ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

# СЕРИЯ 1 **СВЧ-ТЕХНИКА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1 (504)

2010

Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

к.т.н. С.А. Зайцев (зам. главного редактора), д.т.н. Б.Н. Авдонин (зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»), к.т.н. В.Н. Батыгин, Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. А.В. Галдецкий, Б.Ф. Горбик, С.И. Гришин, д.ф.-м.н. Б.Ч. Дюбуа, д.т.н. С.С. Зырин, к.т.н. Ю.А. Кондрашенков, к.т.н. А.С. Котов, к.т.н. Е.А. Котюргин, к.т.н. П.В. Куприянов, к.т.н. В.В. Лисс, д.т.н. М.И. Лопин, В.М. Малыщик, В.А. Мальцев, к.т.н. П.М. Мелешкевич, д.ф.-м.н. А.Б. Пашковский, Е.Н. Покровский, к.т.н. А.В. Потапов, к.т.н. С.Е. Рожков, д.т.н. К.Г. Симонов, В.П. Стебунов (ответственный секретарь), к.т.н. А.М. Темнов, д.т.н. Н.Д. Урсуляк, д.т.н. М.М. Трифонов (ЗАО НПП «Исток-Система»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»), к.т.н. А.Г. Михальченков (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 ученых степеней кандидата и доктора наук)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2010 г.

# СОДЕРЖАНИЕ

Выпуск 1(504)	2010
Потапов А.В. – Александру Николаевичу Королеву – 70 лет	4
Технология	
<i>Дюбуа Б.Ч., Михальченков А.Г., Поливникова О.В., Темирязева М.П.</i> – Влияние структуры поверхности металлопористых катодов на их эмиссионные свойства	25
Электровакуумные приборы	
<i>Геворкян В.М., Перевезенцев С.А.</i> – Коррекция частотной характеристики полосно- пропускающих фильтров	35
Твердотельная электроника	
Баранов И.А., Дудинов К.В., Епифанцев А.А., Замятина Г.А., Коротков А.Н., Корот- кова И.Ю., Обрезан О.И., Пархоменко В.А. – Характеристики деградации монолитно- интегральных схем на GaAs-гетероструктурах при высоких температурах канала	
PHEMT	44
<i>Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В.</i> – Анализ возможности теплоотвода в ГИС СВЧ- диапазона при двухъярусном расположении кристаллов транзисторов	54
<i>Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Калина В.Г.</i> – Расчет рабочей полосы частот цикло- тронного защитного устройства	70

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

### SERIES 1

### **SVCH-TEKHNIKA**

(Microwave Engineering)

### COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise "RPC "Istok" The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (MINPROMTORG) Radioelectronic Industry Department

#### CONTENTS

Issue 1(504)	2010	Founded in 1950
Potapov A.V. – Alexander Nickola	yevich Korolev is 70 years old	
Technology		
<i>Djubua B.Ch., Mikhalchenkov A.G.</i> surface structure of dispenser cat	., <i>Polivnikova O. V., Temiryazeva M.P</i> thodes on their emission properties	- The influence of 25
Electrovacuum devices		
Gevorkyan V.M., Pereverzentsev S filters	S.A. – Correction of frequency characteri	istics of bandpass 35
Solid-state electronics		
Baranov I.A., Dudinov K.V., Epifant Obrezan O.I., Parkhomenko V.A degradation at PHEMT channel	<i>tsev A.A., Zamyatina G.A., Korotkov A.N.</i> 4. – The characteristics of GaAs heteros high temperatures	., <i>Korotkova I.Yu.,</i> tructures MMICs 
Iovdalsky V.A., Ganyushkina N.V. – arrangement of transistor chips in	- The analysis of possibility of heat sinkir 1 microwave HICs	ng at double-deck 54
Budzinsky Yu.A., Bykovsky S.V., Ka cyclotron protection device	<i>ulina V.G.</i> – The calculation of the operation	ting frequency of 70

#### Два юбилея: А.Н. Королеву – 70 лет, сборнику «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» – 60 лет

Редакционная коллегия и коллектив редакции горячо и сердечно поздравляют первого заместителя генерального директора ФГУП «НПП «Исток», главного конструктора предприятия Александра Николаевича Королева с 70-летием !

Александр Николаевич родился 4 апреля 1940 года в г. Калинине. В 1963 году окончил радиотехнический факультет Львовского политехнического института по специальности «Автоматика и полупроводниковая электроника». Трудовую деятельность начал в ЦНИИС МО СССР в г. Мытищи. С 1966 по 1975 год работал во Фрязинском отделении ИРЭ АН СССР. На предприятии работает с 1975 года.

14 сентября 1988 г. трудовой коллектив НПО «Исток» избрал А.Н. Королева генеральным директором предприятия.

А.Н. Королев – кандидат технических наук (1970 г.), доктор технических наук (2003 г.), профессор (2005 г.), академик Академии наук прикладной радиоэлектроники (2002 г.), академик Академии медикотехнических наук РФ (2003 г.), член секции Межведомственного совета по присуждению премий правительства Российской Федерации в области науки и техники, заведующий кафедрой филиала Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики при ФГУП «НПП «Исток», член редакционного совета журнала «Прикладная радиоэлектроника», автор более 150 научных трудов, патентов и авторских свидетельств.

Почётный гражданин Московской области (2003 г.). Почётный гражданин г. Фрязино (2003 г.). Почётный радист СССР (1983 г.). Лауреат премии Миноборонпрома Российской Федерации (1997 г.). Кавалер ордена «Почёта» Российской Федерации (2002 г.). Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники (1999 г.). Лауреат премии правительства Российской Федерации в области науки и техники (2009 г.).

Благодаря грамотной и взвешенной политике, проводимой Александром Николаевичем Королевым, в настоящее время ФГУП «НПП «Исток» по-прежнему является одним из ведущих предприятий отечественной электронной промышленности. Сегодня предприятие – это крупный поставщик СВЧ-приборов военного и гражданского назначения, используемых в самых современных системах радиоэлектронного вооружения, причем большинство этих приборов может производиться только на ФГУП «НПП «Исток». Неоценимый вклад в это внес лично А. Н. Королев.

Последние 20 лет Александр Николаевич является также главным редактором сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника». Сборник издается ФГУП «НПП «Исток» с 3 апреля 1950 года. За прошедшие 60 лет сборник из закрытого ведомственного издания превратился в ведущий специализированный журнал России по СВЧ-электронике. В 2009 году вышел в свет юбилейный, 500-й, номер сборника.

У истоков издания стояли ныне широко известные ученые, лауреаты Ленинской премии академик Н.Д. Девятков и В.Ф. Коваленко, авторы отражательного клистрона; В.А. Гольцов, один из первых директоров НИИ-160; С.А. Зусмановский, зам. директора по научной части; А.А. Сорокин, главный инженер; начальники отделов В.А. Астрин, Г.А. Метлин, В.С. Лукошков, Д.Д. Оленин, А.П. Пастухов, Н.И. Струтинский, А.П. Федосеев, Б.М. Царев и др. Среди авторов журнала были сотрудники предприятия: лауреат Сталинской премии, создатель первого советского транзистора (1949 г.) А.В. Красилов и лауреат Ленинской премии, автор открытия генерации в лавинно-пролетном диоде (1959 г.) А.С. Тагер.

На страницах журнала нашла свое отражение вся история предприятия. За эти годы научная школа ФГУП «НПП «Исток» вывела отечественную электронику СВЧ на передовые позиции в мире и обогатила ее новыми теоретическими идеями, конструкторскими и технологическими решениями. В журнале печатались статьи по теории и практике конструирования электровакуумных и твердотельных приборов и устройств СВЧ, материаловедению и технологии. В журнале были опубликованы статьи ведущих специалистов и ученых предприятия, внесших огромный вклад в развитие отечественной СВЧ-электроники. Среди них С.И. Ребров, Э.А. Гельвич, В.Г. Кармазин, Л.Г. Некрасов, И.В. Соколов, Л.А. Парышкуро, М.Б. Голант. И.И. Бродуленко, В.И. Мноян, В.Ф. Афанасьев, Ю.П. Мякиньков, С.В. Королев, А.С. Победоносцев, С.П. Кантюк, В.Н. Русаков, А.Д. Родионов, В.П. Беляев, И.П. Стародубов, И.И. Девяткин, Д.Г. Арапов, Н.В. Черепнин и многие-многие другие.

В журнале публиковались статьи работников не только ФГУП «НПП «Исток», но и многих других предприятий электронной промышленности СССР. Эта традиция продолжается и сейчас.



КОРОЛЕВ Александр Николаевич

УДК 621.385.6(09)

#### А. В. Потапов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

#### АЛЕКСАНДРУ НИКОЛАЕВИЧУ КОРОЛЕВУ – 70 ЛЕТ

Пройдя «пожарную» проходную (называемую так в обиходе по той причине, что метров через сто от нее находится пожарная часть), вы сразу же упираетесь взглядом в большое панно, расположенное зимой на заснеженной, а летом на ярко-зеленой лужайке, со словами: «НПП «Исток» – лидер отечественной СВЧ-электроники». И дата образования – 1943 год. А мимо панно вправо, влево и прямо расходятся асфальтированные дороги, обрамленные раскрашенными белой и черной краской бордюрными блоками, отделяющими от проезжей части зеленые большей частью года лужайки, примыкающие к многочисленным производственным корпусам. Это целый микрорайон города Фрязино, занимаемый Федеральным государственным унитарным предприятием «НПП «Исток» с «населением» почти пять тысяч человек. Последние более чем двадцать лет этим предприятием руководил Александр Николаевич Королев и всего только за полгода до своего семидесятилетия подал в отставку.

Несомненно, «Исток» – выдающееся предприятие. Почти вся СВЧ-электроника в СССР отпочковалась от «Истока». Отдельные подразделения или группы специалистов «Истока» становились центрами кристаллизации, на основе которых формировались новые предприятия. Множество разработанных в «Истоке» приборов было передано для выпуска на другие предприятия, поскольку своих производственных мощностей не хватало. И сейчас без продукции «Истока» значительная часть нашей армии останется безоружной. Руководить таким предприятием, соответствовать его уровню – задача очень непростая. А Александр Николаевич руководил «Истоком» двадцать один год.

Сейчас генеральный директор «Истока» – Александр Анатольевич Борисов. Готовя к печати эту публикацию, я попросил его ответить на несколько вопросов.

#### – Александр Анатольевич! Вы провели специальное совещание по подготовке к празднованию юбилея А. Н. Королева, что для «Истока» не характерно? Удалось ли Вам за то время, что Вы находитесь на посту генерального директора «Истока», оценить роль Вашего предшественника в жизни этого предприятия в течение последних 20 лет?

– Вы знаете, для этого мне не надо было становиться генеральным директором «Истока». Что такое «Исток» и его значение для СВЧ-электроники я прекрасно представлял, можно сказать, всю сознательную жизнь. И с Александром Николаевичем мы давно и хорошо знакомы. А уж в должности начальника 22 ЦНИИ Минобороны России мне приходилось плотно взаимодействовать не только с Александром Николаевичем, но и со многими сотрудниками «Истока». Так что роль руководителя такого сложного предприятия, как «Исток», к тому же являющегося градообразующим, в жизни не только самого предприятия, но и в жизни города трудно переоценить. – Александр Анатольевич! Считаете ли Вы, что А. Н. Королев использовал все свои возможности для вывода «Истока» из той сложной ситуации, в которой предприятие находится, и сформулировали ли Вы для себя перечень тех мер, выполнение которых позволит исправить положение?

– Зная Александра Николаевича как человека ответственного и высококвалифицированного, я не сомневаюсь, что он предпринимал все меры для преодоления тех негативных факторов, которые существенно влияли на состояние «Истока». Надо сказать, что в последние годы «Исток» значительно улучшил свою технологическую базу, в том числе и за счет освоения новых технологических процессов. Но, конечно, я бы не согласился руководить «Истоком», если бы не был уверен, что имеется возможность обеспечить полноценную и стабильную работу предприятия. Мероприятия для этого сейчас разрабатываются, но одна из первых мер, которую я предпринял, – получил крупный кредит для финансирования закупок материалов и комплектующих изделий, так как без этого невозможно требовать от руководителей подразделений выполнения производственных планов.

# – Александр Анатольевич! Смена руководителя, если прежний остается работать на том же предприятии, – процесс неизбежно болезненный. Были ли сложности в Вашем случае и помогает ли Вам многолетний опыт А. Н. Королева в руководстве таким сложным предприятием, как «Исток»?

– Конечно, я стараюсь, по возможности, полнее использовать опыт Александра Николаевича и благодарен ему, что он мне в этом не отказывает. Мелкие шероховатости в жизни всегда бывают, но надо просто не обращать на них внимания – и все будет в порядке.

Вот Вы правильно заметили, что я провел специальное совещание по поводу празднования юбилея Александра Николаевича, и, кстати, уже не одно. Это ведь тоже показывает, что роль Александра Николаевича я оцениваю очень высоко.

Отмечая это, я хотел бы пожелать Александру Николаевичу дальнейших успехов, крепкого здоровья, хорошего настроения.

Десять лет назад к 60-летию А. Н. Королева я подготовил статью, которая была опубликована в еженедельной газете ГНПП «Исток» «За передовую науку» от 3 апреля 2000 года, № 13 (1068). Учитывая, что за прошедшие годы события в прежней шестидесятилетней жизни Александра Николаевича вряд ли изменились, а аудитории многотиражной газеты и журнала «Электронная техника» существенно отличаются, я решил использовать и прежние материалы с некоторым дополнением. Мне это кажется необходимым еще и потому, что в этих материалах есть оценка деятельности А. Н. Королева, как генерального директора, Сергеем Ивановичем Ребровым, выдающимся ученым и организатором, предшественником А. Н. Королева на посту генерального директора, которого сегодня уже нет с нами.

В славной истории «Истока» есть немало прекрасных и героических страниц, написанных трудами его выдающихся специалистов – инженеров и рабочих, ученых и служащих с наградами и регалиями или без оных, но прекрасно знавших и исполнявших дело, которому они посвятили свою жизнь. Среди них особое место занимает директорский корпус, потому что обычно действующий директор – это и есть сегодняшнее лицо предприятия, на которое обращено внимание окружающего мира.

По-видимому, наиболее сложный период в истории «Истока» пришелся на долю Королева Александра Николаевича. Конечно, невероятно сложно было организовать институт и «с ко-

лес» выпускать продукцию в тяжелые годы Великой Отечественной войны или качественно и в срок выполнять ответственные правительственные заказы в годы послевоенной разрухи. Да и в любое другое время ответственность и спрос были немалые. Но при этом и государство, как мы теперь понимаем, брало на себя весьма солидные обязательства: вовремя платить зарплату, формировать госзаказ, обеспечивать план ресурсами. И только в последние десятилетия возникла немыслимая ранее ситуация, когда государство и государственное предприятие оказались по разную сторону «баррикад». Более того, государство приложило немало усилий к уничтожению предприятия. И в том, что «Исток» не погиб, как его соседи, огромная заслуга Королева Александра Николаевича, так же, как и всех тех, кто в самые тяжелые годы «выживания» не покинул предприятие и сделал все, чтобы сегодня «Исток» продолжал жить и работать. Более того, благодаря, в первую очередь, зарубежным «вояжам» генерального директора и его ближайших помощников, против чего немало было сломано копий на колдоговорных конференциях, «Исток» получил за рубежом признание и возможность реализовывать свою продукцию, обеспечивая тем самым значительную часть финансовой поддержки своей деятельности.

Александр Николаевич окончил Львовский политехнический институт в 1963 году и по распределению был направлен в Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС) г. Мытищи. Результатом работы здесь стала его первая научная публикация [1]. Отработав положенные два года, он решил поступить в аспирантуру и выбрал Институт радиотехники и электроники АН СССР, директором которого был один из основоположников отечественной радиолокации академик Котельников Владимир Александрович, а заведующим отделом, в котором начал работать Александр Николаевич, другой мэтр отечественной радиолокации – тогда член-корреспондент, а позднее академик АН СССР Кобзарев Юрий Борисович.

Школа, которую Александр Николаевич прошел в ИРЭ, дала ему неоценимые знания в области радиолокации и статистической радиотехники. Следует отметить два обстоятельства, которые этому способствовали.

Во-первых, это регулярные семинары, которыми руководил Кобзарев Ю. Б. и на которых рассматривалось множество самых разнообразных вопросов: от обязательного обсуждения отчетов по законченным НИР и ОКР до рецензий на статьи, поступившие в журнал "Радиотехника и электроника", или доклады специалистов (своих или из других отделов и организаций) на самые животрепещущие вопросы научной жизни того времени. Отличительная особенность тех семинаров – отсутствие чинопочитания и выяснение истинности докладываемой точки зрения независимо от званий и чинов докладчика.

Второе обстоятельство связано с тем, что это было время активного развития ИРЭ, и в его стенах буквально в течение нескольких лет появились сотни молодых специалистов, недавних выпускников самых престижных вузов страны. Особенно много их сконцентрировалось во Фрязинском отделении ИРЭ Академии наук, где протекала почти вся практическая работа Александра Николаевича. Жил Александр Николаевич с семьей (жена и дочь, а вскоре и сын) в небольшой комнате в Мытищах, и хотя учился в аспирантуре с отрывом от производства, но во Фрязино появлялся каждый день – он был (и есть!) человек ответственный, тема его диссертации составляла часть плановых работ, и надо было выполнять и то и другое.

Большую часть тематики работ отдела составляли исследования помеховых полей в диапазоне сверхдлинных радиоволн, маскировавших полезные сигналы. Такие помехи генерируются промышленными источниками, линиями электропередач, но основную их часть составляют шумы и электромагнитные импульсы, возникающие из-за грозовой активности атмосферы Земли. Строились математические модели таких помех, однако вследствие неизученности источников помех и физики их формирования основными стали экспериментальные полевые исследования, ради которых организовывались специальные экспедиции, функционировавшие круглый год. Одной из базовых точек экспедиции была деревня Лазино в Калужской области, состоявшая из трех домов, выбранная из-за полного отсутствия в ней электричества и, следовательно, промышленных помех. Она стала базой и для экспериментальных исследований Александра Николаевича, главной целью которых были измерения взаимной корреляции атмосферных радиопомех в пространственно разнесенных точках, призванные подтвердить его теоретические исследования пространственно разнесенных антенных решеток. На практике же надо было уметь эксплуатировать дизель-генератор, питавший аппаратуру, и иметь немалую физическую силу, чтобы разматывать и сматывать огромные многокилометровые бухты коаксиального кабеля, использовавшегося для связи приемников в пространственно разнесенных точках. Что касается физической силы, то Александру Николаевичу не надо было ее занимать, - он ведь бывший десятиборец и запросто отжимался в положении лежа руками от земли со стокилограммовой нагрузкой на спине, в качестве которой, кстати, мог выступить любой желающий.

Конечно, не только физическую силу, но и все остальные свои таланты Александру Николаевичу пришлось использовать в своих исследованиях – и доказательством тому стала блестящая защита кандидатской диссертации. Это стало возможным благодаря целому вееру статей, опубликованных им как до защиты кандидатской диссертации в 1970 году, так и после [2-20].

Исследования помех Александр Николаевич продолжил далее в научной экспедиции на Кубе, расположенной в Карибском бассейне, который является одним из мировых центров грозовой активности Земли. На одном из самых фешенебельных курортов в кубинском местечке Варадеро, где раньше отдыхали только самые состоятельные американцы, местные аборигены с удивлением наблюдали, как Александр Николаевич прямо на пляже, на тончайшем белом песке раскрывал небольшой чемоданчик, разворачивал антенну, включал самописец и... шел купаться в море, ловить рыбу или искать ракушки на глубине 10 м. Но по вечерам приходилось потеть, обрабатывая огромную массу полученных данных.

Еще одна экспедиция, в которой Александру Николаевичу пришлось участвовать, – морская, на экспедиционном судне Академии наук, с пересечением экватора и заходом на острова Фиджи.

До сих пор Александр Николаевич с удовольствием вспоминает об этих экспедициях и любит рассказывать о событиях тех дней.

В 1975 году, почувствовав необходимость применить свои знания в более близкой к практическим задачам области и заодно увеличить свой семейный бюджет, Александр Николаевич перешел на работу в «Исток», где начал заниматься разработкой системы автоматизированного проектирования гибридно-интегральных схем (САПР ГИС), возглавив соответствующую лабораторию в отделе 340. К 1979 году в этом направлении были получены совершенно потрясающие результаты, которые по нескольку раз в год докладывались на различных конференциях и вызывали сначала удивление и недоверие, а затем восторг самых искушенных специалистов. Во всем мире это направление только начинало развиваться, и САПР, разработанная в отделе 340, была одной из самых передовых [21-39].

Однако в это время возникла НИЭР «Синтез-Союз» и Сергей Иванович Ребров начал со-

бирать в один кулак всех специалистов, которые имели хоть какое-то отношение к радиолокации. Сначала было неясно, что такое «Синтез-10». Хотя задача создания современного бортового радиолокатора и казалась привлекательной, все же жаль было бросать такое перспективное направление, как САПР, тем более, что работа была, что называется, хорошо раскручена и находилась на самом подъеме. Сил было вложено немало, но еще нереализованных идей и задумок была масса. Тем не менее на двух стульях усидеть было нельзя, и Сергей Иванович «железной рукой» преобразовал отдел 340 в отделение 34, ликвидировав заодно все направления САПР. И на долгие годы, связанные с «Синтезом», сотрудников отделения 34 стали называть цифровиками.

Александр Николаевич возглавил отдел, который должен был разработать сердце бортового радиолокатора – цифровой вычислительный комплекс, включая все системное программное обеспечение. На его создание ушло три года. Впервые в нашей стране был создан многомашинный вычислительный комплекс с системным программным обеспечением и развитым тестовым инструментарием. О его исключительной отработанности говорит тот факт, что, когда подошло время летных испытаний БРЛС на летающей лаборатории, в программном обеспечении не было сделано ни одной правки. Просто не было необходимости.

По результатам испытаний на юбилейной научно-технической конференции ВНИИ «Альтаир» в 1985 году была сделана целая серия докладов, вызвавшая огромный интерес специалистов.

В 1984 году коллектив «Истока» постигла тяжелая утрата – ушел из жизни выдающийся специалист, руководитель НПК-7 Владимир Никитович Русаков. Это был разгар «синтезных» работ, и было принято решение объединить коллективы НПК-7 и отделения 34 в одном подразделении, НПК-7, под руководством Сергея Алексеевича Зайцева. Отдел Александра Николаевича был подключен к работам по изделию "Синтез-20", которое спустя почти полтора десятилетия получит название изделие 50Э и станет одним из основных финансовых источников существования предприятия. Разработанный отделом блок, названный вначале БПЦО (блок процессора цифровой обработки), а затем, после доработки, ПОС (процессор обработки сигналов), и сегодня выпускает ЗАО «Исток-Система» – дочернее предприятие ГНПП "Исток", в которое превратился бывший отдел Александра Николаевича.

В 1986 году Александр Николаевич Королев стал руководителем НПК-7, а в 1988 году он был избран генеральным директором НПО "Исток". Работа на посту генерального директора, естественно, проходит на виду у всего коллектива предприятия, однако все ее сложности и трудности лучше всего могут оценить ближайшие соратники Александра Николаевича по руководству предприятием.

Поэтому в канун 60-летнего юбилея Александра Николаевича, в марте 2000 года, я обратился к некоторым членам дирекции ГНПП «Исток» с просьбой высказать свои соображения о работе предприятия в течение последних 10 лет.

Генеральный конструктор ГНПП «Исток» Сергей Иванович Ребров:

– 80-е годы характеризовались для НПО "Исток" началом нового этапа в его научной и производственной деятельности. Внедрение комплексированных устройств и схемотехники на основе ГИС уже фактически создало задел для разработки на нашем предприятии сложнейшей радиолокационной аппаратуры. К тому же, в отличие от предприятий МРП, мы в то время обладали более совершенной технологией изготовления базовых элементов и компонентов

систем, в том числе и твердотельных. Учитывая нарастающее отставание в области радиоэлектронного вооружения для истребительной авиации, министр электронной промышленности А. И. Шокин привлек нас и предприятия Зеленограда к обсуждению возможного построения нового поколения этого вооружения. Выслушав все доводы за и против, он остановился на нашем предприятии. Так родилось известное распоряжение ВПК СМ СССР о постановке НИЭР «Синтез-Союз», где головная роль по созданию экспериментального образца радиолокационного прицельного комплекса (РЛПК) для современного истребителя и активной радиолокационной головки самонаведения (АРГС) для ракеты класса «воздух-воздух» была поручена нам.

На предприятии среди научного руководящего состава сразу же определилась целая группа единомышленников в лице А. Н. Королева, В. Н. Русакова, С. А. Зайцева, М. И. Лопина, А. В. Потапова, В. И. Гуртового, М. А. Воскобойника и других. Ведущая роль в этой группе принадлежала названным товарищам. Уже с начала работ проявились высокие качества нашего Юбиляра в этом новом для нашего предприятия направлении. Он обладал всеми качествами, необходимыми для крупного руководителя и, безусловно, стал знаменательной фигурой в коллективе разработчиков «Синтеза», заменив рано ушедшего из жизни замечательного руководителя НПК-7 Владимира Никитовича Русакова. Александр Николаевич Королев продолжил начатую разработку АРГС и привел её к успешному окончанию с великолепными результатами лётно-конструкторских испытаний. Так была создана вторая в мире по срокам и первая по совокупности тактико-технических характеристик активная радиолокационная головка самонаведения. При этом А. Н. Королёв продолжил развитие НПК-7 и укрепление его коллектива, создавая первое в НПО «Исток» подразделение по разработке малогабаритной радиолокационной и связной аппаратуры.

Правильность выбранных в начале 80-х годов новых технических направлений была доказана временем. Работы, выполненные на предприятии 15 лет назад, стали в настоящее время заделом для основных источников финансовых поступлений.

В сентябре прошлого года исполнилось 11 лет, как на конференции трудового коллектива Александра Николаевича Королева избрали генеральным директором после разделения должностей генерального конструктора и директора предприятия. Сейчас он, несомненно, один из лучших директоров отрасли, сумевший найти пути выживания предприятия в самые тяжелые годы псевдорыночных реформ. Наверное, в это время таким, как А. Н. Королев, и должен был быть генеральный директор крупного градообразующего предприятия.

Главный инженер ГНПП «Исток» Виталий Николаевич Батыгин:

– Работа предприятия в последние годы определялась прежде всего тем, в каких политических, социальных и экономических условиях мы жили. Ажиотаж обвальной приватизации, оголтелая травля предприятий ВПК и «красных» директоров – руководителей оборонных предприятий, безденежье и снежным комом растущие долги по налогам и обязательным платежам, постоянные угрозы и акции по ограничению и прекращению поставок энергоносителей.

Перспектива удержаться, не рухнуть была иногда призрачной. Невероятно, как в этих условиях только еще начинавший свою карьеру директора и еще далеко не искушенный в управленческих делах А. Н. Королев мог сохранять выдержку, спокойствие, убеждать сотрудников перспективой будущих больших заказов, развитием бизнеса в новых направлениях и находить какието минимальные финансы для поддержания полуголодающего коллектива предприятия.

На первом этапе удалось главное – сохранить организационную и технологическую целост-

ность предприятия, устоять от разрушительного давления внешних и внутренних сил, обеспечить жизнедеятельность всех служб предприятия. Но требовалось большее. И в борьбе за выживание мы все учились жить в меняющемся экономическом и политическом мире и решать проблему восстановления экономической независимости предприятия.

Я думаю, что самым талантливым учеником у нас был генеральный директор. Одновременно он был и нашим учителем. По его инициативе разрабатывались и испытывались различные системы экономического стимулирования производства, проводился поиск оптимальных организационных структур, а самое главное – настойчиво и планомерно проводился поиск и создавался все увеличивающийся объем заказов на разработку и производство профильной для предприятия продукции.

Сегодня результаты этой работы видим и ощущаем не только мы, сотрудники предприятия, но и жители г. Фрязино. Предприятие на подъеме и приступает к решению проблемы технического перевооружения.

Я думаю, что это самый лучший подарок для Александра Николаевича в канун его юбилея от коллектива предприятия, который был вместе с ним все самые трудные времена.

Заместитель генерального директора, технический директор ГНПП «Исток» Сергей Алексеевич Зайцев:

– В течение последних 10 лет мирного времени при отсутствии каких-либо явно выраженных природных катаклизмов катастрофически обрушился экономический потенциал нашего государства. Это сказалось в первую очередь на тех, кто занимается так называемым «реальным сектором экономики» и, особенно, на предприятиях оборонной промышленности. За это время в жизни «Истока» чередовались тяжелые и очень тяжелые периоды. Казалось, что в таких условиях сохранить, а тем более, развить научно-технический и производственный потенциал нашего предприятия является несбыточным желанием.

Однако сегодня «Исток» — лидер СВЧ-электроники России, создавший новые виды продукции, обеспеченный заказами от российских смежников, получивший признание у иностранных компаний и активно работающий на зарубежном рынке. Заслуга в этом Александра Николаевича неоценима.

Внешне Александр Николаевич почти всегда выглядит спокойным, приветливым, уверенным и слегка неторопливым. Может быть, не многие знают, что за всем эти стоят глубокие внутренние переживания за все происходящее.

Хотелось бы пожелать, чтобы его высокая квалификация, глубочайшая ответственность за дело, умение правильно оценивать все тонкости происходящего, а также определять и четко проводить в жизнь долговременную политику и впредь приносили процветание «Истоку» и истинное удовлетворение юбиляру.

Здоровья и счастья Вам в 21 веке!

Заместитель генерального директора, директор по производству ГНПП «Исток» Евгений Николаевич Покровский:

– Вступление в должность генерального директора предприятия Александра Николаевича Королева по времени совпало с началом крупномасштабного кризиса всей отечественной оборонной промышленности (и не только оборонной). В этот период все предприятия лишились государственной поддержки, у многих руководителей опустились руки, некоторые пошли по пути ликвидации производства и своих предприятий; особенно много бед принесла проводившаяся в первой половине 90-х годов приватизация.

Александр Николаевич выбрал сложный, но, как показала жизнь, единственно верный путь – на «выживание» предприятия, на поиск эффективных направлений развития производства, на сохранение коллектива. Такая работа не укрепляет здоровье, требует напряжения физических и моральных сил, самоотдачи. Работать пришлось, выдерживая мощный натиск и «сверху» – со стороны государственных органов и высокопоставленных чиновников, и «снизу» – со стороны собственных «реформаторов-демократов», толкавших руководителя к приватизации, к разделению предприятия на отдельные мелкие самостоятельные фирмы. А. Н. Королев практически сразу понял пагубность подобных шагов. Сейчас мы на примере «сдавшихся» видим, что могло бы случиться с «Истоком».

Основные усилия генерального директора и, под его влиянием, всех работающих на предприятии были направлены на поиск продукции, которая была бы востребована; и непринципиально, где этот «востребователь» находится – в России или за рубежом. Жестко проводился в жизнь принцип: все, что делается на предприятии, должно приносить доход. Александр Николаевич лично следил за поступлением денежных средств на счета предприятия из всех источников и требовал того же от других. Такая работа дала свой результат: «Истоку» удалось в 1999 году вырваться из тисков кризиса. На предприятии, несмотря на снижение численности работающих и проведенные структурные реорганизации, сохранены все основные технические направления деятельности, началась финансово-экономическая стабилизация, а самое главное – сохранился и продолжает уверенно функционировать работоспособный коллектив ГНПП «Исток». У людей появилась уверенность в завтрашнем дне. И в этом безусловная заслуга генерального директора Александра Николаевича Королева.

Заместитель генерального директора Борис Яковлевич Кистин:

– В книге «Моя жизнь, мои достижения» Генри Форд проводит резкую грань между двумя понятиями, особенно характерными для нашего времени: делом и спекуляцией. По словам Форда «ДЕЛО – это не что иное, как РАБОТА. Наоборот, спекуляция готовыми продуктами труда не имеет ничего общего с ДЕЛОМ – она означает ни больше ни меньше как более пристойный вид BOPOBCTBA». К чести нашего юбиляра, для него никогда не было сомнений – у него всегда главным было его ДЕЛО – его РАБОТА, то есть работа по двенадцать-четырнадцать часов в день, четырнадцать неиспользованных отпусков (кстати, в дирекции такие же «трудоголики»: у них 71 неиспользованный отпуск).

Период директорства АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА совпал с временем развала всего и вся, временем взлета и торжества бездарей и лизоблюдов, когда в чести были предатели и политические проститутки, а директора все были «красными», «ретроградами» и «врагами демократии». И именно их власть предержащие выставляли крайними, именно на них, как теперь модно выражаться, «переводили стрелки». Наверное, о таком времени писал поэт: «Бывали хуже времена, но не было подлей!» КОРОЛЕВ А. Н. выстоял, так как понимал, что за ним коллектив ГНПП «Исток», который поверил в него в 1988 году, хотя были времена, когда на Генерального выплескивалось недовольство людей, и он переживал это, но все равно продолжал обращаться во все Инстанции, бил во все «колокола»: в Правительство, в Совет Безопасности, к Президенту, в Министерство (сколько их уже сменилось), к военным – нужно спасать отечественную СВЧ-электронику! Ситуация 1999 – 2000 годов показала, что настойчивость АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА вознаграждена – финансовое положение ГНПП «Исток» стабилизируется, имеются приличные заделы на будущее. Казалось бы, можно радоваться, но прав был маршал Ней: «Еще не пришло время честно служить Отечеству». В Инстанциях, оказывается, уже готовы документы по пересмотру контрактов с директорами, имеются реальные намерения по изъятию (мягко говоря) части прибыли в какие-то централизованные фонды, есть «наработки» (интересно чьи?) по акционированию госпредприятий. Так что покой АЛЕКСАНДРУ НИКОЛАЕВИЧУ будет только сниться. Его и после юбилея ожидает борьба за ГНПП «Исток», поэтому хочу пожелать нашему Генеральному директору помимо крепкого здоровья и долгих лет жизни еще трех незаменимых ничем вещей: ТЕРПЕНИЯ, чтобы преодолеть то, что можно преодолеть, СМИРЕНИЯ, чтобы не преодолевать того, чего преодолеть нельзя, и РАЗУМА, чтобы отличить первое от второго.

После торжественно отмеченного шестидесятилетия Александра Николаевича прошло уже десять лет. Это были нелегкие годы. «Исток» за это время переживал и взлеты и падения. И связано это было в первую очередь с изменением от года к году объема поставок изделия 50Э, иногда до 300 %, хотя продукция этого направления даже в годы минимума поставок оставлась для предприятия в финансовом плане основной. Но все же для стабилизации финансового положения предприятию необходима была еще какая-то серийная продукция. Дирекции во главе с А. Н. Королевым удалось существенно продвинуться по этому пути. На предприятии были разработаны и началась поставка СВЧ-субмодулей для активных фазированных антенных решеток (АФАР) самолета 5-го поколения. И хотя это направление находится в самом начале своего развития, его перспективы несомненны.

Несмотря на все сложности, Александру Николаевичу удалось за это время защитить докторскую диссертацию, опубликовав весомое количество статей по развитию СВЧ-направления [40-66]. Даже беглый взгляд на эти работы позволяет выделить в них три основные части. Первая [40-42, 52, 66] – это отголоски той активной кампании, которую А. Н. Королев вместе с ближайшими сотрудниками провел по продвижению продукции «Истока» за рубеж и получению экспортных контрактов. Среди прочих был использован и самый доступный способ – доклады на самых престижных международных конференциях по СВЧ-электронике, а они, как правило, проходили в США. Вторая часть [43, 47-51, 53-55, 58, 63, 64] – публикации о разработках, результатом которых стало присуждение в 1999 году Александру Николаевичу и его коллегам по этой работе Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники. Наконец, третья часть [59, 61, 62, 65, 66] – некоторые материалы докторской диссертационной работы Александра Николаевича.

Как и десять лет назад, но теперь уже накануне 70-летнего юбилея Александра Николаевича я снова прошу некоторых его ближайших сподвижников ответить на несколько вопросов.

# – Как Вы оцениваете роль А. Н. Королева в жизни «Истока» с момента его прихода на предприятие в 1975 г. по настоящее время?

Заместитель генерального директора Сергей Алексеевич Зайцев:

– Александр Николаевич пришел на работу в «Исток» при Советском Союзе. Работать приходилось много, ответственность очень высокая, срывы сроков выполнения работ и графиков поставок были исключительными событиями, но при этом невозможно было даже подумать о том, что могут быть перебои с обеспечением комплектующими и материалами или задержки выплаты зарплаты. Никаких трудностей с загрузкой научно-технических и производственных мощностей не было, они были постоянно перегружены.

Александра Николаевича выбрали генеральным директором как раз в то время, когда начался полный обвал всего, что было связано с деятельностью предприятий ОПК во всех сферах. Это сейчас пытаются представить действия тогдашних властей как что-то необходимое, продуманное и перспективное. На самом деле вопрос стоял так: или полное уничтожение «Истока», или поиск и реализация порой самых невероятных действий для его спасения. Я совершенно убежден в том, что Александр Николаевич был ключевой фигурой в генерации идей и их воплощении, благодаря чему «Исток» не только выжил, но и стал развиваться, несмотря на дефолт 1998 года. Решить вопросы стратегического технического перевооружения, создания новых пилотных линий и новых направлений без самого активного непосредственного руководства Александра Николаевича было бы невозможно.

Поэтому кратко можно сформулировать оценку роли Александра Николаевича так: только благодаря высококвалифицированной во всех отношениях деятельности Александра Николаевича «Исток» выжил, и сейчас открылось «второе дыхание» по его развитию с четко определенными стратегическими целями.

#### Заместитель генерального директора Евгений Николаевич Покровский:

– Приход Королева А. Н. к руководству предприятием произошел на рубеже исторических эпох, когда в стране уже набирал силу процесс разрушения отечественной промышленности. Этот процесс в полной мере коснулся и нашего предприятия, и особенно это проявилось в середине 90-х годов прошлого века.

Огромная заслуга Королева А. Н. в том, что он не допустил распада предприятия на отдельные самостоятельно хозяйствующие единицы, сохранил основной костяк коллектива и к концу 90-х годов застабилизировал ситуацию, и «Исток» начал подниматься «с колен».

В период работы А. Н. Королева на «Истоке» были развиты совершенно новые направления разработок и производств современной СВЧ-техники, к ним относятся активные радиолокационные головки самонаведения, СВЧ-субмодули АФАР, МИС на базе пилотной линии кристального производства и др.; постоянно уделяется внимание повышению степени интеграции и комплексирования СВЧ-техники.

#### Заместитель генерального директора Юрий Маркович Гомольский:

– А. Н. Королев, вступив в должность генерального директора в 1988 г., прошел самые трудные для ФГУП «НПП «Исток» годы так называемой «перестройки». Отставание по выплате заработной платы достигало 10 месяцев. В это время сохранить предприятие, сплотить основной костяк коллектива – требовало огромных организационных способностей, здоровья и построения взаимоотношений со многими организациями на взаимовыгодной основе.

Александр Николаевич с честью справился со всеми задачами. И огромное ему спасибо за его труд на благо предприятия.

Заместитель генерального директора Борис Яковлевич Кистин:

– Впервые фамилию Королев А. Н. я услышал в ФИРЭ АН СССР от заместителя директора Неона Александровича Арманда, который с сожалением сказал об уходе в «Исток» нескольких перспективных ученых, назвав в их числе и фамилию Александра Николаевича.

Второй раз фамилия Королева А. Н. была на слуху в конце 70-х – начале 80-х годов, когда Ребров С. И. ввел на «Истоке» «военное положение» по доработке изделия «Одиссея», в связи с известными событиями на Ближнем Востоке. А в это время начальник отдела НПК-7 Королев А. Н. занимался перспективнейшей работой по «двадцатке», в последствии известным изделием 50Э.

В сентябре 1988 года Ребров С. И. принял меня на работу в качестве своего заместителя, а 26 октября 1988 года генеральным директором был утвержден Королев А. Н., с которым мне в дальнейшем и посчастливилось работать.

В последующие годы именно с Королевым А. Н. связаны значительные изменения в жизни «Истока»: в 1989 году получено право открытой публикации результатов научных исследований; в этом же году предприятие стало участником внешнеэкономической деятельности; начиная с 1990 года специалисты «Истока» стали выезжать за границу, причем одним из первых в Ле-Бурже поехал Ребров С.И. В 1991 году в составе делегации МЭП в Китай выезжал Королев А.Н., после чего службами Белоусова В.П. стал активно развиваться экспорт, а наши ведущие ученые Зайцев С.А., Победоносцев А.С., Дюбуа Б.Ч., Сазонов В.П., Урсуляк Н.Д., Мелешкевич П.М., Будзинский Ю.А., Малыщик В.М. и многие другие стали выезжать в загранкомандировки. Сейчас это уже в порядке вещей.

Великий китайский мыслитель ЛАО ЦЗЫ говорил: «Стремясь к малому – приобретаешь, стремясь ко многому – впадаешь в заблуждение». Александр Николаевич никогда не впадал в заблуждение – он целенаправленно, постоянно, постепенно проводил в жизнь идею сохранения коллектива предприятия, расширения рынков сбыта нашей продукции, поиска новых возможностей. И в тяжелые восьмидесятые – девяностые благодаря именно Королеву А. Н. удалось сохранить «Исток» и работоспособный коллектив.

Заместитель технического директора Иван Михайлович Панас:

– Главная роль и заслуга Александра Николаевича Королева в жизни «Истока» и города Фрязино – это сохранение предприятия после развала СССР и разгула демократии. Только его личное участие, умение, организаторские способности, авторитет и заслуженное уважение в коллективе обеспечили решение этой задачи. Все усилия были направлены на укрепление лидирующей роли предприятия в стране по разработке и поставке приборов и устройств СВЧ для нужд оборонной промышленности. В результате удалось сохранить основной костяк кадрового состава ученых, высококвалифицированных рабочих и ИТР. «Исток» является основным градообразующим предприятием города и существенно влияет на жизнедеятельность города, выпуская более 50 % научно-промышленной продукции. При его участии разработана и принята программа развития города как наукограда.

Не сохранился бы «Исток» – не было бы и наукограда Фрязино.

#### Начальник НПК-7 Виктор Михайлович Малыщик:

– Я присутствовал на собрании трудового коллектива «Истока» по выборам генерального директора. Считаю, что истоковцы сделали правильный выбор, избрав генеральным директором А. Н. Королёва. Принятый в начале 90-х курс на максимально возможный экспорт позволил предприятию выжить, возрождение производства изделия 509 – стабилизировало положение «Истока», развитие производства МИС СВЧ и на их базе СВЧ-субмодулей для АФАР вместе с работами по дальнейшей модернизации изделия 509 – залог успешного развития предприятия в будущем. Всё это – результат работы Александра Николаевича.

#### Начальник НПК-8 Юрий Афанасьевич Будзинский:

– Считаю, что сам по себе факт существования ФГУП «НПП «Исток» до сегодняшнего времени является его заслугой!

#### Начальник НПК-9 Назар Дмитриевич Урсуляк:

– С 1975 по 1988 год, до избрания А. Н. Королева генеральным директором, у нас с ним были очень продуктивные научные контакты. С его непосредственным участием в НПК-9 (и в других подразделениях) были разработаны машинные методы проектирования, программы расчета наших изделий, математические методы обработки результатов, позволившие существенно снизить количество макетных и опытных образцов при выполнении НИР и ОКР.

В этот период я убедился в широкой и глубокой профессиональной подготовке А. Н. Королева, его «железной» логике и уникальной памяти. Поэтому с глубоким уважением отношусь к нему как к ученому.

Кстати, результатами наших научных контактов явились 6 совместных публикаций и 2 изобретения.

Роль А. Н. Королева в период его работы в должности генерального директора коротко оцениваю так: благодаря правильно выбранным направлениям работ в самое сложное время (изделие 50Э, зарубежные контракты и др.) «Исток» не «развалился» и сохранился костяк коллектива и основные направления работ. В первую очередь это его заслуга.

Главный научный сотрудник отдела 220 Станислав Ефимович Рожков:

– Главная заслуга Александра Николаевича в том, что благодаря его твердой позиции в «беспредельные» 90-е годы удалось сохранить НПО «Исток» как единое целое и избежать судьбы соседних предприятий.

Большая роль принадлежит Александру Николаевичу в возрождении в конце 90-х годов, вопреки многим скептикам, аппаратурного направления (изделие 50Э), что позволило в последующие годы выжить не только ряду приборных (разрабатывающих) подразделений, но и технологическим. Так, благодаря подключению отдела 220 к решению новых для него задач, таких, как разработка и поставка микросборок для некоторых блоков изделия 50Э, удалось сохранить в «Истоке» отдел полупроводникового материаловедения.

Трудно также переоценить роль Александра Николаевича в организации техперевооружения (создание «пилотной линии») твердотельного направления «Истока» для обеспечения перспективного развития элементной базы микроэлектроники СВЧ. Включение в состав пилотной линии отдела 220 позволило построить и укомплектовать самым современным оборудованием участок гетероэпитаксии и тем самым создать фундамент будущего производства эпитаксиальных гетероструктур требуемого качества.

Начальник отдела РЛС НПК-20 Анвер Фатехович Хасянов:

- Безусловно, как положительную, а возможно, и судьбоносную. Широкие академические знания (пришел в «Исток» из АН СССР), волевой спортивный характер (следствие многолетних и успешных занятий десятиборьем), здоровые амбиции и готовность к разумному риску позволили ему возглавить «Исток» в самые трудные перестроечные годы и, как по лезвию бритвы, провести предприятие через них без серьезных потерь, как это случилось во Фрязино со многими другими государственными предприятиями. Не будь А. Н. Королева, возможно, сегодня не было бы и ФГУП «НПП «Исток».

# – Испытывали ли Вы сложности в отношениях с А. Н. Королевым как генеральным директором?

Заместитель генерального директора Сергей Алексеевич Зайцев:

– В любом коллективе, даже в семье, иногда возникают сложности в отношениях между

его членами. Восприятие этих сложностей во многом определяется степенью сопричастности к тому, что происходит, и личными особенностями характера. Александр Николаевич никогда не был злопамятным и мелочным, но всегда отдавался работе во всех её проявлениях, что называется, «на полную катушку». Поэтому у меня никогда не было «сложностей» в мелочах и на бытовом уровне. Не было всяких «сложностей» и по ключевым вопросам развития предприятия. Иногда наши взгляды на пути решения зачастую сложных вопросов не совпадали. Это – естественный процесс поиска решений товарищами, заинтересованными в лучшем конечном результате, который никогда не приводил к «сложностям».

Заместитель генерального директора Евгений Николаевич Покровский:

- Сложностей в отношениях с генеральным директором я не испытывал.

Заместитель генерального директора Юрий Маркович Гомольский:

– Сложности в отношениях с руководством возникают тогда, когда происходит недопонимание в осуществлении общих задач предприятия. Лично у меня таких сложностей не возникало.

Заместитель генерального директора Борис Яковлевич Кистин:

– Королева А. Н. отличают феноменальная память, способность ладить с самыми разными по характеру людьми, глубокие знания в самых разных отраслях науки и производства, а также истории, спорта, литературы, что способствовало плодотворной работе с ним как с генеральным директором. Он позволял мне, как его заместителю, многое брать на себя, оставляя за собой право контроля наиболее важных моментов или этапов работы. Это доверие с его стороны способствовало развитию большей инициативы в проведении тех или иных работ. Его нормальное, деловое отношение к случавшимся ошибкам стимулировало не бояться их, а делать из ошибок правильные выводы.

При анализе ошибок сложнее всего было убедить Александра Николаевича наказать виновных в той или иной оплошности. Мне это не удалось ни разу. Королев А. Н., даже когда когото ругал, сам переживал больше, чем проштрафившийся сотрудник. Думаю, именно о такой ситуации говорила французская писательница Мари Совиньи: «Чем больше я узнаю людей, тем больше я люблю собак». Александр Николаевич любит людей, но очень любит и собак.

#### Начальник НПК-7 Виктор Михайлович Малыщик:

– Да, в начале моей работы в должности начальника НПК-7. Были очень сложные задачи, были мои ошибки. Знаю, что было мнение меня заменить, но коллектив успешно решил задачи, опыт работы начальником пришёл со временем, а у Генерального хватило терпения дождаться этого.

#### Начальник НПК-8 Юрий Афанасьевич Будзинский:

– Конечно, испытывал, как сотрудник, занимающийся делом, сложным и зачастую рискованным!

#### Начальник НПК-9 Назар Дмитриевич Урсуляк:

– Все подчиненные испытывали определенные сложности в отношениях с вышестоящими руководителями. Главное, чтобы в результате принимались правильные решения и решались как злободневные, так и перспективные проблемы. В решении этих вопросов сложностей в отношениях с А. Н. Королевым я не испытывал.

Поэтому с глубоким уважением отношусь к А. Н. Королеву как крупному руководителю.

Главный научный сотрудник отдела 220 Станислав Ефимович Рожков:

– Никогда за 21 год не испытывал как начальник отдела 220 сложностей в отношениях с Александром Николаевичем. Он был всегда как генеральный директор доступен, демократичен. Если обращался к Александру Николаевичу с проблемами и просьбами, то он всегда выслушивал мои доводы, а если отказывал, то аргументировано.

Начальник отдела РЛС НПК-20 Анвер Фатехович Хасянов:

– Никаких! Он вполне доступный и демократичный руководитель при обсуждении деловых вопросов, а как человек – открытый и с хорошим чувством юмора.

# - 4 апреля 2010 года А. Н. Королеву исполняется 70 лет. Что бы Вы хотели ему пожелать? Заместитель генерального директора Сергей Алексеевич Зайцев:

– Конечно, от всей души хочу пожелать здоровья и долгих лет активной, плодотворной жизни, благополучия в семье. Мы работаем вместе более 40 лет. Думаю, это достаточный отрезок времени, чтобы сказать, что Александр Николаевич глубоко порядочный и надёжный товарищ. Оставайся таким же ещё много-много лет!

Заместитель генерального директора Евгений Николаевич Покровский:

– В день юбилея хочу пожелать Александру Николаевичу крепкого здоровья, успехов в его деятельности на благо «Истока», благополучия и семейного счастья!

Заместитель генерального директора Юрий Маркович Гомольский:

– *Ну*, во-первых, конечно, здоровья, оптимизма, благополучия и веры в то, что все сделанное будет еще долго служить на пользу нашему предприятию!

Заместитель генерального директора Борис Яковлевич Кистин:

– Великий Конфуций отмечал «пять простых и великих добродетелей, находящихся в соответствии с законами природы и являющихся важнейшими условиями разумного порядка в совместной жизни людей: 1) МУДРОСТЬ, 2) ГУМАННОСТЬ, 3) ВЕРНОСТЬ, 4) ПОЧИТАНИЕ СТАРШИХ, 5) МУЖЕСТВО».

Королев А. Н. обладает всеми этими качествами, и хочу пожелать ему побольше здоровья, счастья и, несмотря ни на что, – удачи!

Начальник НПК-7 Виктор Михайлович Малыщик:

– Хочу пожелать, чтобы, несмотря на все изменения, Александр Николаевич сохранил свой оптимизм, активность в работе и в жизни и чтобы здоровья для этого хватило надолго!

Начальник НПК-8 Юрий Афанасьевич Будзинский:

- Желаю здоровья, долгих лет жизни и осуществления всего задуманного!

Начальник НПК-9 Назар Дмитриевич Урсуляк:

– Желаю А. Н. Королеву крепкого здоровья. Долгих лет счастливой жизни и долгих лет дальнейшей успешной работы на благо «Истока»!

Главный научный сотрудник отдела 220 Станислав Ефимович Рожков:

– Здоровья, еще раз здоровья, многих лет жизни и творческого потенциала!

Начальник отдела РЛС НПК-20 Анвер Фатехович Хасянов:

– Здоровья, здоровья и здоровья ему и его близким! Реализации всех своих еще не осуществленных планов во благо «Истоку» и себе!

В канун юбилея я обратился к самому **Александру Николаевичу Королеву** с просьбой ответить на несколько вопросов.

– Александр Николаевич! Прошло всего 5 месяцев, как Вы оставили пост генерального директора «Истока», на котором находились 21 год. Название Вашей должности те-

#### перь гораздо длиннее – первый заместитель генерального директора – директор по научно-технической деятельности – главный конструктор. Ощущаете ли Вы понижение уровня ответственности? И вообще, как Вы себя чувствуете в новом положении?

– Акценты деятельности формально поменялись. В мою компетенцию не входят финансовые вопросы, ценообразование, своевременная выплата зарплаты и т. д. Однако, конечно, все эти вопросы меня не оставляют, я не могу от них избавиться, так как занимался ими 21 год и у меня есть другие решения этих вопросов. Наиболее неприятные моменты связаны с чисто человеческими отношениями, когда люди, с которыми в течение 20 лет я решал и производственные, и часто личные их вопросы, перестают здороваться.

– Александр Николаевич! Вы по-прежнему проводите по четвергам совещания по разработке и поставкам активных радиолокационных головок самонаведения для ракет класса «воздух-воздух». Это новое направление в «Истоке» формировалось при Вашем самом активном участии. Как Вы считаете, насколько оно перспективно для «Истока»?

– Головочное направление вторично возродилось в «Истоке» в 1996 году после подписания контракта на поставку ракет PBB-AE московским ГосМКБ «Вымпел» в Индию. «Исток» в 97 – 99 годах разработал практически новую головку и начал серийные поставки. Это направление фактически спасло «Исток». В 1999 – 2003 годах выручка от продажи головки (изделия 50Э) составляла 45...55 % от всего объема «Истока».

Головка самонаведения — это пример создания сложного радиоэлектронного устройства на электронной фирме. Этот пример необходимо рассматривать как наиболее оптимальную разработку сложной техники, когда задачи радиолокации мгновенно влияют на задачи электроники и наоборот — и все это делается на одном предприятии. Я думаю, что такие сложные радиоэлектронные устройства и в будущем будут разрабатывать на «Истоке». Это могут быть новые головки или сложные CBЧ-субмодули типа полузаконченных АФАР. Для этого на «Истоке» необходимо готовить кадры не только по традиционной CBЧ-электронике, но и по другим специальностям — управлению движением летательных аппаратов, цифровой обработке и т. д.

# – Александр Николаевич! Как Вы считаете, почему «Исток» почти не пополняется молодыми кадрами? Пенсионеры не вечны, а передать свой богатейший опыт им некому. Есть ли какой-то выход из этой ситуации?

– Пока на «Истоке» не будет завершено глубокое техперевооружение, как это делается на двух пилотных линиях по производству микросхем и сборке CBЧ-субмодулей, молодежь не пойдет на «Исток», – они не хотят работать на древнем технологическом и измерительном оборудовании. А в НПК-4 и НПК-7, на участке многослойных керамических плат на основе LTCC в ПТК-39 и в цехе 3, где появились современнейшее технологическое оборудование, измерительная техника, металлообрабатывающие станки, – там значительно омолодились подразделения. Необходимо серьезное техперевооружение вакуумной электроники, что также обеспечит приток молодых специалистов. Необходимо иметь серьезную высокотехнологичную гражданскую продукцию, чтобы стабилизировать финансовое положение «Истока» – тогда молодежь пойдет.

– Александр Николаевич! Кто оказал на Ваше становление как человека, ученого, организатора наибольшее влияние?

– Как человека – мои родители, школьная и студенческая среда. Как ученого и организатора – Кобзарев Ю. Б., Ребров С. И. – Александр Николаевич! Вы руководили «Истоком» в очень непростое время. Кого Вы считаете своими соратниками, кто в наибольшей степени помогал Вам удержать «Исток» «на плаву»?

– Гражданская позиция моих ближайших друзей, членов дирекции и наш главный мотив – как же проживет наша оборонка, наша страна без «Истока». Эту мотивацию поддерживало большинство сотрудников «Истока», которые продолжали работать при задержке по выплате зарплаты, доходившей до 11 месяцев.

Меня многократно упрекали, в том числе и в печати, что необходимо разделить «Исток» на какие-то части. И эти части заживут хорошо. Но продукция «Истока» так связана технологически, что практически все подразделения участвуют в выходной продукции. Это огромный корабль, его нельзя распилить пополам, чтобы нос утонул, а корма успешно поплыла дальше.

Оценивая результаты более чем двадцатилетнего «правления» Александра Николаевича Королева «Истоком», можно попробовать обобщить некоторые выводы, уже в какой-то мере сделанные выше, в том числе и самим Александром Николаевичем, и его коллегами.

1. «Исток» благодаря усилиям Александра Николаевича и его «команды» сохранился как целостное предприятие с почти полным набором имевшихся ранее технологических возможностей и в значительной мере действующим кадровым составом ведущих специалистов. Он и сегодня остается лидером отечественной СВЧ-электроники, может быть, даже в большей степени, чем раньше. Хотя на предприятии практически не стало НИР, но ОКР выполняются на очень высоком уровне, нередко на предельно высоком, что иногда, к сожалению, приводит к срыву сроков выполнения работ.

2. В течение последних лет на «Истоке» появились новые технологические возможности, что создает неплохие перспективы для дальнейшего развития предприятия:

– пилотная линия для производства монолитных интегральных схем СВЧ с разрешением 0,1 мкм;

- автоматизированная линия по сборке СВЧ-субмодулей АФАР;

 – участок производства эпитаксиальных гетероструктур современного уровня для обеспечения производства МИС;

– механический участок с новейшими обрабатывающими центрами для производства корпусов СВЧ-субмодулей АФАР.

3. «Исток» сделал важный шаг по пути превращения в предприятие с вертикально интегрированным производством, освоив серийный выпуск активных радиолокационных головок самонаведения. Это тем более важно, что мировые тенденции развития электроники направлены на создание и производство микросхем со все большими и большими функциональными возможностями, поэтому миниатюризация сложнейших радиоэлектронных устройств возможна в максимальной степени только в симбиозе с развитой электроникой.

4. Имеется понимание того, что для стабилизации финансового положения «Истоку» необходимо иметь массовое или крупносерийное производство гражданской продукции, пользующейся устойчивым спросом на рынке, однако реального продвижения в этом направлении пока нет, хотя такие попытки и предпринимаются.

В заключение хотелось бы пожелать Александру Николаевичу дальнейших успехов в развитии отечественной СВЧ-электроники и ее лидера – ФГУП «НПП «Исток» и, конечно, крепкого здоровья и благополучия!

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Королев А.Н., Новоженов Г.Ф.* Расширение частотного диапазона шумового генератора с диодом типа 2Д2С // Труды ЦНИИС МО. – 1965. – № 5.

2. *Королев А.Н.* Линейная, круговая и крестообразная приемные антенные решетки, обеспечивающие максимальное отношение сигнала к шуму // Радиотехника и электроника. –1970. – № 1.

3. *Бекетов С.В., Королев А.Н.* Оптимальное обнаружение сигнала системой пространственно разнесенных приемников // Радиотехника и электроника. – 1970. – № 7.

4. Бекетов С. В., Королев А.Н., Потапов А.В. Максимально правдоподобная оценка направления прихода узкополосного сигнала при пространственно коррелированных помехах // Радиотехника и электроника. – 1970. – № 11.

5. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Обнаружение и оценка направления прихода узкополосного сигнала с неизвестными параметрами системой пространственно разнесенных приемников // Радиотехника и электроника. – 1971. – № 2.

6. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Оценка местоположения источника узкополосного сигнала // Радиотехника и электроника. – 1971. – № 7.

7. Статистические характеристики числа выбросов поля атмосферных помех в диапазоне сверхдлинных волн / Л.Т. Ремизов, А.Н. Королев, И.В. Олейникова, И.Г. Выскребцов, А.Ф. Чернявский // Радиотехника и электроника. – 1971. – № 7.

8. Бекетов С.Ф., Королев А.Н., Потапов А.В. Оценка местоположения источника импульсного сигнала // Радиотехника и электроника. – 1971. – № 12.

9. Спектр флуктуационной составляющей атмосферных радиопомех в диапазоне сверхдлинных волн / Л.Т. Ремизов, А.Н. Королев, И.В. Олейникова, И.Г. Выскребцов // Радиотехника и электроника. – 1972. – № 2.

10. Королев А.Н., Потапов А.В. Некоторые вопросы пространственной корреляции шумовых полей // Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей: 6-ой Всесоюзный симпозиум, 1973.

11. Бекетов С. В., Королев А.Н., Потапов А.В. Оценка местоположения импульсного сигнала // Радиотехника и электроника. – 1973. – № 8.

12. Характеристики непрерывной составляющей атмосферных радиопомех в диапазоне СДВ / Л.Т. Ремизов, А.Н. Королев, И.Г. Выскребцов, С.А. Зайцев. – Препринт ИРЭ, 1972.

13. Измерение статистических характеристик импульсных радиопомех СДВ / Л.Т. Ремизов, А.Н. Королев, И.Г. Выскребцов, А.М. Шаров. – Препринт ИРЭ, 1972.

14. Вариации параметров распределения вероятностей интенсивности выбросов естественных случайных полей в диапазоне СДВ и СНЧ / Л.Т. Ремизов, Д. Бердеянс, С.В. Бекетов, А.Н. Королев, И.Г. Выскребцов, А.М. Шаров // Радиотехника и электроника. – 1974. – № 12.

15. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Оценка местоположения источника сигнала системой пространственно разнесенных приемников // Исследования в области радиотехники и электроники 1954-1974 гг. – М.: Академия наук СССР, 1974.

16. Моделирование на ЭВМ процесса обнаружения потока сигналов на фоне потока помех / *С.В. Бекетов, С.А. Зайцев, А.Н. Королев, А.В. Потапов* // Вопросы автоматизации научных исследований в области радиотехники и электроники. – М.: Академия наук СССР, 1975.

17. Бекетов С.В., Королев А.Н. Оптимизация КНД антенных решеток при учете флуктуации параметров возбуждения электронов // Вопросы автоматизации научных исследований в области радиотехники и электроники. – М.: Академия наук СССР, 1975.

18. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Исследования полосы пропускания антенных решеток // Вопросы автоматизации научных исследований в области радиотехники и электроники. – М.: Академия наук СССР, 1975.

19. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Влияние пространственной корреляции помех на точность оценки направления прихода сигнала // Вопросы автоматизации научных исследований в области радиотехники и электроники. – М.: Академия наук СССР, 1975.

20. Бекетов С.В., Королев А.Н., Потапов А.В. Расчет на ЭВМ потенциальной точности местоопределения источника сигналов // Вопросы автоматизации научных исследований в области радиотехники и электроники. – М.: Академия наук СССР, 1975.

21. Автоматизированная система комплексного машинного проектирования изделий СВЧ электронной техники. Ч.1. Принципы построения и структура системного и технического обеспечения / И.М. Блейвас, И.И. Голеницкий, С.А. Зайцев, А.Н. Королев, А.В. Потапов, А.Н. Захарова и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 1. – С. 93-117.

22. Автоматизированная система комплексного машинного проектирования изделий СВЧ электронной техники. Ч. 2. Прикладное математическое обеспечение / И.М. Блейвас, И.И. Голеницкий, С.А. Зайцев, А.Н. Королев, А.В. Потапов, А.Н. Захарова и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 2. – С. 71-121.

23. Королев А.Н., Ищенко А.Н. Расчет матрицы рассеяния широкополосного микрополоскового циркулятора // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 7. – С. 117-119.

24. *Буданов В.Н., Королев А.Н., Потапов А.С.* Статистический анализ выходных характеристик микрополосковых Y-циркуляторов методом Монте-Карло // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 1. – С. 3-9.

24. *Гинзбург Е.Г., Зайцев С.А., Королев А.Н.* Подпрограмма вычисления площадей произвольных фигур // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 1. – С. 115-116.

26. Голдобин Д.Н., Ищенко А.Н., Королев А.Н. Программа расчета широкополосного микрополоскового дискового гиротропного У-соединения // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 12. – С. 81.

27. Комплекс программ для расчета на БЭСМ-6 топологии гибридных интегральных схем, обеспечивающий автоматическое получение чертежей и фотооригиналов / С.А. Зайцев, А.Н. Королев, Ю.М. Каменев, О.И. Куц, Н.М. Перегонова, Н.Г. Ревенко и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 4. – С. 120-123.

28. Королев А.Н. Программа расчета связанных несимметричных СВЧ микрополосковых линий на диэлектрической подложке // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 6. – С. 107-108.

29. Результаты экспериментального исследования поворотов микрополосковых линий и их использование в системе машинного проектирования ГИС СВЧ / *Т.А. Хавкина, А.Н. Королев, Д.И. Говорова, И.Д. Ашкенази* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 10. – С. 94-103.

30. *Королев А.Н., Ашкенази И.Д.* Программа расчета дисперсионных характеристик волнового сопротивления и ширины микрополосковой линии // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 1. – С. 122-126.

31. *Королев А.Н., Лещинский И.А., Манылов Л.М.* Программа расчета характеристик запуска входным СВЧсигналом усилителя М-типа с вторично-эмиссионным катодом // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 5. – С. 108-116.

32. Структура и принципы организации системы автоматизированного проектирования ГИС СВЧ / С.А. Зайцев, А.Н. Королев, Н.М. Перегонова, М.М. Трифонов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 9. – С. 64-68.

33. *Королев А.Н., Сорокин М.О.* Подпрограммы расчета матриц рассеяния некоторых неоднородностей микрополосковых линий // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 2(326). – С. 67-69.

34. Программа расчета А-, Y-, S-матриц N-проводной микрополосковой линии / С.А. Зайцев, А.Н. Королев, В.Я. Сухоносов, А.В. Потапов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 6(330). – С. 67-68.

35. Диалоговая подсистема проектирования СВЧ-микросхем ДИАГИС / С.А. Зайцев, А.Н. Королев, Н.Я. Малькова-Хаимова, М.М. Трифонов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 9(333). – С. 70-72.

36. Зайцев С.А., Королев А.Н., Трифонов М.М. Лингвистическое обеспечение системы автоматизированного проектирования СВЧ-микросхем САПГИС // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 12(336). – С. 63-68.

37. Статистический анализ и синтез допусков в системе автоматизированного проектирования СВЧ-микросхем САПГИС / С.А. Зайцев, С.М. Мартынов, А.Г. Михеев, А.В. Потапов, А.Н. Королев, М.М. Трифонов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 5(341). – С. 58-64.

38. Верба С.В., Королев А.Н., Саяпин Ю.А. Машинное проектирование микрополосковых СВЧ-фильтров на связанных линиях // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 7(343). – С. 13-18.

39. *Королев А.Н., Красильникова О.И., Ревенко Н.Г.* Программа расчета смесительных каскадов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 2(350). – С. 65-68.

40. *Korolev A.N., Zaitsev S.A., Sazonov V.P.* Microwave electronics investigations and production at "Istok" // Microwave Engineering Europe. – 1993. – June/July. – P. 49-60.

41. *Королев А.Н., Зайцев С.А., Сазонов В.П.* Основные направления работ в области СВЧ электроники в ГНПП «Исток» // Электронная промышленность. – 1993. – № 11-12. – С. 9-13.

42. *Korolev A.N.* "Istok" – the leading enterprise of Russia in the field of investigation and development of microwave devices (thesis) // IEEE MTT-S Digest. – 1993. – Vol.2, June 14-18, Atlanta, USA, Proceedings of the Microwave International Symposium. – P. 1127.

43. *Королев А.Н., Симонов К.Г.* Отпаянная мощная электронная пушка модульной конструкции // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. – 1997. – Вып. 45. Материалы XV международного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. Т. II. – Харьков. – С. 38-39.

44. *Королев А.Н.* Работы ГНПП «Исток» в области ближней радиолокации // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1998. – Вып. 1(471). – С. 3-13.

45. *Королев А.Н., Лопин М.И., Победоносцев А.С.* Многолучевой клистрод для телевидения // Электроника — наука, технология, бизнес. – 1998. – № 2. – С. 23-25.

46. High-power multiple-beam kiystrode for dm-range TV transmitters / A.N. Korolev, M.I. Lopin, A.S. Pobedonostsev, T.A. Mishkin, S.A. Zaitsev // EHF Electronics and Radiophysics: Proceedings of the International University Conference. St.Petersburg State Engineering University, 1999, May 24-28, St. Petersburg, – P. 53-55.

47. Возможности применения электронной пушки с широким пучком в радиационных технологиях и медицине / А.Н. Королев, К.Г. Симонов, Б.Ю. Богданович, В.А. Синюков, А.В. Мищенко, В.М. Пироженко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. – 1999. – № 3. – С. 107-110.

48. Применение электронной пушки с широким пучком в радиационных технологиях / Б.Ю. Богданович, А.Н. Королев, В.А. Синюков, К.Г. Симонов // Научная сессия МИФИ-99: сб. науч. тр. – 1999. – Т. 4. – С. 126-127.

49. The application of low-energy electron beams in technology and medicine / B.Yu. Bogdanovich, A.N. Korolev, V.A. Sinyukov, K.G. Simonov // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. – P. 2570-2572.

50. A compact installation for radiation treatment of materials by accelerated electrons / A. Korolev, S. Krylov, T. Latypov, G. Mamaev, S. Mamaev, E. Miroshnik et al. // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York, 1999. – P. 2567-2569.

51. Установки радиационной стерилизации медицинских изделий пучками ускоренных электронов / А.Н. Королев, А.В. Мищенко, В.М. Пироженко, К.Г. Симонов, А.И. Шаповалов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 11. – С. 5-16.

52. The traditional and new trends of vacuum electronics in R&PCorporation "Istok" / A.N. Korolev, S.A. Zaitsev, I.I. Golenitsky, E.V. Zhary, A.D. Zakurdaev, M.I. Lopin et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, No 12. – P. 2929-2937.

53. *Korolev A.N., Pirozhenko V.M., Simonov K.G.* 200 keV compact electron – beam device // Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. – P. 663-665.

54. A compact linear accelerator for radiation technological installation / V. Belugin, A. Mishenko, V. Pirozhenko, V. Rozanov, A. Zavadtsev, A. Korolev, K. Simonov // Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. – P. 2515-2517.

55. *Королев А.Н., Симонов К.Г.* Конструкция компактной установки с широким электронным пучком для радиационных технологий // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. – 2001. – № 3. – С. 30-32.

56. Оригинальные схемы выключателей, ограничителей и аттенюаторов на *p* – *i* – *n*-диодах и ПТШ (тезисы) / *А.Н. Королев, А.К. Балыко, В.А. Мальцев, Ю.Б. Рудый, А.В. Тыртышников //* СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 11-й Международной конференции, 10-14 сентября 2001, Севастополь, Украина. – С. 143-144.

57. Выключатели мощности СВЧ на связанных линиях / А.Н. Королев, А.К. Балыко, В.А. Мальцев, Ю.Б. Рудый, В.И. Дубинин, Е.В. Егорова // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 2002. – Вып. 1. – С. 27-32.

58. *Korolev A.N., Simonov K.G., Pirozhenko V.M.* A new type of 200 keV sealed-off electron accelerators // Proceedings of EP AC 2002, Paris, France. – 2002. – June 3-7. – P. 2769-2771.

59. *Королев А.Н.* Миниатюрные СВЧ-модули и бортовые когерентные передатчики на их основе (тезисы) // Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления: Тезисы докладов международной специализированной выставки-конференции военных и двойных технологий. – Нижний Новгород, 2002. – С. 214-215.

60. Многолучевые клистроны для телевидения и радиолокации / А.Н. Королев, С.А. Зайцев, М.И. Лопин, А.С. Победоносцев, Т.А. Мишкин, В.А. Рыжов, А.В. Галдецкий, С.А. Румянцев // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 2003. – Вып. 1(481). – С. 5-7.

61. Исследование и проектирование нового класса ЭВП СВЧ – компактных многолучевых многосекционных ЛБВ Ка-диапазона мощностью 100-700 Вт (тезисы) / А.Н. Королев, С.А. Зайцев, С.А. Румянцев, А.С. Победоносцев // Материалы XIII Отраслевого координационного семинара по СВЧ-технике, Нижегородская область, п. Хахалы, 27-29 августа 2003. – С. 12.

62. Проектирование компактной многолучевой прозрачной ЛБВ Ки-диапазона с коэффициентом усиления до 16 дБ (тезисы) / А.Н. Королев, С.А. Зайцев, С.А. Румянцев, А.С. Победоносцев // Материалы XIII Отраслевого координационного семинара по СВЧ-технике, Нижегородская область, п. Хахалы, 27-29 августа 2003. – С. 15.

63. Королев А.Н., Симонов К.Г., Пироженко В.М. Отпаянные мощные электронные пушки // Вакуумная наука и техника: Материалы десятой юбилейной научно-технической конференции. Судак, Украина. – 2003. – Т. 2. – С. 324-325.

64. Королев А.Н., Симонов К.Г. Новый класс компактных электронных отпаянных пушек с широким электронным пучком // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 2(482).– С. 9-16.

65. Результаты комплексного теоретического исследования и оптимизации передающих модулей активных головок самонаведения для ракет малой и средней дальности / А.Н. Королев, С.А. Зайцев, А.С. Победоносцев, С.А. Румянцев, В.М. Торбик, А.Д. Закурдаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – Вып. 1. – 2004. – С. 5-20.

66. The results of a complex investigation and optimization of transmitting modules using miniaturized multiple-beam klystrons and TWTs / A.N. Korolev, S.A. Zaitsev, A.S. Pobedonostsev, S.A. Rumyantsev, V.M. Torbik, A.D. Zakurdaev, B.V. Sazonov // Proceedings of the 5-th International Conference on Vacuum Electronics, IVEC 2004 Abstracts, Monterray, USA. – 2004. – April 27-29. – P. 308-309.

# **ТЕХНОЛОГИЯ**

УДК 621.385.73

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ НА ИХ ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА

Б. Ч. Дюбуа, А. Г. Михальченков, О. В. Поливникова, М. П. Темирязева

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

С помощью атомно-силового микроскопа изучена структура поверхности осмированного и скандатного металлопористых катодов. Обнаружено большое количество пирамидальных структур. Полученные результаты позволяют высказать предположение, что высокие эмиссионные свойства изучаемых катодов обусловлены увеличением площади поверхности, с которой отбирается ток, и появлением термополевой эмиссии с заостренных вершин пирамид.

The surface structure of osmium and scandium dispenser cathodes was studied by atomic-force microscope. A great number of pyramid structures were found. The obtained results suppose that high emission properties of the studied cathodes are specified by increasing the surface area from which the current is taken and the appearance of thermal-field emission from tapered pyramid points.

КС: металлопористый катод, атомно-силовой микроскоп, термополевая эмиссия

Keywords: dispenser cathode, atomic-force microscope, thermal-field emission

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Все эффективные катоды (оксидные, металлопористые, металлосплавные) рассматриваются как катоды пленочного типа: их высокие эмиссионные свойства обусловлены наличием моноатомной пленки активного металла (бария, лантана, церия, тория и т. п.), адсорбированной на поверхности катода [1]. Поскольку в металлопористых катодах (МПК) источником активного вещества является его окись и, кроме того, в составе остаточных газов присутствует кислород, то все это дает основание предполагать, что в действительности на поверхности реального МПК в составе пленки бария присутствует и кислород [2]. В этом случае, согласно [3], кислород располагается под адсорбированными атомами (адатомами) электроположительных металлов, что приводит к снижению работы выхода и увеличению энергии связи адсорбированной пленки активного металла с поверхностью. Эта модель наиболее естественно реализуется для граней (100) и (112) вольфрама.

Существует и альтернативная позиция: эмиссионная поверхность МПК полностью [4] или хотя бы частично [5] покрыта объемными образованиями (кристаллитами) окисей активных металлов. Однако термодинамическое рассмотрение процессов, происходящих на поверхнос-

ти и в объеме МПК, показало [6], что если такие кристаллиты окиси бария и существуют, то только при низких температурах (не выше 1100 К), поскольку для их существования при более высоких температурах необходимо давление кислорода в приборе более 10<sup>-5</sup> Па, что в реальных условиях работы приборов исключается.

Конечными задачами рассмотрения процессов, происходящих на поверхности катода, являются выяснение причин неоднородного распределения эмиссии по его поверхности и разработка способов улучшения этого параметра катодов.

Объяснение неоднородности эмиссии может быть дано с позиций как «пленочной», так и «кристаллитной» теорий. С позиций пленочных представлений [7,8] эмиссионные свойства МПК улучшатся, если их поверхность покрыть платиной. Эта рекомендация основывалась на результатах экспериментов: подвижность и энергия связи бария на поверхности платины выше, чем на вольфраме. Однако попытка реализовать это предположение в реальных МПК не дала положительного результата.

Успешным оказалось предложение покрывать эмиссионную поверхность катода осмием [9]. Предложение основывалось на допущении, что в моноатомной системе металл–барий работа выхода тем меньше, чем выше работа выхода металлической подложки ( $\phi_{0s} = 4,7$ эВ,  $\phi_{W} = 4,5$ эВ). И в действительности осмирование поверхности МПК приводит к увеличению их термоэлектронной эмиссии в 5–6 раз.

Этот результат исходит из предположения, которое не соответствует действительности: согласно экспериментальным данным [3, 10], работа выхода моноатомного слоя бария не зависит от работы выхода подложки и равна  $(2,3\pm0,1)$  эВ (изучены подложки из W, Mo, Re, Os, Ir, Ru, Pt, Rh, Ta, Nb, Hf, Ti, Zr и ряда их сплавов). Минимальная работа выхода при наличии кислорода достигается только на вольфраме и молибдене и равна  $(1,9\pm0,1)$  эВ.

В работах [5, 11] благоприятное воздействие осмия на эмиссионные характеристики МПК связывается с увеличением эмиссионных центров, которые, как показывают авторы этих работ, представляют собой кристаллиты окисей активных металлов.

Но еще раз: каких-либо очевидных экспериментальных данных, позволяющих связать эмиссионные центры на катоде с трехмерными образованиями, до настоящего времени не получено. Картина эмиссионной поверхности катода, полученная с помощью эмиссионного микроскопа, дает возможность довольно произвольно трактовать причины неоднородности поверхности. Так, например, эмиссионная неоднородность оксидного катода объясняется тем, что увеличение эмиссии происходит или из пор, или с выступающих зерен оксида [12].

Существующие представления о структуре поверхности и механизме работы эффективных катодов, к сожалению, являются недостаточно полными, чтобы целенаправленно улучшать их эмиссионные характеристики или хотя бы объяснить причины получения уникально высокой электронной эмиссии таких катодов, которые появились в результате большого количества технологических проб различных эмиссионно-активных материалов (например, скандатных МПК [13]).

Возможность улучшить ситуацию с пониманием физико-химических процессов, происходящих на поверхности эффективных катодов, предоставляют новые методы исследования свойств поверхности, и прежде всего сканирующая микроскопия. Одним из наиболее значительных достижений в физике последних десятилетий является создание нового мощного метода топографирования и анализа поверхности твердого тела – сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия [14].

#### 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование поверхности в атомно-силовом микроскопе (ACM) производилось с помощью специальных зондовых датчиков, представляющих собой упругую консоль – кантилевер с острым зондом на конце. Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании – держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных ACM-зондов составляет 1...50 нм, в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. (Для исследования поверхности катодов использовались 10-нм зонды.) Оптическая система ACM юстируется таким образом, чтобы изображение полупроводникового лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника.

Условно методы получения информации о рельефе и свойствах поверхности с помощью ACM делятся на контактные квазистатические и бесконтактные колебательные.

Для исследования поверхности катодов использовалась так называемая «полуконтактная» колебательная АСМ-методика, основанная на регистрации параметров взаимодействия колеблющегося кантилевера с поверхностью. При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10...100 нм. Зонд подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца. При сканировании регистрируется изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера. Взаимодействие зонда с поверхностью в «полуконтактном» режиме состоит из Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия, к которому в момент касания добавляется сила упругости, действующая на зонд со стороны поверхности. Заметим, что «полуконтактный» режим реализуется только тогда, когда расстояние от кантилевера до поверхности меньше амплитуды колебаний кантилевера.

Формирование ACM-изображения поверхности происходит следующим образом. С помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте  $\omega$ , близкой к его резонансной частоте, с амплитудой  $A_{\omega}$ . При сканировании система обратной связи ACM поддерживает амплитуду колебаний кантилевера на уровне  $A_0$ , задаваемом оператором ( $A_0 < A_{\omega}$ ). Напряжение в петле обратной связи записывается в память компьютера в качестве ACM-изображения рельефа поверхности. Одновременно при сканировании образца в каждой точке регистрируется изменение фазы колебаний кантилевера, которое записывается в виде распределения фазового контраста.

Эмиссионные характеристики катодов изучались по методике, изложенной в [15]. В катодах использовалась вольфрамовая губка с пористостью 25 %, пропитанная алюминатом состава 3BaO–0,5CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Пленка осмия наносилась по технологии, описанной в [16]. Скандатный катод содержал в губке 2 % окиси скандия.

В научных публикациях последних лет и докладах ежегодных научно-практических конференций «Нанотехнологии производству», проводимых в городе Фрязино, начиная с 2004 г. наблюдается все возрастающий объем научно-исследовательских работ, осуществляемых на сканирующем или на атомно-силовом микроскопе.

Сегодня зондовая сканирующая микроскопия становится все более доступным и наиболее информативным методом исследования нанообъектов материалов для электронных приборов.

Со времени открытия метода и присвоения Нобелевской премии сотрудникам IBM Г. Биннигу и Г. Рореру в 1986 году в научных центрах России созданы различные модели этих микроскопов. Возможность не только проводить исследования на молекулярном уровне, но и модифицировать наноструктуры, удаляя и осаждая отдельные атомы и молекулы, способствовала разработке сложных нанотехнологических конвейерных комплексов, именуемых нанофабами.

Ведущим предприятием в России по проектированию и конструированию нанофабов, а также по производству микроскопов типа SOLVER стала компания НТ-МДТ. Сегодня насчитывается 11 моделей этой серии, которые приобретены для лабораторий не только России, но и ведущих стран мира.

Исследования катодных материалов в данной работе проведены на модели SOLVER-PRO (рис. 1) названной компании.



Рис. 1. Атомно-силовой микроскоп модели SOLVER-PRO

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура поверхности эмиссионного тела катода после токарной обработки несет на себе очевидные следы резца, а также следы выплава, вероятно, гидратированной окиси бария, появляющейся в результате нагрева эмиссионного тела в процессе его механической обработки (рис. 2,*a*). Последующий прогрев этого образца в водороде сглаживает структуру, оставленную на вольфрамовой губке резцом, но увеличивает количество выплавленного гидроксида бария (рис. 2,*б*). После прогрева в вакууме выплавы удаляются (рис. 2,*в*). Ионное травление приводит к существенному изъязвлению поверхности, образованию «гористой» структуры с большим количеством пиков (рис. 2,*е*). Прогрев этих образцов не изменяет структуру поверхности (рис. 2,*д*). Напыление осмия увеличивает количество пиков (рис. 2,*е*), а прогрев в вакууме сопровождается образованием друз (рис. 2,*ж*).



Рис. 2. Структура поверхности эмиссионного тела МПК после токарной обработки (*a*), прогрева в водороде при 1250 °С в течение 10 мин ( $\delta$ ), прогрева в вакууме при 1250 °С в течение 10 мин ( $\epsilon$ ), травления ионами азота при энергии 1,5 кВ и плотности тока 4 мА/см<sup>2</sup> (*c*), прогрева в вакууме после травления при 1250 °С в течение 10 мин ( $\partial$ ), напыления пленки осмия (*e*), прогрева в вакууме катода с пленкой осмия при 1250 °С в течение 10 мин ( $\mathcal{H}$ )





Рис. 3. Структура поверхности эмиссионного тела МПК после нанесения осмия без предварительного ионного травления





Рис. 4. Структура поверхности вольфрамовой ленты (*a*) и алюмооксидной керамики (б) после нанесения пленки осмия толщиной 0,5 мкм



Рис. 5. Структура поверхности эмиссионного тела МПК Sc после прогрева в вакууме при 1000 °C в течение 10 мин

Напыление осмия на поверхность без предварительного ионного травления также приводит к образованию большого количества пирамид, отличающихся между собой по высоте в 1,5...2 раза (рис. 3).

Существенное отличие структуры пленок осмия наблюдается при их нанесении на гладкую поверхность вольфрамовой ленты (рис. 4,a) и алюмооксидной керамики (рис.  $4,\delta$ ).

Структура пленки осмия на этих двух последних рисунках легко поддается объяснению. На вольфрамовой ленте, в силу близких значений параметров кристаллических решеток вольфрама и осмия, образуется сплошная пленка (пленка растет по механизму Франка-Ван-дер-Мерве). На алюмооксидной керамике из-за большой рассогласованности параметров решеток наблюдается рост сфероидальных островков (механизм Фольмера-Вебера).

На поверхности вольфрамовой губки, пропитанной алюминатом бария-кальция, механизм формирования осмиевого покрытия отличается существенно большей сложностью. Губка, сформированная из вольфрамового порошка, должна содержать большое количество дислокаций. Ионная бомбардировка увеличивает число нарушений кристаллической решетки вольфрамовых зерен. Эти нарушения являются центрами зарождения кристаллов осмия, которые растут в форме многогранников. Причем их ребра являются источниками слоев роста. Если при этом скорость доставки напыляемого вещества на центральную часть грани достаточно мала, то вершины обгоняют центры граней. Образуются остроконечные холмики роста. Склоны холмиков отклонены от грани с простыми кристаллографическими индексами на углы порядка нескольких градусов. Образуется поверхность вициналей.

Такая форма роста напыляемых слоев описывается механизмом Странского-Крастанова: на начальной стадии образуется смачивающий слой толщиной в один-два атомных слоя, который затем переходит в островковую структуру.

В результате рассмотрения представленных структур поверхности металлопористого катода с пленкой осмия (МПК Os) можно сделать два важных вывода.

1. Поверхность МПК после ионного травления и нанесения осмия существенно изъязвлена, увеличена в размере, а осмиевое покрытие нельзя рассматривать как однородную сплошную пленку с одинаковой толщиной по всей поверхности катода.

2. Ионное травление и осмиевое покрытие приводят к образованию на поверхности МПК Оѕ рельефа с конусными структурами.

Это позволяет указать на две возможные причины более высокой эмиссионной способности осмированных катодов: увеличение эмиссионной поверхности (появление «эффекта полого катода») и, вследствие наличия заостренных структур, обеспечивающих увеличение поля, по-явление термополевой эмиссии.

В настоящей работе впервые было установлено, что, в отличие от МПК Os, на поверхности металлопористых скандатных катодов (МПК Sc) спонтанно формируются пирамидальные структуры после прогрева катодов в вакууме при температуре 900...1000 °C (рис. 5). Так что высокие эмиссионные свойства МПК Sc также можно объяснить термополевой эмиссией с этих структур.

Возможность существования термополевой эмиссии с МПК Sc обсуждалась также в работах [17, 18]. Однако хотя в настоящей работе и были впервые обнаружены структуры, которые могут быть ответственны за полевую эмиссию, но выяснить причины и изучить физикохимические процессы, вызывающие появление этих структур на поверхности МПК Sc, пока не удалось. Влияние структуры поверхности МПК на его эмиссионные свойства можно проследить путем направленного модифицирования рельефа поверхности катода, например, электроискровым способом. На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики для обычного МПК с гладкой поверхностью и МПК, на поверхность которого нанесены взаимно перпендикулярные ячейки шириной и шагом 0,3 мм. Для катода с модифицированной поверхностью вольтамперные характеристики не имеют четко выраженного насыщения, и при высоких анодных напряжениях с такого катода можно отобрать ток, в 1,5...2 раза больший, чем с обычного катода с гладкой поверхностью. Возможность отбора большего тока обусловлена проникновением поля в полости и усилением поля на краях ячеек. В этом случае имеет место очевидное отклонение от закона Шотки: с увеличением температуры катода темп роста анодного тока при увеличении анодного напряжения не падает, а возрастает.



Рис. 6. Зависимости анодного тока J от анодного напряжения  $U_a$  для ячеистого ( — , — ) и «гладкого» ( — , — ) МПК

Аналогичная форма вольт-амперных характеристик наблюдается и для МПК Os (рис. 7). И при этом характерно то, что отклонение от закона степени 3/2 для МПК и МПК Os наблюдается приблизительно при одинаковых токах, что может свидетельствовать в пользу того, что облако пространственного заряда сглаживает рельеф поверхности осмированного катода.

Построить точную модель работы МПК Os, на наш взгляд, пока не представляется возможным. Оценим довольно грубо возможные эффекты, которые могут проявиться при образовании на поверхности катода пирамидальных структур. Обнаруженные структуры подсказывают, что размер пирамид близок к величинам: основание – 2х2 мкм и высота – 1 мкм. В этом случае плотность пирамид будет равна 2,5·10<sup>7</sup> штук/см<sup>2</sup>, а поверхность катода увеличится в 1,4 раза.

Оценить вклад термополевой эмиссии в общий ток катода можно, используя уравнение [19, 20]:

$$\frac{I(T)}{I(0)} = 1 + \frac{1, 4 \cdot 10^8 \varphi T^2}{E^2}$$

где I(T) – термополевая эмиссия при температуре T; I(0) – полевая эмиссия при нулевой темпе-



Рис. 7. Зависимости анодного тока Jот анодного напряжения  $U_{\rm a}$ для МПК Оs

ратуре; φ – работа выхода электронов, которую в данном случае принимаем равной 2 эВ; *E* – электрическое поле, В/см.

С помощью этого уравнения можно показать, что при увеличении температуры катода с 1400 до 1500 К ток термополевой эмиссии может увеличиться максимум на 10 %, а поле *E* при этом будет равно около 1,5·10<sup>7</sup> В/см. Плотность тока с острия при этом поле и нулевой температуре составляет около 100 А/см<sup>2</sup> [21]. Далее, используя эти данные, можно оценить эмитирующую площадь вершины пирамиды и радиус ее скругления, который оказывается равным 0,1 мкм.

Оценим поправку к полю на вершине пирамиды:  $K = U_a/Er = 26$ .

Эта поправка учитывает геометрию вершины пирамиды, форму и расположение анода и экранирующее воздействие соседних пирамид.

Для единичного конического катода эта величина принимается равной 5 [21].

Таким образом, несмотря на то, что предложенная модель поверхности МПК Оs основана на довольно грубых допущениях, результат оценки геометрических параметров такой поверхности оказался близок к характерным размерам полевых катодов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования осмированных и скандатных металлопористых катодов посредством атомносилового микроскопа позволили выявить ряд структурных особенностей поверхностей этих катодов. Обнаружена сильно развитая поверхность с большим количеством пирамидальных структур, что позволяет утверждать, что высокие эмиссионные свойства этих катодов обусловлены увеличением поверхности, с которой отбирается ток (эффект «полого катода»), и появлением термополевой эмиссии с заостренных вершин пирамид.

Обнаруженная структура поверхности осмированных катодов формируется в процессе ионной обработки катодов и напыления осмия.

Пирамидальная поверхностная структура скандатных катодов формируется спонтанно в процессе прогрева катодов в вакууме.

Физико-химические процессы, вызывающие столь удивительное явление, пока не выявлены.

Остается также открытым вопрос, в какой степени такая острийная структура осмированных катодов может способствовать инициированию пробоев в высоковольтных приборах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В. Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (К истории идей в катодной технологии) // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2008. – Вып. 4(497). – С. 3.

2. Зингерман Я.П., Солтык В.Я. Химические воздействия кислорода на электронную эмиссию пористого металлопленочного катода // Радиотехника и электроника. – 1957. – Т. 2, № 12. – С. 1512.

3. *Култашев О.К., Макаров А.П., Рожков С.Е.* Влияние кислорода на работу выхода пленок электроположительных металлов, адсорбированных на 4d- и 5d-переходных металлах // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1976. – Т. 40, № 12. – С. 2478.

4. Nergaard L.S. The physics of the cathode // RCA Review. - 1957. - Vol. 18, No 4. - P. 486.

5. Эмиссионно-микроскопическое и рентгеноспектральное исследование поверхности металлопористого катода / Ю.В. Гурков, А.В. Дружинин, Т.А. Куприянова, В.И. Некрасов // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1974. – Т. 38, № 11. – С. 2270.

6. Термодинамические условия существования эмитирующих фаз на поверхности металлопористого алюминатного катода / О.К. Култашев, А.П. Макаров, Т.М. Новикова, В.И. Соловьев // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 1. – С. 38.

7. *Моргулис Н.Д.* Физические свойства и элементы расчета пористого барий-вольфрамового катода // Радиотехника и электроника. – 1957. – Т. 2, № 12. – С. 1471.

8. *Митянский* Г.Ф. Миграция бария по поверхности некоторых металлов // Радиотехника и электроника. – 1957. – Т. 2, № 12. – С. 1490.

9. *P. Zalm, A.J.A.* van *Stratum*. Osmium dispenser cathodes // Phyl. Tech. Rev. – 1966. – Vol. 27, No 3,4. – P. 69. 10. Дюбуа Б.Ч. Термоэлектронная эмиссия некоторых тугоплавких металлов в парах бария // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, № 6. – С. 1161.

11. Дружинин А.В., Некрасов В.И. Распределительные термокатоды с пленками металлов // Электронная техника. Сер.16. Генераторные, модуляторные и рентгеновские приборы. – 1969. – Вып. 2. – С. 69.

12. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде. – М.: Наука, 1968. – С. 9.

13. US Patent, filed 10-1964, granted 12-1967. Metal porous body having pores filled with barium scandate / A. Figner, A. Soloveichik, I. Judinskaya.

14. *Бинниг Г., Рорер Г.* Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевская лекция по физике, 1986 // УФН. – 1988. – Т. 154, вып. 2. – С. 261.

15. Дюбуа Б.Ч., Митрофанова Л.А., Невская Л.В. Распределительные вольфрам-бариевые катоды // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1964. – Т. 28, № 9. – С. 1491.

16. *Гурков Ю.В., Дружинин А.В.* Эмиссионные параметры осмированного пропитанного металлопористого термокатода // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1979. – Т. 43, № 9. – С. 1850.

17. Bekh I.I., Il'chenko V.V., Lushkin A.E. The influencing of the surface structure on the emission properties of the Sc-Ba dispensed cathodes // Proceeding IVESC, Beijing, China. – 2004. – P. 197.

18. Yiman Wang, Jinshu Wang, Wei Lin, Ke Zhang, Ji Li. Development of high current density cathodes with scandia – doped tungsten powders // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – Vol. 54, No 5. – P. 1061.

19. *Marphy E.L., Good R.N.* Thermionic emission, field emission and the transition region // Phys. Rev. – 1956. – Vol. 102, No 6. – P. 1464.

20. Шредник В.Н. Теория автоэлектронной эмиссии: сб. статей / Под ред. М.И. Елинсона. – М.: Сов. радио, 1974. – С. 171.

21. Brodie I., Spindt C.A. Vacuum microelectronics // Advances in Electronics and Electron Phys. – 1992. – Vol. 83. – P. 12.

Статья поступила 10 мая 2009 г.

## ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.372.543.2

#### КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

#### В. М. Геворкян, С. А. Перевезенцев

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)»

Представлены результаты разработки корректирующего элемента волноводных полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах, предназначенного для повышения крутизны скатов амплитудно-частотной характеристики фильтра. Каскадное включение корректирующего элемента на входе (выходе) фильтра преобразует его исходную – чебышевскую или максимально плоскую частотную – характеристику к эллиптическому виду. Конструкция фильтра с применением такого элемента позволяет улучшить его избирательность без существенного изменения массогабаритных параметров. Данное положение подтверждено на примере семизвенного фильтра *Ки*-диапазона.

The results of developing the correcting element in waveguide bandpass filters on dielectric resonators designed for increasing the amplitude-frequency characteristic transconductance of the filter are presented. Cascade connection of correcting element at filter input (output) transforms its original Chebyshev or maximum flat frequency characteristics into elliptic form. The filter design including such an element allows to improve its selectivity without considerable change of overall dimensions. This statement has been proved on Ku-range seven section filter.

- КС: <u>полосно-пропускающий фильтр, диэлектрический резонатор, амплитудно-частотная</u> <u>характеристика, резонансный поглощающий элемент</u>
- *Keywords:* <u>bandpass filter, dielectric resonator, amplitude-frequency characteristic, resonant absorbing</u> <u>element</u>

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) для мобильных (бортовых) и спутниковых систем связи характеризуются жесткими требованиями к комплексу параметров. Такие фильтры должны иметь малые потери (обычно не хуже 1 дБ) в полосе пропускания, которая составляет от 0,5 до 2...3 %, при высокой крутизне скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), характеризуемой коэффициентами прямоугольности не хуже 2,3...2,5 по уровню минус 60 дБ и около 3-х по уровню минус 80 дБ, большие ослабления в полосе заграждения (обычно 80...100 дБ), обеспечивать отсутствие вблизи рабочей полосы частот паразитных полос пропускания (требуемые отстройки составляют, как правило, 10...20 % от центральной частоты) и при этом обладать малыми габаритами и массой. Этот комплекс параметров позволяет повысить потенциальные возможности приемопередающей аппаратуры за счет высокой избирательности устройств частотной селекции, однако трудно реализуем по всей их совокупности. Остановимся на анализе возможной реализации таких ППФ в *Ku*-диапазоне, как наиболее перспективном в настоящее время.

Как правило, большинство требуемых электрических параметров реализуются в фильтрах на объемных резонаторах и в волноводных фильтрах с элементами связи в виде индуктивных
или емкостных диафрагм. Размеры этих фильтров, в частности длина, принципиально ограничены снизу резонансным размером звеньев фильтра. На рис. 1 приведена частотная характеристика девятизвенного волноводного фильтра с габаритными размерами 140×38×38 мм на основе диафрагм [1]. Для сравнения отметим, что семизвенный волноводный фильтр 7WP01-13000/T190-V/V фирмы K&L Microwave с близкими электрическими характеристиками (при несколько меньшем гарантированном ослаблении в полосе заграждения) имеет габариты 139×33×33 мм, а семизвенный фильтр 7C60-13000/T190-O/O той же фирмы на объемных резонаторах – 139×24×19 мм [2].



Рис. 1. Частотные характеристики фильтра

Существенного уменьшения габаритов ППФ при сохранении и улучшении электрических параметров удается достичь за счет применения диэлектрических резонаторов (ДР) из современных СВЧ-керамик с высокой (не менее 30) относительной диэлектрической проницаемостью. Так, ДР из термостабильной керамики, аналогичной БЦНТ, с относительной диэлектрической проницаемостью 33 имеют ненагруженную добротность 10 000 в *Ки*-диапазоне [3]. Это позволяет обеспечить эффективную добротность резонансного звена (РЗ) с таким ДР на уровне 3 000...4 000. Малый температурный коэффициент частоты ДР (от -6 до +6  $\cdot$ 10<sup>-6</sup>/°С) и возможность выбора его величины и знака обеспечивают работу фильтров на ДР в широком диапазоне внешних температур и на больших уровнях мощности в СВЧ-тракте. Тем не менее, серьезной проблемой фильтров на ДР являются паразитные полосы пропускания, близкие к рабочей полосе, возникающие вследствие большей, чем у иных видов резонансных структур, густоты спектра собственных колебаний ДР.

Существуют различные способы решения проблемы разряжения спектра колебаний ДР,

например, применение диафрагм, штырей и других дополнительных элементов, подавляющих или отстраивающих нежелательные типы колебаний, а также использование «зеркальных» (половина, четверть) резонаторов и т. п. [4, 5]. Общий недостаток применения резонансных звеньев с элементами подавления паразитных полос пропускания заключается в снижении эффективной добротности звена в сравнении с собственной добротностью ДР.

Известно действенное техническое решение подавления паразитных полос пропускания ППФ на ДР, лишенное этого недостатка в большей мере. Оно основано на креплении ДР в РЗ с применением трех тонких металлических пластин, плоскости которых ориентированы параллельно радиусу запредельного цилиндра и развернуты под углом 120 град друг относительно друга [6]. Однако в *Ки*-диапазоне такое техническое решение оказывается нетехнологичным. В этом случае приходится ограничиться более простым, но менее эффективным приемом, а именно выбором соотношения размеров ДР и их взаимного положения, чем можно несколько расширить область заграждения фильтра.

#### 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В основе построения всех типов ППФ на ДР лежит принцип размещения резонансных звеньев (на базе ДР) в запредельной полости, например цилиндрической трубе, вход и выход которой присоединены к СВЧ-линиям передачи. Это могут быть линии передачи любого типа, возбуждаемые электромагнитной волной на конце запредельного волновода, а точнее, оконечным резонансным звеном (или, иначе, оконечным ДР). Таким образом, развязку (степень затухания электромагнитной волны вне полосы пропускания ППФ) между входной и выходной линиями передачи обеспечивает запредельный участок линии передачи, в котором размещены резонансные звенья. Степень затухания определяется эффективным (т. е. с учетом электрической длины, определяемой степенью заполнения запредельного сечения диэлектриком) поперечным сечением запредельного участка. Во всех случаях построения фильтров на ДР, независимо от типа реализуемой амплитудно-частотной характеристики (например, чебышевской, максимально плоской или эллиптического типа), наблюдается уменьшение развязки («подъем» АЧХ) с ростом частоты.

Повышения развязки вне полосы пропускания ППФ на ДР можно достичь увеличением длины запредельности. Однако этот прием не позволяет повысить крутизну скатов АЧХ фильтра вблизи полосы пропускания. Решить эту задачу можно или за счет увеличения порядка фильтра, т. е. путем увеличения числа резонансных звеньев, или с введением эллиптичности. Увеличение числа резонансных звеньев ППФ приводит к росту прямых потерь в полосе пропускания, вследствие конечной и относительно низкой (порядка 3 000...4 000) эффективной собственной добротности резонансного звена на ДР. ППФ с эллиптической АЧХ, обладая крутыми скатами АЧХ на границах полосы пропускания, принципиально характеризуются подъемом АЧХ вне полосы пропускания (при отстройке от нее). Кроме того, ППФ с АЧХ эллиптического типа более сложные в настройке.

С учетом сказанного, предпринята попытка реализации коррекции вида АЧХ (законченного в разработке ППФ на ДР) с помощью резонансного поглощающего элемента.

Свойства резонансного поглощающего элемента, образованного в результате размещения ДР в короткозамкнутом отрезке волновода стандартного сечения (волноводе «бегущей волны»), известны с 1970 г. [7]. Эффект резонансного поглощения мощности падающей волны в короткозамкнутом волноводе наблюдается в случае реализации критической связи ДР с волноводом, т. е. при коэффициенте связи  $\beta \approx 1$ , что следует из приближенной формулы для коэффициента отражения в такой структуре:

$$\underline{S}_{11} \approx e^{-i2\Gamma_0 z_k} \left\{ 1 - \frac{2^{B'}}{1 + B'} \left[ 1 + i \frac{Q_{03}}{1 + B'} \left( \frac{\mathrm{III}^2 - \mathrm{III}_0^2}{\mathrm{III}_0^2} + \frac{B''}{Q_{03}} \right) \right]^{-1} \right\},\$$

где  $\beta' = P_{\rm NA}/P_{\rm T}$  – коэффициент связи ДР с электродинамической системой для короткозамкнутого прямоугольного волновода с основной волной  $H_{01}$ ;  $\beta'' = P_{\rm NP}/P_{\rm T}$  – частотный коэффициент ДР, определяющий смещение резонансной частоты относительно частоты РЗ  $\omega_0$ ;  $P_{\rm NA}$  и  $P_{\rm NP}$  – активная и реактивная мощности, излучаемые ДР в волновод.

На рис. 2 приведены схематическое изображение рассматриваемой электродинамической модели и теоретические и экспериментальные зависимости модуля коэффициента отражения и резонансной частоты ДР от расстояния между центром диэлектрического образца и короткозамыкат  $S_{11}$  м для случаев  $\beta' = 10$  и 2,5.



Рис. 2. Схематическое изображение рассматриваемой модели, а также теоретические (кривые) и экспериментальные (точки) зависимости модуля коэффициента отражения (*a*) и резонансной частоты ДР (*б*) от расстояния между центром диэлектрического резонатора и короткозамыкателем:  $1 - \beta' = 10; \ 2 - \beta' = 2,5$ 

Из рисунка видно, что резонансные частоты точек «полного» поглощения мощности (то есть  $S_{11} = 0$ ) отличны от собственной резонансной частоты  $f_{p0}$  ДР. Причем отличие возрастает с рос-

том максимального значения коэффициента связи ДР с линией передачи. Отсюда следует, что даже в случае идеально закороченного прямоугольного волновода добиться необходимого сочетания положения образца ДР в линии передачи и его собственной резонансной частоты, которое обеспечило бы равенство нулю  $S_{11}$  на заданной частоте, непросто. Задача еще больше усложняется в случае неидеального короткозамыкателя, что соответствует варианту конструктивного решения ППФ на ДР, размещенных в отрезке запредельного волновода, схематично изображенного на рис. 3.



Рис. 3. Полосно-пропускающий фильтр на ДР:

1 – запредельный в полосе пропускания полый металлический экран; 2 – отрезки прямоугольных волноводов стандартного сечения; 3 – ДР; 4 – диэлектрические подставки крепления ДР; 5 – ДР резонансного поглощающего элемента; 6 – отверстие в стенке отрезка регулярного волновода 2; 7 – элемент настройки резонансной частоты ДР 5

Тем не менее, с применением численных методов расчета коэффициента передачи в электродинамической системе, представленной на рис. 4, достаточно несложно осуществить выбор размеров и положения ДР, удовлетворяющих требуемым параметрам резонансного поглощающего элемента. Причем, как видно из рисунка, в расчетной модели опущен ряд элементов, важных с точки зрения построения ППФ, но усложняющих процесс счета. В частности, отсутствует элемент подстройки частоты ДР. Однако, учитывая достаточно большую ожидаемую погрешность рас 2 а, это действие оправдано. 2



Рис. 4. Расчетная модель положения и размеров ДР: *I* – запредельный в полосе пропускания полый металлический экран; *2* – отрезки прямоугольных волноводов стандартного сечения; *3* – ДР резонансного поглощающего элемента

Ниже (рис. 5 – 7) приведен ряд расчетных кривых коэффициента передачи в нашей модели для различного положения ДР относительно окна запредельного волновода. Так, на рис. 5 представлена АЧХ коэффициента передачи  $S_{21}$  при размещении ДР на срезе запредельной линии, т. е. при  $\Delta x = 0$  (см. рис. 4). Помимо положений характеристик поглощения мощности при разных типах колебаний ДР, кривая иллюстрирует уменьшение развязки за счет запредельности с ростом частоты. Расчеты показали, что увеличение  $\Delta x$  не влияет на АЧХ коэффициента передачи  $S_{21}$  и наоборот, при положении образца ДР выше стенки запредельности АЧХ резко меняется. Например, в случае положения торца ДР на 0,2 мм выше стенки запредельности АЧХ резко меняется. Например, в случае положения торца ДР на 0,2 мм выше стенки запредельности АЧХ резко меняется. Например, в случае положения торца ДР на 0,2 мм выше стенки запредельности АЧХ резко меняется. Например, в случае положения торца ДР на 0,2 мм выше стенки запредельного волновода АЧХ приобретает вид, показанный на рис. 6. Перемещением ДР в продольном направлении (относительно плоскости стыка между запредельным и регулярным волноводами) можяю увравлять резонансной частотой поглотителя, что иллюстрирует рис. 7.



Рис. 5. АЧХ коэффициента передачи *S*<sub>21</sub> при размещении ДР на срезе запредельной линии



Рис. 6. АЧХ коэффициента передачи  $S_{\rm 21}$  при размещении ДР на 0,2 мм выше стенки запредельности

Таким образом, в результате численного моделирования в первом приближении удается синтезировать конструкцию резонансного поглотителя с заданной АЧХ, т. е. определить размеры ДР и его положение относительно плоскости соединения запредельного и регулярного волно-



Рис. 7. АЧХ коэффициента передачи S<sub>21</sub> при размещении ДР на 0,2 мм выше стенки запредельности и на 0,5 мм ближе к началу запредельности

водов. Уточнение резонансной частоты поглотителя осуществляется с помощью элемента настройки частоты, показанного на рис. 3, поз. 7.

На рис. 8 показаны АЧХ семизвенного ППФ *Ки*-диапазона: исходная и с включенным каскадно-резонансным поглотителем – корректирующим элементом. Видно, что введение корректирующего элемента качественно изменило АЧХ, придав ей эллиптичный вид. Важно заметить, что корректирующий элемент можно ввести в любой частотной точке исходного ППФ. Например, можно установить его в точках на низкочастотном склоне, если этот склон не удовлетворяет требованиям по крутизне. Можно одновременно установит корректирующие элементы и на высокочастотном, и на низкочастотном склонах АЧХ. Интересно отметить, что введение корректирующего элемента не изменяет свойства взаимности ППФ как четырехполюсника, но приводит к его несимметрии. Однако, как показали экспериментальные данные, несимметрия не привела к заметному отличию КСВН по входам ППФ.

Важно, что размера фильтра и его внешний вид сохранились исходными (рис. 9).

#### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное техническое решение обеспечило увеличение крутизны скатов амплитудночастотной характеристики полосно-пропускающего фильтра без увеличения числа его резонансных звеньев, то есть порядка фильтра.

Использование изобретения позволило создать в диапазоне частот 12...15 ГГц семизвенные полосно-пропускающие фильтры с открытыми дисковыми диэлектрическими резонаторами (полоса пропускания – около 1,5 %; потери в полосе – не хуже 1 дБ), обладающие частотными характеристиками, аналогичными девятизвенным полосно-пропускающим фильтрам.



Рис. 8. Частотные характеристики исходного ППФ (а) и фильтра с корректирующим элементом (б)

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(504), 2010



Рис. 9. Семизвенный фильтра на ДР

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фильтры *Ки*-диапазона на диэлектрических резонаторах /*А.В. Бунин, С.В. Вишняков, В.М. Геворкян* и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 18-й Международной Крымской конференции. Севастополь, 8...12 сентября 2008. – 2008. – Т. 2. – С. 474-475.

2. K&L Microwave Product Catalog // www. klmicrowave.com.

3. Высокочастотные керамические материалы и микроволновые элементы / Каталог. – СПб.: ООО «Керами-ка», 2000. – 40 с.

4. Диэлектрические резонаторы / *М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятышев, Л.Г. Гассанов* и др.; под ред. М.Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.

5. Dielectric high-power band-pass filter using quarter-out  $TE_{018}$  image resonator for cellular base stations / T. *Nishikawa, K. Wakino, K. Tsanoda, Y. Ishikawa* // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – 1987. – D-2. – P. 133-136.

6. Пат. RU 2301481 C1, МПК 1/202; 7/10. Полосно-пропускающий фильтр / Геворкян В.М. – Опубл. 20.06.07, Бюл. № 17.

7. Алексейчик Л.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А. Возбуждение открытого диэлектрического резонатора в линии передачи // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т. 17. – С. 2261-2269.

Статья поступила 9 октября 2009 г.

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.77

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕГРАДАЦИИ МОНОЛИТНО-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА GaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ КАНАЛА РНЕМТ

# И. А. Баранов, К. В. Дудинов, А. А. Епифанцев, Г. А. Замятина, А. Н. Коротков, И. Ю. Короткова, О. И. Обрезан, В. А. Пархоменко

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Рассматриваются вопросы научно-методического и технического обеспечения проведения испытаний транзисторов и МИС на гетероструктурах А<sup>Ш</sup>В<sup>V</sup> с целью создания модели ускоренных испытаний изделий. Приводятся результаты испытаний и дается их оценка с точки зрения возможности разработки методик ускоренных испытаний по определению показателей надежности перспективных сверхдолговечных полупроводниковых приборов СВЧ.

The issues of scientific methodological and technical possibilities of testing transistors and MICs on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> heterostructures are under consideration in order to create a model of accelerated testing of products. The results of tests and their assessments are given from the point of view of possibility of creating methodologies on accelerated tests for defining reliability criteria of microwave super long-term semiconductor devices.

КС: РНЕМТ, деградация, энергия активации, ускоренные испытания

Keywords: degradation, activation energy, accelerated tests

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы заметно актуализируется задача разработки методик ускоренных испытаний на безотказность радиоэлектронных изделий и электрорадиокомпонентов, разрабатываемых предприятиями электронной промышленности. Важность разработки адекватных методик очевидна, поскольку речь идет об определении (подтверждении) показателей безотказности для изделий с ресурсом (наработкой) десятки тысяч часов, в частности монолитно-интегральных схем СВЧ на основе транзисторов на GaAs-гетероструктурах (PHEMT). Достоверные сведения о показателях безотказности этих изделий нужны не только для того, чтобы оценивать их соответствие требованиям T3 (TУ), но и для пополнения базы данных об этих показателях, которая используется при оценке надежности радиоэлектронных изделий не экспериментальными методами.

Современная практическая методология ускоренных испытаний изделий электронной техники при форсировании режима испытаний температурой базируется на применении закона Аррениуса-Льюиса, сформулированного во второй половине XIX века для химических реакций, на основе которого во всем мире принято, что скорость изменения контролируемого параметра  $V_{\pi}$  твердотельного ИЭТ может быть описана соотношением:

$$V_{\rm n} = C_{\rm a} \exp(-E_{\rm a}/K_{\rm b} \cdot T_{\rm a}),\tag{1}$$

где  $V_n$  – скорость изменения параметра «п»;  $C_a$  – размерный коэффициент (чаще всего константа);  $E_a$  – энергия активации процессов, приводящих к деградации контролируемого параметракритерия годности;  $K_b$  – постоянная Больцмана;  $T_a$  – температура ИЭТ, К.

Практически всегда при использовании соотношения (1) предполагают, что параметры  $C_a$  и  $E_a$  являются постоянными величинами (не зависят от температуры).

В этом случае  $V_n$  = const и из (2) определяют коэффициент ускорения испытаний (сокращения их продолжительности) при изменении температуры, если известно значение  $E_a$ :

$$K_{\rm yc\kappa} = \frac{V_{\rm n} \left(T_{\rm a} = T_{\rm \phi}\right)}{V_{\rm n} \left(T_{\rm a} = T_{\rm n}\right)}.$$
<sup>(2)</sup>

Коэффициент ускорения, найденный таким способом, используют для определения длительности испытаний в форсированном режиме  $t_{\phi}$ , если известна (задана) длительность нормальных испытаний  $t_{\mu}$ . Тогда

$$t_{\phi} \Big|_{T_{\mu c \pi} = T_{\phi}} = \frac{t_{\mu} \Big|_{T_{\mu c \pi} = T_{\mu}}}{K_{\nu c \kappa}}$$

Характеристический параметр закона Аррениуса-Льюиса – энергия активации протекания химических реакций – в применении к полупроводниковым приборам является величиной, зависящей от конструктивных характеристик, электрофизических свойств материалов, технологических особенностей изготовления структур, т. е. является характеристической величиной для типа прибора и/или технологического процесса. Определенная для одного типа прибора, энергия активации может быть использована для другого типа только с определенной осторожностью. При изменении материала, а значит, конструктивно-технологических свойств активной области полупроводниковой структуры нового класса полупроводниковых приборов определение энергии активации является необходимой процедурой.

За рубежом исследованию надежностных свойств транзисторов на А<sup>Ш</sup>В<sup>V</sup>-гетероструктурах уделяется большое внимание: появляются все новые структуры и каждый новый транзистор или микросхема (МИС) подвергаются надежностным исследованиям – определительным испытаниям большой выборки, объем которой определяют по правилам планирования испытаний (например, [1–4]).

В соответствии с общими правилами [4] определительные форсированные испытания должны проводиться в два этапа:

1) определение области допустимого форсирования с соблюдением принципа автомодельности;

2) проведение испытаний совокупности образцов изделия при различных значениях форсирующего фактора.

По результатам испытаний проводится оценка значений параметров модели ускоренных

испытаний изделия и типовых значений показателей безотказности.

В настоящей работе приведены результаты исследования характеристик деградации свойств МИС малой мощности на РНЕМТ при высокой температуре активной области полупроводниковой структуры-канала, целью которого является получение исходных данных для разработки методики ускоренных испытаний на безотказность транзисторов и МИС на GaAs-гетероструктурах.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика ускоренных испытаний должна удовлетворять ряду условий.

1. Продолжительность ускоренных испытаний по категории длительных испытаний на безотказность должна быть приемлемой для производства, т. е. не превышать установленной в нормативных документах (ГОСТ) длительности нормальных кратковременных испытаний на безотказность – порядка 500...2 000 ч.

2. Уровень форсирующего фактора должен быть соответствующим, чтобы при приемлемой длительности испытаний изменение параметра-критерия годности было достаточным для уверенной его регистрации измерительными приборами.

3. Уровень форсирующего фактора не должен превышать границы области его значений, при которых еще не нарушаются физические закономерности протекания процессов, вызывающих изменение во времени контролируемого функционального (или диагностического) параметра.

4. Значение форсирующего фактора при проведении испытаний для оценки параметров модели ускоренных испытаний должно быть близким к эксплуатационному значению.

Традиционным (эффективным) форсирующим фактором для твердотельных ИЭТ (транзисторов, конденсаторов, резисторов) является их температура, точнее температура тех областей приборов, процессы в которых определяют деградацию функциональных параметров приборов в процессе наработки (эксплуатации).

Ниже приводятся результаты испытаний маломощных МИС на PHEMT при повышенных температурах с целью оценки возможных параметров форсированного режима ускоренных испытаний.

Маломощные МИС представляют собой усилительный каскад на PHEMT с нитевидным секционированным затвором, работающий в режиме автосмещения: в цепи истока включено сопротивление  $R_{\mu}$ , в цепи стока – сопротивление  $R_{c}$ . На кристалле размещены и другие элементы электрической схемы (рис. 1). Практически весь ток, потребляемый от внешнего источника питания, протекает через транзистор и резисторы в цепи стока и истока, поэтому измеряемый ток источника отождествляется с током стока. В общем случае все наблюдаемые изменения тока питания (тока стока) при изменении температуры или в процессе наработки при испытаниях являются следствием изменений как свойств активного элемента, так и параметров резисторов в электрической схеме. Если наблюдаемые изменения контролируемого параметра – тока стока – пытаться анализировать с помощью соотношения Аррениуса, то в результате будут определены некие интегральные параметры соотношения (2) для микросхемы конкретного типа. Значения параметров, в первую очередь  $E_{a}$ , могут отличаться от привычных значений для GaAs ПТШ или опубликованных значений для PHEMT или MИС СВЧ других типов [5].

Испытаны две выборки МИС (в количестве N = 8 при  $T_{\text{корл}} = 220$  °С и N = 6 при  $T_{\text{корл}} = 200$  °С).



Рис. 1. Схема электрическая МИС на РНЕМТ с автосмещением:  $R_{\mu} = R5; R_{c} = R1 + R2$ 

Выборки МИС для испытаний сформированы из текущей продукции, причем подобраны три группы МИС: штатные МИС с автосмещением и  $I_c \approx 55...65$  мА; штатные образцы с автосмещением в режиме повышенного тока стока,  $I_c \approx 75...90$  мА; образцы МИС в режиме отсутствия смещения ( $U_3 = 0$ ) с  $I_c > 100$  мА.

Соответственно МИС имеют разную испытательную температуру канала входящего в их состав РНЕМТ при фиксированной температуре корпуса МИС.

В табл. 1 представлены параметры электрического режима и элементов схемы испытанных МИС.

Из таблицы видно, что производственная настройка МИС на требуемые функциональные параметры ( $K_{\rm m}$  и  $K_{\rm y}$ ) достигается при самых различных сочетаниях значений сопротивлений  $R_{\rm c}$  и  $R_{\rm u}$ . Это обстоятельство оказывает заметное влияние на результаты оценки энергии активации по однопараметрической модели Аррениуса (см. разд. 3), поскольку регистрируемые изменения тока МИС определяются не только изменением свойств активного элемента – PHEMT, но и изменениями  $R_{\rm c}$  и  $R_{\rm u}$ .

На рис. 2 приведены типовые зависимости изменения тока  $I_c$  (для представителей каждой из групп МИС с  $R_c \neq 0$  и  $R_u \neq 0$ ) от наработки  $t_u$  в испытательном режиме (далее – деградационные характеристики тока) при температуре корпуса МИС 220 °C. Там же приведены расчетные зависимости  $T_{uan}(t_u)$ .

На рис. З приведены деградационные характеристики МИС с  $R_{\mu} = 0$  при  $T_{\text{корп}} = 220$  и 200 °C. По существу, эти характеристики отражают деградацию полупроводниковой структуры активного элемента – PHEMT: омических контактов, затвора и собственно канала.

Из рис. 2 и 3 видно, что на деградационной характеристике тока можно выделить два участка. На начальном участке  $(0...t_{\rm H})$  происходит «тренировка» МИС и зависимость  $I_{\rm c}(t)$  имеет различный вид для различных образцов: от «быстро» спадающего монотонного до нелинейного немонотонного с максимумом тока при  $0 < t_{\rm H} < t_{\rm H}$ .

Таблица 1

Номер МИС	<i>Т</i> <sub>корп</sub> , °С	<i>R</i> <sub>с</sub> , Ом	<i>R</i> и, Ом	<i>I</i> <sub>с.ср</sub> , мА	$T_{\text{кан.ср,}}$ °C	V <sub>с.ср</sub> , А/ч	Интервал испытаний (ч), для которого определены средние значения параметров <i>I</i> <sub>c</sub> , <i>V</i> <sub>c</sub> , <i>T</i> <sub>кан</sub>
1995		13,77	11,37	59,9	230,6	$-2,1852\cdot10^{-5}$	
1996	219	19,26	6,97	58,6	231,02	$-2,5264 \cdot 10^{-5}$	43-409
1997		20,46	17,1	59,2	229,9	$-1,7817 \cdot 10^{-5}$	
5684		30,58	4,21	52,7	231,7	-7,6497·10 <sup>-5</sup>	
7139	220	34,73	7,86	43,8	230,6	$-2,2219\cdot10^{-5}$	55-130
7140		35,89	3,93	43,04	231,2	$-1,4754 \cdot 10^{-5}$	
7503	200	29,2	1,5	60,2	211,7	$-1,8375 \cdot 10^{-5}$	8-50
7504	200	24,52	3,36	67	211,9	$-1,7404 \cdot 10^{-5}$	55-130
1773		9,34	1,51	87,9	243,2	$-5,2409 \cdot 10^{-5}$	
1777	220	20,48	3,65	139,2	236,4	-9,3166·10 <sup>-5</sup>	55-130
4950		3,69	1,87	97	246,2	$-7,8586 \cdot 10^{-5}$	
7079		21,78	2,93	84,43	216,3	-4,77·10 <sup>-5</sup>	55-130
7080	200	20,28	2,15	91,33	217,02	$-5,7247 \cdot 10^{-5}$	55-130
7081		26,2	4,86	109,4	225,9	$-1,7383 \cdot 10^{-4}$	8-50
7141	220	4,55	0	93,8	245,4	$-1,7067 \cdot 10^{-4}$	55 120
7112	220	10,41	0	125,8	247,5	$-1,2449 \cdot 10^{-4}$	55-150
4931	200	6,86	0	108,6	224,4	$-1,11\cdot10^{-4}$	55-130

Параметры МИС малой мощности, испытанных при высоких температурах канала РНЕМТ (U<sub>п</sub> = 6 B)



Рис. 2. Деградационные характеристики тока стока МИС при  $T_{\text{корп}} = 220 \text{ °C}:$ ——  $I_{\text{c}}(t_{\mu}); -- T_{\text{кан}}(t_{\mu})$ 

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(504), 2010



Рис. 3. Деградационные характеристики МИС при «нулевом» смещении ( $R_{\mu} = 0$ )

Зависимость с «быстрым» спадом характерна для МИС с малыми значениями  $R_{\mu}$  и повышенной температурой канала, зависимость с максимумом – для МИС с рабочими значениями тока стока, как правило, менее 75 мА.

На участке  $t_{\mu} > t_{\mu}$  наблюдается относительно быстрое снижение скорости деградации в процессе наработки, характеристика  $I_c(t_{\mu})$  «выполаживается».

Зависимость тока стока испытанных образцов МИС от наработки при  $t_{\mu} > t_{\mu}$  в испытательном режиме имеет ограниченно нелинейный вид типа:

$$I_{c}(t_{u}) = I_{0} + C_{M} t_{u}^{M}$$
(3)

 $(C_{M} -$ константа;  $0,7 \le M \le 1)$ , а при  $t_{\mu} > t_{c}$  близка к линейной.

Это, в частности, означает, что линейная аппроксимация  $I_c(t_{\mu})$  на относительно коротком интервале  $t_c \leq t_{\mu} \leq t_{\kappa}$  может рассматриваться как граница снизу при прогнозировании наработки до отказа по соотношению (1) по заданному критерию допустимого уменьшения тока стока.

Нелинейность зависимости  $I_c(t_n)$ , означающая отступление от однопараметрического соотношения Аррениуса, усложняет процедуру интерпретации результатов исследовательских испытаний при повышенных температурах канала.

Основная трудность интерпретации деградационных характеристик полупроводниковых приборов вообще, и МИС на PHEMT в частности, связана со значительным разбросом их свойств в пределах партии и от партии к партии. На рис. 3 видно что в малой выборке PHEMT нет однозначного соответствия между скоростью деградации тока стока и температурой канала транзистора, как это должно быть в соответствии с однопараметрическим соотношением Аррениуса. Или это соотношение не столь универсально, как принято считать, и необходима более сложная модель для описания деградационных характеристик при высоких температурах канала полупроводникового прибора, в частности PHEMT, или испытываемые выборки должны быть б льших размеров для получения статистически значимых зависимостей изменения скорости деградации параметров при изменении температуры приборов.

Для СВЧ МИС на PHEMT положение осложняется наблюдаемой неоднозначностью связи между изменением в процессе наработки НЧ- и СВЧ-параметров: для одной выборки маломощ-

ных МИС с падением тока стока в процессе испытаний ухудшаются и функциональные параметры, например  $K_{yc}$  и  $K_{m}$ , тогда как для другой такая закономерность отсутствует. И это связано с тем, что МИС состоят из конечного числа пассивных и активных элементов, значения параметров которых изменяются во времени по разным законам, что и приводит к отмеченному выше результату.

#### 3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ

Для оценки величины  $E_a$  воспользуемся соотношением (1) и предположим, что  $V_n = V_{cp}$ , где  $V_{cp}$  – среднее значение на традиционно исследуемом интервале наработки, в данном случае  $t_{\mu}...t_{\kappa}$  в пределах  $0...t_{\kappa}$ .

В соответствии с (1) имеем

$$\ln(|V_{cp\,i}|) = \ln(C_{a}) - E_{a}/(K_{b}T_{KaH\,i}).$$
(4)

Для каждого образца суммарной выборки МИС, испытанных при температуре корпуса 200 и 220 °С, на заданном интервале *t*<sub>1</sub>...*t*<sub>2</sub> определяются:

1. Зависимость тока стока от времени в режиме испытания  $I_{ch}(t)$  и режиме контроля  $I_{cc}(t)$  в виде (5)

$$I_{cc}(t) = A_c + B_c t^{Mc},$$
  

$$I_{ch}(t) = A_h + B_h t^{Mh},$$
(5)

где  $M_c, M_h, A_c, B_c, A_h, B_h$  – соответствующие константы; 0,4 <  $M_{c,h}$  < 1,5.

*Примечание*. Индексы *с* и *h* здесь и далее означают принадлежность параметров и констант соответственно к режиму контроля ( $T_{\text{корп}} = 25 \text{ °C}$ ) и режиму испытаний ( $T_{\text{корп}} = 220 \text{ и } 200 \text{ °C}$ ).

2. Средние значения скорости изменения тока стока  $V_{coi}(t)$  по стандартному правилу:

$$V_{\rm cp\,i}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dI_{\rm cc}}{dt} dt = B_{ci} \frac{t_2^{Mi} - t_1^{Mi}}{t_2 - t_1}.$$
(6)

3. Средние значения температуры канала:

$$T_{\text{кан.ср}\,i} = T_{\text{осн}} + P_{\text{расс.ср}\,i} R_T$$

где

$$P_{\text{pacc.cp}\,i} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int I_{ch} \left( U_{\pi} - I_{ch} \left( R_c + R_{\mu} \right) \right) dt =$$

$$= A_h \left( U_{\pi} - A_h R \right) \frac{1}{t_2 - t_1} \left\{ \left[ B_h \left( U_{\pi} - A_h R \right) \left( t_2^{m.i+1} - t_1^{m.i+1} \right) \right] - B_h R \left( t_2^{2m.i+1} t_1^{2m.i+1} \right) \right\},$$
(7)

 $R = R_{c} + R_{\mu}; m.i \rightarrow M_{n.i}$  – значение  $M_{n}$  для *i*-го образца.

Примечание. Значение R<sub>т</sub> определяется расчетным путем по [6] или другим приемлемым способом.

По определенным таким образом значениям  $V_{cp i}$  и  $T_{кан.cp i}$  находится аппроксимирующая функция в виде

$$\ln(|V_{cp}|) = C_{a} + C_{x}X,$$
(8)

где  $X = 1000/T_{\text{кан}}$ .

Сопоставляя (4) и (8), находим

$$C_{a} = \exp(C_{a})$$
 и  $E_{a} = -1000 C_{x} K_{b}$ . (9)

В табл. 2 и 3 представлены результаты определения значений Е, по данным испытаний – термоэлектропрогона (ТЭП) двух выборок маломощных МИС на различных интервалах  $t_1...t_2$ при  $t_{\rm H} \leq t_{\rm H} \leq t_{\rm K}$ .

Таблица 2

Групповые значения E <sub>a</sub> для выборки МИС № 1	
на интервалах наработки при Т <sub>корп</sub> = 220 °C	
$(T_{\text{кан.cp}} \sim 247230 \text{ °C}; T_{\text{кан max}} \sim 274240 \text{ °C})$	
$E_a$ , эB, в интервале наработки, ч	

Количество		$E_{\rm a}$ , эВ, в интервал	те наработки, ч							
МИС	050	34104	90130	55130						
в выоорке										
		$I_{\rm c}(t_{\rm M}) = I_0 + B t_{\rm M}^{\ M}$								
8	1,233(0,5577)	2,026(0,7689)	-	1,844(0,7137)						
5	4,076(0,9942)	2,485(0,9842)	2,11(0,9454)	2,466(0,9304)						
	$\tilde{I}_{\rm c}(t_{\rm H}) = 1 + C t_{\rm H}^{M}$									
8	2,349(0,6577)	1,035(0,5627)	-	1,646(0,8656)						
5	3,056(0,9921)	1,452(0,9794)	1,16(0,9294)	1,743(0,8755)						

Примечание. В скобках указаны значения коэффициента корреляции по соотношению (8).

Таблица 3

на интервалах наработки при  $T_{\text{корп}} = 200 \text{ °C}$ ( $T_{\text{кан.ср}} \sim 227...210 \text{ °C}; T_{\text{кан max}} \sim 252...218 \text{ °C}$ )  $E_a$ , эВ, в интервале наработки, ч Количество МИС 34...104 8...50 55...130 90...130 в выборке  $I_{\rm c}(t_{\rm M}) = I_0 + B t_{\rm M}^{M}$ 3,42 (0,9529) 6 2,703 (0,9881) 2,947(0,9581) 3,087 (0,8812) 3,055 (0,9332) 4\*  $\tilde{I}_{c}(t_{\mathrm{H}}) = 1 + C t_{\mathrm{H}}^{M}$ 2,389 (0,88) 6 1,667 (0,9994) 1,871(0,9668) 2,042 (0,9344) 4\* 2,124 (0,8605)

Групповые значения  $E_a$  для выборки МИС № 2

Примечания. 1. В скобках указаны значения коэффициента корреляции по соотношению (8).

2. Знаком \* отмечено количество работоспособных образцов на интервалах наблюдения.

Данные, приведенные в табл. 2 и 3, требуют комментарий.

1. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных по соотношению (8) для каждой из выборок в целом незначителен, особенно на начальном участке ТЭП, когда происходит тренировка-стабилизация тока стока МИС.

Гораздо выше коэффициент корреляции для ранжированных выборок, т. е. тех, из которых исключены образцы с обратной зависимостью скорости деградации от температуры основания. В сумме в двух выборках таких "неправильных" образцов набралось около 30 %.

Это много, но результат получен для выборок, составленных из образцов текущей продукции, принадлежащих к разным партиям в условиях нестабильного технологического процесса.

2. В табл. 2 и 3 приведены результаты оценки  $E_a$  с использованием зависимостей для абсолютного  $I_c(t_u) = A + Bt_u^M - cm.$  (3) – и относительного

$$\tilde{I}_{c}(t_{\mu}) = I_{c}(t_{\mu}) / I_{c}(t_{\mu} = t_{\mu}) = 1 + Ct_{\mu}^{M}$$
(10)

изменений тока при ТЭП.

Значения  $E_a$  для этих зависимостей существенно отличаются. Это означает, что скорость деградации тока зависит не только от температуры, но и от параметра, который является функцией абсолютного значения тока [4].

3. Из таблиц видно, что величина  $E_a$  изменяется в процессе ТЭП; причем к концу 130-часового интервала наблюдается некоторое увеличение ее группового значения для  $T_{\text{корп}} = 200 \text{ °C}$  и уменьшение – для  $T_{\text{корп}} = 220 \text{ °C}$ , при том, что зависимость  $I_c(t)$  с увеличением t все более приближается к линейной. Наилучшее приближение аппроксимирующей функции (8) к экспериментальным данным отмечается для испытанных выборок на интервале 34...104 ч.

4. На начальном участке ТЭП (0...50 ч), на котором происходит стабилизация свойств маломощных МИС, видно увеличение  $E_a$  с увеличением температуры; на последующем интервале (55...130 ч) – некоторое уменьшение (см. табл. 4).

Таблица 4

T °C	$\mathbf{P}_{\mathbf{u}\mathbf{u}} I(t)$	<i>Е</i> а, эВ, в	интервале	наработки, ч
I корп, С	Бид $I_{\rm c}(l_{\rm H})$	050	55130	0130
220	$I_{\rm c}(t_{\rm M}) = I_0 + B t_{\rm M}^{M}$	4,08	2,67	3,93
200		3,42	2,95	2,85
220	$\tilde{I}_{a}(t_{\rm W}) = 1 + C t_{\rm W}^{M}$	3,06	1,74	3,03
200		2,4	1,87	1,76

Сопоставление значений  $E_a$  для выборок, испытанных при  $T_{\text{корп}} = 220$  и 200 °C

Достоверность этих зависимостей не очень велика, поскольку размер выборок мал, а разброс индивидуальных свойств МИС велик. Это обстоятельство означает, что  $E_a$ , возможно, является функцией температуры, и для обоснованного ее определения испытания изделий необходимо проводить, по крайней мере, при 4-х значениях температуры корпуса: минимальное значение температуры должно быть, по возможности, приближено к рабочему.

5. Приведенные в табл. 2 и 3 значения  $E_a$  получены в предположении, что эффективное значение температуры канала соответствует температуре, определенной с помощью микропи-

рометра 14ИК1, или расчетной температуре теплового поля структуры, усредненной по площади «пятна» микропирометра.

В то же время известно, что локальное значение  $T_{\rm кан}$ , определенное с помощью современной аппаратуры (разрешение – 0,5...1,0 мкм) [7], может на 30...50 % превышать среднее по структуре значение  $T_{\rm кан}$ .

В зависимости от выбора способа определения эффективной температуры результаты оценки энергии активации могут заметно измениться. Это, в частности, затрудняет сопоставление с данными зарубежных публикаций. По этим данным [5,8], возможные значения  $E_a$  для транзисторов и МИС с гетероструктурами  $A^{III}B^{V}$ , определенные по критерию относительного 10-процентного (или 20-процентного) падения тока стока, лежат в пределах 1...2 эВ.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Продолжительность участка "тренировки" маломощных МИС на РНЕМТ при температуре их основания (корпуса) 200...220 °С и температуре канала 240...260 °С составляет около 20 ч. Это означает, что если ставить задачу стабилизации параметров маломощных МИС в составе технологического процесса на пластине в обесточенном состоянии, то температура МИС для термостабилизации должна быть порядка 250 °С при длительности термопрогона 40...50 ч.

2. Температуру канала РНЕМТ с нитевидным затвором в маломощных МИС порядка 250 °С, по-видимому, следует рассматривать как предельную для выбора режима форсирования при разработке методики ускоренных испытаний МИС: при этой температуре еще сохраняется автомодельность процесса деградации тока стока (о чем свидетельствует вид зависимости изменения тока стока в испытательном и контрольном режимах), но процесс деградации идет уже достаточно быстро, чтобы длительность испытаний была приемлемой.

3. С целью получения достоверных результатов определения параметров модели ускоренных испытаний МИС и транзисторов выборки для предварительных испытаний необходимо формировать из изделий с наименьшим возможным разбросом по значениям рабочего тока транзисторов и параметров элементов электрической схемы МИС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перотте А.П., Карташов Г.Д., Цветаев К.Н. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. – М.: Сов. радио, 1968.

2. *Nelson W., Kielpinski T.J.* Theory of optimum censored accelerated life tests for normal and lognormal life distribution // Technometrics. – 1976. – Vol.18, No1, February.

3. ГОСТ 27.410-87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – М.: Госстандарт, 1988.

4. ОСТ 11 336.938-83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.

5. Новая технологическая линия по выпуску GaN транзисторов фирмы NITRONEX // GS MANTECH Conference Digest, May 14-17, 2007. – 2007. – P. 83.

6. *Linsted R.D., Surty R.J.* Steady state junction temperatures of semicondactor chips // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1972. – Vol. ED-19, No1, January. – P. 41-44.

7. Интегрированный микрораммановский ИК-зонд для мониторинга саморазогрева в AlGaN/GaN транзисторных структурах / *A. Saura* et al. // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2006. – Vol. 53, No 10. – P. 2438-2447.

8. Результаты исследования надежности InP НЕМТ-транзисторов и МИС на их основе субмм-диапазона // IEEE Electron Device Letters. – 2003. – Vol. 24, No 6.

Статья поступила 25 мая 2009 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛООТВОДА В ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА ПРИ ДВУХЪЯРУСНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ КРИСТАЛЛОВ ТРАНЗИСТОРОВ

#### В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина

ФГУП НПП «Исток», г. Фрязино

Представлен анализ возможности теплоотвода от кристаллов транзисторов при их двухьярусном расположении через дополнительную теплопроводящую пластину. Приведены результаты оптимизации геометрических размеров теплопроводящей пластины в зависимости от теплопроводности ее материала и мощности, выделяемой кристаллом транзистора. Анализ осесимметричной тепловой модели мощной гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона проведен с использованием трехмерной программы расчета.

The analysis of possibility of heat sinking from transistor chips at their double-deck arrangement through an additional heat-conducting plate is given. The results of optimization of geometrical dimensions of heat sinking plate versus heat conductance of its material and power generated by transistor chip are presented. The analysis of an axis-symmetrical heat model of high-power microwave hybrid integrated circuit was made using 3D calculation program.

КС: транзистор, двухъярусное расположение, теплоотвод, ГИС, СВЧ-диапазон

Keywords: transistor, double-deck arrangement, heat sinking, HIC, microwave range

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания радиоэлектронной аппаратуры специального назначения необходимы усилители мощности СВЧ-диапазона с современными полупроводниковыми транзисторами и гибридными интегральными схемами на их основе. Отечественные полупроводниковые приборы, например полевые транзисторы с диодом Шотки (ПТШ), уступают по электрическим характеристикам лучшим зарубежным аналогам. Так, транзистор TGF (производство США) имеет выходную мощность 5 Вт при размерах кристалла 3×1×0,1 мм, в то время как отечественный транзистор с такими же размерами кристалла имеет мощность в два раза ниже. В связи с этим для получения необходимых характеристик приходится использовать большее количество транзисторов в схеме. Например, для получения требуемой мощности приходится увеличивать число каскадов усилителей либо наращивать мощность отдельных каскадов за счет параллельного включения полупроводниковых приборов, например ПТШ.

В настоящее время для получения необходимой мощности сигнала в выходных каскадах усилителей мощности СВЧ-диапазона складывается мощность до 16 транзисторов. При этом для суммирования и разделения подводимой и отводимой мощности сигнала используются

пленочные элементы микрополосковых плат (МПП), такие, как кольцевые делители мощности, направленные штыревые ответвители (мосты Ланге) и другие, которые занимают основную площадь МПП и резко снижают массогабаритные характеристики ГИС и РЭА в целом. Кроме того, применение большого числа протяженных пленочных элементов приводит к увеличению потерь мощности проходящего по ним сигнала и, как следствие, снижает эффективность наращивания мощности за счет увеличения числа ПТШ.

Обычно кристаллы ПТШ устанавливаются на выступ металлического основания, расположенный в отверстии платы или между двумя половинками МПП. Высота металлического выступа обеспечивает совпадение плоскостей лицевых поверхностей кристаллов ПТШ и лицевой поверхности МПП, что, в свою очередь, позволяет использовать достаточно короткие соединительные проводники между контактными площадками кристаллов ПТШ и топологическим рисунком МПП.

Однако существуют конструкции радиоэлектронных устройств, в том числе и гибридных схем, в которых полупроводниковые приборы, как корпусированные, так и бескорпусные, при параллельном включении располагаются не рядом, а один над другим [1,2].

#### 2. ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ МОЩНОЙ ГИБРИДНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

В рассматриваемой ГИС СВЧ-диапазона кристаллы транзисторов расположены в два яруса (рис. 1), причём их области тепловыделения обращены друг к другу.



Рис. 1. Расчётная область фрагмента мощной гибридной ИС с двумя кристаллами транзисторов:

1 – кристалл верхнего транзистора (GaAs); 2 – кристалл нижнего транзистора (GaAs);
 3 – теплопроводящая пластина, скоба (MD-50 или Cu); 4 – теплопроводящее основание (MD-50);
 5 – области тепловыделения транзисторов

От нижнего транзистора 2 тепло отводится непосредственно через выступ теплопроводящего основания 4, выполненного из сплава МД-50. А от верхнего транзистора l – через дополнительную теплопроводящую пластину, скобу 3, и далее через то же теплопроводящее основание 4. В связи с этим максимальная температура верхнего транзистора  $t_{\rm B\ max}$  превышает максимальную температуру нижнего транзистора  $t_{\rm H\ max}$ .

Условием стабильной работы ГИС является примерное равенство условий работы транзисторов, именно по этой причине стараются использовать транзисторы с одинаковыми характеристиками. Обычно подбирают кристаллы транзисторов, изготавливаемые на одной эпитаксиальной структуре и в одном технологическом цикле. Однако в связи с особенностями конструкции ГИС транзисторы находятся в разных тепловых условиях. Работоспособность конструкции тем выше, чем меньше перегрев верхнего транзистора относительно нижнего. Поэтому содержанием работы являлись расчёт температурных полей этой конструкции, нахождение максимальных температур обоих транзисторов и определение условий минимизации разности этих температур. Кроме того, исследовалось влияние геометрических характеристик и материала скобы в широком диапазоне коэффициента теплопроводности  $\lambda$  – от 0,1 до 2 Вт/(мм·К) – на величину перегрева верхнего транзистора относительно нижнего.

#### 3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Поле температур определялось с помощью трёхмерной вычислительной программы, реализующей решение дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием итерационной схемы Ньютона-Раффсона. Решалась задача нахождения трёхмерного стационарного температурного поля, для которой дифференциальное уравнение теплопроводности выглядит следующим образом:

$$\Delta^2 t = 0. \tag{1}$$

Уравнение (1) дополняется необходимыми граничными условиями:

- нижняя поверхность основания имеет постоянную температуру: t = 0 °C;

– на поверхностях транзисторов 5 выделяется тепловая мощность Q, т. е. известна плотность теплового потока:  $q = -\lambda(dt/dn)$ ;

– фронтальная и левофланговая плоскости конструкции являются её плоскостями симметрии (т. е. рассчитывается 1/4 часть). На них выполняется условие симметрии: dt/dn = 0;

- остальные поверхности конструкции находятся в условиях теплоизоляции.

#### 4. ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка результатов, полученных по трехмерной программе, проводилась с помощью программы «Интерполяция полиномами» (автор И. П. Чепурных). Программа позволяет делать прямое представление полинома в виде  $10^{P(y)}$ , где  $y = \log(x)$ , и проводит поиск коэффициентов интерполяционного полинома  $a_{i}$ .

Таким образом, общий вид полинома:

$$y = 10^{a_0 + a_1 \cdot \lg x + a_2 (\lg x)^2 + \dots + a_i (\lg x)^i}$$

В данном случае, в качестве *у* выступает максимальная температура верхнего транзистора; а в качестве *х* – коэффициент теплопроводности материала скобы:

$$t_{\rm Bmax} = 10^{a_0 + a_1 \cdot \lg \lambda + a_2 (\lg \lambda)^2 + \ldots + a_i (\lg \lambda)^i}$$

#### 5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматривались транзисторы двух размеров, мм (рис. 2).





Рис. 2. Кристаллы транзисторов (заштрихована область тепловыделения): a - Q = 0.9 Вт ;  $\delta - Q = 0.9$ ; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 Вт

На рис. 3, 4 показаны все варианты геометрических размеров скобы для двух, упоминаемых выше размеров транзистора.







Рис. 4. Различные варианты геометрии скобы для транзистора с размерами кристалла  $3,0\times1,0\times0,1$  мм и Q = 0,9; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 Вт

В табл. 1 приведены результаты расчётов температурных полей по трехмерной программе для различных геометрических вариантов скобы, соответствующих рис. 3, и кристаллов размерами  $1,1\times0,5\times0,1$  мм. В качестве материала скобы рассматривались MD-50 и Cu. Представлены максимальные температуры верхнего и нижнего кристаллов и их перепад при Q = 0,9 Вт.

Таблица 1

## Максимальные температуры верхнего и нижнего кристаллов транзисторов и перепад температур между ними в зависимости от геометрических параметров и материала скобы при Q = 0,9 Вт с каждого кристалла

Геометрия скобы (рис. 2, <i>a</i> ;	Материал скобы	Максимальна кристалла транзистор	я температура ра (1,1x0,5x0,1 мм), °С	Перепад температур между
рис. 3)		верхнего	нижнего	кристаллами, °С
	MD-50	20,49	13,34	7,15
ADCDEA	Cu	18,57	14,01	4,56
	MD-50	19,04	13,31	5,73
AFIDEA	Cu	16,24	12,48	3,76
AGJDEA	MD-50	18,89	13,31	5,58
	Cu	16,14	12,48	3,66
AHKDEA	MD-50	18,89	13,31	5,58
	Cu	16,14	12,48	3,66
ABLQEA	MD-50	19,45	13,34	6,11
	Cu	16,50	12,51	3,99
	MD-50	19,44	13,34	6,10
ADMPEA	Cu	16,49	12,50	3,99

Геометрия скобы	Материал	Максимальна: кристалла транзистор	я температура ра (1,1x0,5x0,1 мм), °С	Перепад температур
(рис. 2, <i>a</i> ; рис. 3)	СКООЫ	верхнего	нижнего	между кристаллами, °С
	MD-50	17,17	13,30	3,87
AFKQEA	Cu	15,01	12,48	2,53
AGSQEA	MD-50	16,67	13,29	3,38
	Cu	14,68	12,47	2,21
AFNPEA	MD-50	17,06	13,30	3,76
	Cu	14,94	12,48	2,46
ACODEA	MD-50	16,41	13,29	3,12
AGOPEA	Cu	14,51	12,47	2,04

#### Продолжение табл. 1

В табл. 2 представлены результаты расчётов для кристаллов транзисторов размерами  $3 \times 1 \times 0,1$  мм при Q = 0,9; 2,5; и 5 Вт.

В части А табл. 2 приведены результаты расчётов по трехмерной программе для геометрических вариантов скобы, соответствующих рис. 4. В качестве материала скобы рассматривались MD-50 и Cu. Для этих вариантов рассчитаны максимальные температуры верхнего и нижнего кристаллов и их перепад.

В части В табл. 2 мы видим результаты обработки расчётов по трехмерной программе. Обработка проводилась по методике, описанной в разд. 4. Для выяснения характера зависимости  $t_{\text{в max}}$  от  $\lambda$  была проведена серия расчётов температурных полей конструкции по трехмерной программе для всех рассматриваемых геометрических вариантов скобы при различных мощностях тепловыделения с кристаллов размерами  $3 \times 1 \times 0,1$  мм. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  брался в диапазоне 0,1...2,0 Вт/(мм·К).

На рис. 5 представлены результаты расчетов температурного поля конструкции (для варианта 1<sup>1</sup> из табл. 2), полученные по трехмерной программе.

В табл. 3 приведены расчётные данные по максимальным температурам кристаллов транзисторов при Q = 0,9 Вт для варианта 1<sup>1</sup>. Полученные значения  $t_{\text{в max}}$  в зависимости от  $\lambda$  обрабатывались далее по программе «Интерполяция полиномами» (см. разд. 4). Результат обработки – коэффициенты  $a_i$  интерполяционного полинома для каждого геометрического варианта скобы. С их помощью возможен аналитический расчёт  $t_{\text{в max}}$  для любого  $\lambda$  в диапазоне 0,1...2,0 Вт/(мм·К) и конкретного варианта размеров геометрии скобы.

На рис. 6-8 представлены зависимости  $t_{\text{в max}}$  от  $\lambda$  для различных геометрических вариантов скобы (1<sup>1</sup>...12<sup>1</sup>; 1<sup>11</sup>....12<sup>11</sup>; 1<sup>111</sup>....12<sup>11</sup>) при Q = 0,9; 2,5; 5,0 Вт соответственно.

На рис. 9 видны области распределения  $t_{\text{в max}}$  (для рассматриваемых вариантов скобы) в зависимости от  $\lambda$  при различных мощностях, выделяемых на кристалле. Варианты геометрии  $1^{1}...1^{III}$ и  $12^{1}...12^{III}$  ограничивают области тепловыделения. Таблица 2

Расчётные данные для кристаллов транзисторов размерами 3X1×0,1 мм при мощностях тепловыделения с каждого кристалла 0,9; 2,5; 5,0 Вт

			V						B		
Номер вари- анта	Геометрия скобы (рис. 2,6;	Материал скобы	Максимальн температура транзистора	ая 1 кристалла ,°С	Перепад темпе-		Коэфф для расчё при соотве	ициент <i>а<sub>і</sub> ин</i> эта t <sub>в max</sub> в ди гствующем і	терполяционнс апазоне л = 0, 1 сеометрической	ого полинома 12,0 Вт/(ммК) и варианте скоб	E
	p		верхнего	нижнего	puryp, V	i = 0	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5
					= Õ	= 0,9 BT					
$1^{I}$	ABCD'E'A	MD-50 Cu	8,15 6,18	$1,6 \\ 1,6$	6,55 4,58	0,585725	-0,382759	0,263196	-0,0369738	-0,0690063	-0,00738025
2 <sup>1</sup>	AB'C'D'E'A	MD-50 Cu	7,52 5,63	$1,6 \\ 1,6$	$5,91 \\ 4,03$	0,531783	-0,417926	0,259369	-0,0038324	0,0255468	0,0681397
$3^{I}$	AFID'E'A	MD-50 Cu	7,32 5,44	1,6 1,6	5,72 3,84	0,505208	-0,449854	0,26237	0,0264607	0,01124	0,0296025
$4^{I}$	AGJD'E'A	MD-50 Cu	7,29 5,38	$1,6 \\ 1,6$	5,69 3,78	Ι	Ι	I	Ι	I	I
51	AHKD'E'A	MD-50 Cu	7,28 5,37	1,6 1,6	5,68 3,77	0,483599	-0,488621	0,258133	-0,0883771	-0,346904	-0,215901
6 <sup>1</sup>	ABLQ'E'A	MD-50 Cu	6,1 4,82	1,6 1,6	4,5 3,22	0,520222	-0,291178	0,22836	-0,0193851	0,0545506	0,0552703
$7^{I}$	ABMP'E'A	MD-50 Cu	5,94 4,71	$1,6 \\ 1,6$	4,34 3,11	0,516291	-0,264886	0,233415	-0,178915	-0,274090	-0,131192
8 <sup>1</sup>	AFRQ'E'A	MD-50 Cu	4,75 3,72	$1,6 \\ 1,6$	3,15 2,12	0,400564	-0,304221	0,231073	-0,0584987	-0,0048153	0,036928
91	AGSQ'E'A	MD-50 Cu	4,46 3,45	$1,6 \\ 1,6$	$2,86 \\ 1,85$	0,352551	-0,354431	0,217212	0,0974095	0,361612	0,272972
$10^{I}$	AFNP'E'A	MD-50 Cu	4,45 3,52	$1,6 \\ 1,6$	2,85 1,92	0,385371	-0,303951	0,193591	0,131129	0,51592	0,371023
$11^{I}$	AGOP'E'A	MD-50 Cu	4,03 3,16	$1,6 \\ 1,6$	2,43 1,56	0,329784	-0,308996	0,223209	-0,0157931	0,103582	0,10717
12 <sup>I</sup>	AHTP'E'A	MD-50 Cu	3,95 3,09	1,6 1,6	2,35 1,49	0,315494	-0,315242	0,232419	-0,0889296	-0,127666	-0,0559819

# В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина

$\mathbf{c}$
табл.
Продолжение

			A						B		
Номер вари- анта	Геометрия скобы (рис. 2,6; рис. 4)	Материал скобы	Максималы температуры транзистора	ная 1 кристалла "°С	Перепад темпе- ратур °С		Коэфф для расчё при соотве	ициент <i>а</i> <sub>і</sub> инг ёта t <sub>в max</sub> в диб тствующем т	серполяционно ппазоне л = 0,1 еометрическом	го полинома 2,0 Вт/(ммК) 1 варианте скобі	la
	(+ - <b>2</b> 11)		верхнего	нижнего	puryp, ~	i = 0	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5
					= 0	= 2,5 BT					
$1^{II}$	ABCD'E'A	MD-50 Cu	22,63 17,17	4,53 4,53	18,10 12,64	1,02963	-0,381807	0,265345	-0,0460606	-0,107098	-0,0381496
2 <sup>II</sup>	AB, $C$ , $D$ , $E$ , $A$	MD-50 Cu	20,88 15,65	4,53 4,53	16,53 11,12	0,975653	-0,414672	0,270208	-0,0365907	-0,10972	-0,0367462
3 <sup>II</sup>	AFID'E'A	MD-50 Cu	20,35 15,12	4,53 4,53	15,82 10,59	0,948674	-0,451601	0,261034	0,0311832	0,0292546	0,0462353
$4^{II}$	AGJD'E'A	MD-50 Cu	20,23 14,93	4,53 4,53	$15,70 \\ 10,40$	Ι	Ι	Ι	I	Ι	Ι
$5^{II}$	AHKD'E'A	MD-50 Cu	20,22 14,91	4,53 4,53	15,69 10,38	0,927527	-0,499248	0,22919	-0,0067574	-0,0625221	-0,0169488
6 <sup>11</sup>	ABLQ'E'A	MD-50 Cu	16,95 13,38	4,53 4,53	12,42 8,85	0,964124	-0,28663	0,228835	-0,0577614	-0,00158756	0,036232
$\tau^{II}$	ABMP'E'A	MD-50 Cu	16,50 13,09	4,53 4,53	11,97 8,56	0,958996	-0,278339	0,222149	-0,059959	-0,00206845	0,0306633
8 <sup>11</sup>	AFRQ'E'A	MD-50 Cu	13,21 10,35	4,53 4,53	8,68 5,82	0,84428	-0,30008	0,247358	-0,0960514	-0,15252	-0,0679275
9 <sup>II</sup>	AGSQ'E'A	MD-50 Cu	12,38 9,59	4,53 4,53	7,85 5,06	0,797558	-0,339086	0,240556	-0,0381771	-0,030713	0,00605967
$10^{II}$	AFNP'E'A	MD-50 Cu	12,36 9,78	4,53 4,53	7,83 5,25	0,830561	-0,279737	0,231977	-0,0941472	-0,116913	-0,0476299
$11^{II}$	AGOP'E'A	MD-50 Cu	11,20 8,79	4,53 4,53	6,67 4,26	0,73645	-0,30665	0,235182	-0,0392501	-0,0101737	0,0185304
12 <sup>II</sup>	AHTP'E'A	MD-50 Cu	10,98 8,58	4,53 4,53	6,45 4,05	0,758034	-0,317322	0,236344	-0,0694711	-0,0878627	-0,0282681

Анализ возможности теплоотвода в ГИС СВЧ-диапазона при двухъярусном расположении кристаллов

Окончание табл. 2

			V						B		
Номер вари- анта	Геометрия скобы (рис. 2,6; рис. 4)	Материал скобы	Максималы температуры транзистора	ная а кристалла "°С	Перепад темпе- патур °С		Коэфф для расчё при соотвез	ициент <i>а</i> <sub>і</sub> ин Эта t <sub>в max</sub> в диі гствующем і	терполяционно апазоне $\lambda = 0,1$ еометрическом	лго полинома 2,0 Вт/(ммК) 1 варианте скобе	la
	Pue. 1)		верхнего	нижнего	puryp, 🗸	i = 0	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5
					= 0	= 5,0 BT					
1	ABCD'E'A	MD-50 Cu	45,27 34,33	9,06 9,06	36,21 25,27	1,33068	-0,381579	0,262824	-0,0475056	-0,0901344	-0,0202935
2 <sup>III</sup>	AB'C'D'E'A	MD-50 Cu	41,75 31,30	9,06 9,06	32,69 22,24	1,27672	-0,413269	0,281247	-0,0427885	-0,226613	-0,172061
3 <sup>III</sup>	AFID'E'A	MD-50 Cu	40,69 30,24	9,06 9,06	31,63 21,18	1,25022	-0,444876	0,269858	-0,0251573	-0,122205	-0,0527601
4 <sup>III</sup>	AGJD'E'A	MD-50 Cu	40,45 29,85	9,06 9,06	31,39 20,78	Ι	I	I	I	I	I
5 <sup>III</sup>	AHKD'E'A	MD-50 Cu	40,44 29,82	90,6 9,06	31,38 20,76	1,22824	-0,500695	0,231409	0,0139627	-0,0278867	0,000648763
6 <sup>III</sup>	ABLQ'E'A	MD-50 Cu	33,89 26,76	9,06 9,06	24,83 17,70	1,26549	-0,284202	0,230568	-0,0809131	-0,0613985	-0,00393656
$\tau^{\rm III}$	ABMP'E'A	MD-50 Cu	33,00 26,18	9,06 9,06	23,94 17,12	1,25992	-0,275296	0,229624	-0,0851702	-0,082554	-0,0237638
8 <sup>III</sup>	AFRQ'E'A	MD-50 Cu	26,41 20,69	9,06 9,06	17,35 11,63	1,1453	-0,307763	0,229053	-0,0341315	0,0425859	0,0618964
9 <sup>III</sup>	AGSQ'E'A	MD-50 Cu	24,77 19,18	9,06 9,06	15,71 10,12	1,09854	-0,340211	0,237381	-0,0286759	0,00968364	0,0381861
$10^{III}$	AFNP'E'A	MD-50 Cu	24,72 19,57	9,06 9,06	15,66 10,51	1,13138	-0,284977	0,219562	-0,050961	0,0274751	0,0533852
$11^{III}$	AGOP'E'A	MD-50 Cu	22,4 17,58	9,06 9,06	13,34 8,52	1,07467	-0,306794	0,233459	-0,0442164	-0,0164837	0,0156055
12 <sup>III</sup>	AHTP'E'A	MD-50 Cu	21,96 17,16	9,06 9,06	12,90 8,10	1,05906	-0,317322	0,236344	-0,0694714	-0,0878626	-0,0282678



Рис. 5. Температурное поле расчётной области, полученное по трехмерной программе: I...I5 – номера изотерм; T = 0...22,63 °C

Таблица 3

Материал	Коэффициент теплопроводности	Максимальна кристалла тр	ая температура ранзистора,°С	Перепад температур,
Скооы	Вт/(мм К)	верхнего	нижнего	°C
-	0,1	16,15	1,63	14,52
AlN	0,16	11,23	1,63	9,06
MD-50	0,25	8,15	1,63	6,55
-	0,3	7,21	1,63	5,58
Cu	0,384	6,18	1,63	4,58
-	0,5	5,31	1,63	3,68
_	0,9	4,02	1,63	2,39
_	1,1	3,72	1,63	2,09
Алмаз	1,5	3,36	1,63	1,73
Алмаз	2,0	3,11	1,63	1,48

# Расчётные данные для кристаллов транзисторов ( $3 \times 1 \times 0,1$ мм, Q = 0,9 Вт) при различных материалах скобы и варианте ее геометрии *ABCD'E'A*

В табл. 4 приведены результаты расчётов по трехмерной программе перепада температур между кристаллами транзисторов для трёх геометрических вариантов (*ABCD'E'A*, *AHKD'E'A*, *AHTP'E'A*) и четырёх видов материала (AlN, MD-50, Cu, алмаз) скобы с различными  $\lambda$  от мощности тепловыделения Q.

Таблица 4

# Зависимость перепада температур между кристаллами транзисторов размерами 3×1×0,1 мм для трёх геометрических вариантов (*ABCD'E'A*, *AHKD'E'A*, *AHTP'E'A*) и четырёх видов материала (AIN, MD-50, Cu, алмаз) скобы от мощности тепловыделения *Q*

Номер	Геометрия скобы	Перепад	температур, °С (λ, Вт/	С, при материал (мм К))	іе скобы
варианта*	(рис. 2,6; рис. 4)	$AlN \\ (\lambda = 0, 16)$	MD-50 $(\lambda = 0,25)$	$\begin{array}{c} Cu\\ (\lambda = 0,384) \end{array}$	Алмаз ( $\lambda$ = 2,0)
1 <sup>1</sup>	ABCD'E'A	9,6	6,55	4,58	1,48
5 <sup>1</sup>	AHKD'E'A	8,64	5,68	3,77	0,66
12 <sup>1</sup>	AHTP'E'A	3,71	2,35	1,49	0,13
1 <sup>11</sup>	ABCD'E'A	26,66	18,10	12,64	4,11
5 <sup>11</sup>	AHKD'E'A	23,90	15,69	10,38	1,74
12 <sup>II</sup>	AHTP'E'A	10,23	6,45	4,05	0,27
1 <sup>III</sup>	ABCD'E'A	53,33	36,21	25,27	8,22
5 <sup>m</sup>	AHKD'E'A	47,81	31,38	20,76	3,49
12 <sup>III</sup>	AHTP'E'A	20,46	12,90	8,10	0,54
1 <sup>IV</sup>	ABCD'E'A	79,98	54,30	37,92	12,33
5 <sup>IV</sup>	AHKD'E'A	71,70	47,07	31,14	5,22
12 <sup>IV</sup>	AHTP'E'A	30,69	19,35	12,15	0,81

Номер варианта*	Геометрия скобы (рис. 2,б; рис. 4)	Перепад температур, °С, при материале скобы (λ, Вт/(ммК))			
		$AlN \\ (\lambda = 0, 16)$	MD-50 $(\lambda = 0,25)$	$\begin{array}{c} Cu\\ (\lambda = 0,384) \end{array}$	Алмаз (λ = 2,0)
1 <sup>v</sup>	ABCD'E'A	106,66	72,42	50,54	16,44
$5^{v}$	AHKD'E'A	95,62	62,76	41,52	6,98
$12^{V}$	AHTP 'E 'A	40,92	25,80	16,20	1,08

#### Продолжение табл. 4

\* Знак I соответствует мощности 0,9 В<br/>т; II- 2,5 Вт; III- 5 Вт; IV<br/> - 7,5 Вт; V- 10 Вт



Рис. 6. Зависимости максимальной температуры кристалла верхнего транзистора  $t_{_{\rm B}\,{\rm max}}$  от коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  для различных геометрических вариантов скобы при  $Q = 0.9~{\rm Br}$ 

В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина





Рис. 9. Области распределения максимальной температуры верхнего транзистора *t*<sub>в max</sub> (для рассматриваемых геометрий скобы) в зависимости от λ при различных мощностях, выделяемых на кристалле

На рис. 10 результаты расчетов, представленные в табл. 4, проиллюстрированы графически для двух геометрических вариантов скобы: ABCD'E'A и AHTP'E'A.





для различных материалов (AlN, MD-50, Cu, алмаз) и геометрических вариантов скобы: *а* – соответствует геометрическому варианту *ABCD'E'A*; *б* – *AHTP'E'A* 

В настоящее время в серийном производстве усилителей мощности используются арсенидгаллиевые полевые транзисторы с барьером Шотки мощностью 5 Вт. В отдельных случаях применяются транзисторы мощностью 10 Вт. Для отвода большей мощности от кристаллов полупроводниковых приборов необходимо применение других технических решений.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение дополнительного теплоотвода в конструкции мощной ГИС СВЧ открывает дополнительные возможности для улучшения ее электрических, тепловых и массогабаритных характеристик. Предложена методика расчета эффективности теплоотвода от кристаллов транзисторов при их двухъярусном расположении. Методика позволяет оптимизировать геометрические размеры теплоотводящей пластины в зависимости от теплопроводности применяемого материала и мощности используемых транзисторов. Полученные результаты открывают широкие возможности применения двухъярусного расположения транзисторов в ГИС СВЧ для суммирования их мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2298255 РФ, МПК Н 01 25/11, Н 05 К 1/18. Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В.А. Иовдальский, В.Г. Лапин, В.А. Пчелин, В.Г. Моргунов; приоритет 12.08.05.

2. *Иовдальский В.А.* Новая концепция сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧдиапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 1(487). – С. 44-51.

Статья поступила 19 февраля 2009 г.

\_\_\_\_\_

УДК 621.384.633

# РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ЦИКЛОТРОННОГО ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

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

#### ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработана методика инженерного расчёта частотных характеристик циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) для СВЧ-приемников радиолокаторов. Резонатор ЦЗУ с электронным пучком моделируется в виде двух звеньев *LCR* полосового фильтра. Основной задачей расчета является расширение полосы частот ЦЗУ по малому уровню КСВН при физических ограничениях на ток электронного пучка и сопротивление объёмного резонатора. Определены пути расширения рабочей полосы частот ЦЗУ.

A methodology has been developed for engineering calculation of frequency characteristics of the cyclotron protective device (CPD) for radar microwave receivers. CPD cavity resonator with an electron beam is modeled as *LCR* band-pass filter with two sections. The main task of the calculation is the CPD frequency bandwidth broadening at low VSWR with electron-beam current and resonator resistance being under physical limitations. The ways of CPD operating frequency bandwidth broadening are determined.

# *КС: <u>СВЧ-защита, циклотронный резонанс, двухзвенный фильтр, рабочая полоса частот,</u> <u>инженерный расчёт</u>*

*Keywords: <u>microwave protection, cyclotron resonance, two-mesh filter, operating frequency bandwidth,</u> <u>engineering calculation</u>* 

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) представляют собой класс СВЧ защитных устройств, предназначенных для сохранения работоспособности входных каскадов полупроводниковых приемников радиолокационных систем (РЛС) в условиях воздействия импульсной СВЧ-мощности высокого уровня передатчика своей РЛС и посторонних источников [1-4].

Для защиты приемников РЛС наиболее часто используют комбинированные газоразряднополупроводниковые устройства. В них первым каскадом является газовый разрядник, который устойчив к входной СВЧ-мощности от единиц до десятков киловатт. Для понижения просачивающейся через разрядник мощности до приемлемого уровня, в качестве второй ступени защиты используют полупроводниковый ограничитель СВЧ-мощности.

Основным недостатком таких устройств является большое время восстановления параметров после окончания импульса мощности передатчика РЛС. Время восстановления газового разрядника составляет, как правило, не менее 1 мкс, что часто не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным РЛС.

ЦЗУ значительно превосходит своих конкурентов по времени восстановления параметров, поскольку его работа основана на электромагнитном взаимодействии с заряженной частицей, которая обладает максимально возможной подвижностью – электроном в вакууме. Время восстановления параметров ЦЗУ обычно не превышает 10...30 нс.

ЦЗУ имеет также ряд иных положительных свойств по сравнению с другими защитными устройствами. Так, в режиме пропускания ему присущи фильтрующие свойства, низкий уро-

вень коэффициента шума, малые потери сигнала (0,25...0,35 дБ). Устойчивость ЦЗУ к СВЧмощности составляет 10...200 кВт. Развязка в режиме защиты превышает 60...70 дБ. Отсутствуют опасные пики просачивающейся мощности на переднем фронте импульса, свойственные газоразрядным и полупроводниковым защитным устройствам. ЦЗУ устойчиво к воздействию сверхкоротких (около 1 нс) импульсов большой амплитуды, что актуально в связи со всё более совершенствующимися средствами подавления работы приёмных каскадов РЛС.

К недостаткам ЦЗУ следует отнести ограниченность рабочей полосы частот (4...5 % в диапазоне длин волн 3 см) и необходимость хорошего согласования с подключаемыми устройствами на входе и выходе. Масса ЦЗУ составляет от 1 до 3 кг. Мощность электропитания – 2...3 Вт.

В статье изложен подход к моделированию резонатора ЦЗУ, нагруженного электронным пучком, в котором возбуждён циклотронный резонанс, в виде двух звеньев полосового фильтра. Предложена аппроксимация проводимости электронного пучка с помощью последовательного *LCR*-контура и приведены простые аналитические выражения для расчёта рабочей полосы частот по параметрам резонатора и режимам ЦЗУ (размерам ламелей, характеристическому сопротивлению объёмного резонатора, току пучка, напряжению ускорения). Определены пути расширения полосы частот ЦЗУ при физических ограничениях на увеличение тока электронного пучка и сопротивления объёмного резонатора.

Результаты моделирования сопоставлены с параметрами выпускаемых приборов.

#### 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ ЦЗУ

Электродинамическая система ЦЗУ состоит из двух подобных секций: входного и выходного резонаторов с подводящими линиями, в которых осуществляется поперечное взаимодействие СВЧ электрического поля с электронным пучком (рис. 1 и 2).

Оба резонатора помещены в однородное магнитное поле, направленное вдоль пучка электронов, благодаря чему возникает циклотронное вращение электронов пучка относительно продольной оси прибора. Уровень магнитной индукции поля  $B_0$  обеспечивает циклотронный резонанс электронов пучка на центральной частоте резонатора, один оборот электронов вокруг оси за период частоты сигнала.







Рис. 2. Резонатор секции ЦЗУ (без передней крышки): *d* – величина зазора между ламелями резонатора; *l* – длина ламелей; *w* – ширина ламелей
В режиме пропускания сигнала малой мощности энергия внешнего сигнала во входном резонаторе ЦЗУ возбуждает циклотронные колебания пучка, проходящего между ламелями. Одновременно в пучке под действием резонатора подавляется шумовой сигнал, обусловленный тепловой энергией нагретого катода. В выходном резонаторе энергия циклотронных колебаний выводится из пучка и поступает в выходную цепь.

Из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ переходит автоматически при превышении входной СВЧ-мощностью уровня в несколько милливатт. Под действием повышенной мощности электронный пучок разрушается и оседает на ламелях входного резонатора. Передача сигнала между входным и выходным резонаторами прекращается. ЦЗУ переходит в режим защиты. Высокий уровень развязки входа и выхода ЦЗУ в режиме защиты обусловлен тем, что СВЧмощность из входного резонатора в выходной поступает лишь через щель в разделительной секции, которая имеет запредельные размеры по отношению к длине волны электромагнитных колебаний.

В режиме защиты примерно 90 % падающей СВЧ-мощности высокого уровня отражается от входной секции, поскольку её резонатор, не нагруженный электронным пучком, имеет КСВН, равный приблизительно 30. В резонаторе и входном тракте ЦЗУ рассеивается лишь до 10 % падающей мощности.

Рабочая полоса частот ЦЗУ в режиме пропускания определяется полосой частот, в которой обеспечено согласование внешних входной и выходной линий соответственно с входным и выходным резонаторами, нагруженными электронным пучком. Для реализации приемлемых характеристик ЦЗУ КСВН по входу и по выходу в режиме пропускания сигнала должен быть не более 1,25...1,5.

#### 3. АППРОКСИМАЦИЯ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ НАГРУЗКИ

Проводимость электронного пучка между ламелями резонатора в режиме циклотронного резонанса, нормированная к максимальному значению вещественной компоненты, определяется, согласно работе [5], функцией:

$$Y = (2/\theta^2) (\omega/\omega_c) [1 - \cos \theta - i(\theta - \sin \theta)] = \operatorname{Re}(Y) + i\operatorname{Im}(Y).$$
(1)

Здесь  $\theta = \tau(\omega - \omega_c) - разность углов пролета электронов по спирали вдоль ламелей на круговой рабочей частоте <math>\omega$  и круговой частоте циклотронного резонанса  $\omega_c$ ;  $\tau = l/v$  – время пролёта пучка вдоль ламелей; l – продольный размер ламели;  $v = (2V_0\eta)^{0.5}$  – скорость пучка;  $V_0$  – постоянное напряжение, ускоряющее пучок;  $\eta = e/m = 1,7588 \cdot 10^{11}$  – удельный заряд электрона (в системе СИ);  $\tau \omega_c = 2\pi N$ ;  $N = \tau f_c = lf_c/(2V_0\eta)^{0.5}$  – число периодов циклотронной частоты за время пролёта ламелей пучком электронов;  $f_c$  – резонансное значение циклотронной частоты.

Параметр нормировки (резонансное значение вещественной проводимости электронного пучка) определяется как:

$$\operatorname{Re}(Y_{\text{pes}}) = Y_{\text{pes}} = \frac{I_0}{8V_0} \left(\frac{l}{d}\right)^2,$$
(2)

где d – расстояние между ламелями;  $I_0$  – ток пучка.

При аппроксимации электронной проводимости пучка, находящегося в условиях циклотронного резонанса, удобно определить её величину как функцию обычного для теории цепей параметра  $x_c = \omega/\omega_c$  – относительного значения циклотронной частоты. Тогда параметр  $\theta$  может быть представлен в виде

$$\theta = 2\pi N(\omega/\omega_{-}-1) = 2\pi N(x_{-}-1). \tag{3}$$

Переменные  $\theta$  и  $x_c - 1$  характеризуют значения относительной расстройки частоты по шкале  $\theta$  и шкале  $x_c$ . Резонанс наступает при  $\theta = 0$  и  $x_c = 1$ .

Нормированная проводимость электронного пучка *Y* в условиях циклотронного резонанса, выраженная через параметр *x*<sub>o</sub>, определяется выражением:

$$Y = \frac{2x_{c}\left\{1 - \cos\left[2pN(x_{c}-1)\right] - i\left\{2pN(x_{c}-1) - \sin\left[2pN(x_{c}-1)\right]\right\}\right\}}{\left[2pN(x_{c}-1)\right]^{2}}.$$
(4)

Характерной особенностью данной зависимости является отрицательное значение тангенса угла наклона мнимой составляющей проводимости вблизи *x*<sub>c</sub> = 1.

# 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ LCR-КОНТУР

Проводимость электронного пучка в зазоре резонатора вблизи частоты циклотронного резонанса подобна проводимости последовательного *LCR*-контура (рис. 3).



Рис. 3. Структура последовательного LCR-контура

Составляющие проводимости Y последовательного контура, нормированные к максимальной (резонансной) проводимости  $Y_{peg} = R^{-1}$ , имеют вид

$$Y_{\rm H} = YR = \operatorname{Re}(Y_{\rm H}) + i\operatorname{Im}(Y_{\rm H}) = [1 - iQ(x_{\rm c} - 1/x_{\rm c})]/[1 + Q^2(x_{\rm c} - 1/x_{\rm c})^2],$$
(5)

где  $Q = (L/C)^{0.5}/R$  – добротность контура.

Максимальная проводимость последовательного контура, как и электронного пучка в условиях циклотронного резонанса, наступает при  $x_c = 1$ .

Компоненты проводимости последовательного контура и электронного пучка, как видно из рис. 4 и 5, в области резонансной частоты (в пределах  $\operatorname{Re}(Y) < 0,6$ ) имеют одинаковый характер. По мере дальнейшего отклонения частоты от резонансной крутизна вещественной компоненты резонансной кривой электронной проводимости возрастает, затем кривая принимает пульсирующий характер, постепенно затухая.

Сопоставляя вещественные проводимости последовательного контура и электронного пучка в пределах  $0.6 < \text{Re}(Y) \le 1$  при равном отклонении относительной частоты от резонанса,



Рис. 4. Графики вещественной составляющей проводимости Re(*Y*) электронного пучка при циклотронном резонансе и последовательного контура при *N* = *Q* = 10:





Рис. 5. Графики мнимой составляющей проводимости Im(Y) электронного пучка при циклотронном резонансе и последовательного контура при N = Q = 10

находим соответствие параметров N и Q, определяющих добротность каждого из видов резонанса:

$$N \approx Q. \tag{6}$$

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(504), 2010

74

Равенство (6) выполняется тем точнее, чем выше N. Но уже при  $N \ge 2$  указанное равенство приемлемо для моделирования проводимости электронного пучка, находящегося в условиях циклотронного резонанса, последовательным контуром при расстройках частоты до 6 % от резонансного значения, т. е. для моделирования электронной проводимости пучка в полосе пропускания ЦЗУ до 12 %.

Значения элементов последовательного контура, аппроксимирующего электронную нагрузку резонатора, выразим через частоту  $f_c$  и характеристическое сопротивление циклотронного резонанса  $\rho_c = NR_c \approx QR_c$ :

$$L_{\rm c} = \rho_{\rm c} / (2\pi f_{\rm c}), \qquad C_{\rm c} = 1 / (2\pi f_{\rm c} \rho_{\rm c}).$$
 (7)

Обращаясь к определениям N и  $R_c = 1/\text{Re}(Y_{\text{pes}})$ , находим характеристическое сопротивление контура  $\rho_c$ :

$$\rho_{\rm c} = QR_{\rm c} \approx NR_{\rm c} = 8f_{\rm c}d^{2}(V_{0}/2\eta)^{0.5}/(I_{0}l).$$
(8)

Таким образом, элементы контура, аппроксимирующего электронную нагрузку резонатора, могут быть определены через размеры ламелей, частоту резонанса, величину ускоряющего напряжения и ток пучка следующими выражениями:

$$L_{c} = 8\kappa_{1}(V_{0})^{0.5}d^{2}/(lI_{0}) = \kappa_{1}R_{c}l/(V_{0})^{0.5}, \Gamma_{\rm H};$$
(9)

$$C_{\rm c} = \kappa_2 I_0 l / [(df_{\rm c})^2 (V_0)^{0.5}] = 8\kappa_2 (V_0)^{0.5} / [(f_{\rm c})^2 R_{\rm c} l], \Phi;$$
(10)

$$R_{\rm c} = 8V_0 (d/l)^2 / I_0, \, \text{Om}; \tag{11}$$

$$\rho_{\rm c} = \kappa_3 d^2 f_{\rm c}(V_0)^{0.5} / (I_0 l) = \kappa_2 f_{\rm c} R_{\rm c} l / (V_0)^{0.5}, \, \text{Om};$$
(12)

$$Q_{\rm c} = \rho/R_{\rm c} = (\kappa_3 f_{\rm c} l)/V_0^{0.5}, \tag{13}$$

 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – численные коэффициенты:

$$\kappa_1 = 1/[2\pi(2\eta)^{0.5}] \approx 2,6835 \cdot 10^{-7}, \quad \kappa_2 = (2\eta)^{0.5}/(16\pi) \approx 11800, \quad \kappa_3 = (2\eta)^{-0.5} \approx 1,6861 \cdot 10^{-6}.$$
 (14)

Для конкретной конструкции ЦЗУ с фиксированными размерами ламелей l и d элементы модели определяются частотой резонанса  $f_c$ , напряжением ускорения  $V_0$  и током  $I_0$ .

# 5. МОДЕЛЬ СЕКЦИИ ЦЗУ – ДВУХЗВЕННЫЙ ФИЛЬТР

Секция ЦЗУ в виде объёмного резонатора, шунтированного внешней цепью и электронным пучком в условиях циклотронного резонанса, имеет характеристики двухзвенного полосового фильтра. Электрическая схема модели входной секции ЦЗУ представлена на рис. 6.

Модель характеризуется пятью основными данными: характеристическими сопротивлениями параллельного  $\rho_n = (L_n/C_n)^{0.5}$  и последовательного  $\rho_c$  контуров; сопротивлением источника, приведенным к параллельному контуру  $R_{_{\rm H}}$ ; сопротивлением электронной нагрузки  $R_c$ ; частотой собственного резонанса контуров  $f_c$ .

В силу взаимности матрицы рассеяния при малом уровне циклотронных колебаний электронного пучка, модель выходной секции отличается лишь тем, что источник напряжения включён последовательно с сопротивлением  $R_c$  последовательного контура.



Рис. 6. Структура модели секции ЦЗУ – двухзвенного фильтра:  $R_{\mu}$  – приведенное к параллельному контуру сопротивление внешней нагрузки;  $L_{n}$  и  $C_{n}$  – индуктивность и ёмкость параллельного контура, моделирующего объёмный резонатор секции ЦЗУ;  $R_{c}$ ,  $L_{c}$ ,  $C_{c}$  – сопротивление, индуктивность и ёмкость последовательного контура, моделирующего проводимость электронного пучка;  $f_{c}$  – частота собственного резонанса параллельного и последовательного звеньев фильтра

Одной из центральных задач построения циклотронного прибора является обеспечение широкой полосы частот. В работе [5] наглядно показано, что полоса пропускания циклотронного прибора может быть расширена, если трансформированное к параллельному контуру сопротивление внешней нагрузки превышает сопротивление электронной нагрузки при циклотронном резонансе.

В ЦЗУ омическое сопротивление электронной нагрузки при циклотронном резонансе  $R_c = [\text{Re}(Y_{\text{pes}})]^{-1}$  лежит в пределах от нескольких сотен до 1000 Ом.

Малые сопротивления  $R_c$ , как показывает анализ, отвечают легко достигаемым невысоким значениям характеристического сопротивления параллельного контура (объёмного резонатора), но требуют высокого тока пучка, величина которого ограничена нормами долговечности применяемых катодов (около 350 мкА).

Высокое сопротивление электронной нагрузки при построении оптимального фильтра с широкой полосой пропускания требует высоких значений характеристического сопротивления объемного резонатора и коэффициента трансформации внешнего сопротивления, которые трудно реализовать.

Установим, при каком комплексе данных ЦЗУ может быть реализована широкая полоса рабочих частот.

Простые аналитические выражения, с помощью которых ширина полосы фильтра определяется через параметры и режимы работы циклотронного прибора, насколько известно, отсутствуют.

Зависимость ширины полосы от конструктивных данных прибора, тока пучка и напряжения ускорения определим, обобщая результаты расчёта матрицы рассеяния ряда вариантов модели. Сопротивление нагрузки, приведенное к параллельному контуру двухзвенной системы, при этом принято равным 1,25 от сопротивления электронной нагрузки  $R_c$ , чтобы КСВН прибора на центральной частоте был равен 1,25. По этому же уровню КСВН определена ширина полосы фильтра.

Многомерность задачи обусловливает большой массив результатов. В качестве иллюстрации приведем пример расчёта ширины полосы пропускания и тока пучка как функции напряжения ускорения.

# 6. ПРИМЕР РАСЧ"ТА МОДЕЛИ ЦЗУ

Длина ламели *l* и высота зазора *d* между ламелями приняты равными 2,5 и 0,08 мм. Напряжение ускорения и ток пучка в ходе расчёта соответствуют сопротивлению электронного пучка на резонансной частоте  $R_c = 480$  Ом. Внешняя нагрузка прибора трансформирована к параллельному контуру как шунтирующий резистор  $R_{\rm H} = 600$  Ом. Характеристическое сопротивление параллельного контура  $\rho_{\rm n}$  является параметром задачи. Частота резонанса контуров фильтра *f*<sub>c</sub> здесь и далее принята равной 9,2 ГГц.

Для трёх значений характеристического сопротивления параллельного контура: 50 Ом ( $L_n = 0,865 \text{ нГн}$ ), 37,28 Ом (0,645 нГн) и 30 Ом (0,519 нГн) – вычисляем ширину полосы пропускания фильтра как функцию напряжения ускорения. Индуктивность последовательного контура модели  $L_c$  устанавливаем согласно (9):

$$L_{c} = \kappa_{1} R_{c} l / V^{0,5}.$$
(15)

Одновременно, исходя из (11), вычисляем ток пучка:

$$I_0 = 8V_0 (d/l)^2 / R_c.$$
(16)

Пульсация частотной характеристики КСВН, по Чебышеву, в ходе расчётов ограничена значением 0,05 дБ, что соответствует КСВН 1,24 на частоте резонанса.

Результаты расчётов ширины полосы пропускания и тока пучка приведены в табл. 1.

Таблица 1

# Пример расчётов модели секции ЦЗУ как двухзвенного фильтра

<i>V</i> <sub>0</sub> , B	<i>I</i> <sub>0</sub> , мкА	<i>L</i> <sub>c</sub> , нГн	Д <i>F</i> , МГц, при с <sub>п</sub> , Ом		
			50	37,28	30
15,63	266,75	80,09	574	367	KCBH > 1,25
12,5	213,3	89,55	563	410	223
10,0	170,67	100,12	535	427	298
9,0	153,6	105,54	520	428	316
8,0	136,53	111,94	498	427	331
6,5	111,0	124,19	453	414	343
5,826	99,45	131,16	427	405	345
5,12	87,38	139,93	392	389	343
4,1	69,97	156,37	320	371	336
3,28	56,0	174,82	227	321	312

Зависимости ширины полосы  $\Delta F$  и тока пучка  $I_0$  от напряжения ускорения  $V_0$  для  $\rho_n = 30$ , 40 и 50 Ом показаны на рис. 7.

Сопротивление электронной нагрузки в ходе расчёта фиксировано и ток пучка *I*<sub>0</sub>, согласно (16), прямо пропорционален напряжению ускорения.

Зависимость ширины полосы от напряжения, как видно из рис. 7, имеет максимум. Величина и положение максимума на оси напряжений определяется характеристическим сопротивле-



Рис. 7. Зависимости полосы пропускания  $\Delta F$  и тока пучка  $I_0$  от напряжения ускорения  $V_0$ 

нием параллельного резонатора ρ<sub>п</sub>. Полоса пропускания секции ЦЗУ возрастает по мере увеличения сопротивления резонатора ρ<sub>п</sub>. Одновременно возрастают значения тока пучка и напряжения ускорения, при которых достигается максимальная ширина полосы.

Форма резонансной кривой, как и ширина полосы фильтра, зависит от электрического режима ЦЗУ. Частотные характеристики КСВН в зависимости от напряжения ускорения  $V_0$  при  $\rho_n = 37,28$  Ом ( $L_n = 0,645$  нГн) представлены на рис. 8. Ширина полосы определена по уровню КСВН 1,24.

Режим ЦЗУ, при котором фильтр является оптимальным (рис. 8,6), соответствует умеренному току пучка и практически наибольшей полосе пропускания. Ограниченное увеличение ширины полосы может быть достигнуто ценою существенного увеличения тока пучка и среднего значения КСВН в пределах полосы (рис. 8,6).

Ширина полосы оптимального фильтра, как показывает анализ данных табл. 1, при  $R_c =$  =const прямо пропорциональна сопротивлению параллельного контура  $\rho_n$ .

Более полные, многомерные расчёты с вариацией данных прибора (сопротивлений контуров, размеров ламелей, частоты резонанса) позволили сформулировать ряд соотношений, связывающих ширину полосы фильтра с параметрами модели. Две разнородные секции ЦЗУ, секция 1 и секция 2, которые отличаются центральными частотами  $f_c$ , размерами ламелей d и l, сопротивлениями электронной нагрузки  $R_c$  и объёмного резонатора  $\rho_n$ , характеризуются следующими соотношениями ширины полосы  $\Delta F_1/\Delta F_2$  при соответствующих соотношениях напряжений ускорения  $V_{01}/V_{02}$  и токов пучка  $I_{01}/I_{02}$ :

$$\Delta F_{1} / \Delta F_{2} = (\rho_{n1} / \rho_{n2}) (R_{c2} / R_{c1}) (f_{c1} / f_{c2}), \qquad (17)$$

$$V_{01}/V_{02} = (\rho_{n1}/\rho_{n2})^2 (l_1/l_2)^2 (R_{c2}/R_{c1})^2 (f_{c1}/f_{c2})^2 = (\Delta F_1/\Delta F_2)^2 (l_1/l_2)^2,$$
(18)

$$I_{01}/I_{02} = (\rho_{n1}/\rho_{n2})^2 (d_1/d_2)^2 (R_{c2}/R_{c1})^3 (f_{c1}/f_{c2})^2 = (\Delta F_1/\Delta F_2)^2 (R_{c2}/R_{c1}) (d_1/d_2)^2.$$
(19)



Рис. 8. Частотные зависимости КСВН:  $a - V_0 = 4,8$  В ( $I_0 = 81,38$  мкА,  $L_c = 231,18$  нГн,  $\Delta F = 0,191$  ГГц);  $\delta - V_0 = 5,827$  В ( $I_0 = 99,45$  мкА,  $L_c = 133,4$  нГн,  $\Delta F = 0,405$  ГГц);  $e - V_0 = 12,5$  В ( $I_0 = 213,3$  мкА,  $L_c = 91,1$  нГн,  $\Delta F = 0,411$  ГГц)

Выражения (17)...(19) определяют следующие свойства модели секции ЦЗУ как двухзвенного фильтра:

– ширина полосы секции ЦЗУ прямо пропорциональна сопротивлению объёмного резонатора ρ<sub>п</sub> и обратно пропорциональна сопротивлению электронной нагрузки *R*<sub>c</sub>;

 при фиксированном сопротивлении электронной нагрузки R<sub>c</sub> ширина полосы прямо пропорциональна центральной частоте (относительная полоса пропускания не зависит от центральной частоты); размеры ламелей в определение ширины полосы непосредственно не входят;

– оптимальное напряжение ускорения пропорционально квадрату длины ламели, квадрату сопротивления объёмного резонатора, квадрату частоты и обратно пропорционально квадрату сопротивления  $R_c$ ; зазор между ламелями в определение оптимального напряжения непосредственно не входит;

– оптимальный ток пучка пропорционален квадрату зазора между ламелями, квадрату сопротивления объёмного резонатора, квадрату центральной частоты и обратно пропорционален кубу сопротивления  $R_c$ ; длина ламели в определение оптимального тока непосредственно не входит.

Исходя из соотношений (17)...(19), установим формулы для расчёта ширины полосы модели ЦЗУ как двухзвенного фильтра. В качестве опорного примем вариант расчета, приведенный в табл. 1 и соответствующий оптимальному фильтру (рис. 8,*б*): d = 0,08 мм, l = 2,5 мм,  $V_{02} = 5,827$  В,  $I_{02} = 99,45$  мкА,  $R_{c2} = 480$  Ом,  $R_{H} = 600$  Ом,  $f_{2} = 9,2$  ГГц,  $\rho_{II} = 37,28$  Ом,  $\Delta F_{2} = 404$  МГц. Подставив эти данные в (17)...(19), получим общие расчётные выражения для оптимальных секций ЦЗУ, в которых сопротивление электронной нагрузки составляет 80 % от сопротивления ния внешней нагрузки  $R_{II}$ , приведенной к резонатору.

Полоса пропускания секции ЦЗУ, соответствующей оптимальному фильтру, определяется выражением:

$$\Delta F = 0,5668 f_{\rm c} \rho_{\rm n} / R_{\rm c}, \tag{20}$$

Данный режим определяют следующие значения тока пучка и напряжения ускорения:

$$V_0 = 1,8258 \left( f_c \rho_n l / R_c \right)^2 = 5,712 \left( \Delta F l \right)^2, \tag{21}$$

$$I_0 = 1,4606 \cdot 10^7 (f_c \rho_n d)^2 / (R_c)^3 = 4,57 \cdot 10^7 (\Delta F)^2 d^2 / R_c.$$
(22)

Индуктивность и ёмкость последовательного контура, характеристические сопротивления объёмного резонатора и последовательного контура, согласно (9) и (21), определяются как:

$$L_{c} = 2,1468 \cdot 10^{6} (V_{0})^{0.5} d^{2} / (I_{0}l) = 0,26835 R_{c} l / (V_{0})^{0.5},$$
(23a)

$$\rho_{\rm n}\rho_{\rm c} = 1,22478(R_{\rm c})^2, \tag{236}$$

$$C_{c} = 1,18 \cdot 10^{-2} l I_{0} / d (f_{c})^{2} (V_{0})^{0.5}.$$
(23B)

Здесь и далее:  $\rho_n$ ,  $R_c$  – Ом;  $f_c$  – ГГц; l, d – мм;  $V_0$  – В;  $I_0$  – мкА;  $L_c$  – нГн; C –  $\phi\Phi$ .

Относительная ширина полосы  $\Delta F/f_c$  двухзвенной модели секции ЦЗУ в режиме оптимального фильтра определяется отношением характеристического сопротивления объёмного резонатора и резонансного сопротивления электронной нагрузки ( $\rho_n/R_c$ ) либо, согласно (23б), отношением резонансного и характеристического сопротивлений электронной нагрузки:  $\Delta F/f_c \sim \rho_n/R_c \sim R_c/\rho_c$ . Определяя характеристическое сопротивление последовательного контура согласно (23а), а параметр  $(V_0)^{0,5}$  через число периодов колебаний N циклотронной частоты за время пролёта ламелей пучком электронов, устанавливаем, что

$$\Delta F = 0,6936f_{/}N \sim f_{/}N.$$
<sup>(24)</sup>

Таким образом, ширина полосы частот секции ЦЗУ как оптимального двухзвенного фильтра определяется отношением резонансной частоты к добротности последовательного контура, т. е. к числу оборотов электрона вокруг оси пучка за время пролёта ламелей.

#### 7. РАСЧ"Т РЕЖИМА СЕКЦИИ ЦЗУ

Методику расчёта секции ЦЗУ поясним на конкретном примере.

В качестве исходных данных приняты: длина ламели l; высота зазора между ламелями d; сопротивление объёмного резонатора  $\rho_n$ ; центральная частота резонатора и циклотронного резонанса  $f_c$ ; коэффициент стоячей волны в пределах полосы пропускания КСВН не более 1,25; сопротивление внешней нагрузки секции ЦЗУ  $R_l$ .

В результате расчета определяются: полоса пропускания  $\Delta F$ ; ток электронного пучка  $I_0$ ; напряжение ускорения  $V_0$ ; коэффициент трансформации сопротивления внешней нагрузки  $R_L$  к сопротивлению нагрузки  $R_{\mu}$  параллельного контура  $\kappa_{\mu} = R_L/R_{\mu} < 1$ .

Режим работы секции ЦЗУ по уровню КСВН не более 1,25 определяется выражениями (20)...(23). Дополнительно к этим выражениям установим зависимость сопротивления последовательного контура от допустимого тока пучка – электронной нагрузки  $(R_c)_i$ , а также значение коэффициента трансформации  $\kappa_r$ .

Согласно (22),

$$(R_{\rm c})_i = [1,4606 \cdot 10^7 (f_0 \rho_{\rm n} d)^2 / (I_0)_{\rm non}]^{1/3}.$$
(25)

Величина нагрузки  $R_{_{\rm H}}$  параллельного контура в принятой модели ЦЗУ на 25 % превышает сопротивление электронной нагрузки  $R_{_{\rm c}}$ , т. е.  $R_{_{\rm H}} = 1,25R_{_{\rm c}}$ . Соответственно коэффициент трансформации внешней нагрузки  $R_{_L}$  к сопротивлению нагрузки, приведенной к параллельному контуру, определяется соотношением:

$$\kappa_{\rm T} = R_L / R_{\rm H} = R_L / (1,25R_{\rm c}). \tag{26}$$

*Пример.* Исходные данные: l = 3 мм, d = 0,1 мм,  $\rho_n = 40$  Ом,  $f_0 = 9,2$  ГГц, допустимый ток пучка – 250...300 мкА, сопротивление внешней нагрузки  $R_L = 50$  Ом.

Согласно (25), сопротивление электронной нагрузки при токе пучка 300 мкА равно:  $(R_c)_{300} = [1,4606 \cdot 10^7 (9,2 \cdot 40 \cdot 0,1)^2 / 300]^{1/3} = 404$  Ом, а при токе 250 мкА  $(R_c)_{250} = 429$  Ом.

Коэффициент трансформации сопротивления нагрузки при  $R_L = 50$  Ом и  $R_c = 404$  Ом составляет:  $\kappa_{\rm T} = R_L/R_{\rm H} = R_L/1,25R_{\rm c} = 1/10,1$ , а при  $R_L = 50$  Ом и  $R_c = 429$  Ом – 1/10,73.

В интервале допустимых значений тока 250...300 мкА полоса пропускания секции ЦЗУ, согласно (20), составляет 0,445...0,473 ГГц. Напряжение ускорения, согласно (21), лежит в пределах от 13,96 до 15,76 В (табл. 2).

Таблица 2

<i>R</i> <sub>с,</sub> Ом	Д <i>F</i> , ГГц	$V_0, \mathbf{B}$	<i>I</i> <sub>0</sub> , мкА	$\kappa_{ m T}$
404	0,516	13,64	300	1/10,1
429	0,486	12,08	250	1/10,73

Результаты расчёта ЦЗУ для тока 250 и 300 мкА

Выбор сочетания тока и напряжения зависит от величины коэффициента трансформации, которая реализована в образце ЦЗУ (Приложение 1).

В образце ЦЗУ, имеющем коэффициент трансформации  $\kappa_{\rm r}$ , сопротивление нагрузки  $R_{\rm H}$ , приведенное к параллельному контуру, определяется как  $R_{\rm H} = R_L / \kappa_{\rm r}$ , где  $R_L$  – сопротивление внешней нагрузки.

Ширина полосы фильтра, ток пучка, напряжение ускорения, согласно (20)...(22), при  $R_{\rm H} = 1,25R_{\rm c}$  и подстройке электрического режима работы конструкции, выполненной с коэффициентом трансформации  $\kappa_{\rm s}$ , описываются выражениями:

$$\Delta F = 0.7085 f_c \rho_{\Pi} \kappa_{T} / R_L, \qquad (27)$$

$$V_0 = 2,853 (f_c \rho_{\rm n} l \kappa_{\rm r} / R_L)^2, \qquad (28)$$

$$I_0 = 2,853 \cdot 10^7 (f_c \rho_{\rm n} d)^2 (\kappa_{\rm r} / R_{\rm I})^3.$$
<sup>(29)</sup>

Например, при  $\kappa_r = 1/10,5$  имеем:  $\Delta F = 0,497$  ГГц;  $V_0 = 12,62$  В;  $I_0 = 267$  мкА.

Аналогично (с помощью подстроек тока и напряжения) могут быть компенсированы неточности определения режима секции, связанные с отклонениями размеров ламелей и погрешностями расчёта сопротивления объёмного резонатора.

Частотные зависимости коэффициента передачи секции ЦЗУ, коэффициента отражения или КСВН определяются с помощью программы расчёта матрицы рассеяния как характеристики двухконтурного фильтра, в котором электронная нагрузка объёмного резонатора моделирована последовательным звеном, а резонатор – параллельным звеном. Исходными данными служат индуктивность циклотронного резонанса  $L_c$ , соответствующее значение ёмкости циклотронного резонанса  $L_n$ , соответствующее значение ёмкости параллельного контура  $C_n = 1/[(2\pi f_c)^2 L_n]$ , сопротивление электронной нагрузки  $R_c$  и приведенное к параллельному контуру сопротивление нагрузки  $R_{\mu}$ .



Рис. 9. Электрическая схема модели секции ЦЗУ

Частотная зависимость коэффициента передачи ЦЗУ от СВЧ-входа до СВЧ-выхода (см. рис. 1) определяется как произведение коэффициентов передачи двух независимых двухконтурных фильтров, входной и выходной секций.

Электрическая схема и частотная характеристика КСВН рассматриваемой модели при  $\kappa_{\rm r} =$ =1/10,5 представлены на рис. 9 и 10. Ширина полосы секции по уровню КСВН 1,24 составляет 496,6 МГц, что соответствует результатам аналитического расчёта.



Рис. 10. Результат расчёта частотной характеристики КСВН

# 8. ПУТИ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ЦЗУ КАК ДВУХЗВЕННОГО ФИЛЬТРА

Ширина полосы двухзвенного фильтра, модели секции ЦЗУ, определяется, согласно (20), отношением сопротивлений объёмного резонатора и электронной нагрузки ( $\rho_n/R_c$ ). Определяя  $R_c$  на основе (22), установим, что для оптимального двухзвенного фильтра

$$\Delta F = 2,3187 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{I_0 \mathbf{c}_{\pi} f_{\mathbf{c}} d^{-2}}.$$
(30)

Ширина полосы секции ЦЗУ, как видно из выражения (30), возрастает пропорционально корню кубическому увеличения тока, сопротивления резонатора, частоты резонанса. Более эффективно, в степени -2/3, ширина полосы возрастает при уменьшении зазора между ламелями. Относительная ширина полосы при увеличении частоты сигнала уменьшается.

Длина ламелей сказывается только на величине напряжения ускорения (хотя при построении резонатора она существенно определяет его характеристическое сопротивление):

$$V_0 = 5,6832(\Delta Fl)^2.$$
(31)

Согласно (30), характеристическое сопротивление резонатора, которое при создании ЦЗУ, наряду с допустимым током пучка, является критическим параметром, определяется соотношением

$$\rho_{\rm n} = 8,0217 \cdot 10^7 (\Delta F)^3 d^2 / (I_{\rm o} f_0). \tag{32}$$

Зависимости сопротивления параллельного контура от ширины полосы для оптимального фильтра на примере  $f_0 = 9,2$  ГГц, d = 0,08 мм и ряда значений тока пучка показаны на рис. 11.

Соответствующая зависимость напряжения ускорения от ширины полосы для ламелей длиной 2,5 мм приведена на рис. 12.

Для реализации характеристик оптимального фильтра сопротивлению резонатора должно отвечать вполне определённое сочетание напряжения ускорения и тока пучка.

Требования к сопротивлению объёмного резонатора возрастают в кубической зависимости по мере увеличения требуемой ширины полосы рабочих частот, что ограничивает возможности построения широкополосных ЦЗУ по системе двухзвенного фильтра.



Рис. 11. Зависимости сопротивления параллельного контура от ширины полосы для оптимального фильтра ЦЗУ



Рис. 12. Зависимость напряжения ускорения от ширины полосы для оптимального фильтра ЦЗУ

# 9. СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕННОЙ И РАСЧ"ТНОЙ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ЦЗУ

Результаты численных расчётов ширины полосы секции ЦЗУ далее сопоставлены с экспериментальными данными четырех ЦЗУ различной конструкции.

Для каждого образца по данным конструкции, электрического режима, резонансной частоты вычислена ширина полосы частот и определено соотношение измеренного и расчётного значений ширины полосы. Оценивая результаты сравнения численных и экспериментальных данных, следует иметь в виду, что ряд неопределенностей, относящихся к реальным приборам, влияет на точность расчетов по предложенной модели:

– СВЧ-тракт, соединяющий резонатор ЦЗУ с внешней нагрузкой, содержит реактивные неоднородности (в частности, индуктивность петли связи), а также керамический изолятор, который разграничивает вакуум внутри прибора и атмосферу во внешнем участке тракта;

 – ток пучка в некоторых конструкциях ЦЗУ может быть использован не полностью (при ширине ламели, меньшей, чем ширина ленты электронного пучка, резонатор эффективно взаимодействует лишь с частью пучка);

– контактная разность потенциалов между эмитирующим покрытием катода и поверхностью металла в зазоре резонатора изменяет действующий потенциал дрейфа пучка в зазоре резонатора на несколько вольт относительно измеренного внешними приборами и неопределённо зависит от состояния (чистоты) этой поверхности, пленок атомарной толщины;

 неоднородность индукции постоянного магнитного поля на протяжении длины ламели резонатора изменяет взаимодействие резонатора с электронным пучком, меняя крутизну составляющих проводимости электронной нагрузки в условиях циклотронного резонанса.

Помимо этого:

 – аппроксимация электронной нагрузки одиночным последовательным контуром, имеющим более низкую крутизну частотных характеристик, должна завышать оценку ширины полосы ЦЗУ;

 – электрическое поле резонатора между ламелями неоднородно, в отличие от принятой в исходных исследованиях [5] структуры поля идеального конденсатора.

При сопоставлении измеренного и расчётного значений ширины полосы расчёт моделей секции ЦЗУ выполнен при следующих условиях:

 – напряжение ускорения уменьшено на 2,5 В относительно измеренного значения с учётом контактной разности потенциалов источника тока пучка и корпуса прибора (см. Приложение 2);

 – ток между ламелями равен полному току пучка (коэффициент использования тока принят равным единице);

- центральные частоты резонатора и циклотронного резонанса одинаковы;

- реактивные неоднородности входного тракта отсутствуют;

- ламели определены как плоские конденсаторы (электрическое поле ламелей принято однородным);

- индукция постоянного магнитного поля на протяжении длины ламели неизменна.

Для четырёх исследованных вариантов ЦЗУ в интервале частот 3,0...10,5 ГГц отношение расчётной ширины полосы к измеренной лежит в диапазоне -5...11 %, как показано в табл. 3.

Таблица 3

Поромотр	Номер образца			
Параметр	1	2	3	4
Диапазон частот, ГГц	3,00	8,50	9,00	10,50
Ширина полосы, МГц:				
расчетная	184	357	364	300
измеренная	193	333	327	283
Отношение расчётной				
ширины полосы к измеренной, %	-4,66	7,2	11,3	6

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных

Как видно, предложенные модель и методика аналитического расчета параметров ЦЗУ позволяют достаточно достоверно оценивать ширину полосы проектируемого ЦЗУ, снижая объём дорогостоящих пробных экспериментов.

#### 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Секция циклотронного защитного устройства рассмотрена как двухзвенный фильтр, оптимальный по малым значениям КСВН в заданной полосе частот. Установлены закономерности и численные связи электрических и конструктивных параметров секции.

Предложена методика инженерного расчёта ширины полосы частот ЦЗУ по основным электрическим и конструктивным параметрам: току электронного пучка, напряжению ускорения, размерам ламелей, характеристическому сопротивлению резонатора, частоте резонанса.

Простые формулы расчёта оптимальных значений тока пучка и напряжения ускорения определяют условия реализации максимальной полосы частот ЦЗУ при заданном малом уровне КСВН.

Найденные зависимости позволяют:

 – оценить необходимые сочетания размеров ламелей, сопротивления объёмного резонатора и данных электрического режима применительно к требуемой ширине полосы частот и допустимому току электронного пучка;

– определить пути корректировки режимов и конструкции образца ЦЗУ;

 установить возможности расширения полосы циклотронного прибора защиты при ограничениях на ток пучка, сопротивление объёмного резонатора, размеры ламелей и на этой основе рекомендовать направления конструирования ЦЗУ.

При характеристическом сопротивлении объёмного резонатора 100 Ом, зазоре ламелей 0,08 мм на частоте 9,2 ГГц для тока пучка 300 мкА может быть реализована ширина полосы 0,87 ГГц, существенно превышающая значения, обычные для секции ЦЗУ как двухзвенного фильтра.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

#### Методика измерения коэффициента трансформации сопротивления внешней нагрузки к. образца ЦЗУ

1. Установить режим совпадения частот резонатора и циклотронного резонанса (характеризуется симметрией пульсирующей кривой КСВН).

2. Ток пучка уменьшить до величины, при которой кривая КСВН не имеет пульсаций, а резонансный уровень КСВН  $\sigma_{pea}$  – до 1,5...2.

3. Измерить контактную разность потенциалов  $V_{\text{конт}}$  между источником тока пучка и корпусом ЦЗУ (Приложение 2).

4. Измерить ускоряющее напряжение  $V_0$  и ток пучка  $I_0$ .

5. Вычислить сопротивление циклотронного резонанса:

$$R_{\rm c} = \frac{8 \cdot 10^6 \left( V_0 - V_{\rm KOHT} \right) d^2}{I_0 l^2},$$

где *d* и *l* – ширина зазора и длина ламелей.

6. Определить сопротивление нагрузки, приведенное к резонатору:  $R_{\mu} = R_{c} / \sigma_{pes}$ .

7. По известному сопротивлению нагрузки  $R_L$ , как правило, равному 50 Ом, вычислить коэффициент трансформации нагрузки:  $\kappa_{\rm r} = R_L / R_{\rm H}$ .

Например:  $V_{\text{конт}} = 2,72$  B;  $\sigma_{\text{рез}} = 1,5$ ;  $V_0 = 23,6$  B;  $I_0 = 220$  мкА; d = 0,11 мм; l = 3 мм;  $R_L = 50$  Ом. При этом  $R_c = 1021$  Ом,  $R_u = 680$  Ом,  $\kappa_r = 1/13,6$ .

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 2

# Измерение контактной разности потенциалов между источником тока пучка и корпусом в образце ЦЗУ

Напряжение ускорения ЦЗУ, определяемое как  $V_{_{\rm H3M}}$ , измеряется между вводом катода и корпусом прибора. В то же время реально действующее на пучок тока напряжение  $V_{_{\rm H}}$  является меньшим на величину отрицательной контактной разности потенциалов в эмиттере катода  $V_{_{\rm H3M}}$ , т. е.  $V_{_{\rm A}} = V_{_{\rm H3M}} + (-V_{_{\rm KOHT}})$ .

Ниже определена формула для расчёта контактной разности потенциалов  $V_{\text{конт}}$ .

В режиме совпадающих частот резонатора и циклотронного резонанса и последующей установки высокого сопротивления циклотронного резонанса (см. Приложение 1) КСВН входа ЦЗУ на центральной частоте определяется отношением сопротивления электронной нагрузки к сопротивлению внешней нагрузки, приведенному к резонатору.

Поскольку сопротивление электронной нагрузки пропорционально отношению действующего напряжения ускорения  $V_{_{\pi}}$  к току пучка, имеем:  $\sigma_{_{pe3}} = R_{_c}/R_{_{H}} \sim V_{_{\pi}}/I_0$ .

При фиксированном значении  $\sigma_{pes}$  отношение действующего значения напряжения ускорения к току пучка в образце прибора не зависит от величины тока:  $V_{\pi}/I_0 = \text{const.}$ 

Определим отношение измеренного напряжения ускорения к току как

$$\kappa = V_{\mu_{3M}}/I_0 = (V_{\mu} + V_{\kappa_{0}})/I_0.$$

Для двух разных значений тока,  $I_{0,1}$  и  $I_{0,2}$ , которым соответствуют напряжения  $V_{_{H3M1}}$  и  $V_{_{H3M2}}$  и для которых сохраняется неизменное значение  $\sigma_{_{pe3}}$  можем записать:

$$\kappa_1 - \kappa_2 = V_{\text{конт}} \left[ (1/I_{0,1}) - (1/I_{0,2}) \right],$$

откуда следует выражение для контактной разности потенциалов:

$$V_{\text{конт}} = \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{(1/I_{0,1}) - (1/I_{0,2})} = \frac{V_{\text{изм}1}I_{0,2} - V_{\text{изм}2}I_{0,1}}{I_{0,2} - I_{0,1}}.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2167480 РФ. Сверхвысокочастотное защитное устройство / Ю.А. Будзинский, С.П. Кантюк, В.Б. Петровский; приоритет 21.02.85.

2. Патент 43405 РФ. Циклотронно-защищенное комплексированное устройство (ЦЗКУ) / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов; приоритет 10.04.03.

3. Об увеличении полосы рабочих частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 15-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2005). Севастополь, Украина. 12-16 сентября 2005. – С. 205-206.

4. *Budzinskiy Y.A., Bykovskiy S.V.* Cyclotron protective device with increased frequency band // Abstracts of 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC'2009. 28-30 April 2009, Rome, Italy. – P. 60-61.

5. Ванке В.А., Лопухин В.М., Савин В.Л. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн // УФН. – 1969. – Т. 99, вып. 4. – С. 247-569.

Статья поступила 16 декабря 2009 г.

# 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 публикования (акт экспертизы).

- 2. Статья должна содержать:
- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- 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 – А4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутоновых 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 18 × 24 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.

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

# 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. 11	Формат 60×88 <sup>1/8</sup>
25.02.2010 г.	Учизд. л. 11,5	Тираж 500
Заказ № 114	Индекс 36292	6 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