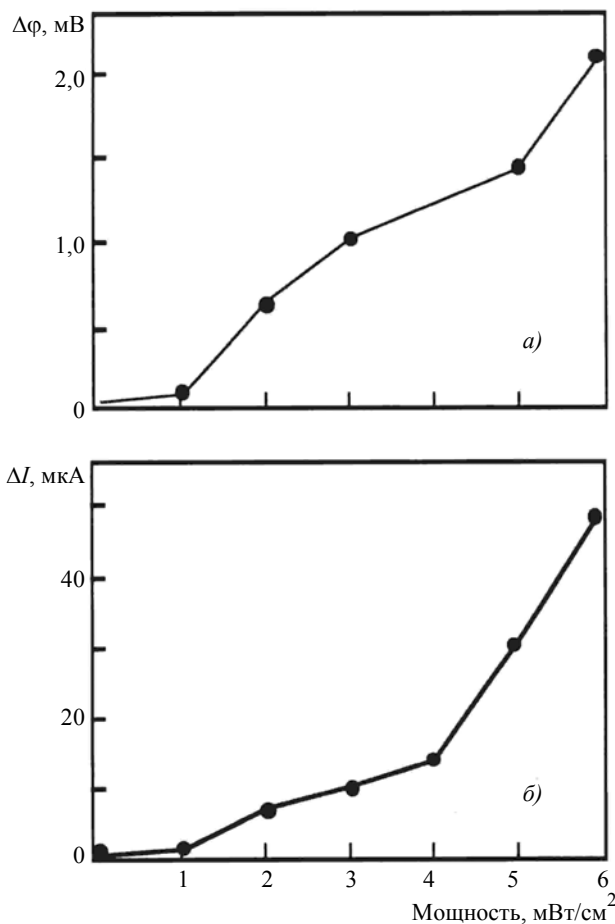


Рис. 6. Типичная зависимость величины приращения потенциала кожи лягушки (а) и полярографического тока (б) от интенсивности облучения.
Длина волны облучения – 8,5 мм

С учетом вышесказанного можно попытаться объяснить эффекты КВЧ-излучения в экспериментах с участием химических реакций в мембранах, учитывая возможность доставки реагентов к месту реакции. Например, скорость накопления продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в суспензии липосом. В результате окисления фосфолипидов увеличивается проницаемость мембран для ионов и др. важных биологических веществ (один из механизмов патологии клетки).

Независимо от способа инициирования окисления мм-излучение приводило к ускорению процессов ПОЛ и дозовая зависимость имела пороговый характер от значений менее 1 мВт/см^2 [7]. Предполагается, что данный эффект связан с увеличением скорости доставки кислорода к месту реакции ПОЛ.

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

Как известно, сопротивление потоку вещества, проникающего через мембранную систему, определяется проницаемостью не только мембраны, но и примембранных водных слоев. Модифицирование мембраны валиномицином может создать такие условия для транспорта ионов K^+ , при которых лимитирующей стадией переноса будут примембранные слои [8]. На рис. 7 показано увеличение проводимости БЛМ, модифицированной валиномицином, при включении КВЧ-излучения (стрелка вниз), и это увеличение проводимости полностью обратимо при выключении облучения (стрелка вверх). В то же время БЛМ без модификатора оказалась нечувствительной к действию КВЧ-излучения.

Более сложной системой для изучения мембранного транспорта является препарат кожи лягушки, предназначенный для перекачивания ионов Na^+ с ее внешней стороны на внутреннюю. Ионы Na^+ пассивно диффундируют в клетки с внешней стороны по электрохимическому

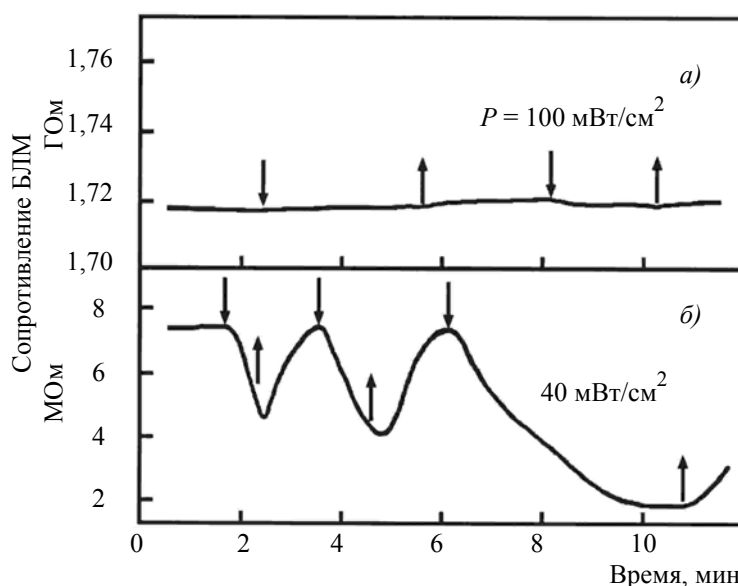


Рис. 7. Изменение электрического сопротивления БЛМ при КВЧ-облучении (длина волны – 8,5 мм):
а – немодифицированная БЛМ; б – БЛМ, модифицированная валиномицином (10^{-6} моль);
стрелками показано включение (вниз) и выключение (вверх) КВЧ-излучения

градиенту, а затем перекачиваются к внутренней стороне кожи с помощью специального фермента Na,K-АТФ-азы. Процесс переноса сопровождается генерацией разности потенциалов между изолированными растворами с двух сторон кожи, которая и является показателем скорости процесса переноса.

Включение КВЧ-облучения приводило к ускорению переноса Na^+ , о чем можно было судить по увеличению разности потенциалов на коже. При увеличении интенсивности излучения эффект возрастал (рис. 6). Таким образом, можно предположить, что и в данном случае ускорение переноса ионов Na^+ через кожу лягушки связано с увеличением пассивной диффузии этих ионов под действием мм-волн. Сравнение дозовых зависимостей (рис. 6) эффектов КВЧ-излучения на простой физико-химической системе (полярографический электрод в водной среде) и сложной биологической системе транспорта ионов натрия в коже лягушки указывает на один и тот же механизм действия излучения – ускорение переноса ионов в пограничных неперемешиваемых водных слоях [4].

Исследовалось также действие КВЧ-излучения на УФ-фотолиз дрожжевых клеток. Было обнаружено, что мм-излучение низкой интенсивности увеличивает выход из клеток в среду продуктов нуклеопротеидной природы с максимумом поглощения на длине волны 260 нм. Дозовая зависимость показывает (рис. 8) проявление эффекта при интенсивности облучения порядка 1 мВт/см² и отсутствие зависимости от мощности излучения при интенсивности 10 мВт/см². Возможно, в данном случае ускорение лизиса при фотохимическом процессе связано с ускорением процесса переноса продуктов реакции в водной фазе под действием КВЧ-излучения. В пользу такого предположения свидетельствуют данные о таком же увеличении лизиса дрожжевых клеток при механическом перемешивании суспензии, а также имеющиеся литературные сведения о важности гидродинамических эффектов при фотолизе везикулярных структур.

Итак, все приведенные в этом разделе результаты экспериментов по КВЧ-облучению биологических и физико-химических объектов можно объяснить ускорением переноса веществ в водной фазе, вызванным конвекцией среды.

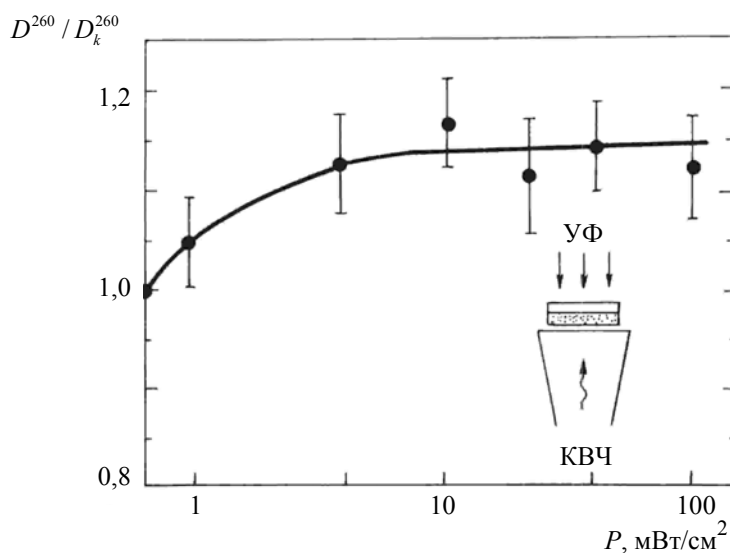


Рис. 8. Зависимость степени фотолиза клеток дрожжей от интенсивности КВЧ-облучения. Оптическая плотность надосадочной жидкости для препарата, который не облучался КВЧ, принята за 1. Длина волны облучения – 8,5 мм

4. УЧАСТИЕ НИТРОЗИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЦИТОХРОМ $c(Fe^{2+}) - NO$ В МЕМБРАННЫХ МЕХАНИЗМАХ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Биологическое действие лазеров, так же как источников мм-диапазона, известно уже более 40 лет, с тех пор как стала развиваться новая медицинская технология лечения широкого круга воспалительных и онкологических заболеваний, основанная на использовании низкоинтенсивного лазерного излучения.

До настоящего времени механизмы терапевтического действия не раскрыты, хотя было предложено немало гипотез, большей частью умозрительных. Главный вопрос, который долгое время оставался неясным, – это природа хромофора, поглощающего действующее излучение, и механизм первичных реакций, приводящих к формированию физиологического ответа организма.

В 80-х годах академиком Ю. А. Владимировым была высказана гипотеза о трех основных механизмах действия низкоинтенсивного лазерного излучения: реактивация супероксиддисмутазы, активация фагоцитов и фотолиз нитрозильных комплексов гемопротейдов [9].

Было замечено, что лазерное излучение способно регулировать потребление кислорода и синтез АТФ клетками животных и человека. Однако такой же способностью обладает и монооксид азота NO. Такое сопоставление позволило предположить, что источником и депо NO могут служить нитрозильные комплексы некоторых белков и NO выходит из этих комплексов под действием лазерного излучения. Нами были поставлены эксперименты, результаты которых подтвердили высказанную гипотезу [10, 11].

Одним из компонентов мембран митохондрий, ответственным за обеспечение дыхательных и энергетических функций и чувствительным к свету, оказался гемовый железосодержащий белок цитохром c (cyt c), реагирующий с NO с образованием нитрозильных комплексов. В наших экспериментах излучение He – Cd-лазера (ЛМП-11) с длиной волны 441,6 нм способствовало диссоциации нитрозильного комплекса cyt $c(Fe^{2+}) - NO$ и этот процесс регистрировался с помощью ЭПР-спектрометра.

Влияние излучения He – Cd-лазера на нитрозильные комплексы cyt c исследовалось при комнатной температуре. Спектр ЭПР cyt $c(Fe^{2+}) - NO$ имеет характерную для нитрозильных комплексов гемовых белков форму одиночной асимметричной линии с g -фактором 2,00 и полушириной около 100 Гс (рис. 9). Амплитуда сигнала ЭПР была выбрана как количественная характеристика для исследования влияния излучения He – Cd-лазера на cyt $c(Fe^{2+}) - NO$.

На рис.9 видно, что амплитуда сигнала ЭПР падала почти вдвое в течение 1 мин под действием излучения лазера мощностью 20 мВт/см². Предполагалось, что падение интенсивности сигнала ЭПР связано с фотодиссоциацией комплекса и образованием несвязанного cyt $c(Fe^{2+})$ и свободного NO. На оптическом спектре поглощения наблюдалось увеличение пика 549 нм, принадлежащего cyt $c(Fe^{2+})$, соответствующее полному восстановлению цитохрома c , а также исчезновение плеча поглощения в районе 560 нм, характерного для нитрозильных комплексов cyt $c(Fe^{2+}) - NO$ (на рисунке не показано). Таким образом, можно полагать, что cyt $c(Fe^{2+}) - NO$ диссоциировал с образованием cyt $c(Fe^{2+})$ и NO.

Данные фотохимические реакции могут иметь важное значение для регуляции клеточного дыхания светом видимого диапазона.

Дальнейшие исследования фотобиологических эффектов, связанных с влиянием NO на клеточные дыхательные процессы, помогут прояснить значение каждого из элементов дыхатель-

ной цепи мембран митохондрий в метаболизме NO, продукции активных форм кислорода в присутствии NO, а также механизмы фотохимических реакций цитохрома и монооксида азота.

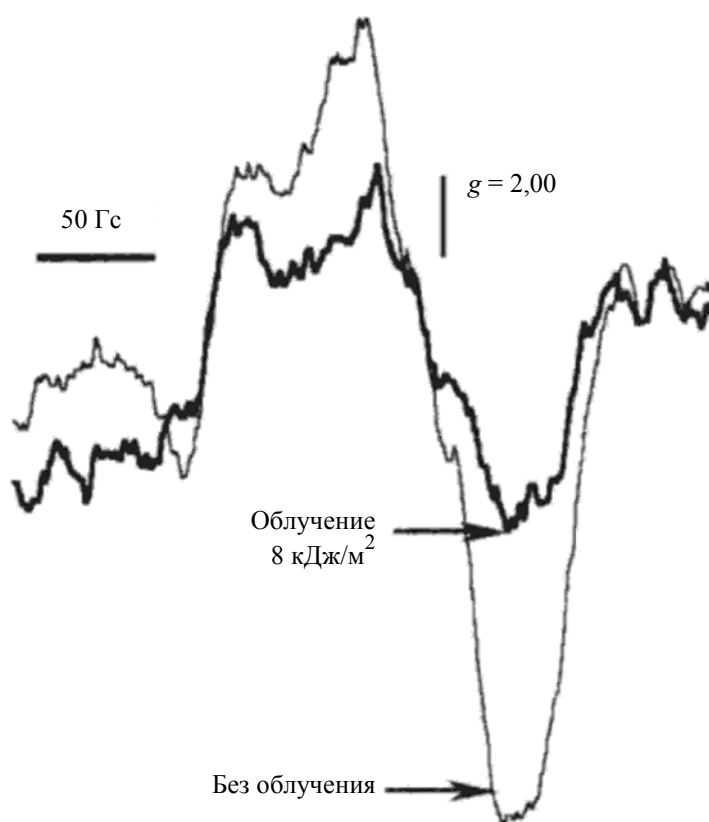


Рис. 9. Изменение спектра ЭПР $\text{cyt } c(\text{Fe}^{2+}) - \text{NO}$ под действием низкоинтенсивного излучения He – Cd-лазера в течение 1 мин. Условия эксперимента: концентрация $\text{cyt } c(\text{Fe}^{2+}) - \text{NO}$ составляет 0,03 ммоль; плотность энергии лазерного излучения – 8 кДж/м². Условия записи спектров: центр поля – 0,33 Тл; развертка поля – 40 мТл; амплитуда модуляции – 0,4 мТл; постоянная времени – 0,03 с; мощность СВЧ – 10 мВт; температура – 77 К

4. ВЫВОДЫ

Итак, полученные в представленной серии экспериментальных работ результаты позволяют заключить, что биологические мембраны в качестве первичных рецепторов оказались чувствительными во всех исследованных диапазонах длин волн ЭМП: импульсов ЭП, КВЧ-излучения и лазерного излучения в видимом диапазоне.

1. Стимуляция клеток импульсами ЭП приводит к увеличению селективной проницаемости их мембран в результате пробоя и образованию пор с ограниченным временем жизни. За это время из среды в цитоплазму попадают ионы кальция, включающие стереотипные физиологические реакции клетки, повышающие ее иммунную активность.

2. Действие КВЧ-излучения низкой интенсивности имеет тепловой характер при незначительном повышении температуры объекта, которая не всегда может быть зарегистрирована техническими средствами. К этим эффектам относятся фазовые переходы (гель – жидкий кристалл)

в мембранах и конвекция у границы раздела фаз (мембрана – вода). Эти эффекты ускоряют перенос ионов и других важных биологических веществ через мембранные системы, а также ускоряют биохимические реакции в гетерогенных системах с соответствующими физиологическими последствиями.

3. Под действием лазерного излучения могут распадаться нитрозильные комплексы цитохрома *c*, присутствующие в мембранах митохондрий, с освобождением важного регулятора дыхательных процессов в клетке – монооксида азота (NO).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1433189. Способ активации фагоцитарной активности *in vitro* / Ю.А. Владимиров, В.А. Казамапов, К.Д. Казаринов и др.
2. Malinin V.S., Kazarinov K.D., Putvinskii A.V. Mechanism of activation of neutrophils of human blood by electric field pulse // *Biophysics*. – 1996. – Vol. 41, No. 4. – P. 887-896.
3. Malinin V.S., Putvinsky A.V., Kazarinov K.D. Calcium dependent activation of human blood neutrophils electric fields pulses // *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum Publishing Corporation*. – New York, 1999. – P. 569-572.
4. Казаринов К.Д. Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности // *Итоги науки и техники. Сер.Биофизика*. – 1990. – Т.27. – 102 с.
5. Полников И.Г., Ибрагимов В.А., Казаринов К.Д. Применение метода СВЧ-АДПМ для анализа газовых сред и биологических объектов // *Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника*. – 2002. – Вып. 1(479). – С. 46-49.
6. Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д. Использование гидродинамической неустойчивости при микроволновом облучении жидких сред в биохимическом эксперименте // *Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника*. – 2007. – Вып. 1(489). – С. 98-106.
7. Андреев В.Е., Полников И.Г., Казаринов К.Д. Использование в биохимическом эксперименте явления межфазной конвекции в водных растворах при поглощении КВЧ-излучения // *Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника*. – 2007. – Вып. 2(490). – С. 91-95.
8. Kazarinov K.D., Putvinsky A.V., Malinin V.S. Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation // *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum Publishing Corporation*. – New York, 1999. – P. 441-444.
9. NO-hemoglobin may be a light-sensitive source of nitric oxide both in solution and in red blood cells / Yu. Vladimirov, G. Borisenko, N. Boriskina, K. Kazarinov et al. // *Journal of Photochemistry and Photobiology. B: Biology*. – 2001. – Vol. 59. – P. 115-122.
10. Nitrosyl complexes of heme and nonheme compounds can serve as a source of free nitric oxide upon laser irradiation / A. Osipov, G. Borisenko, K. Kazarinov, Yu Vladimirov // *Reactive Oxygen and Nitrogen Species: Diagnostic, Preventive and Therapeutic Values: International Symposium*. – St. Peterburg – Kizhi – St. Peterburg. 8-12 July, 2002. – P. 63.
11. Нитрозильные комплексы цитохромов митохондриальной цепи – первичные хромофоры в механизме фотоактивации дыхания / Г.Г. Борисенко, С.С. Постнов, К.Д. Казаринов, А.Н. Осипов, Ю.А. Владимиров // *Биологические мембраны*. – 2002. – Т. 19. – С. 379-391.

Статья поступила 4 сентября 2007 г.

К 65-ЛЕТИЮ ФГУП «НПП «ИСТОК»

УДК 623(09)

ПОД ШИФРОМ «КОБАЛЬТ»

Р. М. Попов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

В 2008 г. ФГУП «НПП «Исток» исполняется 65 лет. Вниманию читателей предлагается отрывок из 2-й части книги сотрудника научно-информационного отделения предприятия Рудольфа Михайловича Попова «От НИИ-160 до «Истока» – «Холодная война».

FSUE RPC “Istok” will be 65 years old in 2008. An extract from the second part of the book “From NII-160 to Istok” called “The cold war” written by Rudolf Mikhailovich Popov, a worker of the scientific-information department, is proposed to the attention of the readers.

Вторая мировая война наглядно показала роль тяжелых стратегических самолетов в бомбардировках объектов противника. Перед войной в СССР не было внятной концепции использования стратегической авиации, поэтому производство высотных скоростных тяжелых бомбардировщиков класса «летающая крепость» ТБ-7 осуществлялось медленными темпами. Всего до конца 1944 г. было построено 93 машины.

Вместе с тем США и Англия произвели за годы войны в сумме около 40 тыс. тяжелых четырехмоторных бомбардировщиков В-17, В-24, В-29, Lancaster, Stirling, Halifax. Но уже в ходе войны военно-политическое руководство СССР приняло первые меры по созданию мощного воздушного стратегического флота. Авиационные КБ получили соответствующие задания, началась подготовка проектов будущих четырехмоторных бомбардировщиков.

В сентябре 1943 г. заместитель народного комиссара авиационной промышленности СССР А.С. Яковлев направил главному конструктору завода № 156 А.Н. Туполеву письмо следующего содержания: «...Вам поручается разработать эскизный проект и построить макет тяжелого высотного 4-моторного бомбардировщика с герметическими кабинами и пушечной защитой...» Далее перечислялись тактико-технические требования к самолету. Из них следовало, что советская авиация в обозримом будущем должна была получить современный дальний бомбардировщик, соответствующий по своим летно-техническим данным лучшим западным аналогам, в частности американскому В-29. ОКБ А.Н. Туполева предстояло, основываясь на отечественных технологиях, материалах и оборудовании, создать бомбардировщик, близкий к американскому.

Уже в августе 1944 г. в ОКБ Туполева был готов эскизный проект «самолета 64» с современным оборудованием, соответствующим требованиям ВВС. Это могло стать большой проблемой, так как не все предприятия-смежники ОКБ могли на том этапе обеспечить производство этого самолета необходимыми материалами, навигационными и радиолокационными средствами.

Надо заметить, что внедрение новых авиационных материалов и изделий из них в условиях войны было затруднено, поэтому самолетостроителям приходилось использовать сортамент листов и пресованных профилей из легких сплавов десятилетней давности. Аналогичная ситуация была характерна и для радиосвязного и радиотехнического оборудования.

В сентябре 1944 г. макет самолета предъявляется для первого предварительного осмотра заказчиком, в результате которого было сделано много замечаний; в частности, заказчик потребовал установки бортовой радиолокационной станции. Второй осмотр после доработок состоялся в феврале 1945 г., и снова последовали замечания по общей компоновке, радиолокационному оборудованию, вооружению и т.д. Можно сказать, что руководство ВВС, постепенно знакомясь с реальными образцами западной авиационной техники, предъявляло все больше и больше требований к новому бомбардировщику, и в какой-то момент эти требования превысили практические возможности советской авиационной промышленности того периода, особенно в части радиотехнического оборудования и вооружения.

Информация о причинах задержек и сбоев в проектировании и постройке самолета докладывалась Л.П. Берии и непосредственно И.В. Сталину. Сталин негодовал, искал виновных в отставании и неоднократно вызывал «на ковер» руководителей ВВС. Всем было уже ясно, что отечественная промышленность, особенно в области авиационной металлургии, радиоэлектроники и телемеханики, не сможет одолеть проектное задание по «самолету 64», рассчитанное на более высокий технологический уровень производства, чем тот, которым владела наша страна в 1945 году.

В литературе создание нового бомбардировщика, копии американского В-29, связывают в основном с отсутствием в СССР носителя атомной бомбы, разработка которой в то время была в самом разгаре. Сталина беспокоило не только отсутствие носителя.

Бывшие союзники по антигитлеровской коалиции стали непримиримыми врагами. Они начали окружать СССР военными базами. В случае военного конфликта Союзу нечем было ответить, так как фактически в стране не было стратегической дальней авиации, способной наносить бомбовые удары по базам противника. Учитывая все эти факторы, требовалось срочно найти выход из создавшегося положения.

И его нашел командующий дальней авиацией Главный маршал авиации А.Е. Голованов. Он вместе с авиационными специалистами отправился на Дальний Восток, где в конце 1944 г. после бомбежки объектов Японии совершили вынужденную посадку четыре В-29. обстоятельно изучив весь комплекс возникших проблем, Голованов доложил о них Сталину, который после доклада приказал перегнать «американцев» в Москву.

В начале июня 1945 г. А.Н. Туполев и его заместитель А.А. Архангельский были вызваны в Кремль к Сталину. Оба они были уверены, что речь пойдет о «самолете 64». Они не знали о решении Сталина и поэтому взяли с собой красочный альбом с основными проектными данными «64». Но разговор Сталин повел вовсе не о «самолете 64», и альбом не пригодился. По воспоминаниям Архангельского, Сталин, поздоровавшись, сразу перешел к сути вопроса: «Товарищ Туполев, вы будете копировать В-29. Подробности – у Шахурина». Туполев, несколько растерявшись от неожиданного поворота событий, промолчал. Архангельский ответил за двоих, что задание будет выполнено, после чего они покинули кабинет Сталина. Весь прием длился две минуты.

6 июня 1945 г. вышло постановление Государственного комитета обороны, по которому ОКБ Туполева и заводу № 22 в Казани поручалось организовать производство советской копии американского бомбардировщика В-29 – самолета Б-4 («бомбардировщик четырехмоторный»), который в дальнейшем по указанию Сталина был переименован в Ту-4.

После предварительной подготовки летчики авиации Тихоокеанского флота в течение июня и июля 1945 г. перегнали три самолета В-29 в Москву, на аэродром в Измайлове. Один самолет было решено передать в Летно-испытательный институт (ЛИИ) для обучения персонала и составления инструкций по эксплуатации. Второй предстояло разобрать для изучения конструкции и составления чертежей. Третий предполагалось оставить в качестве эталона.

А.Н. Туполев после осмотра машины оценил объем предстоящих работ в три года, обосновывая этот срок тем, что американская технология отличается от нашей не только в самолетостроении, но и в других смежных отраслях промышленности. В ответ на доводы Туполева Сталин предоставил ему широчайшие полномочия, ограничив при этом срок освоения Б-4 в серийном производстве двумя годами. Первые Б-4 должны были участвовать в воздушном параде в августе 1947 года.

Впервые в практике отечественного самолетостроения было разрешено Министерству авиационной промышленности без согласования с какими-либо инстанциями напрямую передавать другим министерствам технические задания на поставку для самолета Б-4 новых материалов и комплектующих изделий. В соответствии с личным указанием Сталина, не допускалось ни малейшего отклонения ни в одной детали от американского образца. Кроме того, в нарушение всех норм и правил правительство разрешило выпуск сразу партии в 20 самолетов без традиционной опытной машины.

В работу над новым самолетом включилось около 900 предприятий и организаций различных наркоматов страны, некоторые предприятия создавались заново. В частности, появились несколько новых ОКБ в системе авиационной промышленности, задачей которых стало копирование и освоение радиоэлектронного, электротехнического, приборного и другого оборудования. Для выполнения поставленной задачи необходимо было разработать 30000 технологических процессов, изготовить 2700 единиц разного рода оснастки, 380900 единиц инструмента.

Почти все оборудование, снятое с самолета В-29 при разборке, в количестве 350 агрегатов было направлено для исследования и копирования в специализированные КБ и НИИ, где каждый агрегат обрабатывала отдельная бригада конструкторов и технологов. Агрегат взвешивали, обмеряли, фотографировали и описывали. Потом демонтировали все съемное оборудование, пока не обнажился каркас агрегата. Любая деталь подвергалась спектральному анализу для определения материала. На основании проведенных исследований было выпущено 40000 чертежей формата А4.

Здесь уместно заметить, что в работе над самолетом Б-4 принимала активное участие и внешняя разведка. Так, в середине 90-х годов ФСБ России рассекретило документы, связанные с получением технической документации на американский бомбардировщик В-29, и имя советского разведчика Н.М. Горшкова, принимавшего участие в этом.

После принятия И.В. Сталиным решения о копировании В-29 к нему был вызван Л.П. Берия, которому была поставлена задача: через резидентов советской разведки за рубежом добыть любую информацию по этому самолету.

Резидент советской разведки в Италии Н.М. Горшков встретился со своими агентами-итальянцами, у одного из которых оказался родственник – авиационный инженер, эмигрировавший в Америку и устроившийся работать на завод фирмы «Боинг», который выпускал бомбардировщики В-29. Агент, получив определенную сумму для поездки в Америку, вскоре вернулся оттуда с двумя чемоданами, туго набитыми чертежами и инструкциями по самолету В-29.

Среди 350 агрегатов, направленных на копирование в КБ и НИИ, был и бомбардировочный радиолокационный прицел AN/APQ-13. НИИ 17 в Филях (Москва) предстояло скопировать его под шифром «Кобальт», а НИИ-160 (Фрязино) – электровакуумные приборы к этому прицелу. Эта задача была не из легких. Если в области самолетостроения наша промышленность имела какой-то опыт, то в области создания радиолокационных станций для самолетов он был минимальным. За короткое время НИИ-17 и НИИ-160 предстояло точно воспроизвести то, к чему Америка, с ее развитой промышленностью, шла более 10 лет. С этой целью в декабре 1945 г. в НИИ-160 для форсирования работ по разработке специзделий для самолета Б-4 в составе лаборатории генераторных ламп создается отдел клистронов. Начальником отдела был назначен С.М. Никифоров, ранее работавший начальником лаборатории электронно-лучевых приборов. Кроме того, специально была создана лаборатория новой технологии, руководителем которой был назначен К.П. Шахов. Для бомбоприцела самолета Б-4 институту, по заданию НИИ-17, необходимо было освоить производство около 10 типов приборов. НИИ-160 предстояла весьма трудная работа.

* * *

В бомбардировочной авиации большое значение имеет точный вывод самолетов-бомбардировщиков в район цели и выполнение прицельного бомбометания при отсутствии оптической видимости и с больших высот. Опыт войны показал, что действия бомбардировщиков ночью и из-за облаков более эффективны, чем действия днем, когда противник может применить все средства противовоздушной обороны. Одним из основных устройств, обеспечивающих бомбардировщикам выполнение боевых задач в сложных метеорологических условиях и ночью, является радиолокационный бомбардировочный прицел.

Радиолокационный бомбардировочный прицел представляет собой самолетную радиолокационную станцию (РЛС) с индикатором кругового обзора, имеющую специальное счетно-решающее устройство для прицельного бомбометания. Такую станцию часто называют панорамной, так как она дает возможность получить на экране индикатора своеобразную световую панораму местности, находящейся под самолетом.

На бомбардировщиках В-29, совершивших вынужденные посадки на территории СССР с июля по декабрь 1944 года, стояла РЛС кругового обзора AN/APQ-13.

Надо заметить, что РЛС AN/APQ-13 не была последним словом в радиолокационной технике, созданной в США. За время войны в Америке было разработано немало замечательных РЛС, но среди них особо выделялся радиолокационный бомбардировочный прицел AN/APQ-7 «Eagle» («Орел») с высокой разрешающей способностью, позволивший намного опередить тогдашний уровень радиолокационной техники.

Прицел AN/APQ-7 представлял собой РЛС 3-см диапазона, которая предназначалась для слепого бомбометания с большой высоты (12 000 м). В то время она имела уникальную антенну в виде фазированной антенной решетки длиной 4,9 м. При импульсной мощности 50 кВт и

средней мощности 30 Вт РЛС позволяла видеть на индикаторе радиолокационное изображение городов на расстоянии до 300 км.

Разработка этой станции началась в ноябре 1941 года. Но, в связи с возникшими трудностями, работы над ней были отодвинуты на второй план. Со временем удалось решить все возникшие проблемы, и в июне 1943 г. РЛС прошла первые летные испытания. Через год промышленности было заказано 1660 таких установок.

В феврале 1945 г. в ВВС США стал поступать новый вариант «суперкрепости» В-29 – бомбардировщик В-29В (было выпущено 311 машин). На нем вместо РЛС AN/APQ-13 была установлена РЛС AN/APQ-7, сопряженная с оптическим прицелом типа «Норден». На совершивших же до декабря 1944 г. вынужденную посадку на территории СССР В-29 стояла старая РЛС (AN/APQ-13).

Характеристики копируемой станции AN/APQ-13 были несколько скромнее, чем у AN/APQ-7. Станция относилась к РЛС типа H_2X , которые были выпущены в двух вариантах: AN/APQ-13 и AN/APS-15. Эти станции имели сходные параметры. При длине волны 3,2 см и мощности передатчика в импульсе 50 кВт дальность действия по наземным объектам была примерно 70 км, дальность обнаружения крупных городов – до 180 км. Счетно-решающее устройство обеспечивало точное бомбометание с высоты более 4500 м. Эти тактико-технические данные РЛС H_2X явились предельными для многокамерных магнетронов, разработанных в США к моменту проектирования этих станций.

РЛС отличались друг от друга в основном своей компоновкой, что позволило за счет уменьшения числа кабелей и сокращения количества блоков получить экономию в массе. Если станция APQ-13 имела 14 блоков и массу 350 кг, то станция APS-15 – 8 блоков и массу 250 кг. Производство станции APQ-13 началось в конце 1943 года.

В блоках этой станции применялись разработанные в США в 1943 году СВЧ-приборы: в передатчике – магнетроны типа 725А 3-см диапазона, в приемнике – отражательные клистроны типа 723А/В и 726А. Кроме этих приборов использовались несколько типов ЭВП, три кристаллических детектора, два разрядника и две электронно-лучевые трубки.

Для того чтобы стандартные вакуумные лампы могли работать в импульсном режиме, на фирме «Боинг» в процессе разработки импульсного модулятора для них были составлены новые технические условия, изменена их конструкция и тип катодов. В частности, использование керамических анодных держателей вместо слюдяных, замена оксидных катодов на катоды из чистого или торированного вольфрама обеспечили увеличение напряжения пробоя.

В генераторе передатчика на магнетроне 725А применялась модуляторная лампа 5D21, позволившая получить модулятор с более высоким КПД. Для его возбуждения использовался лучевой тетрод типа 829. Он управлял работой двух ламп 5D21. Такой модулятор с импульсной мощностью 250...300 кВт нашел применение еще в шести типах самолетных РЛС. Он выпускался в больших количествах до последних дней второй мировой войны.

Среди других типов ЭВП, применявшихся в РЛС AN/APQ-13, можно назвать пентагрид (гептод) 6SA7, который предназначался для преобразования частоты ВЧ-колебаний, и высоко-частотный пентод 6AG7 – для усиления напряжения высокой частоты; тиратрон 884, который использовался в схеме развертки ЭЛТ; тиратрон с газовым наполнением 2050 – в электропреобразовательных устройствах; пентод 6AC7 и двойные триоды 6J6 – в каскадах усилителя промежуточной частоты.

Всего же по упрощенной схеме этой станции в приемопередатчике использовалась 31 радиолампа, в синхронизаторе – 25, в индикаторе – 4, в выпрямителе – 6. Итого 66 радиоламп. Но эта цифра не говорит о количестве типов использованных радиоламп, так как в блоке дальности станции стояло 17 ламп трех типов, в блоке передатчика – 8 четырех типов, в приемном устройстве – 10 трех типов и т.д., при этом некоторые типы радиоламп одновременно стояли в нескольких блоках. Перечисленные приборы являлись основными в радио-электронных схемах станций Н₂Х.

В приказе по НИИ-160 от 18 июня 1947 г. указано, что институт должен отгружать в первую очередь в организации, занимающиеся производством самолета Б-4, девять типов ЭВП (705, 6Х5, 6АГ5, 837, 1625, 811, ВП-1, 5D21 и 6J6). Если сравнивать типы перечисленных радиоламп с лампами, применявшимися в РЛС АН/АРQ-13, то можно увидеть, что только двойной триод 6J6 и модуляторная лампа 5D21 названы в приказе.

В сохранившихся в архиве НПП «Исток» документах название станции «Кобальт» впервые упоминается в приказе по НИИ от 5 марта 1951 года. В нем перечислены электровакуумные приборы, выпускавшиеся для производства этой РЛС: лампы 6Н15П (6J6), 6АЖ5 (6АГ5), Г-483 (5D21), 705А, 6ПЗ и кристаллический детектор КД2С31 (в скобках указаны названия аналогичных американских ламп). Подтверждение тому, что генераторный триод 811, генераторные пентоды 837, 1625 и вакуумное реле ВП-1 применялись в РЛС «Кобальт», найти не удалось. Очевидно, как и кенотрон 6Х5 (6Х5С), они использовались в других радиотехнических системах бомбардировщика Ту-4. Так, в приказе по НИИ-160 от 29 октября 1948 г. читаем: «Для обеспечения комплектации радиоаппаратуры самолетов Ту-4, участвующих в параде 7 ноября 1948 года, обязываю тов. Черненко Т.С. отобрать особо тщательно 60 шт. клистронов (на самом деле кенотронов. – *Р.П.*) типа 6Х5С...»

В приказе 1947 года, кроме приемно-усилительных ламп, не упоминаются другие приборы, применявшиеся в РЛС. Например, не названы магнетрон, клистрон, разрядники, электронно-лучевые трубки, кристаллические смесители. Без этих приборов РЛС не может функционировать. Но если НИИ-160 их не выпускал, тогда кто же?

Ответ мы находим в том же приказе, в котором главному инженеру опытного завода т. Ратенбергу С.А. поручается обеспечить своевременное получение из ЛКБ технической документации и инструмента по лампам 5D21 и 6J6 (только инструмент).

Лабораторно-конструкторское бюро (ЛКБ) по разработке и выпуску электровакуумных приборов было организовано в августе 1945 г. в пригороде г. Берлина – Обершеневайде, на заводе «Обершпрее». В Бюро работали как советские, так и немецкие специалисты. Подробно о деятельности ЛКБ написано в первой части книги*. Значит, ЛКБ принимало участие в изготовлении приборов для самолета Ту-4.

В начале 1943 г. немцами над Голландией был сбит английский самолет, на котором стоял бомбоприцел с РЛС 3-см диапазона. Немцы были поражены увиденным, так как до сих пор считали, что волны короче 20 см не пригодны для радиолокации. Так сбитые во время налетов союзной авиации самолеты позволили немецким специалистам изучить конструкции новых для них бортовых РЛС.

*Попов Р.М. Немецкий след в советской электронике // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 3(491). – С. 32-47.

Со второй половины 1943 г. радиотехническая промышленность Германии приступила к интенсивному воспроизведению англо-американских РЛС и ЭВП для них. Принимал в этом участие и завод «Обершпрее». Когда после войны на нем было организовано ЛКБ, работы по копированию ЭВП продолжились.

В 1946 году ЛКБ было дано задание на разработку целого ряда приборов, среди которых были импульсные магнетроны 3-см диапазона типа 725А и 730, отражательные клистроны 723А/В и 726А, шесть типов радиоламп (6AC7, 6AG7, 6J6, 5D21, 829В, 717А), два типа электронно-лучевых трубок, два типа разрядников на диапазон 3 см и два типа смесительных детекторов.

В связи с тем, что выпуск клистронов из ЛКБ был передан на ленинградский завод «Светлана», хотя опыт по их изготовлению в Бюро перенимали сотрудники НИИ-160, мы не будем рассматривать проблемы, связанные с их производством.

Одной из первоочередных задач, поставленных перед ЛКБ, была разработка импульсных магнетронов на длину волны 3 см с излучаемой мощностью не менее 30 кВт в импульсе. Когда ЛКБ было ликвидировано, производство магнетрона типа 725А было передано в НИИ-160.

Первый рабочий образец такого 3-см магнетрона был изготовлен в США, в Лаборатории излучения Массачусетского технологического института (МТИ), летом 1941 года. В дальнейшем после ряда опытов был разработан магнетрон типа 2J21, освоенный в производстве. Его выходная мощность составляла 15 кВт при КПД от 12 до 15%.

Для усовершенствования магнетрона (повышения выходной мощности, срока службы, КПД) к работе подключился Колумбийский университет. Совместно, сосредоточив все усилия только на магнетроне с двенадцатью резонаторами, в США удалось создать конструкцию, которая уже представляла собой, в основных чертах, магнетрон типа 725А.

Опыты показали, что этот магнетрон вполне пригоден для мощностей порядка 150 кВт. На первых стадиях его производства возникло много затруднений, но все они были преодолены, и в течение 9 месяцев выпуск годных магнетронов был доведен до 85 %. Общее количество магнетронов, выпущенных всеми фирмами США за годы войны, превысило 300 тыс. шт. В дальнейшем для 3-см диапазона волн были сконструированы лучшие магнетроны, но все же магнетрон 725А занимает среди них особое место. Он дал высокий КПД и послужил прототипом для большинства последующих разработок магнетронов на волну 3 см в США и Англии.

При копировании прибора мало изучить только его конструкцию. Необходимо научиться рассчитывать его параметры, изготовить специальное оборудование, различные штампы и приспособления, разработать новые технологические процессы, измерительную технику и многое другое. В большинстве случаев технология изготовления копии отличается от технологии изготовления ее прототипа.

Сам процесс производства магнетрона 725А состоит из нескольких этапов. Сначала в прямоугольной заготовке из вакуумной бескислородной меди с помощью специальных приспособлений по окружности высверливаются двенадцать отверстий диаметром 2 мм. Они называются резонаторными камерами. В центре заготовки делается еще одно отверстие диаметром 5 мм, в котором в дальнейшем размещается катод. Резонаторные камеры соединяются с центральным катодным отверстием щелями шириной 0,6 мм, образуя при этом высокочастотные колебательные контуры. Как резонаторные камеры, так и щели должны быть абсолютно одинаковы и выполнены с очень большой точностью. Это достигается с помощью специального инструмента.

Одним из основных элементов магнетрона является катод. От его качества главным образом зависит срок службы прибора. Обычная конструкция оксидного катода, применявшаяся в электронных лампах, оказалась непригодной для магнетрона, работающего в импульсном режиме. При высоких анодных напряжениях катод быстро разрушался. Для увеличения его срока службы в ЛКБ была разработана специальная технология. Предварительно были исследованы различные оксидные пасты для катода. Полученный в результате состав оказался наиболее устойчивым в условиях работы магнетрона.

Конструкция катода представляла собой никелевую трубку с присадкой магния, на которую приваривалась тонкая никелевая сетка. В эту сетку вмазывалась оксидная паста, которая сверху покрывалась тонким слоем оксида методом пульверизации. В результате проведенных работ срок службы магнетрона был увеличен почти в 10 раз. Его выходная мощность составила 30 кВт, а КПД – 30%. Кроме создания образцов изделий, перед ЛКБ была поставлена задача по разработке технологии их серийного производства, а также изготовлению необходимой инструментальной оснастки.

К концу 1946 г. ЛКБ выполнило полученное задание. К февралю 1947 г. в Министерство промышленности средств связи (МПСС) было поставлено радиоламп 5D21 – 245 шт., 829B – 505 шт., 6AC7 – 2723 шт., 6AG7 – 1338 шт., 6J6 – 2719 шт. Кроме того, было поставлено разрядников на 3-см диапазон LG-80 – 82 шт. и LG-79 – 122 шт., электронно-лучевых трубок диаметром 108 мм для индикатора кругового обзора 5FP7 – 192 шт. и 3ДР1 диаметром 69 мм – 146 шт., а также смесительных детекторов ЕД704 – 8000 шт. и ЕД707 – 6000 шт.

Таким образом, первые РЛС «Кобальт» фактически были обеспечены изделиями, изготовленными в ЛКБ. В дальнейшем их производство предстояло освоить НИИ-160. Это освоение потребовало от коллектива предприятия большой творческой работы, в которой не всегда все шло гладко. Одним из наглядных примеров может служить производство кристаллических детекторов. Об этом мы расскажем подробнее.

* * *

Прием радиолокационными станциями отраженных от целей слабых сигналов сверхвысокой частоты требует применения высокочувствительных приемников, чувствительность которых определяется шумами, возникающими в самом устройстве, в основном шумами электронных ламп.

Неудовлетворительные свойства электронных ламп при работе на СВЧ привели к необходимости использовать в приемных устройствах кристаллические детекторы. Замечательные свойства этих детекторов, в частности исключительно малое время пробега электронов между электродами, делают их идеальными приборами для целей преобразования сверхвысоких частот.

Отсутствие отечественных детекторов см-диапазона, способных работать в радиолокационных станциях, потребовало организовать их производство в СССР. В связи с этим Совет Министров СССР своим постановлением от 17 июля 1947 г. поручает разработку и выпуск серии кристаллических детекторов НИИ-160. Позднее, в июле 1948 г., Комитет №3 при Совете Министров СССР обязывает НИИ-160 дополнительно разработать серию малогабаритных детекторов для применения их в разведывательных устройствах.

Кристаллический детектор состоял из двух металлических электродов, находящихся в контакте с полупроводником. Один электрод представлял собой металлическое основание с гнез-

дом, в котором закреплялся кристалл полупроводника, другим электродом являлась тонкая заостренная проволока из вольфрама, тантал-ниобия или других материалов. Острые проволоки (пружины) соприкасалось с поверхностью полупроводника. Для детектирования применялись различные полупроводники, такие, как кремний, германий и др. Площадь соприкосновения между кончиком пружины и полупроводником была равна примерно 10^{-6} см². При изготовлении кристаллических детекторов обращали особое внимание на природную чистоту материала, обработку его поверхности, на остроту и правильность установки кончика пружины.

НИИ-160 предстояло изготовить четырнадцать типов детекторов на два диапазона, 3 и 10 см, для трех основных целей: преобразования сигнала в смесителях радиолокационных станций, сантиметровых приемников прямого усиления и измерительных устройств.

В начале работы в НИИ-160 не имелось какого-либо опыта по изготовлению кристаллических детекторов. Не было необходимого оборудования. Состояние измерительной техники не позволяло производить необходимые измерения.

За короткое время в результате проделанных коллективом предприятия работ были найдены оригинальные пути конструктивного и технологического решения таких проблем, как способ осаждения кристаллов кремния на графите из газовой фазы, настройка детекторов непосредственно в специально сконструированной измерительной аппаратуре сантиметрового диапазона и т.д.

В период с 11 декабря 1948 г. по 30 марта 1949 г. детекторы НИИ-160 прошли испытания. Государственная комиссия в своем акте от 5 апреля 1949 г. констатировала, что предъявленные НИИ-160 опытные образцы детекторов испытания выдержали. Комиссия отметила, что детекторы НИИ-160 позволили увеличить дальность действия радиолокационных станций без увеличения мощности передатчика и что они находятся на уровне лучших зарубежных образцов. Также было отмечено, что в настоящее время практически все типы сантиметровых радиолокаторов отечественного производства, проходящие государственные испытания и выпускаемые промышленностью, ориентированы на применение детекторов НИИ-160.

В соответствии с решением Совета Министров СССР по окончании разработки на опытном заводе НИИ-160, в специальном цехе № 37, было организовано, с начала 1949 года, серийное производство кристаллических детекторов четырнадцати типов.

Во вспомогательных цехах завода проводились операции изготовления и шлифовки керамики, спекания керамики с металлом, а также изготовления механических деталей детекторов. Проектная мощность цеха № 37 была рассчитана на 3000 детекторов в месяц. Еще в процессе освоения производства детекторов за два месяца их было изготовлено около 3000 шт. более чем для 20 различных организаций. За девять месяцев, с января по октябрь 1949 г., было выпущено 14126 штук детекторов всех типов. Качество детекторов характеризуется отзывами о них основных потребителей.

«До выпуска детекторов, разработанных в НИИ-160, ЦНИИ-108 применял в основном импортные и трофейные детекторы... Разработка и, особенно, освоение серийного выпуска детекторов сопряжены со значительными трудностями, вызванными малыми размерами (рабочая площадь контакта – порядка нескольких квадратных микрон), сложной технологией очистки исходных материалов и отсутствием аппаратуры, необходимой в процессе регулировки детекторов. Эти трудности разработчиками НИИ-160 были преодолены.

Детекторы НИИ-160, по качеству аналогичные и, в ряде случаев, превосходящие современные иностранные образцы, позволили ЦНИИ-108 выполнить по правительственным заданиям

четыре крупные разработки радиолокационных и разведывательных станций. Три из этих станций в настоящее время успешно прошли государственные испытания. Разработка и организация серийного выпуска детекторов в НИИ-160 представляет собой серьезное достижение нашей радиолокационной промышленности». Аналогичные отзывы были даны и другими организациями (НИИ-10, НИИ-20, НИИ-17 и др.).

В 1950 году за разработку и внедрение в производство серии кристаллических детекторов см-диапазона волн, предназначенных для использования в радиолокационных станциях и измерительной аппаратуре, начальник лаборатории, главный конструктор кандидат технических наук А.В. Красилов и инженер-разработчик технологических процессов А.И. Мельников были удостоены Сталинской премии.

Но положительные отзывы потребителей детекторов не значили, что их производство было благополучным. В марте 1951 г. в техническом распоряжении по НИИ-160 было дано указание: «...в цехе 37 для повышения качества детектора КД2С3А провести технологические и конструктивные мероприятия – установить технические требования на тантал-ниобий, применяемый для изготовления спиралей; ввести электролитическое заострение спирали; изготовить два комплекта нового инструмента для формовки спиралей...» Но принятые меры неполностью устранили недостатки детекторов.

Так, со стороны руководства завода № 283, выпускавшего РЛС «Кобальт», были серьезные претензии к их качеству. В частности, отмечался выход из строя большого количества детекторов из-за выгорания их в процессе настройки станции. После посещения директором НИИ-160 В. Гольцовым этого завода в институте был выпущен приказ, в котором для выяснения причин выхода из строя детекторов начальнику лаборатории № 173 Красилову, в соответствии с просьбой главного инженера завода № 283, предписывалось выехать на этот завод, где установить причину выхода детекторов из строя и дать свои предложения главному инженеру опытного завода НИИ-160 Басистову по улучшению их качества. Кроме того, Красилов должен был взять с собой 100 шт. детекторов КД2С3А конструкции ДК-С3 и провести их испытание непосредственно в станции.

Спустя девять месяцев в другом приказе по НИИ-160 от 26 сентября 1952 года отмечалось, что «проверкой Министерства государственного контроля установлена недостаточная надежность в работе радиолокационных станций «Кобальт» в связи с тем, что имели место выходы из строя радиоламп и радиодеталей». А еще раньше приказом МПСС от 9 сентября 1952 года НИИ-160 был обязан «исследовать причины отказов в работе кристаллических детекторов ДК-С3 и разработать мероприятия, обеспечивающие повышение их надежности». Начальник отдела 220 Н.О. Зебода совместно с А.В. Красиловым приняли ряд мер по повышению надежности детекторов ДК-С3. Но и после проведенных мероприятий положение дел в корне не изменилось, хотя выпуск годных детекторов увеличился.

Кристаллические детекторы НИИ-160 нашли применение не только в радиолокационной технике. Так, в июне 1950 г. директор Института точной механики и вычислительной техники АН СССР академик М.А. Лаврентьев и заведующий лабораторией №1 действительный член Академии наук УССР С.А. Лебедев направили в адрес НИИ-160 письмо с техническим заданием на германиевые детекторы, разрабатываемые НИИ-160 по постановлению Совета Министров СССР от 11 января 1950 г. В августе 1951 г., согласно другому постановлению Совета Министров СССР, институт должен был поставить Академии наук СССР 500 шт. кремниевых

детекторов. Эти детекторы использовались в первых разрабатываемых в СССР электронно-вычислительных машинах МЭСМ (малая электронная счетная машина) и БЭСМ (быстродействующая электронная счетная машина).

Наибольшее количество выпускаемых детекторов приходится на начало 50-х годов. В 1951 г. было изготовлено 148 тыс. шт., в 1952 г. – 257 тыс. и в 1953 г. – 185 тыс. В 1954 г. выпуск детекторов в НИИ-160 был прекращен в связи с организацией в 1953 г. в Москве специализированного отраслевого НИИ полупроводниковой электроники – НИИ-35 (впоследствии «Пульсар»), в него переводится А.В. Красилов. В лаборатории, руководимой им, были изготовлены первые плоскостные транзисторы, ставшие основой серийных приборов типа П1, П2, П3 и их дальнейших модификаций П6, П13...П16. Эти приборы создали базу для дальнейшего развития транзисторной технологии в СССР.

К концу 80-х годов точечные кристаллические детекторы практически были вытеснены плоскостными диодами и диодами Шотки.

Но проблемы возникали не только при изготовлении кристаллических детекторов. Почти все радиолампы для станции «Кобальт», поступившие из ЛКБ для их серийного производства в НИИ-160, в скором времени потребовали усовершенствования. В тематический план института на 1947 год были включены такие темы, как «Разработка пальчикового двойного триода по типу 6J6 (6Н15П)», «Разработка генераторного тетрода по типу 5D21 (Г-483)». В 1949 г. – «Разработка усовершенствованной лампы для замены Г-483», «Разработка миниатюрного двойного триода с разделенными катодами по типу 6J6 (6Н15П)». В 1950 г. – «Разработка лампы по типу 6ПЗ для радиолокационных приемных устройств, обладающей повышенной виброустойчивостью, однородностью параметров и сроком службы свыше 5000 часов». Еще до этого в планы НИИ была включена тема «Переконструирование лампы 6ПЗ применительно к новым эксплуатационным условиям».

Из имеющихся в нашем распоряжении документов видно, что до 1951 г. с радиолампами для станции «Кобальт» все вроде бы было благополучно. Но, может быть, это связано с тем, что первые станции комплектовались радиолампами, изготовленными в берлинском ЛКБ? Когда же дело дошло до их разработки в лаборатории № 5 завода № 465 и производства в НИИ-160, из-за несовершенства технологии, отсутствия необходимого оборудования и измерительной техники их качество снизилось. Стали искать причины, вводить новые технологические процессы и методы испытания, изменять конструкцию приборов.

В марте 1951 г. своим приказом министр МПСС Г.В. Алексеенко обязывает НИИ-160 в целях улучшения качества изделий, поставляемых институтом заводам МАП для станции «Кобальт», пересмотреть технические условия и ужесточить нормы параметров на эти изделия, «обратив особое внимание на: а) недокальный режим, б) повышение напряжения между катодом и подогревателем до 200 В при испытании ламп 6Н15, 6АЖ5, 6ПЗ и в) уменьшение величины термотока первой сетки при перекальном режиме в лампах 6ПЗ, 6АЖ5 и Г-483».

Чтобы как-то исправить создавшееся положение, на опытном заводе НИИ дополнительно вводятся 36-ти часовая тренировка радиоламп и предварительная выдержка их в течение 30 дней до предъявления военной приемке. По отдельным приборам (6ПЗ, Г-483, 6Ж5, 705А) проводится переработка конструкции и технологии их изготовления. Среди мероприятий по улучшению качества радиоламп можно назвать такие:

- для лампы 6ПЗ проводятся пробы с применением серебряных сеток, изготовлением катодов из цельнотянутой трубки толщиной 0,1 мм с подогревателем из вольфрама, а также слюдяных пластин с металлической армировкой для фиксации арматуры относительно колбы лампы;
 - по лампе 705 разрабатывается режим карбидирования катодов, вводится контроль за обмоткой стеклом молибденовых выводов, изготавливаются сливные молибденовые аноды с циркованием;
 - по лампе типа 6Н15 устанавливаются причины разброса накала и перегрева колбы;
 - по лампе типа 6АЖ5 проводятся пробы по серебрению сеток, изготовлению ламп с анодами из алюминированного железа, вводится новая конструкция ножки, определяются причины короткого замыкания катод – нить;
 - по лампе типа Г-483 выявляются причины окисления некоторых деталей лампы при заварке и появления термоотоков в сетках. И это далеко не все проводимые мероприятия.
- Разумеется, изготовителей станции не интересовали все эти проблемы, они только констатировали, что «несмотря на проделанную работу, качество ряда типов электровакуумных приборов еще недостаточно и радиолампы требуют дальнейшего улучшения».

* * *

Первый бомбардировщик Ту-4 совершил свой полет 19 мая 1947 года. Через месяц, в июне, взлетели еще два самолета. Эта тройка, как и требовал Сталин, приняла участие в традиционном воздушном параде в Тушино в августе 1947 года. Летчики-испытатели Рыбко и Галлай летели на своих самолетах, а головную машину пилотировал Главный маршал авиации А.Е. Голованов. Три бомбардировщика весьма эффектно прошли на небольшой высоте над аэродромом, произведя должное впечатление на правительство и зарубежных военных атташе.

Диктор торжественно объявил: «В небе новый стратегический бомбардировщик Ту-4». Кстати, на Западе долго считали, что на параде представлялись восстановленные В-29, полагая, что за такой короткий срок СССР не в состоянии скопировать и организовать серийное производство такого сложного самолета, как В-29.

Принимавшие участие в параде самолеты летели без бомбоприцела «Кобальт», как и первые 20 машин, проходящие испытание. Когда станция была поставлена на самолеты, точно не известно. Но 18 октября 1951 года в 11 часов утра взлетел бомбардировщик Ту-4, на борту которого находилась атомная бомба РДС-3. После двух часов полета, предусмотренных программой, самолет вышел на цель и около часа дня сбросил бомбу над Семипалатинским полигоном с высоты 10 км. Можно с уверенностью утверждать, что на этом самолете стояла РЛС «Кобальт». Но стоит заметить, что в то время станция еще требовала необходимой доработки.

В приказе по НИИ-160 от 8 января 1952 г. отмечено, что «при сдаче заводом №283 МАП установок «Кобальт» военными представителями возвращаются до 30% станций по вине радиоламп, в том числе и радиоламп, изготовленных опытным заводом НИИ-160 (6ПЗС, 6ЖЗП, ДК-СЗ)». В приказе указано, что причинами возврата является то, что на опытном заводе не создано необходимое количество тренировочных стендов, в результате чего 36-ти часовой тренировке подвергаются лампы в количестве, не обеспечивающем потребности заводов МАП; не проводятся испытания ламп 6ПЗС и 6ЖЗП в импульсном режиме, соответствующем режиму эксплуатации станции «Кобальт» и т.д.

В результате принимается решение: ежемесячно квалифицированным сотрудникам НИИ-160

выезжать на завод №283, где рассматривать претензии завода к качеству ламп. А претензий у завода было достаточно. Пробои в лампах Г-483, появление тока управляющей сетки лампы 6АЖ5, уменьшение анодного тока ламп 6ПЗ, выгорание детекторов в процессе настройки станции. После дополнительных мероприятий постепенно многие недостатки удалось устранить. Но не все. Отказы в работе станции все же продолжались.

* * *

Следующей разработкой бомбоприцела «Кобальт» был «Рубидий», который включал в свой состав РЛС «Кобальт» и отличался от последней наличием приставки «Цезий», обеспечивающей сопряжение РЛС с оптическим прицелом ОПБ-5ср. Такое сопряжение резко улучшало точность прицеливания и повышало возможность поражения целей. В связи с этим РЛС «Кобальт» и «Рубидий» имели одинаковые тактико-технические данные, за исключением характеристик точности бомбометания.

Радиолокационные прицелы «Кобальт» и «Рубидий» успешно выполняли свои задачи на тяжелых бомбардировщиках с поршневыми двигателями. С переходом авиации на реактивные двигатели, когда увеличивались скорость, высота и дальность полета, для новых бомбардировщиков потребовалась на борту иная радиолокационная техника. Такой техникой стал прицел РБП-4, явившийся дальнейшей разработкой РЛС «Рубидий». Аппаратура прицела РБП-4 отличалась от аппаратуры прицела «Кобальт» наличием синхронной связи с оптическим бомбоприцелом ОПБ-11р.

Бомбоприцел РБП-4 устанавливался на реактивном бомбардировщике средней дальности Ту-16А (бомбардировщик с атомным вооружением), а на Ту-4К (Ту-4КС) и модификации Ту-16КС – РЛС наведения противокорабельных ракет «Кобальт-М». Станция устанавливалась в задней части фюзеляжа и в нерабочем положении убиралась внутрь.

На 20 ноября 1955 г. было намечено испытание отечественной водородной бомбы РДС-37. В качестве самолета-носителя был определен самолет Ту-16А. 20 ноября в 6 часов 45 минут подготовленная специалистами КБ-11 бомба была передана для подвески к самолету, который вылетел в 8 часов 24 минуты, но из-за отсутствия визуальной видимости цели и отказа радиолокационного прицела бомбометание не состоялось. Самолету с бомбой было дано разрешение на посадку. Испытание бомбы было проведено 22 ноября 1955 года. Прицельное бомбометание было произведено с высоты 12 км и при скорости самолета 985 км/ч.

РЛС «Кобальт», выпускаемая Ленинградским электромеханическим заводом, позволяла определять местонахождение самолета и производить бомбометание в условиях плохой видимости. В этом случае бомбометание проводилось по индикатору радиолокатора совместно штурманом-оператором и штурманом-бомбардиром, также был возможен вариант выполнения бомбометания штурманом-оператором самостоятельно.

В сентябре 1952 г. ВВС США сообщили: «Советский Союз имеет в распоряжении сейчас и в течение следующих нескольких лет сохранит достаточное количество самолетов, позволяющее предпринять попытку доставить в США весь наличный запас ядерных бомб».

В результате создания стратегической авиации, а также носителя атомной бомбы бомбардировщика Ту-4 в какой-то степени обесценивались те усилия, которые США предпринимали после войны в области наращивания определенных видов военной техники. Нереальной оказа-

лась ставка на стратегическую авиацию, крупные авианосцы, громоздкую и дорогостоящую систему противовоздушной обороны. По-новому встала также проблема американских военных баз на чужих территориях; уязвимость этих баз стала очевидной.

В историческом контексте видно, что создание и серийное производство самолета Ту-4 подготовило благодатную почву для подлинной революции в авиации – появления первого поколения советских реактивных самолетов, сначала военных, а затем и гражданских.

РЛС «Кобальт» использовалась не только для бомбометания и определения местонахождения самолета. В 1951 году П.Н. Куксенко и С.Л. Берия докладывали И.В. Сталину о том, что для увеличения времени между моментом обнаружения налета противника и возможностью принять необходимые меры для обороны необходимо поднять РЛС дальнего обнаружения как можно выше. Для этого можно использовать самолет Ту-4 с размещенной на нем РЛС с большой дальностью обнаружения целей. Самолет будет базироваться на высоте нескольких километров на значительно удаленных от обороняемого района рубежах.

Самооборону самолета с комплексом радиолокационного дозора и наведения (в настоящее время этот комплекс имеет обозначение ДРЛО – дальнее радиолокационное обнаружение и наведение) предлагалось обеспечить с помощью двух радиоуправляемых самонаводящихся ракет класса «воздух-воздух». Это предложение было принято для проработки как система Д-500.

Самолет Ту-4 был в то время самым крупным, но и на нем невозможно было установить РЛС с большой дальностью обнаружения из-за ее размеров. После длительных обсуждений с А.Н. Туполевым решили установить на самолете четыре РЛС «Кобальт» (в носу, хвосте, сверху и снизу) с дальностью обнаружения бомбардировщика противника 80...100 км.

После установки РЛС с обтекателями для антенн А.Н. Туполев ругал радистов последними словами, говоря, что из самолета сотворили какую-то абракадабру с бородавками, имея в виду обтекатели антенн. Но, так или иначе, комплекс был создан и поднят в воздух для испытаний. Но эти испытания были недолгими. В середине 1953 г. по разным причинам работы над комплексом прекратились. Второй раз к идее создания самолета радиолокационного дозора в Советском Союзе вернулись в 1958 году. В данном случае базовым самолетом был выбран Ту-126.

Разработка первого самолета радиолокационного дозора для дальнего обнаружения воздушных целей с помощью РЛС «Кобальт», по существу, явилась началом работ по созданию авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения «Лиана» и «А-50», в РЛС которой используются три мощных многолучевых клистрона, амплитрон, электростатический комбинированный усилитель, разработанные в ФГУП «НПП «Исток». Кроме того, на самолетах Ту-4 была установлена разработанная и внедренная в серийное производство на базе РЛС «Кобальт» первая система радиоуправления крылатой ракетой «Комета» класса «воздух-море».

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «СВЧ-ТЕХНИКА»

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

2. Статья должна содержать:

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

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

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат DOC или RTF), записанного на магнитном (FDD 3,5") или оптическом (CD) носителе, и двух экземпляров распечатки.

4. Статья должна быть сформатирована через 1 интервал с выравниванием по ширине. Абзацный отступ - 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты - Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста - 12 пунктов, примечаний и ссылок - 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги - A4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

Фотографии принимаются в оригиналах (не более 17 × 20 см) или в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

10. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией, о чем авторы ставятся в известность.

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. 7	Формат 60×88 ^{1/8}
23.10.2007 г.	Уч.-изд. л. 7,5	Тираж 200
Заказ № 478	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