



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (547)

2020





ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(547)

2020

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н. А.А. Борисов

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **С.П. Морев**, АО «НПП «Торий», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2020 г.



ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(547)

2020

Founded in 1950

Editor-in-chief

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **S.P. Morev**, JSC «RPC «Torij», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИИ № ФЦ 77-73640 dated September 7, 2018).

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

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

К 80-летию Александра Николаевича Королева.....	6
Радиоэлектронные устройства	
<i>Джуринский К.Б.</i> – Новейшие достижения в области радиочастотных соединителей.....	24
Электровакуумные приборы	
<i>Духина Н.Г., Мирющенко Н.И., Плешанов С.А., Ревенко К.В., Чугунов В.В.</i> – Исследование эффективности экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ-ЛН.....	37
<i>Журавлев С.Д., Шестеркин В.И.</i> – Эффективная площадь эмиссии катода в катодно-сеточном узле с теневой сеткой.....	53
<i>Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Манжосин М.А., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И.</i> – 400-ваттный многолучевой импульсный клистрон <i>Ки</i> -диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита.....	58
<i>Галдецкий А.В., Савин А.Н., Ключников Н.А.</i> – Вывод энергии баночного типа сверхмощного клистрона <i>S</i> -диапазона.....	64
<i>Данилов А.Б., Роговин В.И., Симонова Ю.В.</i> – Исследование возможности повышения электронного КПД ЛБВ <i>Q</i> -диапазона.....	76
Технология и материаловедение	
<i>Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Логинов В.В., Пучнина С.В.</i> – Исследование процесса активной пайки легкоплавкими припоями кварцевого стекла с металлами в газоразрядных приборах..	82
<i>Жабин Г.А., Лябин Н.А., Архипов Д.Ю., Парамонов В.С., Федотов В.В., Долгих К.О.</i> – Применение лазера на парах меди в изготовлении молекулярно-напыленных оксидных катодов.....	90
Твердотельная электроника	
<i>Билевич Д.В., Сальников А.С., Горяинов А.Е.</i> – Разработка методики автоматического определения репрезентативного СВЧ-транзистора для усилительных применений в линейном режиме по частотным характеристикам при измерениях на полупроводниковой пластине	98
Экономика	
<i>Чекаданова М.В., Бобрышев А.Д.</i> – Совершенствование управления особыми экономическими зонами технико-внедренческого типа.....	108
Краткие сообщения	
<i>Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Сизоненко М.И.</i> – Суммы квадратов целых чисел..	118
Тематический указатель.....	122
Алфавитный указатель.....	126

CONTENTS

To the 80-th anniversary of Alexander Nikolaevich Korolev.....	6
Radioelectronic devices	
<i>Dzhurinsky K.B.</i> – The latest advances in the field of RF connectors.....	24
Electrovacuum devices	
<i>Dukhina N.G., Miryushchenko N.I., Pleshanov S.A., Revenko K.V., Chugunov V.V.</i> – The shielding efficiency investigation of precision airborne cesium atomic-beam tubes (ABT) with laser pumping (LP).....	37
<i>Zhuravlev S.D., Shesterkin V.I.</i> – The effective cathode emission area in a cathode-grid unit with a shadow grid.....	53
<i>Zhuravlev S.D., Kirichenko D.I., Manzhosin M.A., Shalaev P.D., Shesterkin V.I.</i> – 400 W multiple-beam <i>Ku</i> -band pulsed klystron with a shadow grid of anisotropic pyrolytic graphite.....	58
<i>Galdetsky A.V., Savin A.N., Klyuchnikov N.A.</i> – Pillbox-type energy output of superpower <i>S</i> -band klystron.....	64
<i>Danilov A.B., Rogovin V.I., Simonova Yu.V.</i> – The investigation of a possibility to increase the <i>Q</i> -band TWT electronic efficiency.....	76
Technology and material science	
<i>Gavrish S.V., Kugushev D.N., Loginov V.V., Puchnina S.V.</i> – The investigation of the active soldering process with low-melting solders of quartz glass with metals in gas-discharge devices.....	82
<i>Zhabin G.A., Lyabin N.A., Arkhipov D.Yu., Paramonov V.S., Fedotov V.V., Dolgikh K.O.</i> – Application of lasers on copper vapor in the manufacturing of molecular sputter-deposited oxide cathodes	90
Solid-state electronics	
<i>Bilevich D.V., Salnikov A.S., Goryainov A.E.</i> – Development of a technique for automatic determination of a golden microwave transistor for amplifying applications in a linear mode by frequency characteristics based on measurements on a semiconductor wafer.....	98
Economics	
<i>Chekadanova M.V., Bobryshev A.D.</i> – Improving the management of special economic zones of technical and implementation type.....	108
News in brief	
<i>Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A., Sizonenko M.I.</i> – Sums of squares of integers.....	118
Subject index	122
Alphabetical index	126



К 80-ЛЕТИЮ АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА КОРОЛЕВА



Александр Николаевич Королев родился в г. Калинин 4 апреля 1940 года.

В 1963 г. окончил Львовский политехнический институт.

Генеральный директор НПП «Исток» с 1988 по 2009 год.

На предприятии работал с 1975 по 2013 год.

Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, лауреат премии Правительства Российской Федерации.

Доктор технических наук, профессор. Почетный гражданин города Фрязино.

Почетный гражданин Московской области.

Умер 26 апреля 2013 года. Похоронен во Фрязино.



ГРАЖДАНСКИЙ ПОДВИГ
АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА КОРОЛЁВА

А. В. Потапов,
лауреат Государственной премии Российской Федерации

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

4 апреля исполнилось 80 лет со дня рождения Александра Николаевича Королёва. Семь лет его нет с нами. Но чем больше проходит времени, тем яснее и отчетливее становится буквально гражданский подвиг Александра Николаевича, сумевшего в немыслимо тяжелые годы всеобщей разрухи в стране, когда руководство страны сознательно фактически уничтожало промышленную базу государства, в том числе предприятия военно-промышленного комплекса, уберечь предприятие от банкротства, от посягательств на само его существование, сохранить костяк уникального высокопрофессионального коллектива «Истока» и даже не потерять технологические и научные достижения, накопленные в предыдущие годы.

Уже в начале 90-х годов в условиях фактически полного отсутствия финансирования и непрерывных попыток практически уничтожения предприятия А. Н. Королёв предпринял почти героические усилия по выводу продукции «Истока» на международный рынок. Сначала это был тоненький ручеек, который со временем потихоньку нарастал, но всё же спасти «Исток» от катастрофы он не мог. Долги по зарплате в середине 90-х достигали 11 месяцев.

К счастью, «палочкой-выручалочкой» стал сформированный в начале 80-х годов научно-практический задел, в котором Александр Николаевич не только принимал активное участие, но и был одним из основных исполнителей. В 1996 году неожиданно возник экспортный контракт на поставки изделия, разработка которого началась ещё в 1980 году, завершилась примерно в 1986-м, и еще несколько лет изделие серийно производилось на Украине. Теперь в связи с расширением экспортных возможностей, предоставленных предприятию государством, и разрывом связей с Украиной было предложено возобновить на «Истоке» выпуск экспортного варианта этого изделия. Эта работа потребовала невероятного напряжения сил сотрудников предприятия, но она его спасла и стала основой для постепенного восстановления финансовой стабильности. И хотя долги ещё терзали наше предприятие, началась почти регулярная выплата зарплаты.

Работа на посту генерального директора, естественно, проходит на виду у всего коллектива предприятия, однако все её сложности и трудности лучше всего могут оценить ближайшие соратники Александра Николаевича по руководству «Истоком».

Приведу оценку деятельности Александра Николаевича на посту генерального директора, данную его предшественником на этом высоком посту. Ещё в марте 2000 года, в канун 60-летнего юбилея Александра Николаевича, я обратился к генеральному конструктору НПП «Исток» Сергею Ивановичу Реброву, генеральному директору предприятия с 1962 по 1988 год, с просьбой высказать свои соображения о работе предприятия в последние 10 лет. Вот его ответ:

– 80-е годы характеризовались для НПО «Исток» началом нового этапа в его научной и производственной деятельности. Внедрение комплексированных устройств и схемотехники уже фактически создало задел для разработки на нашем предприятии сложнейшей радиоэлектронной аппаратуры. К тому же, в отличие от предприятий радиопромышленности, мы в то время обладали более совершенной технологией изготовления базовых элементов и компонентов систем. Для разработки такой аппаратуры на предприятии сразу же опреде-

лилась целая группа единомышленников в лице А. Н. Королева, В. Н. Русакова, С. А. Зайцева, М. И. Лопина, А. В. Потапова, В. И. Гуртового, М. Ф. Воскобойника и других. Уже с начала работ проявились высокие профессиональные качества А.Н. Королева в этом новом для нас направлении.

Он обладал всеми качествами крупного руководителя и, безусловно, стал знаменательной фигурой в коллективе разработчиков, заменив рано ушедшего из жизни замечательного руководителя НПК-7 Владимира Никитовича Русакова. Александр Николаевич Королёв продолжил начатую разработку и привёл её к успешному окончанию с великолепными результатами испытаний. При этом А. Н. Королёв продолжил развитие НПК-7 и укрепление его коллектива, создавая первое в ГНПП «Исток» подразделение по разработке законченных образцов радиоэлектронной и связной аппаратуры. Правильность выбранных в восьмидесятые годы новых технических направлений была доказана временем. Работы, выполненные на предприятии 15 лет назад, стали в настоящее время заделом для основных источников финансовых поступлений.

Недавно исполнилось 10 лет, как Александра Николаевича Королёва 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 ельцинских псевдорыночных реформ.

Наверное, в это время таким, как А.Н. Королёв, и должен был быть генеральный директор крупного градообразующего предприятия.

О деятельности Александра Николаевича неоднократно высказывался и генеральный директор АО «НПП «Исток» им. Шокина» Александр Анатольевич Борисов, которого ещё накануне семидесятилетия А. Н. Королёва я попросил ответить на два вопроса:

– Александр Анатольевич! Вы провели специальное совещание по подготовке к празднованию юбилея А. Н. Королёва, что для «Истока» неожиданно. Удалось ли Вам за то время, что Вы находитесь на посту генерального директора «Истока», оценить роль Вашего предшественника в жизни «Истока» в последние 20 лет?

– Вы знаете, для этого мне не надо было становиться генеральным директором «Истока». Что такое «Исток» и его значение для отечественной 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 МО РФ мне приходилось плотно взаимодействовать не только с Александром Николаевичем, но и со многими сотрудниками НПП «Исток». Так что роль руководителя такого сложного предприятия, как НПП «Исток», к тому же являющегося градообразующим, в жизни не только самого предприятия, но и в жизни города трудно переоценить.

– Считаете ли Вы, что А. Н. Королёв использовал все свои возможности для вывода «Истока» из той сложной ситуации, в которой предприятие находилось, 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 счёт освоения новых технологических процессов. Но, конечно, я бы не согласился руководить «Истоком», если бы не был уверен, что имеется возможность обеспечить полноценную стабильную работу предприятия. Мероприятия для этого сейчас разрабатываются, но одна из первых мер, которую я предпринял, – получил крупный кредит для финансирования закупок материалов и ком-

плектующих изделий, так как без этого невозможно требовать от руководителей подразделений выполнения производственных планов.

Несколько позже, в 2014 году, А. А. Борисов снова вернулся к этому вопросу в статье «От истоков в будущее»:

«На долю А. Н. Королёва выпало время смены общественного строя и распада СССР, вызвавших небывалый кризис в истории цивилизованных государств, и в первую очередь во всех высокотехнологичных отраслях промышленности. Однако ему за время его руководства НПП «Исток», с 1988 по 2009 год, удалось сохранить организационную и технологическую целостность предприятия, устоять под разрушительным давлением внешних и внутренних сил, обеспечить жизнедеятельность всех служб предприятия. «Исток» сумел заявить о себе на международных рынках, разработать и организовать производство экспортно-ориентированной продукции, в основном создать пилотные линии по производству монолитных интегральных схем и субмодулей СВЧ. Думаю, что имя Александра Николаевича Королёва навечно сохранится в истории «Истока» как одного из его выдающихся руководителей».

**ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР «ИСТОКА»
ПЕРИОДА СМЕНЫ ФОРМАЦИЙ**

А. К. Балыко,

лауреат премии Ленинского комсомола

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

Когда 14 сентября 1988 года трудовой коллектив НПО «Исток» на конференции избрал своим генеральным директором Александра Николаевича Королева, вряд ли кто-нибудь мог предполагать, что всего через три года ситуация в стране и на предприятии круто изменится.

Исчезнет Советский Союз. Лавинообразно станет расти число обанкротившихся предприятий. Рухнет военно-промышленный комплекс страны, на протяжении многих десятилетий питавший «Исток» своими заказами. Бюджет города напрямую станет зависеть от объема выпускаемой продукции на градообразующих предприятиях. Для того чтобы предприятию и городу выжить в этих условиях, генеральный директор «Истока» должен был обладать исключительными качествами, не характерными для руководителя советского периода.

Пройдя в течение двух десятилетий нелегкий путь с Александром Николаевичем, сотрудники «Истока» могут с уверенностью утверждать, что их выбор оказался не просто верным, но и чрезвычайно прозорливым. С той огромной проблемой, которая легла на плечи А. Н. Королева, он справился успешно. Обладая многими выдающимися качествами, Александр Николаевич смог не допустить разрушения предприятия и на протяжении двух десятилетий вести его верным, им выбранным путем.

А. Н. Королев родился в г. Калинин (ныне Тверь) 4 апреля 1940 г. Отец, Николай Александрович Королев, был директором электростанции. Мать, Зоя Петровна, была врачом. В 1947 г. семья Королевых переехала во Львов, куда перевели отца. С ранних лет Александр проявил себя как разносторонний молодой человек. Активно участвовал не только в математических и физических олимпиадах, но и в спортивных мероприятиях, выиграл чемпионат Украины по десятиборью среди юношей. Во Львове Александр Николаевич окончил школу и без проблем поступил во Львовский политехнический институт на радиотехнический факультет по специальности «Автоматика и полупроводниковая электроника».

В 1963 г., после окончания института, он по распределению был направлен на работу в Цен-

тральный научно-исследовательский институт связи Министерства обороны СССР в г. Мытищи. В 1966 г., отработав положенные два года в ЦНИИС, Александр Николаевич, почувствовав в себе непреодолимую тягу к научной работе, принимает решение поступить в аспирантуру Фрязинского филиала ИРЭ АН СССР. Здесь он познакомился с работами выдающихся советских ученых в области радиолокации и статистической радиотехники, академиков В. А. Котельникова и Н. Н. Боголюбова, члена-корреспондента Ю. Б. Кобзарева, докторов технических наук И. А. Большакова, А. Е. Башаринова, Р. Л. Стратоновича, Я. Д. Ширмана и других. Я хорошо был знаком с этой областью статистической радиотехники, потому что И. А. Большаков был руководителем моего дипломного проекта в МИЭТе в 1972 году.

Первые работы А. Н. Королева посвящены актуальной в то время тематике – выделению сигналов и потоков сигналов из шума и исследованию шумовых полей в диапазоне сверхдлинных радиоволн, маскировавших полезные сигналы. Теоретические результаты его работы требовали экспериментальных подтверждений. Для этих исследований была выбрана деревня Лазино в Калужской области, насчитывающая всего несколько дворов, в которой полностью отсутствовало электричество, что позволяло проводить тонкие эксперименты без влияния промышленных помех. Проведя многочисленные эксперименты и доложив результаты сверхчувствительных измерений ученому совету института, Александр Николаевич с блеском защитил кандидатскую диссертацию, доказав ученому миру, что ему по силам всё: и глубокие теоретические изыскания, и надежные экспериментальные исследования, и даже тяжелая физическая работа в сложных полевых условиях по прокладке многокилометровых кабелей.

Старшее поколение хорошо помнит приход на «Исток» в середине 70-х годов интеллектуально мощной группы научных сотрудников из ФИРЭ АН СССР: Сергея Алексеевича Зайцева, Александра Николаевича Королева, Александра Васильевича Потапова, Юрия Васильевича Феофанова и других. Инициатором их прихода был видный ученый «Истока» Александр Сергеевич Победоносцев, которому в 2020 году исполнилось бы 90 лет. Он пользовался огромным авторитетом у генерального директора С. И. Реброва, и по его настоятельной просьбе Сергей Иванович пригласил молодых ученых на наше предприятие, создав для них сразу отдел 340, который стал заниматься разработкой системы автоматизированного проектирования гибридных интегральных схем (САПР ГИС). А. Н. Королев возглавил соответствующую лабораторию в отделе, а затем и отдел в чуть позднее созданном отделении 34. Через пять лет интенсивного труда им с сотрудниками были получены основополагающие результаты, которые привели сначала в удивление, а затем и в восторг многих специалистов этого направления электроники СВЧ. САПР ГИС, разработанная А. Н. Королевым и другими сотрудниками отделения 34, произвела мощный прорыв в автоматизированном проектировании изделий электроники СВЧ и стала одной из самых передовых в мире.

В начале 80-годов на «Истоке» началась мощная реорганизация научной части, связанная с выполнением важного государственного задания. Потребовались специалисты, глубоко разбирающиеся в проблемах радиолокации. Одним из первых, кто был привлечен к выполнению этой нетрадиционной для «Истока» программы, был А. Н. Королев. Задача создания современного радиолокатора была чрезвычайно сложной и необычайно привлекательной. Необходимы были новые идеи, связанные не с аналоговой, чем раньше занимались на «Истоке», а с цифровой обработкой сигналов. Александр Николаевич возглавил отдел по разработке и созданию сердцевины радиолокатора – цифрового вычислительного комплекса и его системного программного обеспечения. На эту сложнейшую работу коллективу потребовалось три года упорного труда часто в сверхурочное время, иногда длившееся по трое суток без перерыва на обед и сон. Результатом этих работ стало создание на «Истоке» впервые в СССР мощного многомашинного отечественного вычислительного комплекса для отечественного радиолокатора.

Продолжение этой уникальной работы потребовало объединения коллективов НПК-7 и отделения 34 в одно подразделение, которое возглавил сначала С. А. Зайцев, а через год А. Н. Королев. Работая над выполнением важного государственного задания, А. Н. Королёв не прекращал активной деятельности по развитию и укреплению вверенного ему коллектива НПК-7, создав, по существу, первое на «Исток» подразделение по разработке малогабаритной радиоэлектронной и связной аппаратуры. Сотрудники НПК-7 и в настоящее время с теплотой вспоминают о сердечном, человеческом отношении к ним своего начальника, его заботе о нуждах трудящихся и посильной помощи каждому работнику.

В середине 90-х годов многим казалось, что некогда мощный «Исток» также развалится вслед за другими фрязинскими предприятиями. И только новый генеральный директор предприятия, избранный трудовым коллективом в 1988 году, не терял оптимизма, он непрерывно искал новые источники финансовой поддержки предприятия и города. Огромные усилия пришлось приложить ему, чтобы доказать, что «Исток» способен организовать серийный выпуск изделий, востребованных на рынке. В течение многих лет экспортные и отечественные заказы на эти изделия «кормили» и предприятие, и город Фрязино.

Особое внимание А. Н. Королев уделял выпуску на предприятии гражданской продукции. Разрабатывались СВЧ маяки-ответчики для потерпевших кораблекрушение, медицинские терапевтические установки для лечения онкологических больных, лазерные технологические установки для прецизионной резки металлов, радиорелейные станции для связи в труднодоступной местности, радиолокационные датчики скорости для железнодорожного транспорта, СВЧ-уровнемеры для применения в металлургии и промышленности строительных материалов, новейшие технологические процессы на основе использования энергии СВЧ-излучения.

Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина от 29 сентября 1999 года авторскому коллективу в составе генерального директора ГНПП «Исток» Королева А. Н., начальника лаборатории НПК-2 Симонова К. Г. и соавторов из других предприятий страны была присуждена Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники «За разработку научно-практических основ, создание и внедрение экологически безопасных высокопроизводительных радиационно-технологических установок для радиационной обработки изделий и материалов».

Огромной заслугой А. Н. Королева является организация разработки и серийного выпуска на предприятии цезиевых атомно-лучевых трубок, являющихся стандартами частоты для отечественной системы глобального позиционирования ГЛОНАСС (главные конструкторы И. И. Самарцев, С. А. Плешанов). В настоящее время на околоземной орбите находятся 28 спутников системы ГЛОНАСС, покрывающих всю территорию Земного шара. При этом 16 спутников из всей группировки космических аппаратов были выведены на орбиту еще при жизни Александра Николаевича и действуют до сих пор.

А. Н. Королев, несомненно, был одним из лучших директоров предприятий российской электроники, сумевшим найти пути выживания крупного наукоемкого градообразующего предприятия в самые тяжелые годы смены государственного строя в стране.

Ему, во-первых, в отличие от других директоров соседних предприятий, удалось сохранить организационную, технологическую, научно-техническую и кадровую целостность предприятия, несмотря на многочисленные попытки некоторых руководителей подразделений НПО «Исток» создать на базе объединения так называемые «дочерние предприятия», дробящие его на более мелкие.

Во-вторых, отстоять вверенное ему предприятие под давлением сил не только изнутри, но и извне, в том числе под давлением «младореформаторов» из руководства Правительства «но-

вой» России. Сотрудники «Истока», конечно же, помнят, как, вернувшись с заседания Правительства России, посвященного оборонному комплексу, Александр Николаевич рассказывал на конференции трудового коллектива, сколько времени ему приходилось доказывать Егору Гайдару, исполняющему тогда обязанности Председателя Правительства РФ, какое важное значение для могущественной державы имеет радиоэлектроника, в том числе отечественное электронное приборостроение и отечественная электроника СВЧ. Егор Гайдар считал, что, имея нефтедоллары, все можно купить за рубежом, не развивая отечественную промышленность.

В-третьих, обеспечить жизнедеятельность не только всех подразделений предприятия, но и всех городских служб, от которых в том числе зависела работа градообразующего предприятия. Огромную помощь в решении этих вопросов ему оказывали главный инженер «Истока» Виталий Николаевич Батыгин, который в декабре 2020 года отметил свой 90-летний юбилей, и заместитель генерального директора по общим вопросам Константин Алексеевич Амосов.

В этой борьбе за выживание в сложнейший для страны период смены формаций он, генеральный директор флагмана отечественной СВЧ-электроники, как и все, учился жить в меняющемся экономическом и политическом мире и решать проблемы экономической независимости вверенного ему трудящимися предприятия.

Сегодня АО «НПП «Исток» им. Шокина» по-прежнему лидер СВЧ-электроники России, создающий новые виды продукции, обеспеченный заказами, получивший международное признание и с уверенностью смотрящий вперед.

Заслуга нашего генерального директора Александра Николаевича Королева в этом неопределима.

ВОСПОМИНАНИЯ ДИРЕКТОРА ЗАВОДА

И. М. Панас,

директор завода «Рений» с 1972 по 1995 годы,
почетный радист СССР, почетный гражданин г. Фрязино

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

На предприятие Александр Николаевич Королев пришел из Фрязинского отделения ИРЭ АН СССР уже сложившимся ученым и организатором. На «Истоке» он возглавлял подразделения научной части. Вначале был начальником лаборатории отдела 340, затем стал начальником отдела в отделении 34. На мой взгляд, самым решительным кадровым шагом С. И. Реброва стало неожиданное его решение поставить Александра Николаевича во главе крупнейшего подразделения «Истока» – НПК-7. Думаю, что во многом такое решение было принято в связи с тем, что А. Н. Королев вместе со своими товарищами успешно разработал современный радиолокатор, основные работы по которому проводились в НПК-7. К слову сказать, все работы по радиолокатору практически не были связаны с производством традиционных электронных приборов на заводе «Рений», которым я руководил много лет. Несмотря на успешное выполнение важнейшего правительственного задания и начало производства новых радиоэлектронных устройств, завод продолжал выпускать ранее разработанные электровакуумные и твердотельные приборы, принося в доход «Истока» около 80 % прибыли. И все плановые задания по этим изделиям никто не снижал, а только увеличивал. Поэтому понятно, что с Александром Николаевичем мы встречались в основном на общих производственных совещаниях. Каждый из нас занимался решением своих научных и производственных проблем.

В сентябре 1988 года на конференции трудового коллектива Александр Николаевич был

избран генеральным директором НПО «Исток». Как член дирекции, я, конечно, знал о том, что его кандидатура среди других предварительно обсуждалась на партийных и государственных уровнях власти. Тем не менее, несколько неожиданно для меня прозвучали слова С. И. Реброва, которые он произнес на трибуне Первомайской демонстрации 1988 г. Когда перед трибуной проходила колонна сотрудников НПК-7, которую, как это полагалось, возглавлял начальник НПК-7 А. Н. Королев, Сергей Иванович негромко (но стоящие на трибуне его услышали) произнес: «Вот идет будущий генеральный директор «Истока».

Близкое наше знакомство с Александром Николаевичем произошло в самом начале 90-х годов, когда НПО «Исток», а с ним и завод «Рений» прекратили свое существование и заводское производство изделий электроники СВЧ в основном было разобрано разрабатывающими научно-производственными комплексами уже научно-производственного предприятия «Исток».

Я родился в 1928 году во Львовской области, окончил Львовский политехнический институт (ЛПИ), куда поступил в 1946 году. О том, что представляло из себя в то время население Львова, говорит такой факт, что в ЛПИ треть преподавателей, да и студентов тоже, были поляки. Как-то раз, уже после того, как А. Н. Королев стал генеральным директором, мы разговорились с ним. Он также после войны жил во Львове и также, как и я, после окончания школы окончил ЛПИ. По его рассказам, Львов тогда был уже типичным советским городом с русско-украинским населением, но при этом некоторые мои преподаватели, в том числе и поляки, учили и его. С тех пор между нами возникло в некотором виде землячество и студенческое братство, и при любой встрече мы с интересом беседовали с ним на различные темы.

В 1988 году, возглавив «Исток» в очень тяжелое время, когда катастрофически не хватало финансирования для существования предприятия, Александр Николаевич искал поддержку среди бывших руководителей НПО «Исток», прежде всего, во взаимодействии с оборонными структурами, имеющими государственную финансовую поддержку, проще говоря, с Министерством обороны России. Александр Николаевич предложил мне возглавить взаимодействие с военными заказчиками, поскольку с руководителями многих оборонных предприятий я был до этого хорошо знаком.

Более того, Александр Николаевич предложил мне также стать его помощником в общественной работе – ответственным секретарем в Совете директоров промышленных предприятий наукограда, который, согласно Уставу города, являлся органом самоуправления Фрязино.

Все эти годы мне с Александром Николаевичем было интересно работать. Он часто советовался со мной не только по производственным вопросам и общественной деятельности, но и по социальным проблемам трудящихся. Эти проблемы практически все 90-е годы просто раздирали трудовой коллектив «Истока». Оглядываясь назад и анализируя этот период, я по сей день не в состоянии в полной мере объяснить, как в этих тяжелейших условиях ещё только начинавший свою карьеру генерального директора и ещё далеко не искушенный в управленческих делах Александр Николаевич мог сохранять выдержку и спокойствие, убеждать сотрудников предприятия перспективой в будущих заказах, в новых направлениях производства отечественных электронных приборов, в сохранении «Истока» головным предприятием СВЧ-приборостроения и в новых условиях находить какое-то минимальное финансирование для поддержания полуголодного коллектива предприятия. С той огромной ношей, которая легла на плечи А. Н. Королева, он справился почти идеально.

Твердость духа, светлый ум, глубокие и всесторонние знания, неиссякаемый оптимизм и доброе человеческое отношение к сотрудникам предприятия – вот те качества Александра Николаевича, которые помогали ему вести предприятие единственно возможным путем. Оказалось,

что только наш генеральный директор обладал именно теми качествами, не характерными для руководителя советского периода, которые и позволили «Истоку», в отличие от других фрязинских предприятий, выжить. Всецело соглашусь с мнением С. И. Реброва, который утверждал, что в то сложнейшее для страны время, когда менялось все, в том числе и форма государственного строя, таким, как Александр Николаевич Королёв, и должен был быть генеральный директор крупного градообразующего предприятия.

В БОРЬБЕ ЗА «ИСТОК»

А. В. Потапов,

лауреат Государственной премии Российской Федерации

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

В славной истории «Истока» есть немало прекрасных и героических страниц, вписанных трудами его выдающихся специалистов – инженеров и рабочих, учёных и служащих, с наградами и регалиями или без оных, 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» пришёлся на долю Королёва Александра Николаевича. Конечно, невероятно сложно было организовать институт и «с колёс» выпускать продукцию в тяжёлые годы Великой Отечественной войны или качественно 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: платить зарплату, формировать госзаказ, обеспечивать план ресурсами.

И только в последние 10 лет возникла немыслимая ранее ситуация, когда государство и государственное предприятие оказались по разные стороны «баррикад». Более того, государство приложило немало усилий (возможно, ещё и не все) к уничтожению предприятия. И в том, что «Исток» не погиб, как соседние предприятия, огромная заслуга генерального директора А. Н. Королёва, так же, как и всех тех, кто в самые тяжёлые годы «выживания» не покинул предприятие и сделал всё, чтобы сегодня «Исток» сначала медленно, а затем всё увереннее поднимался с колен. Более того, в первую очередь благодаря иностранным «вояжам» генерального директора и его ближайших помощников, против чего немало было сломано копий на колдоговорных профсоюзных 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 и по распределению был направлен в ЦНИИС, в город Мытищи. Отработав положенные два года, он решил поступить в аспирантуру и выбрал Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) 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 Кобзарёв Юрий Борисович. Школа, которую Александр Николаевич прошёл в ИРЭ, дала ему неоценимые знания в области радиолокации и статистической радиотехники. Следует отметить два обстоятельства, которые этому способствовали.

Во-первых, регулярные семинары, которыми руководил Ю. Б. Кобзарёв и на которых рассматривалось множество самых разнообразных вопросов: от обязательного обсуждения отчётов по законченным НИР и ОКР до рецензий на статьи, поступающие в журнал «Радиотехника и электроника», и докладов специалистов (своих или из других отделов и организаций) по самым животрепещущим вопросам научной жизни того времени. Отличительная особенность семинара – отсутствие чиновничества и выяснение истинности докладываемой точки зрения независимо от званий и чинов докладчика.

Второе обстоятельство связано с тем, что это было время активного развития ИРЭ АН СССР, в стенах которого в течение нескольких лет появились сотни молодых специалистов, недавних выпускников самых престижных вузов страны. Особенно много их сконцентрировалось во Фрязинском отделении ИРЭ, а именно здесь протекала вся практическая работа Александра Николаевича. Жил Александр Николаевич с семьёй (жена и дочь) в небольшой комнате в Мытищах и, хотя учился в аспирантуре в Москве с отрывом от производства, во Фрязино появлялся каждый день – он был человеком ответственным, 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 вследствие 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 трёх домов, выбранная из-за полного отсутствия в ней электричества и, следовательно, промышленных помех. Она же стала базой и для экспериментальных исследований Александра Николаевича, главной целью которых было измерение взаимной корреляции атмосферных радиопомех в пространственно разнесённых точках. Эксперименты были призваны подтвердить его теоретические исследования пространственно разнесённых антенных решёток. Конечно, не только физическую силу, но и все остальные свои таланты Александру Николаевичу пришлось использовать в своих исследованиях. И доказательством тому стала блестящая защита им кандидатской диссертации.

Исследования помех Александр Николаевич продолжил далее в экспедиции на Кубе, 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... шёл на море купаться, ловить рыбу или искать ракушки на глубине десяти метров. Хотя по вечерам приходилось потеть, обрабатывая огромную массу полученных данных.

Ещё одна экспедиция, в которой Александру Николаевичу пришлось участвовать, – морская, на экспедиционном судне Академии наук СССР, с пересечением экватора и заходом на остров Пасхи.

Александр Николаевич всегда с удовольствием вспоминал об этих экспедициях и любил рассказывать о событиях тех дней.

В 1975 году, почувствовав потребность применить свои знания в более близкой к практиче-

ским задачам области и заодно увеличить свой семейный бюджет, Александр Николаевич перешёл на работу в «Исток», где начал заниматься разработкой системы автоматизированного проектирования гибридных интегральных схем (САПР ГИС), возглавив соответствующую лабораторию в отделе 340.

К 1979 году в этом направлении были получены совершенно потрясающие результаты, которые по несколько раз в год докладывались на различных конференциях и вызывали сначала удивление и недоверие, а затем восторг самых искушённых специалистов. Во всём мире это направление только начинало развиваться, и САПР, разработанная в отделе 340, была одной из самых передовых в стране.

Однако в это время на «Истоке» помимо выпуска приборов СВЧ начались разработки законченных радиоэлектронных устройств, и Сергей Иванович Ребров начал собирать в один кулак всех специалистов, которые имели хоть какое-то отношение к радиолокации. Хотя задача создания современных радиоэлектронных устройств, каким являлся радиолокатор, и казалась привлекательной, всё же жаль было бросать такое перспективное направление, как САПР, тем более, что работа была, что называется, хорошо раскручена и находилась на самом подъёме. Сил было вложено немало, но ещё была масса нереализованных идей и задумок. Тем не менее, на двух стульях усидеть было нельзя, и Сергей Иванович железной рукой преобразовал отдел 340 в отделение 34, ликвидировав заодно все направления, связанные с САПР. И на долгие годы сотрудников отделения 34 стали называть цифровиками.

Александр Николаевич возглавил отдел, который должен был разработать сердце радиолокатора – цифровой вычислительный комплекс, включая всё 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 работе говорит тот факт, что, когда подошло время испытаний, в программном обеспечении не было сделано ни одной правки. В этом не было необходимости.

В 1984 году коллектив «Истока» постигла тяжёлая утрата – ушёл из жизни выдающийся специалист, руководитель НПК-7 Русаков Владимир Никитович. Тогда С. И. Ребров принял решение объединить коллективы НПК-7 и отделения 34 в одно подразделение – НПК-7. Отдел Александра Николаевича был подключён к работам по разработке радиолокатора, который спустя почти 1,5 десятилетия станет одним из основных источников существования «Истока».

Разработанный отделом блок – процессор обработки сигналов выпускает руководимое М. М. Трифоновым ЗАО «Исток-Система», дочернее предприятие «Истока», в которое превратился бывший отдел Александра Николаевича.

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

Поэтому в канун 60-летнего юбилея Александра Николаевича я обратился к некоторым членам дирекции «Истока» с просьбой высказать свои соображения о работе предприятия в последние 10 лет.

Виталий Николаевич Батыгин, лауреат Государственной премии СССР, главный инженер НПП «Исток»:

– Работа предприятия в последние годы определялась прежде всего тем, в каких политических, социальных и экономических условиях мы жили. Условия эти: ажиотаж обвальная и

преступной 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 из-за несвоевременной оплаты...

Перспектива удержаться, не рухнуть была иногда призрачной. Не вероятно, как в этих условиях только ещё начинавший свою карьеру директора и ещё далеко не искушенный в управленческих делах А. Н. Королёв мог сохранять выдержку и спокойствие, убеждать сотрудников перспективой будущих заказов, развития бизнеса в новых направлениях и находить какие-то минимальные финансы для поддержания полуголодного коллектива предприятия.

На первом этапе удалось главное – сохранить организационную и технологическую целостность предприятия, устоять под разрушительным давлением 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 шёл поиск заказов и создавался всё увеличивающийся объём заказов на разработку и производство профильной для предприятия продукции.

Сегодня результаты этой работы видят и ощущают не только сотрудники предприятия, но и все жители наукограда Фрязино. Предприятие на подъёме и приступает к решению проблем технического перевооружения.

Я думаю, что это самый лучший подарок, который получил Александр Николаевич в канун его юбилея от коллектива предприятия. Генеральный директор и трудовой коллектив были всегда вместе во все самые трудные времена.

Сергей Алексеевич Зайцев, лауреат премии Правительства РФ, заместитель генерального директора, технический директор НПП «Исток»:

– 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 тяжёлые и очень тяжёлые периоды. Казалось, что в таких условиях сохранение, а тем более развитие научно-технического производственного потенциала нашего предприятия является несбыточным желанием.

Однако сегодня «Исток» – лидер СВЧ-электроники России, создающий новые виды продукции, обеспеченный заказами от российских предприятий, 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. Не многие знают, что за всем этим стоят глубокие внутренние переживания за всё происходящее.

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

Евгений Николаевич Покровский, лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии Правительства РФ, заместитель генерального директора, директор производства «Истока»:

– *Вступление Александра Николаевича Королёва в должность генерального директора предприятия 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 обвальная 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. Королёв практически сразу понял пагубность подобных шагов. Сейчас мы на примере «сдавшихся» видим, что могло бы случиться с «Иском».

Основные усилия генерального директора и под его влиянием всех работающих на предприятии были направлены на поиск продукции, которая была бы востребована. Не принципиально, где этот потребитель находится – в России или за рубежом. Жестко проводился в жизнь принцип: всё, 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 проведённые структурные реорганизации, сохранены все основные технические направления деятельности, началась финансово-экономическая стабилизация и, самое главное, сохранился и продолжает уверенно функционировать работоспособный коллектив «Истока». У людей появилась уверенность в завтрашнем дне. И в этом безусловная заслуга генерального директора Александра Николаевича Королёва.

Борис Яковлевич Кистин, лауреат премии Правительства РФ, заместитель генерального директора:

– *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 ВОРОВСТВА». К чести Александра Николаевича, здесь для него никогда не было сомнений – у него всегда главным было его ДЕЛО, его РАБОТА, то есть работа по двенадцать – четырнадцать часов в день плюс четырнадцать неиспользованных отпусков (кстати, в дирекции есть такие же «трудоголики» – у некоторых из них до 20-ти неиспользованных отпусков).*

Период директорства Александра Николаевича совпал со временем развала всего и вся, со временем взлёта и торжества бездарей и лизоблюдов, когда в чести были предатели и политические проститутки, а директора все были «красными», «ретроградами» и «врагами демократии». И именно директоров власть предрежащие выставляли крайними, именно на них, как теперь говорят, «переводили стрелки». Наверное, о таком времени писал поэт: «Бывали хуже

времена, но не было подлей!» А. Н. Королев выстоял, так как понимал, что за ним – коллектив «Истока», который поверил в него в 1988 году, хотя были времена, когда на генерального выплёскивалось недовольство людей и он переживал это. И продолжал обращаться во все инстанции: в Правительство, в Совет безопасности, к Президенту, в наше министерство (сколько их уже сменилось!), к военным, бил во все «колокола»: нужно спасать отечественную СВЧ-электронику! Ситуация 1999 – 2000 годов показала, что настойчивость Александра Николаевича вознаграждена: финансовое положение «Истока» стабилизировалось, имеются приличные заделы на будущее. Казалось бы, можно радоваться, но прав был маршал Ней: «Ещё 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 снится. Его и после юбилея ожидает борьба за «Исток», поэтому хочу пожелать нашему генеральному директору трех незаменимых ничем вещей: СИЛЫ, чтобы преодолеть то, что можно преодолеть, ТЕРПЕНИЯ, чтобы не преодолевать того, чего преодолевать нельзя, и РАЗУМА, чтобы отличить первое от второго.

ИЗ ВЫСТУПЛЕНИЯ

ПРЕДСЕДАТЕЛЯ СОВЕТА ДИРЕКТОРОВ НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРОДА АЛЕКСАНДРА НИКОЛАЕВИЧА КОРОЛЕВА НА ТОРЖЕСТВЕННОМ СОБРАНИИ, ПОСВЯЩЕННОМ 50-ЛЕТИЮ Г. ФРЯЗИНО (2001 г.)

Сегодня необычный день в жизни нашего города. Сегодня мы отмечаем его юбилейную дату – 50-летие. Сотрудники «Истока» поздравляют всех фрязинцев и руководителей города с юбилеем и желают им и любимому нашему городу процветания.

Славный город Фрязино существенно преобразился за полвека. Из обычного рабочего поселка он превратился в настоящий город, город науки – наукоград. Это название Фрязино получил, конечно же, неслучайно. На городских промышленных предприятиях на протяжении почти 60-ти лет развивается наука, причем передовое ее направление – электроника.

Электроника настолько сильно вошла в нашу жизнь, что без нее просто немыслимо существование человечества, как такового. Радио, телевидение, аудио- и видеотехника, вычислительные машины, СВЧ-печи – это все необходимые атрибуты нашего быта, нашего дома. И в этот праздничный день я с гордостью могу сказать, что в разработку и создание перечисленной электронной аппаратуры фрязинцы внесли свою, возможно, даже самую существенную лепту. Кто-то может мне возразить. Ведь наши предприятия в основном занимались разработкой аппаратуры специального назначения для оборонной промышленности страны. Однако история развития цивилизации показывает, что прогресс во всех сферах промышленности связан, прежде всего, с развитием оборонной промышленности.

Отражательные клистроны, изобретенные и созданными нашими выдающимися учеными В. Ф. Коваленко, почетными гражданами города академиком Н. Д. Девятковым, Л. А. Парышкуро, И. И. Бродуленко и другими для военных целей, стали затем широко использоваться в радиолокационных станциях гражданского назначения, в том числе в связи, радиовещании и телевидении.

Пальчиковые лампы, разработанные почетным гражданином города Н. В. Черепниным со своими сотрудниками для оборонной промышленности, нашли широчайшее применение практически во всех бытовых радиоприемниках и телевизорах.

На основе магнетронов, созданных выдающимися разработчиками Л. Г. Некрасовым и Д. Е. Самсоновым с сотрудниками, были разработаны радиолокационные станции ЗРС С-75, позволившие, в частности, обнаружить и сбить самолет американского шпиона Паурса 1 мая 1960 года.

Высотомер на основе генераторных устройств, разработанных на «Истоке» в лаборатории А. М. Алексеенко, позволил осуществить автоматическую мягкую посадку лунохода на Луну.

На «Истоке» почетным гражданином города А. С. Тагером, А. И. Мельниковым, А. М. Цебиевым, Г. П. Кобельковым было открыто новое физическое явление в полупроводниках. И это при том, что всего в стране во всех областях техники зарегистрировано всего 350 открытий. На основе этого, «истоковского», открытия были созданы уникальные полупроводниковые СВЧ-приборы – лавинно-пролетные диоды.

Работы в области миллиметровых волн, впервые в мире начатые на «Истоке» профессором М. Б. Голантом, А. А. Негиревым и другими, позволили уже в современных условиях разработать медицинскую аппаратуру для диагностики и лечения многих заболеваний.

Завод «Рений», возглавляемый И. М. Панасом, на протяжении четверти века выпускал разработанные в НИИ «Исток» электровакуумные и твердотельные изделия и приносил в доход «Истока» около 80 % прибыли. Выпускаемые на заводе бытовые термосы пришли в миллионы квартир жителей страны. Магнитофонные приставки высшего класса, разработанные на предприятии под личным руководством С. И. Реброва, были самыми лучшими в стране.

На «Фрязинском заводе имени 50-летия СССР» под руководством генерального директора Г. Д. Колмогорова отрабатывалась тончайшая технология изготовления полупроводниковых приборов, являющихся основой всей современной радиоэлектронной аппаратуры и универсальных вычислительных машин. Транзисторы типа КТ315 и КТ361 выпускались миллионными партиями. Первые отечественные компьютеры для персонального применения ДВК также были сделаны на этом заводе.

Много усилий было положено нашими сотрудниками, возглавляемыми генеральным конструктором почетным гражданином города С. И. Ребровым, для создания совершенной малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры. Это был мощный прорыв в области радиоэлектроники.

Огромных достижений добились ученые Фрязинского отделения Института радиотехники и электроники АН СССР, впоследствии РАН (директор академик Ю. В. Гуляев) в изучении космического пространства, радиолокационном исследовании планет Солнечной системы, атмосферы Земли, в решении уникальных экологических задач, в использовании перспективных материалов и технологий в народном хозяйстве.

Важнейшие научные и технические разработки на протяжении многих лет выполнялись на фрязинских предприятиях Министерства электронной промышленности «Платане», «Циклоне» и других.

Подобные примеры можно было бы продолжать и продолжать. Ведь, по существу, все сотрудники «Истока» и других промышленных и научных предприятий города, они же и жители Фрязино, участники разработки уникальных приборов и устройств. Именно они на протяжении десятилетий создавали всемирную славу нашему городу. Низкий им всем поклон.

Чествовать наших «истоковских» героев мы будем через 2 года, когда будем отмечать 60-летие «Истока».

Сотрудники промышленных и научных предприятий внесли свой вклад не только в отечественную электронику. В той или иной форме их руками были построены жилые дома города, сооружены современные спортивные сооружения, дома отдыха, пансионаты, базы отдыха, Дворец культуры, школы, детские сады и т. п. Проще сказать, покажите мне объект в городе,

где не приложил бы руку сотрудник «Истока», «Электронприбора», «Платана», «Циклона», ФИРЭ РАН.

Чествуя юбилей города, мы тем самым должны высказать благодарственные слова в адрес наших славных ветеранов «Истока» и других промышленных и научных предприятий. И пусть Ваши аплодисменты будут расценены как знак благодарности им от нынешнего поколения.

НПП «ИСТОК» 60 ЛЕТ*

А. К. Балыко,

лауреат премии Ленинского комсомола

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

Александр – в переводе с греческого великий. И гениальная музыка советско-российского гимна, написанная Александром Александровым, дважды звучащая в большом актовом зале Дворца культуры «Исток», и центральная фигура торжества Александр Николаевич Королев – все в этот вечер говорило о величии и победе созидания над развалом, которому подверглась отечественная электроника в конце XX века.

Торжественное заседание, посвященное 60-летию «Научно-производственного предприятия «Исток», открылось выступлением генерального директора предприятия А. Н. Королева. В своем докладе он выделил четыре временных этапа, которые прошел «Исток» на своем историческом пути.

1943 – 1947 гг. – подписание И. В. Сталиным Постановления ГКО СССР «О радиолокации», становление предприятия, работы по приемно-усилительным и генераторным лампам. Руководили в это время предприятием С. А. Векшинский, В. И. Егизаров и А. А. Захаров.

1947 – 1961 гг. – строительство НИИ-160, развертывание работ по малошумящим ЛБВ и усилительным клистродам. На этом этапе институт возглавляли В. А. Гольцов и М. М. Федоров.

1962 – 1988 гг. – этап интенсивного развития предприятия. Отечественная электроника в 1961 году стала самостоятельной отраслью, во главе которой стал А. И. Шокин, один из виднейших деятелей отечественной электроники, а «Исток» возглавил С. И. Ребров. За эти годы были разработаны приборы для всех зенитно-ракетных комплексов и других систем радиоэлектронного вооружения нашей армии, были увеличены производственные площади на 120 тыс. кв. м, а численность «Истока» возросла до 14,5 тыс. человек.

Четвертый этап в жизни «Истока» начался с 1988 года, когда трудовой коллектив «Истока» избрал генеральным директором А. Н. Королева, и продолжается по настоящее время.

Смена общественного строя и распад СССР вызвали небывалый в истории цивилизованных государств экономический кризис, охвативший страну. Однако предприятие «Исток» достойно вышло из этого кризиса. В настоящее время, по существу, идет возрождение «Истока». Дирекции и коллективу удалось сохранить «Исток» как единое предприятие, выйти на международный рынок, существенно увеличить объем гособоронзаказа и гражданской продукции. Сегодня объем производимой продукции «Истока» сравним с объемом 1988 года. На предприятии работает более 5000 человек.

«60 лет исторического развития «Истока», – сказал А. Н. Королев, – отмечены крупными научно-техническими достижениями в области разработки электронных приборов различного назначения. Было создано свыше 600 типов электровакуумных и 500 типов твердотельных

*Опубликовано во Фрязинской городской газете «Ключь» (октябрь 2003 г.)

СВЧ-приборов более чем для 400 различных систем радиоэлектронного вооружения. Около 370 типов приборов, разработанных на «Истоке», были затем освоены на 28 предприятиях страны. Для этого «Исток» направил на постоянную работу на эти предприятия свыше 200 своих специалистов».

Александр Николаевич подробно охарактеризовал крупные научно-технические направления деятельности предприятия; назвал имена выдающихся специалистов, внесших существенный вклад в развитие каждого из этих направлений; привел примеры приборов и устройств с уникальными характеристиками, созданных славными тружениками «Истока». Полный текст выступления А. Н. Королева опубликован в газете предприятия «За передовую науку» (№ 33, 5 сентября 2003 г.). Доклад генерального директора сопровождался многочисленными фотографиями, слайдами, видео- и киноматериалами.

Поздравительные телеграммы А. Н. Королеву и сотрудникам «Истока» прислали из Федеративной Республики Германия (Институт физики), Индии, Китайской Народной Республики, Национального комитета Латинской Америки, академических и учебных институтов. Многие руководители предприятий радиоэлектронной промышленности приехали лично поздравить «Исток» с юбилеем.

Первый заместитель председателя Правительства Московской области В. В. Голубев по поручению Губернатора области Героя Советского Союза Б. В. Громова зачитал поздравительный адрес трудовому коллективу «Истока». Он огласил также Постановление Губернатора о присвоении звания «Почетный гражданин Московской области» А. Н. Королеву и вручил награду генеральному директору «Истока».

В своем выступлении генеральный директор Российского агентства по системам управления (РАСУ) В. Г. Козлов отметил, что сегодня «Исток» фактически не предприятие, а целая отрасль, где динамично развиваются и традиционные для электроники направления (создание новых материалов и оборудования, приборостроение), и такие направления, как разработка уникальной радиоэлектронной аппаратуры. Важно, что все «истоковские» работы востребованы. Из 700 предприятий отрасли далеко не все находятся в таком состоянии, как «Исток». Сегодня РАСУ доверило «Истоку» большую работу по развитию отечественной твердотельной СВЧ-электроники.

Глава города В. В. Ухалкин от имени жителей Фрязино поздравил «Исток» с юбилеем и подарил предприятию копию флага города.

«Нам очень хотелось, чтобы сегодняшнее торжество совпало с присвоением городу статуса наукограда, поскольку «Исток» – основное градообразующее предприятие. К сожалению, этого не произошло. В настоящий момент документы подписаны Председателем Правительства страны и переданы на подпись Президенту»*.

Академик Ю. В. Гуляев вручил А. Н. Королеву поздравительные адреса президиума Российской академии наук (РАН) и коллектива ИРЭ РАН, передал поздравление почетного директора ИРЭ В. А. Котельникова, которому скоро исполнится 95 лет, и напомнил, что ФИРЭ РАН и «Исток» связывает не только совместная работа, но и «личные» узы – Александр Николаевич начинал свою трудовую деятельность в ФИРЭ РАН.

Все поздравлявшие вручали генеральному директору «Истока» адреса и памятные подарки. Когда для чествования на сцену поднялись руководители банков, Александр Николаевич пошутил: «Напоминаю, что самый лучший подарок от банка – это низкий процент за кредит».

*Статус наукограда был присвоен городу Фрязино Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина 29 декабря 2003 г. – *Ред.*

«Благодаря могучей школе и мощной технологической базе, которыми обладает «Исток», мы надеемся, что все задачи по созданию перспективного вооружения будут успешно выполнены», – сказал в своем выступлении заместитель начальника 16-го Управления Министерства обороны РФ М. И. Критенко.

«НИИ-160, «Светлана» и МЭЛЗ – эти три предприятия стояли у истоков отечественной электроники, а к середине 80-х годов их было уже более 500. Из стен «Истока» вышло много руководителей этих предприятий», – это слова из выступления бывшего заместителя министра электронной промышленности СССР А. Ф. Казакова.

Его мысль развил бывший начальник Первого главного управления министерства, генеральный директор НПП «Микроволна СВЧ» В. Г. Калашников. «Большое достижение «Истока», – сказал он, – состоит в том, что за 40 последних лет у «Истока» всего один раз менялся генеральный директор: С. И. Реброва сменил А. Н. Королев. В этом «Истоку» сильно повезло. Недаром китайцы, когда желают плохого, говорят: «Чтоб ты жил в эпоху перемен». В заключение он зачитал четверостишие:

*«И если будет вдруг однажды
Мне трудно сделать даже вздох,
Прильну, чтобы спастись от жажды,
К тебе, живительный «Исток».*

Статья поступила 03 ноября 2020 г.



РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.6

НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

К. Б. Джуринский

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

Проанализировано направление работ зарубежных компаний за последние 10 лет по созданию радио-частотных соединителей см- и мм-диапазонов длин волн. Рассмотрены параметры, конструктивные и технологические особенности разработанных соединителей для мобильной и сотовой связи, автомобильных радаров, 5G-приложений и радиоизмерительной аппаратуры в диапазоне частот 0...145 ГГц.

КС: радиочастотные соединители, мобильная и сотовая связь, см- и мм-диапазоны длин волн, коаксиальная линия, предельная частота, опорная диэлектрическая шайба, автомобильный радар, КСВН, потери, волновое сопротивление

THE LATEST ADVANCES IN THE FIELD OF RF CONNECTORS

K. B. Dzhurinsky

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

The trend of work of foreign companies over the last 10 years on the creation of radio frequency connectors of cm and mm wavelength ranges is analyzed. Parameters, design and technological features of the developed connectors for mobile and cellular communications, automobile radars, 5G-applications and radio measuring equipment in the frequency range of 0...145 GHz are considered.

Keywords: radio frequency connectors, mobile and cellular communications, cm- and mm-wavelength ranges, coaxial line, cutoff frequency, axial dielectric bead, automobile radar, VSWR, loss, wave impedance

1. РАДИОЧАСТОТНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ ОСВАИВАЮТ МИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН ДЛИН ВОЛН

Продвижение в область все более высоких частот является одним из основных направлений развития современных радиочастотных соединителей. Это обусловлено постоянным совершенствованием радиоэлектронных систем связи, телекоммуникаций и навигации, военной техники, а также радиоизмерительного и медицинского оборудования. Повышение частоты позволяет расширить информационную емкость каналов связи, увеличить скорость передачи информации и ее помехозащищенность, увеличить разрешающую способность радиотехнических систем.

В табл. 1 приведены данные о коаксиальных соединителях см- и мм-диапазонов длин волн (далее см- и мм-соединители): время создания и компания, разработавшая соединитель, пре-



дельная теоретическая и максимальная рабочая частоты, а также параметры коаксиальной линии соединителей. В мм-соединителях применена воздушная коаксиальная линия, размеры которой тем меньше, чем выше предельная частота. Внутренний проводник этих соединителей закреплен в опорной диэлектрической шайбе из материала с малыми потерями [1].

Таблица 1

Коаксиальные соединители см- и мм-диапазонов длин волн

Соединитель	Компания	Год создания	Теоретическая предельная частота, ГГц	Максимальная рабочая частота, ГГц	Диаметры проводников и опорной шайбы, мм		
					наружного	внутреннего	шайбы
7/16 DIN	Spinner	1940-е	8,3	7,5	16,0	7,0	–
N	Bell Laboratories	1942	18	11	7,0	3,04	–
SMA	Bendix Research	1958	27,0	18	4,13	1,27	–
3,5 мм	Hewlett-Packard	1976	38,8	33	3,50	1,52	3,6
2,92 мм (K-соединитель)	Wiltron	1983	46	40	2,92	1,27	3,05
2,4 мм	Amphenol, Hewlett-Packard, M/A-COM	1986	56	50	2,40	1,042	2,1
1,85 мм (V-соединитель)		1989	73	70	1,85	0,803	1,5
1,35 мм (E-соединитель)	Spinner, Rosenberger	2014 – 2018	98,5	90	1,35	0,598	–
1,0 мм (W-соединитель)	Hewlett-Packard	1989	133	110	1,0	0,434	1,15
0,8 мм	Anritsu	2015 – 2019	166	145	0,8	0,347	0,56

Одним из важнейших направлений развития техники СВЧ стало создание все более миниатюрных и высокочастотных базовых станций мобильной и сотовой связи. Увеличение предельной частоты диапазона связи и возросшие скорости передачи данных предъявили жесткие требования к параметрам коаксиальных трактов. Прежде всего, это относится к 5G-поколению мобильной связи, где интермодуляционные искажения влияют на технические характеристики систем связи особенно сильно. Для этого потребовалась разработка специальных радиочастотных соединителей.

2. СОЕДИНИТЕЛИ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ И СОТОВОЙ СВЯЗИ

Соединители для мобильной и сотовой связи должны иметь низкий уровень КСВН и прямых потерь в рабочем диапазоне частот, максимальные рабочее напряжение и допустимую пропускаемую мощность, высокий уровень экранного затухания, стойкость к механическим и климатическим воздействиям, большое число соединений и рассоединений вилки и розетки, высокую

надежность, минимальные габаритные размеры и массу. Но кроме этих общих для всех соединителей требований есть и специфические требования:

- возможность наружного применения с высоким классом защиты (IP 68);
- удобство эксплуатации, например возможность надежного соединения вилки и розетки без применения инструмента;
- низкий уровень интермодуляционных искажений.

Последнее требование является наиболее важным, так как уровень интермодуляционных составляющих спектра сигнала (ИМР) – критический параметр, влияющий на качество систем связи. Развитие базовых станций мобильной связи GSM, DCS 1800, PCS 1900, а также широкополосной связи нового поколения выдвинуло жесткие требования к уровню ИМР для всех применяемых компонентов, в том числе и для радиочастотных соединителей. Уровень ИМР для таких соединителей не должен превышать минус 160 дБс при входной мощности каждого из двух сигналов 43 дБм (20 Вт) [1].

Рассмотрим эволюцию радиочастотных соединителей для мобильной и сотовой связи.

Соединители 7/16. Соединители 7/16 DIN (далее 7/16) до настоящего времени широко применяют в антенных системах и базовых станциях мобильной и сотовой связи. DIN – сокращенное название Немецкого института по стандартизации (Deutsches Institut für Normung). Многие стандартизованные радиочастотные соединители, разработанные немецкими компаниями, обозначались числами, которые означали диаметры внутреннего и наружного проводников коаксиальной линии соединителя.

Внешний вид разных модификаций соединителя 7/16 показан на рис. 1, а его параметры, по данным компаний Spinner (www.spinner-group.com) и Telegärtner (www.telegärtner.com), в сравнении с параметрами других соединителей для систем мобильной и сотовой связи приведены в табл. 2 [1, 2].



Рис. 1. Соединители 7/16 (а) и кабельные сборки с ними (б)

Таблица 2

**Технические характеристики соединителей
с волновым сопротивлением 50 Ом для мобильной и сотовой связи**

Характеристика	7/16	4.3–10	NEX10	2.2–5	3.5–1.5
Теоретическая предельная частота, ГГц	8,3	13	21	–	–
Диапазон рабочих частот, ГГц	0 – 7,5	0 – 12*	0 – 20*	0 – 20	0 – 30
Максимальный КСВН в диапазоне частот 0...6 ГГц	1,22	1,05	1,05	1,05	1,05

Окончание табл. 2

Характеристика	7/16	4.3–10	NEX10	2.2–5	3.5–1.5
Прямые потери, дБ, на частоте f , ГГц	$0,05\sqrt{f}$	$0,05\sqrt{f}$	$0,05\sqrt{f}$	$0,05\sqrt{f}$	–
Уровень ИМРЗ, дБс, в диапазоне частот 0...4 ГГц, менее	-155	-166	-166	-166	-166
Максимальная пропускаемая мощность, Вт, на частоте 2 ГГц	850	500	150	100	100
Рабочее напряжение, кВ	2,7	1,8	1,0	1,4	–
Соппротивление изоляции, ГОм, более	10	5	3	5	–
Экранное затухание, дБ, на частоте 6 ГГц	-128**	-110**, -90***	-100**	-110**, -70***	–
Усилие соединения вилки и розетки, Н, не более	15	80***	100***	50***	–
Усилие рассоединения вилки и розетки, Н, не более	15	60***	80***	40***	–
Допустимое количество соединений и рассоединений, не менее	500	100			
Диапазон рабочих температур, °С	-55...+155		-40...+85	-55...+125	-40...+85

*0...6 ГГц – оптимально; **резьбовое соединение, ***соединение защелкиванием.

Соединители 7/16 выпускают многие зарубежные компании: Spinner, Telegärtner, Rosenberger (www.rosenberger.com), Molex (www.molex.com), Amphenol (www.amphenol.com), Huber+Suhner (www.hubersuhner.com), Radiall (www.radiall.com), а также компании Юго-Восточной Азии. Эти соединители широко применяют в многоканальных системах мобильной и сотовой связи, где особенно недопустимы интермодуляционные искажения, в базовых станциях, антеннах с уровнем мощности до 100 Вт на канал. Это самые прочные и надежные соединители, обеспечивающие высокую пропускаемую мощность и низкий уровень интермодуляционных искажений. До недавнего времени 7/16 являлся предпочтительным соединителем для антенн и базовых станций. Однако постепенно он начал уступать свое место более миниатюрным аналогам.

Соединители 4.3–10. Необходимость в соединителях с низким уровнем интермодуляционных искажений, но с меньшими размерами и массой для замены соединителя 7/16 была очевидна для оборудования мобильной и сотовой связи повышенной компактности и меньшей занимаемой площади. Начиная с 2012 года ведущие компании Spinner, Telegärtner, Rosenberger и Huber+Suhner объединили свои усилия и начали разрабатывать серию соединителей 4.3–10 для индустрии связи.

На рис. 2 показаны внешний вид и размеры (при установке в ряд) соединителей 7/16 и 4.3–10 компании Telegärtner [5].

Соединитель 4.3–10 приблизительно на 40 % миниатюрнее и на 60 % легче соединителя 7/16. Это достигнуто за счет уменьшения размеров коаксиальной линии соединителя 4.3–10. Важной конструктивной особенностью этих соединителей является раз-

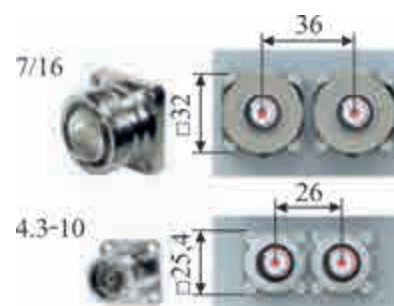


Рис. 2. Внешний вид и размеры соединителей 7/16 и 4.3–10

несение плоскостей электрического и механического контактирования. Благодаря этому, приблизительно на 80 % уменьшился момент затягивания гайки вилки и стало возможным соединение вилки и розетки даже без применения динамометрического ключа.

Предложенные конструктивные изменения позволили разработать три версии вилки соединителя 4.3–10: с резьбовым соединением с розеткой при помощи динамометрического ключа, с резьбовым соединением при закручивании вручную и с соединением защелкиванием. При этом для всех трёх конструктивных версий вилки используется одна и та же универсальная розетка – рис. 3 [2].



Рис. 3. Соединители 4.3–10 с разными механизмами сочленения вилки и розетки

В 2016 году соединители 4.3–10 были включены в стандарт IEC 61169-54 [3]. Основные технические характеристики соединителей 4.3–10 приведены в табл. 1. Хотя стандарт устанавливает предельную рабочую частоту 6 ГГц, некоторые производители в своих data sheet гарантируют ее равной 12 ГГц. Соединители 4.3–10 производят многие зарубежные компании: Spinner, Telegärtner, Rosenberger, IMS, Amphenol, Molex, Huber+Suhner, Radiall и др. Область применения соединителей 4.3–10 варьируется от базовых станций до распределенных внутренних и наружных антенных систем.

Соединители 2.2–5. Уже в настоящее время и, особенно, в будущем мобильные системы связи, жестко ограниченные по габаритным размерам и массе, должны передавать радиочастотные сигналы с малыми потерями и минимальными интермодуляционными искажениями. Поэтому, основываясь на успехе новаторского решения соединителя 4.3–10, компания Telegärtner в тесном сотрудничестве с компанией Spinner и с поддержкой других компаний разработала соединитель 2.2–5 с высоким уровнем параметров, более миниатюрный, чем соединитель 4.3–10 [4–6]. Размеры фланцевого соединителя 2.2–5 меньше на 53 %, чем соединителя 4.3–10, и на 70 % – чем соединителя 7/16 (рис. 4) [5].

В соединителе 2.2–5 размеры коаксиальной линии были уменьшены в 2 раза (диаметр центрального проводника – 2,2 мм, наружного проводника – 5 мм) по сравнению с соединителем 4.3–10. При этом сохранены особенности конструкции соединителей 4.3–10. Благодаря этому, созданы кабельные вилки с резьбовым соединением с розеткой при помощи динамометрического ключа, с резьбовым соединением при закручивании вручную (на гайке имеется накатка для ручной затяжки) и с соединением защелкиванием. Конструкция розетки универсальная, розетка может соединяться с вилками всех трех вариантов исполнения.

Технические характеристики соединителей 2.2–5 по данным компании Spinner представлены в табл. 1. Несмотря на значительное уменьшение размеров, технические характеристики соеди-



нитей 2.2–5 и 4.3–10 сопоставимы [6]. Заявка на стандартизацию соединителей серии 2.2–5 была направлена в МЭК в 2017 году.



Рис. 4. Фланцевые соединители 7/16, 4.3–10 и 2.2–5

Соединитель NEX10. В связи с миниатюризацией оборудования сотовой и мобильной связи и повышением рабочего диапазона частот, антенны и приемники становились все меньше, и для них требовалось применение более высокочастотных соединителей с меньшими размерами. Соединители 4.3–10 и 2.2–5 уже не удовлетворяли этим требованиям. Поэтому спустя всего лишь 5 лет после создания соединителя 4.3–10 ведущие производители радиочастотных соединителей Rosenberger, Huber+Suhner и Radiall совместными усилиями разработали миниатюрные коаксиальные соединители NEX10 в диапазоне частот 0...20 ГГц для применения в небольших сотовых сетях 4G и 5G [7–10].

Созданы кабельные вилки соединителя NEX10 двух вариантов: с резьбовым соединением при помощи динамометрического гаечного ключа и с соединением защелкиванием. Соединители NEX10 на 50 % миниатюрнее, чем 4.3–10 (рис. 5, а), размеры фланцев соединителей этих типов соответственно равны 25,4×25,4 и 12,7×17,4 мм. Соединители NEX10 компании Rosenberger показаны на рис. 5, б...г [8].



Рис. 5. Фланцевые соединители 4.3–10 и NEX10 (а), соединители NEX10 компании Rosenberger: вилки с резьбовым соединением (б) и соединением защелкиванием (в), панельная фланцевая розетка (г)

Основные характеристики соединителей NEX10, согласно данным компании Rosenberger, приведены в табл. 1. В 2019 году подана заявка в МЭК на стандартизацию соединителя NEX10. После стандартизации соединитель NEX10 станет доступным всем потребителям.

Соединители 1.5–3.5. Разработка 5G-поколения мобильной связи со скоростью передачи, в 100 раз большей, чем 4G, создает новые, более сложные задачи для индустрии мобильной связи. Компания Telegärtner разработала серию соединителей Cell IQ, призванных решить проблему соединений в настоящее время и в будущем [11]. Эта серия состоит из трех соединителей: 4.3–10, 2.2–5 и 1.5–3.5 (рис. 6).





Рис. 6. Соединители 2.2–5, NEX10 и 1.5–3.5 компании Telegärtner

Соединители 1.5–3.5 являются самыми миниатюрными из этих соединителей и предназначены для мобильной и сотовой связи будущего поколения. Размеры фланца с 4-мя отверстиями фланцевого кабельного соединителя равны $15 \times 9,7$ мм или $12,7 \times 12,7$ мм, что меньше на 47 %, чем у соединителей 2.2–5, и на 75 %, чем у соединителей 4.3–10.

Конструкция соединителя 1.5–3.5 такая же, как и у его предшественников, только коаксиальная линия выполнена с размерами $1,5/3,5$ мм. По размерам коаксиальной линии этот соединитель сопоставим с соединителем 3,5 мм (SMA 3.5), но выгодно отличается от него отсутствием интермодуляционных искажений и пригодностью для наружного применения. Технические характеристики соединителей 1.5–3.5 приведены в табл. 1. Так как предполагается работа сети 5G на высоких частотах, предельная частота соединителя 1.5–3.5 не случайно выбрана равной 30 ГГц. Возможен широкий спектр применений этих соединителей: сети мобильной радиосвязи, небольшие сотовые ячейки, маломощные удаленные радиоустройства, встроенные и распределенные антенные системы [12].

Соединители играют решающую роль в обеспечении высокого качества передачи радиочастотных сигналов между базовыми станциями и удаленными антеннами. За рубежом менее чем за 10 лет были разработаны соединители 4.3–10, 2.2–5, NEX10 и 1.5–3.5 и налажено серийное производство их основных модификаций. Эволюция соединителей для мобильной и сотовой связи на этом не закончена и будет продолжаться.

3. СОЕДИНИТЕЛИ С ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ 145 ГГц

Большой интерес к мм-диапазону длин волн обусловлен, прежде всего, необходимостью повышения скорости передачи данных и пропускной способности сетей связи, а также создания радиоизмерительной аппаратуры нового поколения. Потребовались всё более широкополосные устройства, выходящие за пределы *W*-диапазона в *D*-диапазон частот (110...170 ГГц, длина волны 2,7...1,8 мм).

Для создания таких устройств были необходимы соединители, работающие в этом диапазоне частот. До недавнего времени считалось, что соединители 1,0 мм (см. табл. 1) достигли предельной частоты радиочастотных соединителей. Размеры коаксиальной линии этих соединителей всего 1,0/0,434 мм. Чтобы дальше увеличивать предельную частоту соединителя, необходимо еще больше уменьшить размеры коаксиальной линии, повысить качество покрытий и чистоту обработки поверхностей. На первый взгляд, это кажется технически невозможным. К тому же с увеличением частоты заметно снижается допустимая пропускаемая мощность соединителя [1].

Тем не менее, компания Anritsu начала работу по созданию соединителя 0,8 мм в *D*-диапазоне частот с теоретической предельной частотой 166 ГГц и предельной рабочей частотой



145 ГГц [13–15]. Воздушная коаксиальная линия этого соединителя имеет размеры 0,8/0,347 мм, а диаметр её опорной диэлектрической шайбы равен всего 0,56 мм. Чтобы представить себе размеры этой опорной шайбы, на рис. 7 для сравнения показаны шайбы соединителей 2,92 мм, 1,0 мм и 0,8 мм.



Рис. 7. Опорные диэлектрические шайбы соединителей 2,92 мм, 1,0 мм и 0,8 мм

При разработке соединителя 0,8 мм возникло много технических проблем [14]. Были трудности при изготовлении с высокой точностью опорной диэлектрической шайбы. В миниатюрной шайбе диаметром всего 0,56 мм необходимо было просверлить 6 отверстий диаметром 50 мкм и сделать проточки по её краям. Кроме того, возникла проблема контактов. Оказалось, невозможно сделать прорезы шириной 25 мкм в гнездовом контакте диаметром всего 0,35 мм, чтобы получить 4 ламели, так как не существуют фрезы толщиной менее 50 мкм. Было найдено простое оригинальное решение этой проблемы. Гнездо было выполнено в виде тонкостенной трубки без прорезей, а штырь увеличенного диаметра был сделан разрезным (с ламелями) с шириной прорезей 50 мкм (рис. 8). Такой контакт получил название «коготь омара» [14].



Рис. 8. Центральные контакты соединителей 0,8 мм

Сложными задачами оказались закрепление в опорной шайбе внутреннего проводника и установка полученной сборки в корпус соединителя. Для этого пришлось поместить шайбу в металлическую втулку, наружный диаметр которой был приблизительно равен диаметру корпуса в области установки втулки. По краям втулка имела очень тонкую стенку. Благодаря этому, шайбу можно было надежно закрепить во втулке, развальцевав ее края. Затем втулку с закрепленной шайбой впаивали в корпус соединителя низкотемпературным припоем.

В результате многолетней работы была создана серия соединителей 0,8 мм, состоящая из негерметичных резьбовых коаксиально-микрополосковых переходов (КМПП): вилки 0,8–105М и розетки 0,8–105F; внутрисерийных и межсерийных адаптеров и прецизионных нагрузок вилка и розетка (рис. 9) [15].

Центральный проводник КМПП диаметром 0,127 мм и длиной 0,29 мм соединяют с микрополосковой линией пайкой при температуре 200 °С.





Рис. 9. Внутрисерийные и межсерийные адаптеры и нагрузка на основе соединителя 0,8 мм

Соединители 0,8 мм имеют следующие основные параметры:

Рабочий диапазон частот.....	0 – 145 ГГц
Максимальный КСВН в рабочем диапазоне частот.....	1,67
Максимальная величина потерь.....	0,70 дБ
Допустимая пропускаемая мощность.....	6 Вт
Напряжение пробоя.....	500 В
Диапазон рабочих температур.....	–54...+125 °С

Максимальный КСВН внутрисерийных адаптеров во всем рабочем диапазоне частот равен 1,43, а величина потерь не превышает 0,35 дБ.

При проектировании соединителя 0,8 мм обсуждался вопрос, должен ли он быть совместимым с соединителем 1 мм? Чтобы избежать повреждения соединителей, было принято решение об их несовместимости. Для этого на корпусе розетки соединителя 0,8 мм была принята более мелкая резьба (М3×0,35 мм), а на корпусе вилки соединителя 1,0 мм – более крупная резьба (М4×0,7 мм). Поэтому сочленение обоих соединителей возможно только с помощью адаптеров. Были разработаны 4 межсерийных адаптера 0,8 мм – 1,0 мм с предельной частотой 110 ГГц. Максимальный КСВН адаптеров в этом диапазоне частот равен 1,29.

Соединители 0,8 мм и аксессуары коаксиального тракта в этом диапазоне частот впервые в мире были применены в разработанном компанией Anritsu сверхширокополосном векторном анализаторе цепей VectorStar™ ME7838D. Этот анализатор позволяет измерять характеристики устройств на печатных платах в диапазоне частот от 75 МГц до 145 ГГц [16].

Эволюция радиочастотных соединителей поражает. Билл Олдфилд (Bill Oldfield), ведущий специалист компании Anritsu, создатель соединителя 0,8 мм, рассказал в 1961 году, как для создания радиоизмерительной аппаратуры все более высоких частот разрабатывали соответствующие соединители [17]. В то время рабочая частота радиочастотных соединителей и кабелей не превышала 18 ГГц. Отвечая на вопрос, будет ли когда-нибудь создан коаксиальный соединитель на 40 ГГц, эксперт из американской компании Hewlett-Packard (ныне Agilent) долго объяснял, почему это практически невозможно. Заметим, что именно Hewlett-Packard че-

рез 15 лет создала первый соединитель мм-диапазона – 3,5 мм с предельной частотой 33 ГГц и в дальнейшем внесла значительный вклад в создание еще более высокочастотных соединителей [1].

С середины 70-х годов прошлого столетия началось продвижение радиочастотных соединителей в миллиметровый диапазон. Достижение каждой предельной частоты казалось последним. Но раз за разом создавались все более высокочастотные соединители. И достижение частоты 145 ГГц – это еще не конец эволюции соединителей. Компания Anritsu продолжает работы по созданию соединителя 0,6 мм с теоретической предельной частотой 220 ГГц. Невозможно даже представить, как можно изготовить такие соединители, но не будем ограничивать наше воображение.

4. СОЕДИНИТЕЛИ 1,35-мм ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ РАДАРОВ

Немецкие компании Spinner, Rosenberger, Rohde & Schwarz и Национальный метрологический институт Германии разработали соединитель 1,35 мм с предельной частотой 90 ГГц [18–22]. Этот соединитель был предназначен для применения в автомобильных радарх для работы в диапазоне частот от 76 до 81 ГГц. В дальнейшем появились еще приложения Satcom, 5G и WLAN в полосе частот 76...90 ГГц, в которых предполагается применение этого соединителя.

К началу разработки уже выпускались соединители 1,85 мм (диапазон частот 50...75 ГГц) и 1,0 мм (диапазон частот 75...110 ГГц). Однако соединитель 1,85 мм не полностью перекрывает диапазон частот 60...90 ГГц, а соединитель 1,0 мм легко повреждается и имеет высокую стоимость.

Коаксиальная линия соединителя 1,35 мм имеет следующие размеры: диаметры наружного проводника – 1,35 мм, внутреннего проводника – 0,6 мм. Диаметр штыря кабельной вилки равен 0,29 мм. Диаметр центрирующей втулки вилки равен 3,5 мм, что обеспечивает большую площадь соприкосновения наружных проводников вилки и розетки при их сочленении. Для надежного соединения на корпусах вилки и розетки выполнена метрическая резьба с мелким шагом – 5,5×0,5 мм. При таком шаге резьбы и моменте закручивания соединительной гайки вилки 0,9 Н·м не происходит существенное ослабление гайки при механических воздействиях. В дополнение к резьбовому соединению вилки и розетки предусмотрено их соединение защелкиванием (push-on). Для этого на корпусе розетки предусмотрена стопорная канавка, в которой защелкивается вилка при соединении с розеткой (рис. 10) [18].

Диаметр контактного штыря вилки выбран равным номинальному диаметру центрального проводника стандартного полужесткого 0,047-дюймового кабеля. Эта позволяет создавать недорогие кабельные соединители высокого качества. Были разработаны соединители 1,35 мм

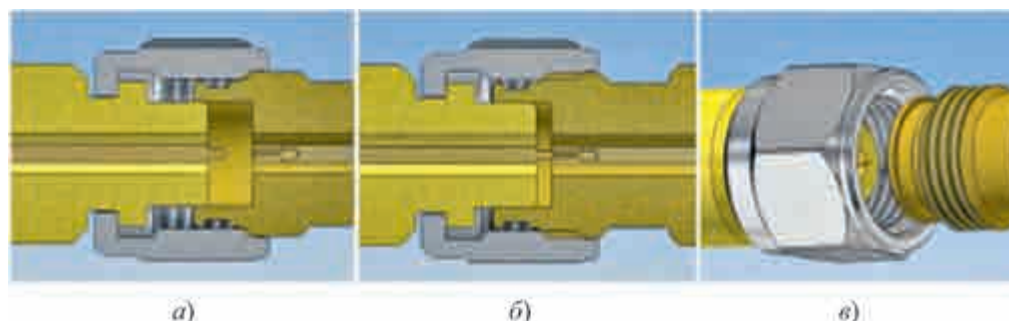


Рис. 10. Схема соединения вилки и розетки соединителя 1,35 мм:

а – наружных проводников; *б* – внутренних проводников; *в* – 3D-вид соединения

двух уровней качества: метрологический и инструментальный. По данным компании Spinner для инструментальных соединителей 1,35 мм волновое сопротивление равно $(50 \pm 0,25)$ Ом, КСВН – 1,22, величина прямых потерь – 0,05 дБ. Для метрологических соединителей волновое сопротивление равно $(50 \pm 0,15)$ Ом, КСВН – 1,13, величина прямых потерь – 0,05 дБ. Экранное затухание обоих соединителей – менее минус 90 дБ.

Другие параметры соединителей 1,35 мм и для сравнения соединителей 1,85 мм и 1,0 мм, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры соединителей 1,85 мм, 1,35 мм и 1,0 мм

Параметр	Соединитель		
	1,85 мм (V-соединитель)	1,35 мм (E-соединитель)	1,0 мм (W-соединитель)
Верхняя частота применения, ГГц	65	90	110
Теоретическая предельная частота, ГГц	72	98,5	133
Диаметр наружного проводника, мм	1,85	1,35	1,00
Диаметр внутреннего проводника, мм	0,803	0,598	0,434
Диаметр штыря кабельной вилки, мм	0,511	0,290	0,250
Резьба на корпусе соединителя	M7×0,75	M5,5×0,5	M4×0,75
Момент затягивания гайки при соединении вилки и розетки, Н•м	0,9	0,9	0,45
Опция соединения защелкиванием (push-on)	Нет	Есть	Нет
Допустимое количество циклов соединения и разъединения, не менее	500	3000	500

Разработаны следующие соединители 1,35 мм (рис. 11) [19–21]:

- кабельный соединитель (кабель 0,047");
- панельный соединитель;
- вывод энергии для поверхностного монтажа на печатную плату;
- концевой вывод энергии;
- шесть межсерийных адаптеров 1,35 мм – 1,0 мм с разным сочетанием розетка и вилка, в том числе два упрочненных адаптера для портов измерительной аппаратуры;
- девять типов коаксиально-волноводных переходов (КВП);
- калибровочный измерительный набор.

Соединители 1,35 мм закрывают пробел в частотном диапазоне между 65 и 110 ГГц и практически идеально подходят для радиочастотных измерений на частотах 60...90 ГГц, для датчиков, применяемых в автомобилях с автономным управлением, и для различных приложений 5G. После завершения процедуры включения этих соединителей в международные стандарты они будут востребованы в разработках изделий мм-диапазона длин волн.



Рис. 11. Соединители 1,35 мм: кабельный (а), панельный (б), вывод энергии для поверхностного монтажа (в), концевой вывод энергии (г), адаптеры (д), КВП (е)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее значимые области применения радиочастотных соединителей в настоящее время – это системы телекоммуникации, базовые станции, устройства беспроводной связи (сотовые и мобильные телефоны, радиостанции, устройства GPS), военная и аэрокосмическая техника, автомобильные, радиоизмерительные и медицинские устройства. Радиочастотные соединители производят сотни компаний США, Европы и Юго-Восточной Азии [22]. В ближайшие пять лет ожидается рост мирового рынка соединителей с 3610 млн долл. в 2019 году до 4940 млн долл. в 2024 году.

Ведущие зарубежные компании четко отслеживают тенденции развития техники СВЧ и в короткие сроки разрабатывают и осуществляют промышленное производство перспективных радиочастотных соединителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джуринский, К. Б. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / К. Б. Джуринский; под ред. д.т.н. Борисова А. А. – С.-Петербург: Изд-во ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. – 426 с.
2. Why 4.3–10 connector is better than 7/16? – orbis.eu <https://www.orbis.eu>
3. 4.3-10. Connector. IEC 61169-54.
4. Type 2.2–5 coax connector fits in tight spaces. – <https://www.microwavejournal.com>. (дата обращения 15.08.2018).
5. 2.2–5 Connector Series – Telegärtner. – <https://www.telegartner.com>.
6. 2.2–5 Connectors – Spinner Group. – <https://www.spinner-group.com>.
7. NEX10: small, robust and low PIM RF connector series. – <https://www.hubersuhner.com>.
8. NEX10. – <https://www.rosenberger.com>.
9. Small cell connectors 2.2–5 or NEX10 // Каталог компании Spinner.
10. Radiall NEX10 Coaxial Connectors and Adapters. – www.radiall.com.
11. 1.5–3.5 Series – Telegärtner. – <https://www.telegaertner.com>.
12. New coax connector: excellent performance for confined spaces // Microwave Journal. – September 12, 2019.



13. **Tumbaga, Charles.** Anritsu Co 0.8 mm connectors enable D-band coaxial measurements / Charles Tumbaga // Microwave Journal. – 2019. – No 3.
14. **Oldfield, B.** The importance of coax connector design above 110 GHz / B. Oldfield. – Anritsu Co., 2007. – https://dl.cdn-anritsu.com/ja-jp/test-easement/reffiles/About-Anritsu/R_D/Technical/E-2/22_07.
15. Coaxial Connector System with Single-Mode Performance to 145 GHz. 0.8 mm Connectors TDS May 2015. Anritsu Company.
16. VectorStar Broadband VNA ME7838A/E/D |Anritsu America, www.anritsu.com.
17. **Janine Love.** Looking back across 50 years of microwave engineering. – <https://www.eetimes.com>. (дата обращения 08.02.11).
18. **Barnett, D.** Novel 1.35 mm precision coaxial connector enables very high-performance. E-Band cable assemblies / D. Barnett, H.U. Nickel // Microwave Components. – 23 September 2018. – www.mwee.com.
19. High frequency performance worldwide // The Robust Precision Interface for DC to 90 GHz. – www.spinner-group.com.
20. Rosenberger Introduces 1.35 mm Connector Series for RF-Connections up to 90 GHz. – February 7, 2019. – <https://www.everythingrf.com>.
21. Robust Precision Interface up to 90 GHz. RPC-1.35 Connectors. – www.rosenberger.com.
22. **Джуринский, К. Б.** Радиочастотные соединители, адаптеры и кабельные сборки / К. Б. Джуринский. – М.: ООО «Ваш Формат», 2018. – 400 с.

Статья поступила 14 августа 2020 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Аналитический контроль благородных металлов. Коллективная монография / Под ред. Карпова Ю. А., Барановской В. Б., Житенко Л. П. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 400 с.

Благородные (драгоценные) металлы относятся к важнейшим видам современных материалов. Они являются валютными ценностями, широко применяются в ювелирном деле, в электронной, химической, машиностроительной промышленности, в медицине и многих других областях человеческой деятельности. Функциональные свойства этих материалов неразрывно связаны с их химическим составом, который устанавливают с помощью аналитического контроля.

В настоящей монографии рассмотрены современные методы анализа (атомно-спектральные, рентгеноспектральные, физико-химические и другие), методы пробирного концентрирования, методики аналитического контроля конкретных объектов, стандарты на методы анализа и проблемы развития аналитической химии благородных металлов. Эта информация представляет интерес для работников аналитических лабораторий, научно-исследовательских организаций, высших учебных заведений и многочисленных потребителей материалов и изделий, содержащих благородные металлы.



ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ БОРТОВЫХ ЦЕЗИЕВЫХ АЛТ-ЛН

Н. Г. Духина, Н. И. Мирющенко, С. А. Плешанов, К. В. Ревенко, В. В. Чугунов

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

Представлены формулы для расчета эффективности продольного и поперечного экранирования системы магнитной защиты, которая состоит из пяти тонкостенных коаксиальных цилиндров, изготовленных из сплавов марки 79НМ и 81НМА. Проведен расчет эффективности конструкции магнитных экранов, используемых в цезиевых атомно-лучевых трубках с лазерной накачкой и лазерным детектированием «Угорь». Изучены спектры зеемановских резонансов атомно-лучевых трубок, помещенных во внешние постоянные магнитные поля различной величины. Анализ сдвига частоты зеемановских резонансов позволил провести оценки коэффициента магнитного экранирования атомно-лучевых трубок с лазерной накачкой и лазерным детектированием и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

КС: атомно-лучевая трубка, экранирование, коэффициент экранирования, магнитное поле, магнитный экран, многослойный экран, магнитный сдвиг частоты, компьютерное моделирование

THE SHIELDING EFFICIENCY INVESTIGATION OF PRECISION AIRBORNE CESIUM ATOMIC-BEAM TUBES (ABT) WITH LASER PUMPING (LP)

N. G. Dukhina, N. I. Miryushchenko, S. A. Pleshanov, K. V. Revenko, V. V. Chugunov

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

Formulas are presented for calculating the efficiency of longitudinal and transverse shielding of a magnetic protection system, which consists of five thin-wall coaxial cylinders made of alloys of 79HM and 81HMA grades. The calculation of the design efficiency of the magnetic shields used in cesium atomic-beam tubes with laser pumping and laser detection «Ugor» is carried out. The spectra of Zeeman resonances of atomic-beam tubes placed in external constant magnetic fields of various strengths are studied. The analysis of the frequency shift of Zeeman resonances made it possible to estimate the magnetic shielding coefficient of laser-pumped and laser-detected atomic-beam tubes and the magnetic shift of the zero transition frequency.

Keywords: atomic-beam tube, shielding, shielding coefficient, magnetic field, magnetic shield, multilayer shield, magnetic shift of frequency, computer simulation

1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие и совершенствование ракетной, космической и навигационной техники и её широкое использование в военных, научных и народнохозяйственных целях требует постоянного повышения точности временных и частотных измерений [1].



Атомно-лучевые трубки (АЛТ) служат в качестве квантовых дискриминаторов частоты, использование которых позволяет обеспечить генерацию чрезвычайно точных сигналов частоты бортовых синхронизирующих устройств. Лидером по производству высококачественных АЛТ на пучке атомов цезия является АО «НПП «Исток» им. Шокина», где разрабатываются и исследуются цезиевые АЛТ начиная с 1959 года [2].

Разработка цезиевых АЛТ была обусловлена острой необходимостью в квантовых стандартах частоты для применения в Государственной службе единого времени и эталонных частот, радионавигации, радиоастрономии, геодезии, фундаментальных научных исследованиях и т. д. Результатом этих работ явилось создание серии приборов бортового и стационарного базирования для аппаратуры важнейших систем, осуществляющих высокоточное навигационное и временное обеспечение Вооруженных Сил и народного хозяйства страны – Государственная система единого времени и эталонных частот, глобальная навигационная спутниковая система «ГЛОНАСС». В настоящее время выпускаемые в АО «НПП «Исток» им. Шокина» АЛТ на атомах цезия являются единственным типом АЛТ, работающих на космических спутниках Земли в обеспечение системы «ГЛОНАСС».

Цезиевые АЛТ с лазерной накачкой и лазерным детектированием атомных состояний (АЛТ-ЛН), которые разрабатываются на АО «НПП «Исток» им. Шокина», предназначены для применения в высокостабильных квантовых стандартах частоты (КСЧ) модернизированного бортового синхронизирующего устройства (БСУ) космического аппарата (КА) «ГЛОНАСС-К2».

Функциональные узлы создаваемой цезиевой АЛТ-ЛН показаны на рис. 1.

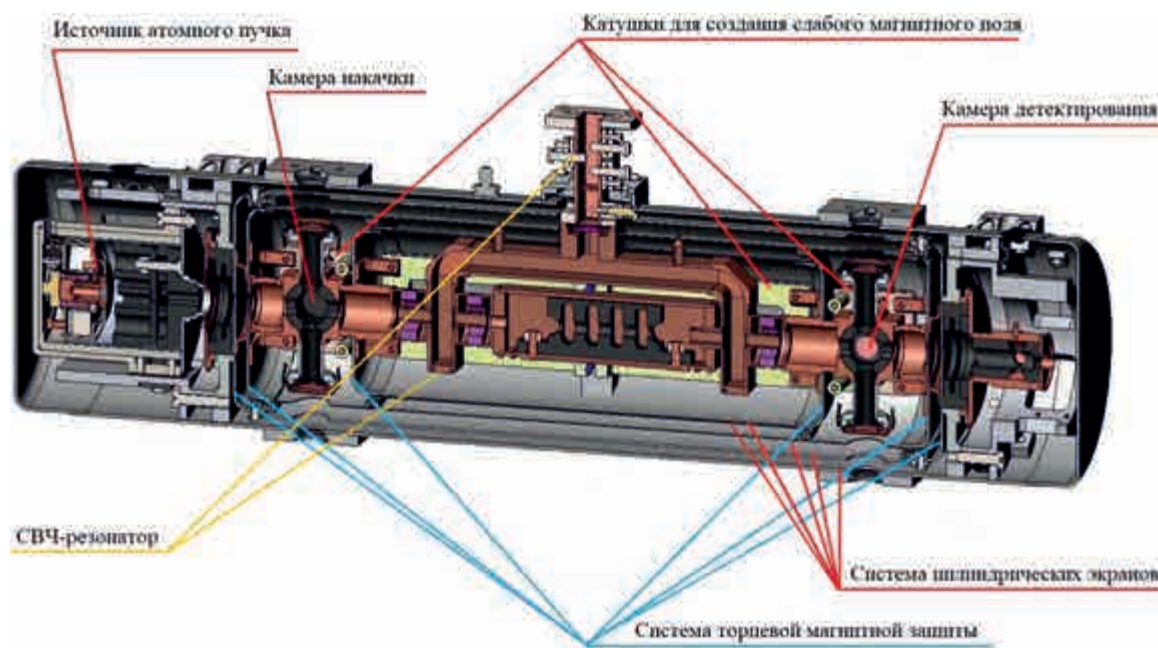


Рис. 1. Функциональные узлы цезиевой АЛТ-ЛН

Для обеспечения высокого вакуума в АЛТ-ЛН «Угорь» используются компактные газопоглотители, выполненные из графита марки МПГ-6. На рис. 1 газопоглотители обозначены черным цветом. Общая масса компактных поглотителей составляет 173 г.

Принцип работы цезиевых АЛТ-ЛН подробно описан в работе [3].

Одним из важнейших требований, предъявляемых к цезиевым АЛТ-ЛН, является снижение сдвига частоты рабочего перехода атома цезия, возникающего под воздействием внешних магнитных полей [4]. Для этого необходимо, чтобы в области взаимодействия атомного пучка с полем СВЧ-резонатора, установленного внутри системы магнитных экранов, обеспечивалась глубокая степень магнитной экранировки, с коэффициентом экранирования не менее 10^5 . Как правило, источниками возмущающих внешних магнитных полей являются постоянно действующее магнитное поле Земли (около 0,5 Э) и поля рассеяния других приборов, работающих в одном блоке с АЛТ-ЛН.

В цезиевых АЛТ-ЛН в качестве материалов экранов используются магнитомягкие сплавы с большой магнитной проницаемостью, требующие предварительного высокотемпературного отжига. Необходимость в таком отжиге, а также конструктивные ограничения приводят к необходимости использования разборных конструкций, в которых цилиндрическая часть экрана не сварена с торцевыми частями, а соединена с ними винтами, стяжными хомутами и т. п. В таких экранах неизбежно наличие воздушных зазоров между цилиндрической и торцевыми частями, уменьшающих коэффициент экранирования.

В литературе можно найти различные формулы для расчета эффективности экранирования (отношение внешнего магнитного поля к внутреннему) для открытых с концов коаксиальных цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью в однородном магнитном поле [5]. Однако для экранирования продольных полей общей формулы не существует, хотя Магер получил соотношение между эффективностями поперечного и продольного экранирования для одного цилиндра (с открытыми и закрытыми каналами) и оценил соотношение для двух коаксиальных цилиндров с открытыми концами. Для магнитных экранов, рассматриваемых в рамках данной статьи, которые невозможно ориентировать в окружающем поле, ограничивающим критерием будет являться эффективность экранирования продольных полей.

В данной статье приводится общая формула для эффективности экранирования продольных полей системой из пяти тонкостенных коаксиальных цилиндров с малыми радиальными зазорами между ними. Допущение о тонкостенных экранах с малыми зазорами приводит к приближениям, упрощающим получающиеся уравнения и делающим их более удобными для практического применения к различным случаям магнитного экранирования, а также обеспечивает простое графическое представление метода построения формулы. Использование формулы продемонстрировано применительно к магнитным экранам, предназначенным для цезиевых АЛТ-ЛН.

Для более точного расчета эффективности экранирования цезиевых АЛТ-ЛН необходимо использовать численные методы решения уравнений, так как аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ-ЛН с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с тем, что функциональные узлы АЛТ-ЛН имеют сложную асимметричную конфигурацию и практически не поддаются точному расчету. При расчете также следует уделять внимание конструктивным особенностям АЛТ-ЛН, которые учтены при использовании численных методов решения уравнений.

С использованием катушек Гельмгольца получены спектры зеемановских резонансов прецизионных АЛТ-ЛН. С помощью полученных данных можно провести оценку коэффициента магнитного экранирования АЛТ-ЛН и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

2. ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛТ-ЛН

Для получения высокой стабильности частоты область резонатора тщательно экранируют от внешних магнитных полей и в ней создают малое однородное статическое поле с помощью рамок соленоида в области резонатора внутри системы магнитных экранов. В слабом магнитном поле каждый из сверхтонких уровней расщепляется на $2F + 1$ зеемановских резонансов, которые определяются различными значениями проекции F на направление внешнего магнитного поля и характеризуются квантовыми числами m_F (рис. 2) [6].

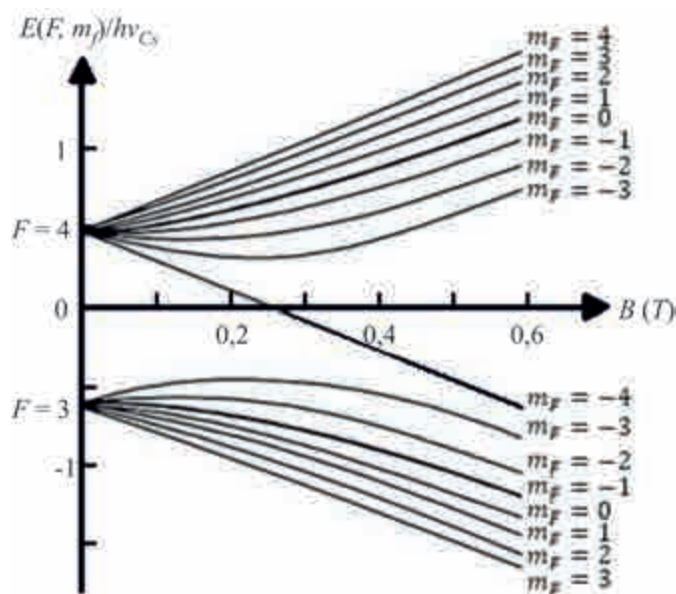


Рис. 2. Схема сверхтонких уровней основного состояния атомов изотопа ^{133}Cs в зависимости от величины внешнего магнитного поля [7]

Слабое однородное магнитное поле выделяет рабочий переход, имеющий квадратичную зависимость от величины магнитного поля, и обеспечивает стабильность сдвига частоты перехода.

Нарушение однородности постоянного магнитного поля (продольного и поперечного), имеющее место в реальных АЛТ-ЛН, приводит к разнообразным искажениям резонансной линии. При этом нередко наблюдается существенное уменьшение интенсивности резонанса, вплоть до полного исчезновения интерференционной картины Рамзея.

В цезиевых АЛТ-ЛН широко используется метод разделенных осциллирующих полей Рамзея [8]. Ширина резонансной линии определяется в этом случае средним временем пролета атомов в пространстве между областями СВЧ-полей и описывается формулами:

$$W_{\text{полн}} = \nu/L = 1400 \text{ Гц}, \quad (1)$$

$$W_{1/2} = W_{\text{полн}}/2 = 700 \text{ Гц}, \quad (2)$$

где $\nu = 210 \text{ м/с}$ – средняя скорость атомов пучка; $L = 15 \text{ см}$ – расстояние между СВЧ-полями.

Наличие неоднородности магнитного поля в пролетном пространстве эквивалентно в «атомной» системе отсчета действию на атом возмущения, зависящего от времени. Это возмущение может индуцировать дополнительные переходы между энергетическими уровнями атома, искажающие резонансную линию наблюдаемого перехода (см. рис. 2).

В случае цезиевой АЛТ-ЛН рабочим является переход между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния ($F=4, m_F=0 \leftrightarrow F=3, m_F=0$), который принято считать нулевым («часовым») переходом. Поскольку многоквантовые переходы маловероятны, то резонансная линия подвергается искажениям главным образом за счет переходов (см. рис. 2):

$$(F=4, m_F=0) \leftrightarrow (F=4, m_F=\pm 1),$$

$$(F=3, m_F=0) \leftrightarrow (F=3, m_F=\pm 1).$$

Действительная частота нулевого («часового») перехода f , Гц, в цезиевых АЛТ-ЛН зависит от напряженности внешнего магнитного поля [9]:

$$f = f_{0-0} + 427,45 \cdot H_c^2, \quad (3)$$

где f_{0-0} – частота нулевого перехода; H_c – напряженность внешнего магнитного поля, Э.

Для цезиевых АЛТ $f_{0-0} = 9\,192\,631\,770$ Гц.

Постоянное магнитное поле применяется в стандарте частоты с целью расщепления магнитных уровней на дополнительные шесть переходов $\Delta F = \pm 1, \Delta m_F = 0$, которые показаны на рис. 3, а. Эти переходы попарно симметричны относительно нулевого перехода и не должны приводить к сдвигу его частоты. Однако, вследствие различной сортировки атомов с разными m_F , интенсивности ближайших к нулевому переходу линий с $m_F = \pm 1$ будут неодинаковы, и они, накладываясь своими краями на линию $4,0 \leftrightarrow 3,0$, будут нарушать ее симметрию, вызывая сдвиг частоты. Спектр нулевого перехода в увеличенном масштабе показан на рис. 3, б.

Снижение влияния внешнего магнитного поля на смещение частоты зеемановских резонансов может привести к улучшению долговременной стабильности магнитных цезиевых АЛТ-ЛН. На сегодняшний день на АЛТ-ЛН «Угорь» получена стабильность частоты на уровне $3,5 \cdot 10^{-15}$ (рис. 4).

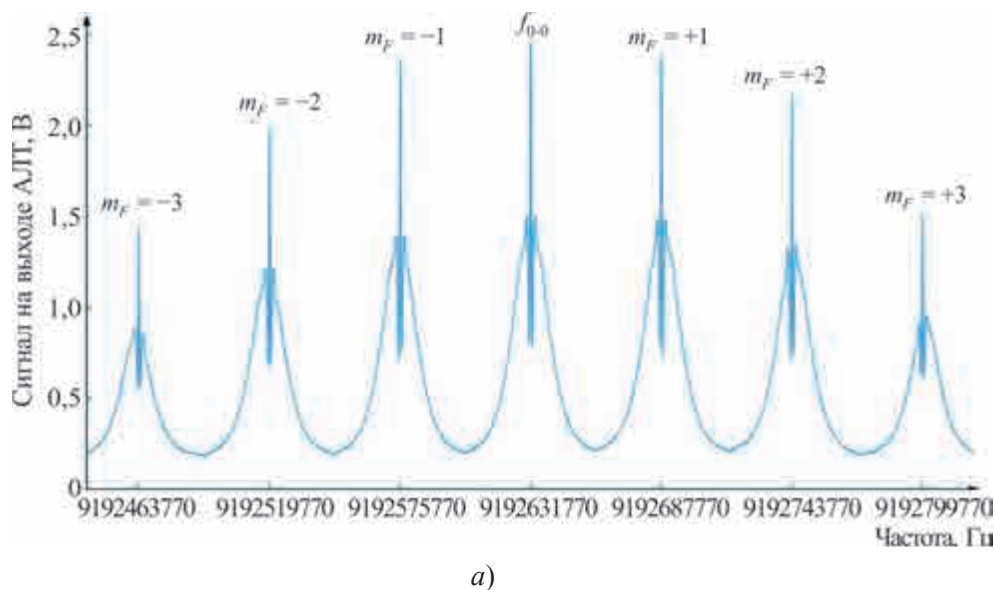


Рис. 3. СВЧ-резонансы в АЛТ-ЛН «Угорь» (см. также с. 42):
а – спектр семи зеемановских резонансов; б – форма резонансной кривой

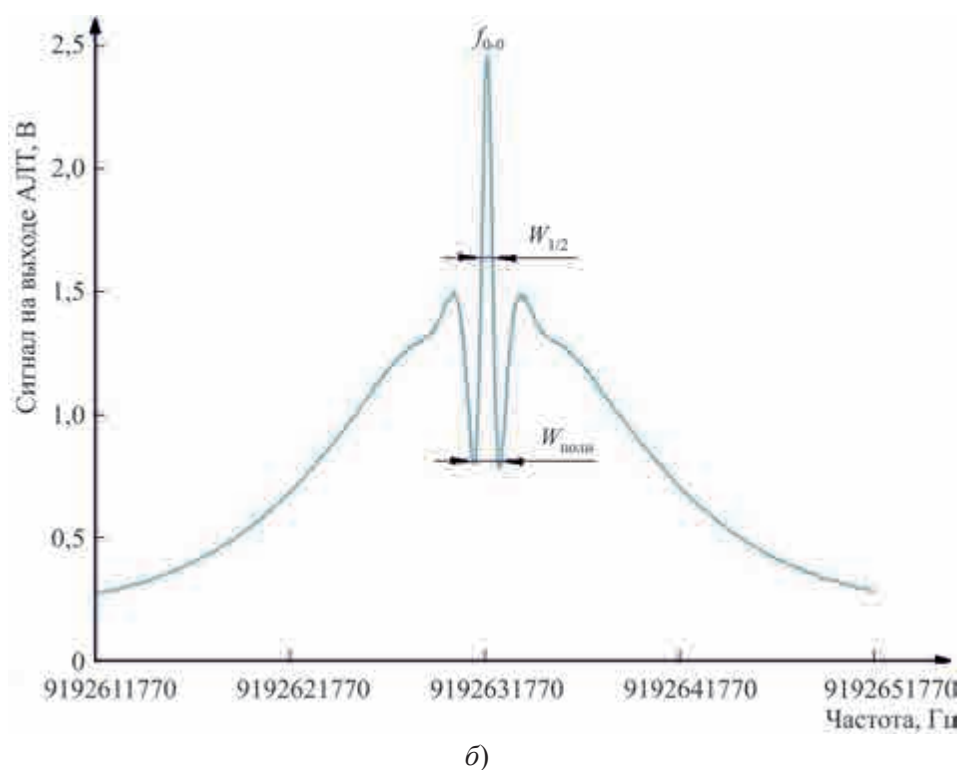


Рис. 3. СВЧ-резонансы в АЛТ-ЛН «Угорь» (окончание):
а – спектр семи зеемановских резонансов; б – форма резонансной кривой

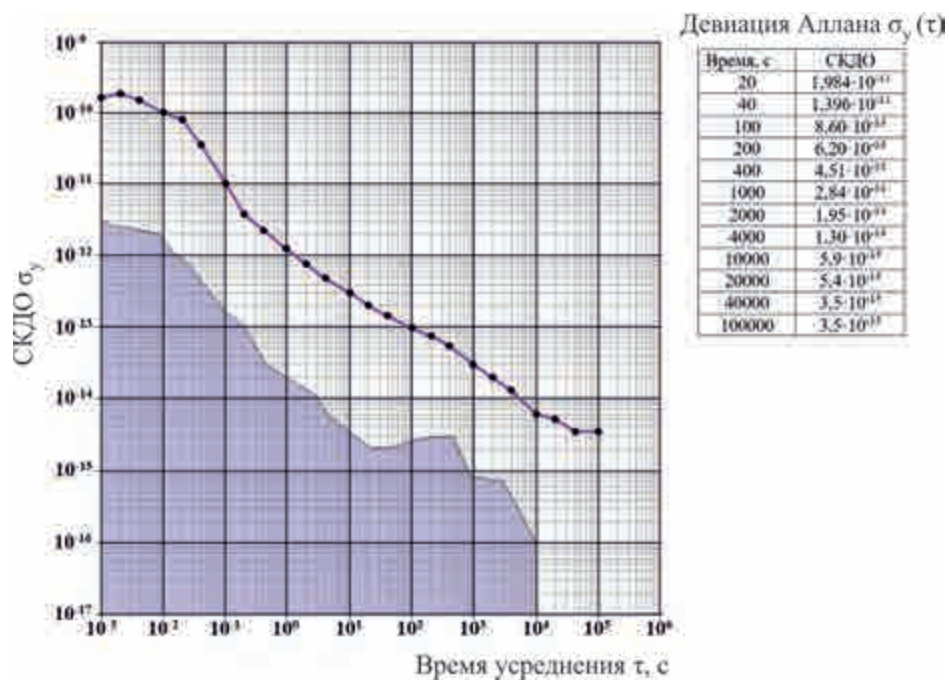


Рис. 4. Девияция Аллана для АЛТ-ЛН «Угорь»



3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ АЛТ-ЛН

Эффективность экранирования для системы из тонкостенных цилиндрических экранов, изготовленных из материала с высокой магнитной проницаемостью, в поперечном поле рассчитывается по формуле [5]:

$$G_N(g_i, s_{i,i+1}) = (1/2)(u_{i+1} + v_{i+1}) = H/H_0, \quad (4)$$

где $u_{i+1} = (1 + g_i s_{i,i+1})u_i + s_{i,i+1}v_i$; $v_{i+1} = g_i \mu_i + v_i$; $S_{N,N+1} = 0$; $g_i = \mu_i t_i / r_i$; $s_{i,i+1} = (r_{i+1} - r_i - t_i) / r_{i+1}$ – радиальный зазор между экранами; H – внешнее поле; H_0 – внутреннее поле вблизи центра экранов; μ_i – магнитная проницаемость i -го экрана (является свойством материала и предполагается однородной по всей поверхности экрана); t_i – толщина i -го экрана; r_i – внутренний радиус i -го экрана; N – количество экранов; u_i и v_i – максимальные значения касательной и нормальной компонент магнитного поля на i -м экране (внутреннее поле предполагается равным 1). Эта рекуррентная формула верна при $t_i/r_i \ll 1$, $s_{i,i+1} \ll 1$ и $g_i \gg 1$.

Для систем, состоящих из четырех и более цилиндрических экранов, расчет эффективности экранирования становится сложным. Это связано с тем, что в сумму входит большое количество пренебрежимо малых членов. С целью получения приближенного решения для таких громоздких сумм можно воспользоваться рис. 5. Данный график упрощает формирование всех членов по способу, который группирует члены одинаковой величины.

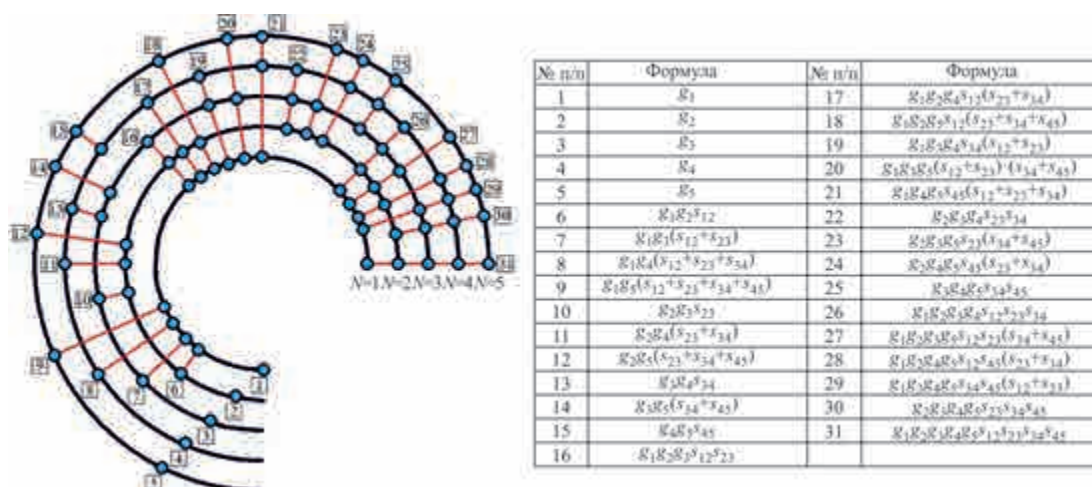


Рис. 5. Графическое представление построения общей формулы для эффективности экранирования

Одной точкой на линии экрана представляются члены g_i , а линией между точками – члены $s_{i,i+1}$ для соседних экранов или члены $(s_{i,i+1} + s_{i+1,i+2} + \dots + s_{j-1,j})$ для несоседних экранов i и j . Соединенные между собой точки представляют члены произведения, как показано на рис. 5. Члены, входящие в уравнение (4), представляются всеми возможными способами сочетания точек 1, 2, 3, 4 или 5. Сумма этих членов дает окончательное выражение для G_N . Для материалов с высокой магнитной проницаемостью ($\mu \geq 10^4$ Гс/Э) низшими членами произведения обычно можно пренебречь, но число значимых членов зависит от конкретной конструкции экрана.

В случае магнитных экранов, рассматриваемых в рамках данной работы, для нахождения G_5

(5)

На рис. 6 приведено схематическое изображение системы магнитной защиты цезиевой АЛТ-ЛН «Угорь».

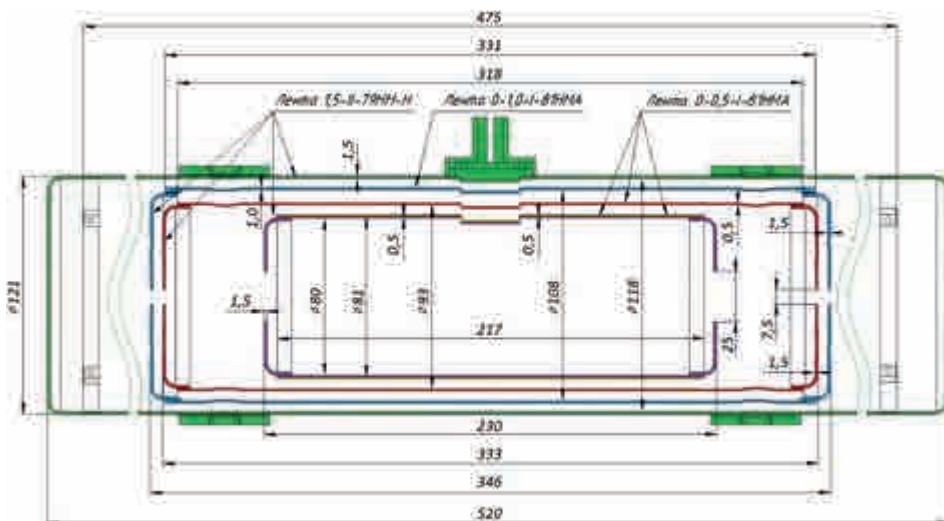


Рис. 6. Схематическое изображение магнитной защиты АЛТ-ЛН «Угорь»

экран – желтым цветом; 3-й экран – красным цветом; 4-й экран – синим цве

5-й экран является корпусом прибора и выделен зеленым цветом

Эффективность экранирования для системы из тонкостенных цилиндров с малым радиальным зазором в продольных магнитных полях можно записать и распространить на закрытые цилиндры в том же виде, что и для случая продольного поля:

(6)

Величина G_N дается выражением (4), построение которого представлено графически на рис. 5, а ψ_i^1 определяются путем обобщения выражения (7):

(7)

где D – коэффициент размагничивания для эллипсоида длиной L_i и радиусом r_i , равным радиусу экрана; L_i – общая длина, включая концевые крышки.

Зависимость величин f и D от отношения L/r показана на рис. 7. Для учета особенностей данной геометрии и разброса свойств материала лучше всего экспериментально определять μ_i^l для первого экрана. Если экспериментальные проверки не возможны, то для оценки μ_i^l можно использовать выражение (7).

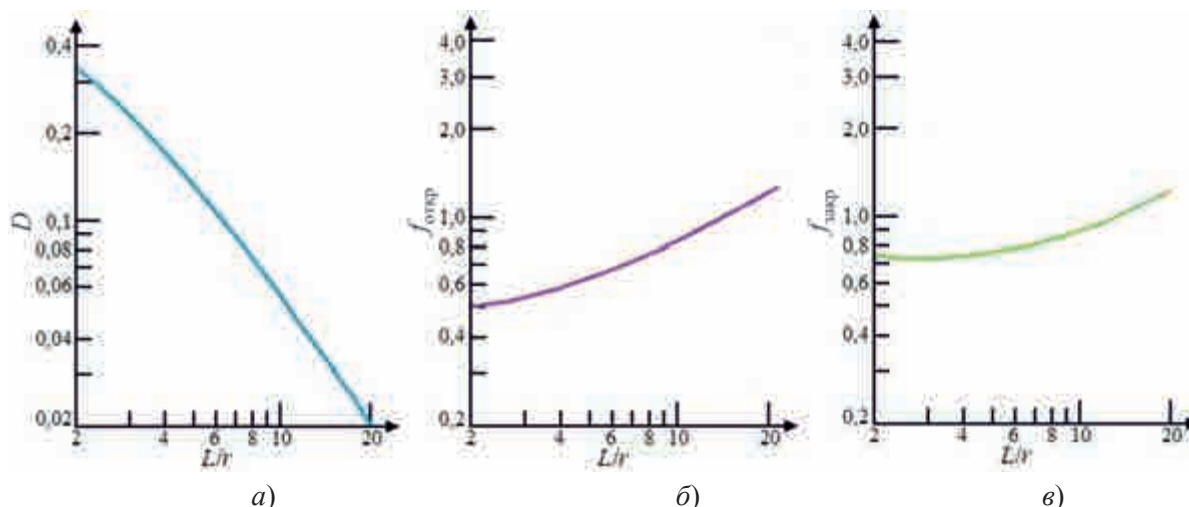


Рис. 7. Зависимости коэффициента размагничивания D (а) и коэффициента f для цилиндрических экранов с открытыми (б) и закрытыми (в) торцами от L/r

Расчет эффективности экранирования АЛТ-ЛН «Угорь» в продольном магнитном поле показал, что для открытого цилиндра коэффициент экранирования составляет $7,83 \cdot 10^8$, а для закрытого цилиндра – $9,05 \cdot 10^8$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

В предыдущем разделе приведены результаты расчета коэффициента магнитного экранирования АЛТ-ЛН, система магнитной защиты которой состоит из 5 тонкостенных цилиндрических экранов. Полученные значения являются завышенными, поскольку в общем случае аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ-ЛН с высокой точностью не представляется возможным, так как ее функциональные узлы имеют сложную асимметричную конфигурацию и практически не поддаются точному расчету. Для правильного расчета также следует учитывать все конструктивные особенности АЛТ-ЛН и использовать численные методы решения уравнений.

При разработке промышленных АЛТ-ЛН на пучке атомов цезия используются приближенные методы расчета узлов, однако при этом решающую роль играют интуиция разработчика и экспериментальные исследования на лабораторных макетах приборов. Возможность совершенствования методики расчета функциональных узлов цезиевых АЛТ-ЛН существует благодаря развитию методов компьютерного моделирования магнитных систем и систем формирования потоков заряженных частиц на основе трехмерных математических моделей, хорошо апробированных в области проектирования магнитных и электронно-оптических систем ЭВП СВЧ.

На рис. 8 показана 3D-модель магнитной защиты АЛТ-ЛН «Угорь», использовавшаяся для расчётов магнитного поля цезиевой АЛТ-ЛН с помощью численных методов. Наружный экран 5 является одновременно корпусом АЛТ. Внутри корпуса установлено четыре экрана 1...4 в виде отрезков цилиндрических труб с закрытыми торцами 6...8 (торцевой магнитной защитой). Все экраны разделены между собой узкими коаксиальными и торцевыми зазорами. Для прохождения ленточного атомного пучка в центре дисков экранов имеются отверстия: круглое отверстие диаметром 25 мм – в диске 6, щелевидное размерами 3×4,5 мм – в дисках 7 и 8.

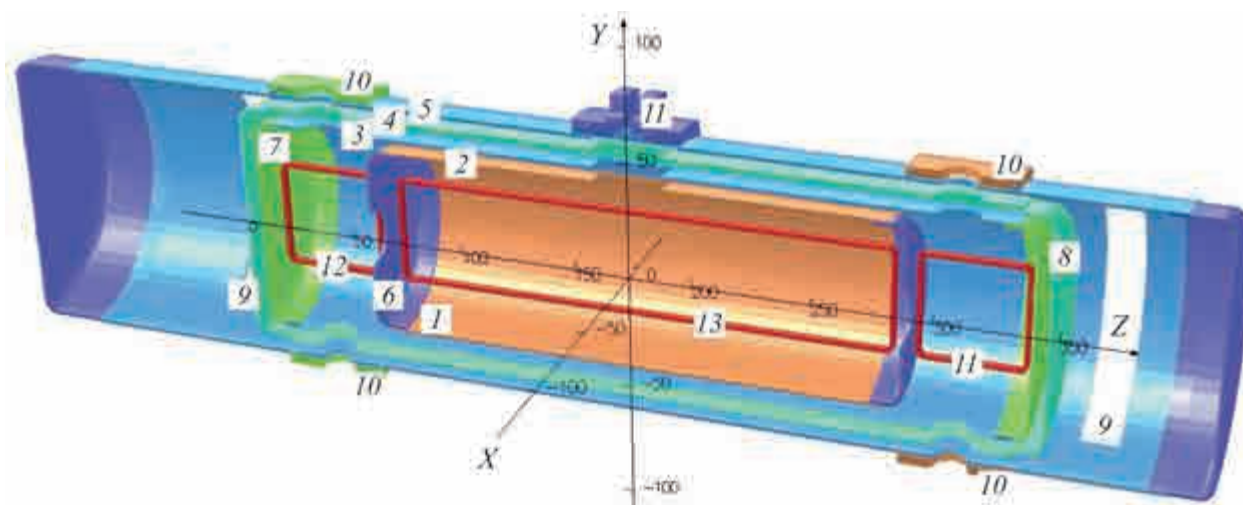


Рис. 8. Система магнитных экранов цезиевой АЛТ-ЛН

В последнем экране 5 вырезаны отверстия 9 размерами 16×110 мм для крепления ног АЛТ-ЛН. Отверстия 10 предназначены для установки лазеров для накачки и детектирования. Данные отверстия имеют диаметр 12,5 мм на внешнем цилиндре 5 и 18 мм на внутренних цилиндрах 3 и 4.

Хомуты 11 предназначены для защиты АЛТ-ЛН от проникновения через центральное отверстие внешних полей и располагаются поверх него. В хомутах имеется щель шириной 5 мм, окруженная надстройкой сложной формы.

С внешней стороны торцевой магнитной защиты 6 установлены рамки в области накачки 12 и в области детектирования 14 в виде квадратных каркасов с натянутыми на них проводами. Внутри первого экрана установлены рамки 13 в виде прямоугольных каркасов с натянутыми на них проводами.

Цилиндрические экраны 1...4 с торцами 6...8 выполнены из сплава марки 81НМА, наружный экран 5 – из сплава марки 79НМ.

Расчет эффективности системы магнитных экранов АЛТ-ЛН проводился с учетом воздействия только лишь внешнего магнитного поля, без присутствия тока рамок. Известно, что поле Земли $H_z = 0,5 \text{ Э} = 39,8 \text{ А/м}$, но, пользуясь линейностью системы, в качестве возмущающего воздействия взято поле, вдвое большее (1 Э), в направлениях X, Y, Z поочередно.

Для снижения трудоемкости и повышения точности расчетов на всех плоскостях симметрии, присущих проектируемому варианту конструкции экранов, задавались соответствующие или тангенциальные граничные условия для решения полевых задач. Материалы полагались нелинейными и задавались таблично с жесткими параметрами счёта, что обеспечило 8...20 итераций

в процессе сходимости и достаточно уверенный счёт поля до $10^{-7} \dots 10^{-9}$. Расчётная сетка состоит из 2952810 узлов.

В цезиевых АЛТ-ЛН для снятия вырождения энергетических уровней атомов цезия в пространстве дрейфа во внутренней области одного цилиндрического экрана поддерживают слабое однородное магнитное поле с заданной пространственной ориентацией магнитных моментов атома цезия в направлении оси X . Таким образом, значение магнитного сдвига частоты (МСЧ) АЛТ-ЛН определяется в первую очередь X -компонентой внешней добавки. Поэтому при вычислении внутреннего магнитного поля, возникающего внутри одного цилиндрического экрана из-за внешних возмущений, особое внимание стоит уделять его X -компоненте.

Результаты сравнительного анализа экранирующих свойств системы экранов АЛТ-ЛН показаны на рис. 9 и в таблице.

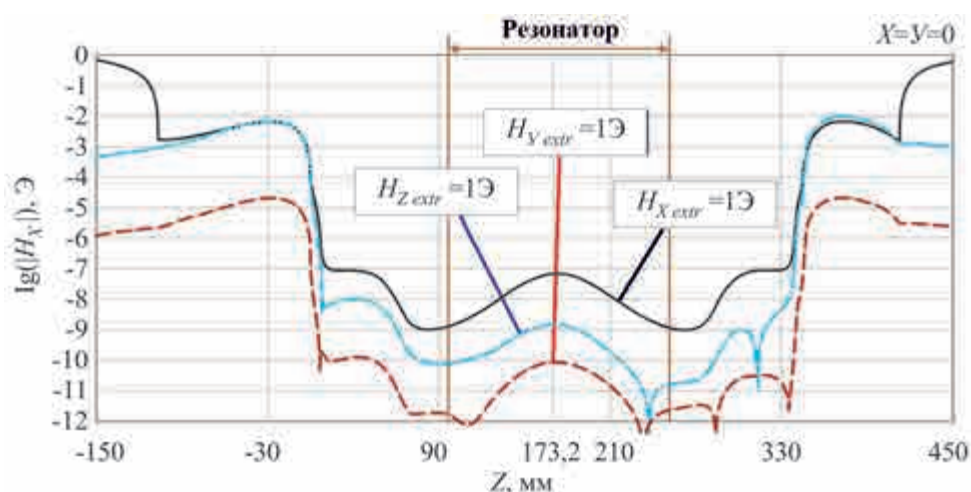


Рис. 9. Модули X -компоненты поля в логарифмическом масштабе на оси системы при воздействии внешнего поля разной направленности

Влияние внешних полей разной направленности на поле внутри экранов

Направление внешнего магнитного поля	Поле в центре резонатора $\{0; 0; 173,2\}$, Э			
	$ H $	H_x	H_y	H_z
X	$1,82 \cdot 10^{-6}$	$7,18 \cdot 10^{-8}$	$-1,82 \cdot 10^{-6}$	$1,29 \cdot 10^{-9}$
Y	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$9,10 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$-1,01 \cdot 10^{-8}$
Z	$8,25 \cdot 10^{-7}$	$1,43 \cdot 10^{-9}$	$-1,28 \cdot 10^{-7}$	$8,25 \cdot 10^{-7}$

Результат моделирования показал, что в системе экранов цезиевой АЛТ-ЛН имеет место сложное распределение магнитного поля вдоль оси Z .

Обычно коэффициент экранирования рассчитывается в центральной точке внутри системы магнитных экранов $Z = 173,2$, где магнитная защита должна быть максимальной. Но в случае АЛТ-ЛН из-за наличия центрального отверстия непосредственно над центром системы наблюдается увеличение возмущения в центре, превышающее по величине поле в прочих точках резонатора. Поэтому коэффициент экранирования, вычисленный в центре резонатора, будет меньше по величине, чем если рассмотреть его в любой другой точке на оси резонатора.



Также стоит отметить, что к результатам в области малых величин поля (менее 10^{-9} Э) следует относиться с осторожностью, так как программа не дает достаточной точности. В частности, это проявляется в несимметрии графиков относительно центра резонатора.

Анализируя рис. 9, можно увидеть, что напряженность поля внутри системы магнитных экранов цезиевой АЛТ-ЛН при воздействии внешнего однородного поля $H_{x_{extr}} = 1$ Э составляет $7,18 \cdot 10^{-8}$ Э, что соответствует коэффициенту экранирования $1,39 \cdot 10^7$. При воздействии внешнего поля $H_{y_{extr}} = 1$ Э и $H_{z_{extr}} = 1$ Э напряженность поля внутри системы очень мала и на таких порядках величин определена с недостаточной точностью.

В связи с этим можно сделать вывод, что расчетный коэффициент экранирования системы магнитных экранов цезиевой АЛТ-ЛН оценивается выше 10^7 в зависимости от направления внешнего однородного магнитного поля.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ АЛТ-ЛН

Одной из важнейших характеристик цезиевых АЛТ-ЛН является магнитный сдвиг частоты (МСЧ). Зная величину МСЧ, можно вычислить коэффициент экранирования под воздействием внешних магнитных полей заданной величины и ориентации.

Величина МСЧ зависит от экранирующих свойств системы магнитной защиты АЛТ-ЛН, от внешнего магнитного поля, а также от топографии магнитного поля, проникающего в область СВЧ-резонатора, в котором происходит взаимодействие атомного пучка с СВЧ-полем.

В работе [1] было определено, что наиболее благоприятным положением цезиевых АЛТ является такое, когда направление внешнего магнитного поля в области резонатора перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и совпадает с направлением движения атомов цезия. Самое неблагоприятное положение – когда направление внешнего магнитного поля в области резонатора совпадает с направлением слабого магнитного поля и перпендикулярно направлению движения атомов цезия. Также в данной работе было установлено, что при тщательном изготовлении систем магнитного экранирования смена направления внешнего магнитного поля практически не вызывает частотного сдвига резонансов. Данные выводы были приведены для магнитных цезиевых АЛТ, но они справедливы и для цезиевой АЛТ-ЛН.

Нами получены экспериментальные данные по сдвигу частоты центральных пиков зеемановских резонансов прецизионных бортовых АЛТ-ЛН, которые были исследованы с помощью катушек Гельмгольца, обеспечивавших три ориентации внешнего магнитного поля по отношению к АЛТ-ЛН, при заданных величинах внешнего магнитного поля. На рис. 10 показана полностью подключенная АЛТ-ЛН «Угорь» внутри катушек Гельмгольца.

Проведено исследование МСЧ для АЛТ-ЛН «Угорь» с целью выявления влияния напряженности внешнего магнитного поля на смещение частоты зеемановского резонанса в неблагоприятном положении АЛТ-ЛН относительно направления внешнего магнитного поля. Результаты исследования МСЧ приведены на рис. 11.

Результаты исследования показали, что при магнитном поле $\pm 0,3$ Э (см. рис. 11, а) смещение частоты вершины зеемановского резонанса $m_F = +1$ составило 0,69 Гц, что соответствует коэффициенту экранирования $3,04 \cdot 10^5$. При магнитном поле ± 1 Э (см. рис. 11, б) смещение частоты вершины зеемановского резонанса $m_F = +1$ составило 0,77 Гц, что соответствует коэффициенту экранирования $9,11 \cdot 10^5$. При магнитном поле ± 3 Э (см. рис. 11, в) смещение составило 1,59 Гц, что соответствует коэффициенту экранирования $1,32 \cdot 10^6$. Разница частоты



вершин зеемановского резонанса $m_F = +1$ при отсутствии магнитных полей объясняется наличием гистерезиса пермалловых сплавов.



Рис. 10. Подключенная АЛТ-ЛН «Угорь» внутри катушек Гельмгольца

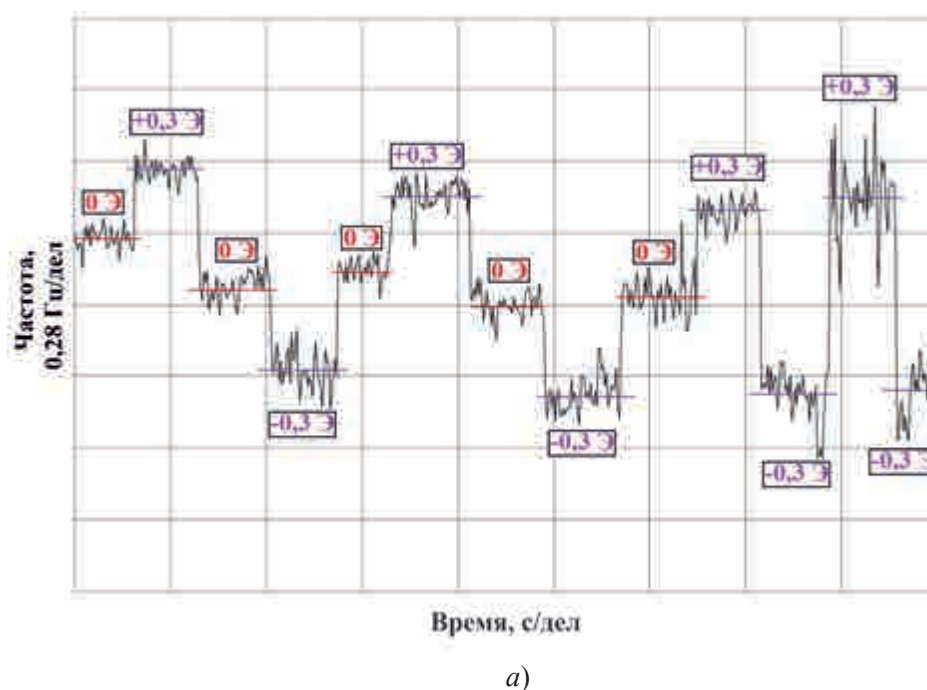
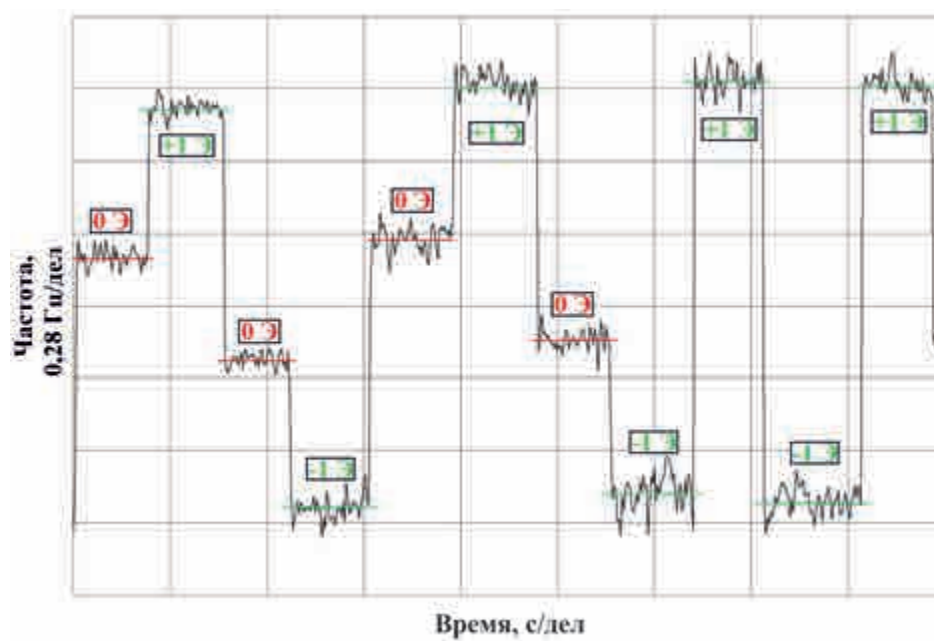
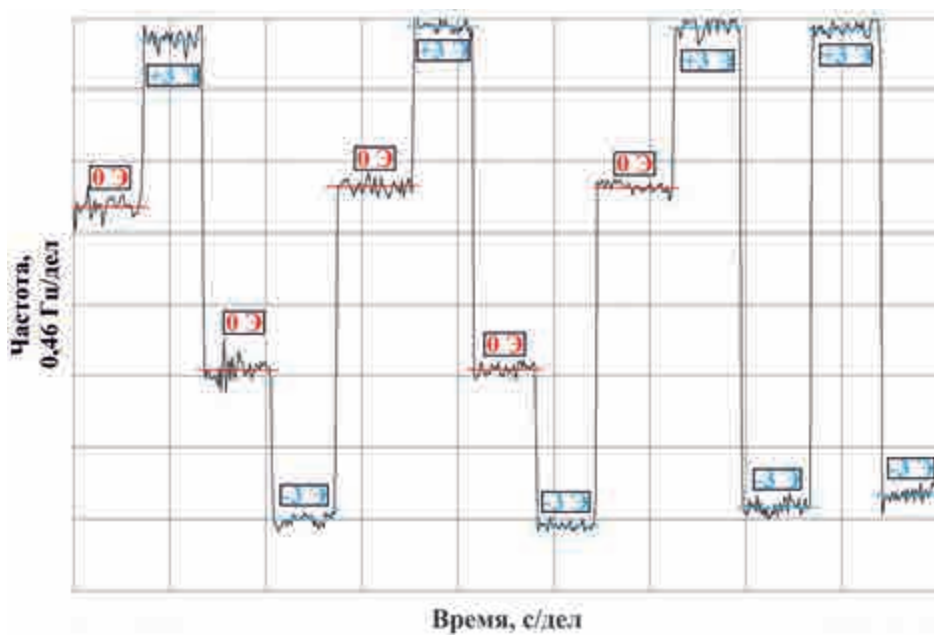


Рис. 11. Влияние напряженности внешнего магнитного поля $H_{Z\text{extr}}$ на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ-ЛН «Угорь» (см. также с. 50):
а – магнитное поле составляет $\pm 0,3$ Г; б – ± 1 Г; в – ± 3 Г



б)



в)

Рис. 11. Влияние напряженности внешнего магнитного поля $H_{Z\text{extr}}$ на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ-ЛН «Угорь» (окончание):
а – магнитное поле составляет $\pm 0,3$ Э; б – ± 1 Э; в – ± 3 Э

Полученные данные позволяют оценить коэффициент экранирования системы магнитной защиты АЛТ-ЛН «Угорь» в пределах $3,0 \cdot 10^5 \dots 1,3 \cdot 10^6$ в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля. Значения коэффициентов магнитного экранирования высо-



кие, что подтверждает правильность выбранной конструкции системы магнитного экранирования АЛТ-ЛН.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведены аналитические расчеты эффективности экранирования для системы из тонкостенных цилиндрических экранов АЛТ-ЛН «Угорь» в продольном и поперечном магнитном поле. Эффективность экранирования в поперечном поле составляет $1,50 \cdot 10^{11}$, а в продольном магнитном поле для открытого цилиндра коэффициент экранирования составляет $7,83 \cdot 10^8$, а для закрытого цилиндра – $9,05 \cdot 10^8$.

Аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ-ЛН с высокой точностью не представляется возможным, поскольку функциональные узлы АЛТ-ЛН имеют сложную конфигурацию и не поддаются точному расчету. Для точного расчета эффективности экранирования следует использовать численные методы решения уравнений.

Произведён расчет магнитного поля и коэффициента экранирования АЛТ-ЛН при воздействии внешних магнитных полей разной направленности.

Результаты численного расчета магнитной защиты АЛТ-ЛН позволяют оценить эффективность экранирования выше 10^7 в зависимости от направления внешнего магнитного поля. Полученные результаты показывают на эффективность экранирования, достижимую при идеальных условиях, когда учтена нелинейность магнитной проницаемости пермаллоевых сплавов от величины действующего магнитного поля.

Произведено исследование МСЧ АЛТ-ЛН для выявления влияния напряженности внешнего магнитного поля на смещение частоты вершины зеемановского резонанса. Полученные данные позволяют оценить коэффициент экранирования системы магнитной защиты АЛТ-ЛН «Угорь» в пределах $3,0 \cdot 10^5 \dots 1,3 \cdot 10^6$ в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля. Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования достаточно высокие, что говорит о правильном конструировании и технологическом исполнении системы магнитной защиты цезиевых АЛТ.

Разумеется, для получения высоких значений коэффициентов экранирования всей системы необходимо использовать высококачественные материалы и добиваться тщательного соблюдения технологических режимов обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Духина, Н. Г. Системы магнитного экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ / Н. Г. Духина, Н. И. Мирющенко, А. А. Орехов, С. А. Плешанов, К. В. Ревенко, В. В. Чугунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 48 – 61.
2. Калябина, И. А. Физические принципы работы атомно-лучевого цезиевого стандарта частоты / И. А. Калябина, В. П. Лагузов, Г. И. Рукман, Я. А. Юхвидин // Электроника. – 1959. – № 6. – С. 3 – 8.
3. Лещенко, М. П. Цезиевые атомно-лучевые трубки с магнитной селекцией и лазерной накачкой / М. П. Лещенко, С. А. Плешанов, И. И. Самарцев, Ю. А. Турутин, В. В. Чугунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 4 (519). – С. 114 – 120.
4. Голеницкий, И. И. Анализ и оптимизация функциональных узлов цезиевых атомно-лучевых трубок методом компьютерного моделирования / И. И. Голеницкий, Н. Г. Духина, В. А. Мешков, С. А. Плешанов, В. В. Чугунов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып. 1 (512). – С. 4 – 20.
5. Gubser, D. U. Shielding of longitudinal magnetic field with thin, closely spaced concentric cylinders of high permeability material / D. U. Gubser, S. A. Wolf, J. E. Cox // Rev. Sci. Instrum. – 1979. – Vol. 50, No 6. – P. 751 – 756.



6. **Пихтелев, А. И.** Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А. И. Пихтелев, А. А. Ульянов, Б. П. Фатеев и др.; под ред. Б. П. Фатеева. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.
7. **Одуан, К.** Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
8. **Рамзей, Н.** Молекулярные пучки / Н. Рамзей; пер. с англ. под ред. Б. П. Адьяевича. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 407 с.

Статья поступила 21 сентября 2020 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ДЭН САЙМОН. Алгоритмы эволюционной оптимизации / Пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 940 с.: ил.

В данной книге рассматриваются история, теоретические основы, математический аппарат и программирование алгоритмов эволюционной оптимизации. Рассмотренные алгоритмы включают в себя генетические алгоритмы, генетическое программирование, оптимизацию на основе муравьиной кучи, оптимизацию на основе роя частиц, дифференциальную эволюцию, биогеографическую оптимизацию и многие другие.

Издание будет полезно студентам старших курсов, программистам, инженерам, а также всем специалистам, кто интересуется принципами построения различных алгоритмов.

БАРАНОВ А. В., МОРУГИН С. Л. Транзисторные усилители-ограничители мощности гармонических СВЧ-колебаний. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 332 с.: ил.

Рассмотрены особенности проектирования транзисторных усилительно-ограничительных СВЧ-устройств, в основе работы которых лежат принципы усиления, ограничения и стабилизации уровня выходной мощности. Обсуждается концепция улучшения частотных и энергетических характеристик этих устройств в ключевых режимах. Изложены принципы подавления «прицельных» помех в усилителях-ограничителях с амплитудно-фазовой конверсией, а также снижения уровня фазовых шумов генераторов на их основе. Приведены примеры разработки данных устройств.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся проектированием радиоэлектронной аппаратуры, может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.





УДК 621.385.6

ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ ЭМИССИИ КАТОДА В КАТОДНО-СЕТОЧНОМ УЗЛЕ С ТЕНЕВОЙ СЕТКОЙ

С. Д. Журавлев, В. И. Шестеркин

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния высоты перемычек теневой сетки на эффективную площадь эмиссии катода. Показано, что полевая экранировка поверхности катода вблизи перемычек теневой сетки существенно возрастает с увеличением ее толщины и величины зазора между сеткой и поверхностью катода. Следствием полевой экранировки является уменьшение эффективной площади эмиссии катода, величина которой может быть сопоставима с площадью перемычек теневой сетки.

КС: КСУ, сеточные структуры, теневая сетка, эффективная площадь эмиссии

THE EFFECTIVE CATHODE EMISSION AREA IN A CATHODE-GRID UNIT WITH A SHADOW GRID

S. D. Zhuravlev, V. I. Shesterkin

JSC «RPE «Almaz», Saratov

The results of experimental studies of the effect of the height of the shadow grid bridges on the cathode effective emission area are presented. It is shown that the field shielding of the cathode surface near the bridges of the shadow grid increases significantly with an increase in its thickness and the size of the gap between the grid and the cathode surface. A consequence of the field shielding is a decrease in the effective emission area of the cathode, the value of which can be comparable to the area of the bridges of the shadow grid.

Keywords: CGU, grid structures, shadow grid, effective emission area

1. ВВЕДЕНИЕ

Низковольтное управление током электронного пучка в импульсных ЛБВ и клистродах осуществляют сеточной структурой, расположенной вблизи эмитирующей поверхности катода. В ЛБВ с выходной средней мощностью более 70 Вт применяют двойные сеточные структуры с теневой сеткой, перемычки которой защищают управляющую сетку от прямого перехвата тока катода [1]. Теневая сетка имеет потенциал, равный потенциалу катода, и, вследствие этого, увеличивает разброс углов наклона траекторий электронов в пучке, уменьшает напряженность электрического поля, создаваемую потенциалом управляющей сетки вблизи поверхности катода по периметру перемычек, уменьшая плотность тока в указанной области [2, 3]. Площадь области полевой экранировки возрастает с увеличением периметра перемычек, их толщины и зазора между катодом и теневой сеткой и может быть сопоставима с площадью перемычек сетки, что необходимо учитывать на этапе проектирования катодно-сеточного узла.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния толщины перемычек теневой сетки и зазора катод – теневая сетка на эффективную площадь эмиссии катода.



2. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальный макет содержал металлопористый катод с плоской эмитирующей поверхностью диаметром 6,35 мм. Перемычкой теневой сетки служила полоса шириной 0,5 мм из молибденовой фольги толщиной $a = 0,1$ мм. Конструкция макета позволяла в ходе эксперимента осуществлять внутривакуумное перемещение катода относительно полосы и изменять величину зазора l между ними (рис. 1). На расстоянии 0,7 мм от поверхности катода, где электрическое поле не было возмущено перемычкой, размещалась диафрагма диаметром 15 мм с отверстием диаметром ~ 20 мкм. Прошедший через отверстие диафрагмы ток принимался коллектором электронов и регистрировался милливольт-микроамперметром Ф116/2.

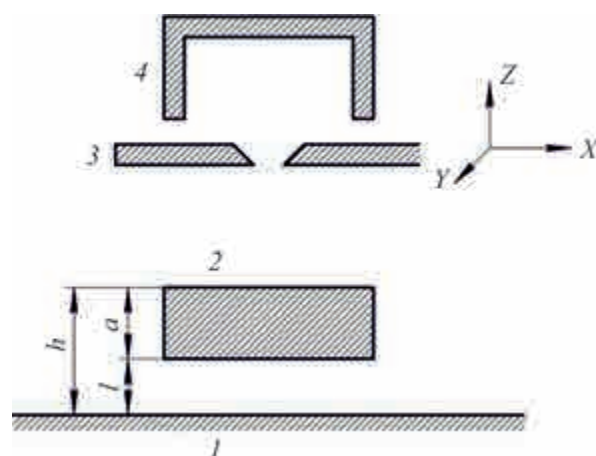


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 – катод; 2 – сечение перемычки сетки; 3 – диафрагма с малым отверстием;
4 – коллектор электронов

Диафрагма вместе с коллектором закреплялась на штоке, с помощью которого осуществлялось ее плоскопараллельное перемещение относительно поверхности катода. Перемещение штока, соединенного с вакуумной камерой через сильфон, осуществлялось шаговыми двигателями с точность 1 мкм. В процессе измерений отверстие диафрагмы перемещалось в плоскости, параллельной поверхности катода, по линии, перпендикулярной к полосе. На диафрагму подавался положительный относительно катода потенциал. Измерения проводились под непрерывной откачкой при вакууме не хуже $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В процессе перемещения диафрагмы от некоторой удаленной точки к перемычке регистрировался ток (далее плотность тока), прошедший через отверстие в диафрагме на коллектор. Его величина изменялась от некоторого постоянного значения $j = j_0$, характерного для поверхности катода вдали от перемычки, до $j = 0$ непосредственно вблизи перемычки (рис. 2).

Длина нарастания плотности тока на экспериментальной кривой (см. рис. 2) соответствует ширине зоны полевой экранировки вблизи перемычки. Увеличение полной высоты теневой сетки h за счет увеличения зазора катод – теневая сетка приводит к расширению зоны полевой

экранировки. В диапазоне изменения величины зазора $l = 0 \dots 70$ мкм она сохранялась неизменной и составляла $\sim 2h$ (см. рис. 2).

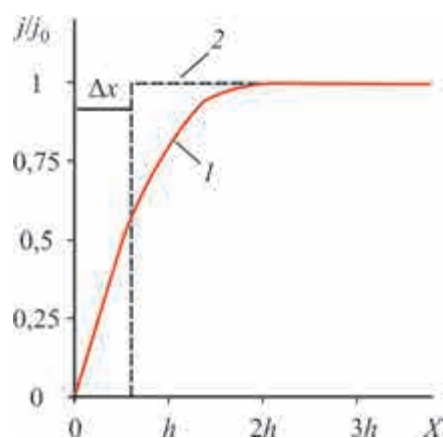


Рис. 2. Зависимость плотности тока катода от полной высоты перемычки ($h = l + a$):
1 — экспериментальная кривая; 2 — аппроксимация кривой
в зоне полевого экранировки

Привязка центра отверстия в диафрагме к краю полосы осуществлялась по координатам точек с $j = j_0/2$ на кривых распределения плотности тока с обеих сторон полосы. Результаты эксперимента находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов [4].

Для удобства проведения анализа влияния полевой экранировки на эффективную площадь эмиссии катода в катодно-сеточном узле (КСУ) мощной импульсной ЛБВ (рис. 3) кривая зависимости плотности тока катода была аппроксимирована ступенчатой функцией с плотностью тока j_0 . Зона полной полевой экранировки с плотностью тока катода $j = 0$ вдоль границы перемычки имеет ширину $\Delta x \approx h/2$, за пределами которой плотность тока катода $j = j_0$.

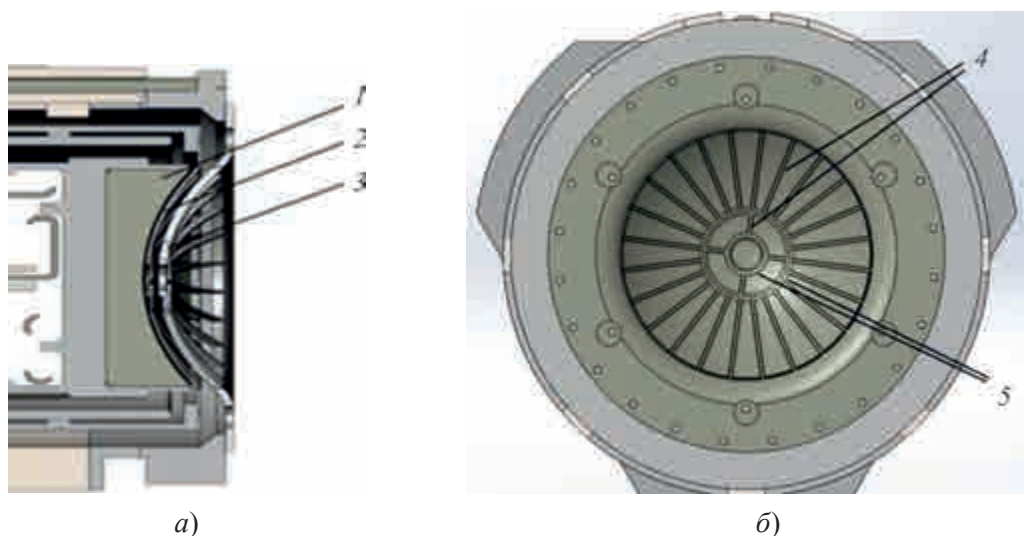


Рис. 3. Конструкции КСУ (а) и сеточной структуры (б):
1 — катод; 2 — теневая сетка; 3 — управляющая сетка; 4 — радиальные перемычки;
5 — кольцевые перемычки

В рассматриваемом КСУ цилиндрический диаметр катода $D_k = 10$ мм, а радиус кривизны эмитирующей поверхности $R_{кр} = 8,2$ мм. Сеточные структуры (теневая и управляющая сетки) имели 24 радиальные перемычки шириной 0,13 мм на периферии сетки, две кольцевые перемычки шириной 0,3 мм с наружными диаметрами 3,8 и 1,72 мм соответственно и 4 перемычками между ними. Расчеты эффективной площади эмиссии $S_{эфф}$ были проведены для различных значений высоты h , включающей толщину теневой сетки и расстояние от ее нижней плоскости до эмитирующей поверхности катода. Высота $h = 0,2$ мм соответствовала размерам, заложенным в чертежи на изготовление КСУ с теневой сеткой толщиной 0,1 мм и зазором катод – сетка 0,1 мм. Эффективная площадь эмиссии катода $S_{эфф}$ и площадь зоны полевой экранировки S_z определялись из соотношений:

$$S_{эфф} = S_k - S_{т.с} - S_z, \quad (1)$$

$$S_z = h/2 \cdot L, \quad (2)$$

где S_k – площадь эмитирующей поверхности катода; $S_{т.с}$ – площадь перемычек теневой сетки; S_z – площадь зоны полной полевой экранировки по периметру перемычек; L – периметр перемычек теневой сетки.

Эффективная плотность тока, соответствующая рабочему току в приборе I_k , определяется соотношением:

$$J_{эфф} = I_k / S_{эфф}. \quad (3)$$

Так, для рассматриваемой конструкции КСУ площади эмитирующей поверхности катода и перемычек теневой сетки составляли $\sim 87,5$ мм² и $\sim 31,0$ мм² (~ 35 % от площади катода) соответственно. При рабочем токе КСУ $I_k = 4$ А плотность тока, отнесенная ко всей поверхности катода S_k , составляла 4,6 А/см². Уменьшение эмитирующей поверхности катода за счет площади перемычек теневой сетки потребует при том же токе увеличение плотности тока до 7,1 А/см² за счет увеличения потенциала на управляющей сетке. Для $h = 0,2$ мм площадь зоны полевой экранировки составила 39 мм² (~ 45 % от площади катода), что превышает площадь перемычек теневой сетки. Эффективная площадь эмиссии катода при этом составила $\sim 17,5$ мм² (~ 20 % от площади катода). Для получения рабочего тока 4 А потребуются увеличение плотности тока катода до ~ 23 А/см².

На рис. 4 представлены зависимости относительных значений площади полевой экранировки катода и эффективной площади эмиссии, а также эффективной плотности тока катода от полной высоты теневой сетки h .

Эффективная плотность тока катода резко возрастает при $h > 0,15$ мм за счет смыкания областей экранировки между радиальными перемычками в месте их перехода в кольцевую перемычку.

Из приведенных результатов следует, что при проектировании КСУ с теневыми сетками следует стремиться к уменьшению их толщины, которая ограничена их формоустойчивостью при прошивке и термических нагрузках в рабочем режиме катода. Необходимо размещать теневую сетку непосредственно на поверхности катода, что неприемлемо для таких материалов, как гафний, который интенсивно рекристаллизуется при контакте с горячей поверхностью катода и разрушается. Одним из перспективных вариантов является конструкция КСУ с сеточными структурами из пиролитического графита, позволяющая размещать теневую сетку непосредственно на эмитирующей поверхности импрегнированного катода. Для снижения полевой

экранировки катода перемычками теневой сетки большой толщины (0,2...0,5 мм) их следует размещать в пазах в теле катода таким образом, чтобы экранирующее действие было минимальным и обеспечивало защиту перемычек теневой сетки от перехвата тока катода.

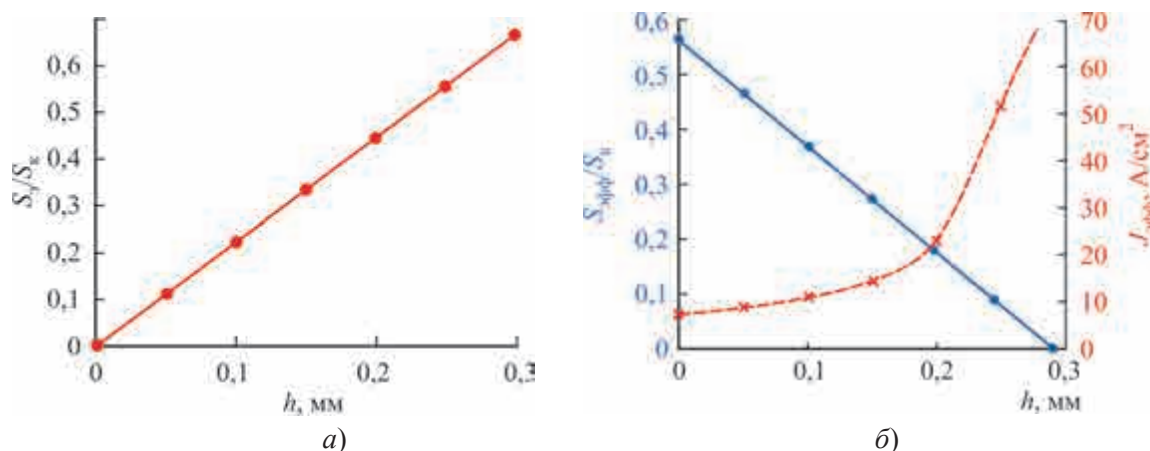


Рис. 4. Зависимости площади экранировки катода S_s (а), эффективной площади катода $S_{\text{эфф}}$ (сплошная линия) и эффективной плотности тока катода $J_{\text{эфф}}$ (пунктирная линия) (б) от высоты перемычки h

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов экспериментальных исследований установлено, что область полевой экранировки эмитирующей поверхности катода перемычками теневой сетки может превышать площадь самих перемычек и составлять до половины площади эмитирующей поверхности катода. Уменьшить область полевой экранировки поверхности катода применением теневой сетки из гафния с минимально возможной толщиной, размещенной непосредственно на поверхности катода, не представляется возможным, вследствие ее рекристаллизации при контакте с поверхностью катода и последующего разрушения. Одним из перспективных вариантов является конструкция КСУ с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита, размещенной вблизи эмитирующей поверхности катода или находящейся в пазах в теле катода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Ю. А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1987. – Вып. 7 (1264). – С. 71.
2. Семенов, С. О. Анализ возмущений, вносимых в электронный пучок управляющими сетками с радиальными и кольцевыми перемычками // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов. 2008. – С. 68 – 73.
3. Петросян, А. И. Исследование характеристик высокоперевансных электронно-оптических систем / А. И. Петросян, В. И. Роговин, С. О. Семенов // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 54 – 59.
4. Петросян, А. И. Численное исследование процесса формирования электронного пучка в ячейках катодно-сеточного узла ЛБВ с токоперехватывающей или теневой сеткой / А. И. Петросян // Матер. науч.-техн. конф. «Электронные приборы и устройства СВЧ». – Изд-во Сарат. Ун-та, 2002. – С. 3 – 13.

Статья поступила 13 августа 2020 г.



УДК 621.385.6

**400-ВАТТНЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КЛИСТРОН
Ku-ДИАПАЗОНА С ТЕНЕВОЙ СЕТКОЙ
ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА**

**С. Д. Журавлев, Д. И. Кириченко,
М. А. Манжосин, П. Д. Шалаев, В. И. Шестеркин**

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Приведены результаты экспериментальных исследований по применению анизотропного пиролитического графита в качестве материала теневой сетки в многолучевом клистроне Ku-диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт. В ходе испытаний прибора отсутствовал термоэмиссионный ток на управляющей сетке, что свидетельствовало о низких значениях термоэмиссионного тока с теневой сетки из анизотропного пиролитического графита, которая расположена вблизи поверхности металлопористого катода, работающего при температуре ~1200 °С и более. Показано, что прибор с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита успешно прошел испытания при скважности 3 без появления паразитной термоэлектронной эмиссии с теневой сетки и разрушения сеток, которое наблюдалось в клистроне с сетками из гафния.

КС: многолучевой клистрон, сеточные структуры, теневая сетка, анизотропный пиролитический графит

**400 W MULTIPLE-BEAM Ku-BAND PULSED KLYSTRON
WITH A SHADOW GRID
OF ANISOTROPIC PYROLYTIC GRAPHITE**

**S. D. Zhuravlev, D. I. Kirichenko,
M. A. Manzhosin, P. D. Shalaev, V. I. Shesterkin**

JSC «RPE «Almaz», Saratov

The results of experimental researches on application of anisotropic pyrolytic graphite as a material of a shadow grid in Ku-band multiple-beam klystron with an output pulsed power up to 400 W are given. During the tests of the device there was no thermal emission current on the control grid, indicating low values of thermal emission current from the shadow grid of anisotropic pyrolytic graphite, located near the surface of the dispenser cathode operating at temperatures ~1200 °C and above. It is shown that the device with a shadow grid of anisotropic pyrolytic graphite was successfully tested with the porosity of 3 without the appearance of spurious thermionic emission from the shadow grid and the destruction of the grids that were observed in the klystron with grids of hafnium.

Keywords: multiple-beam klystron, grid structures, shadow grid, anisotropic pyrolytic graphite

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационная надежность и долговечность мощных импульсных приборов микроволнового диапазона, таких, как ЛБВ и клистроны, во многом определяются устойчивостью сеточных электродов катодно-сеточных узлов (КСУ) электронной пушки к тепловым нагрузкам и способностью в течение заданного срока безотказной работы сохранять низкие значения термической эмиссии в условиях интенсивного испарения активного вещества металлопористого



катода [1, 2]. Скорость испарения активного вещества (Ва и ВаО) металлопористого катода, а следовательно, и скорость его адсорбции на близлежащие электроды существенно возрастает с ростом температуры катода. В этой связи долговечность и надежность импульсных приборов с высокой плотностью тока катода (десятки ампер на квадратный сантиметр) при рабочей температуре катода более 1100 °С определяются свойствами материалов сеточных структур КСУ. Снижение тока управляющей сетки и предотвращение рекристаллизации её материала при высокой температуре позволяет увеличить процент выхода годных приборов при их производстве и надёжность при эксплуатации.

Проведены экспериментальные исследования возможности повышения процента выхода годных приборов при промышленном производстве миниатюрного многолучевого клистрона *Ku*-диапазона с выходной импульсной мощностью не менее 400 Вт. Основную долю брака приборов этого типа составили приборы, отказавшие при переходе из режима работы с импульсами длительностью 1,0...2,5 мкс и скважностью 10 в режим работы со скважностью 3 и той же длительностью импульсов. Отказы происходили по причине разрушения (как правило, теневой или обеих) сеток КСУ.

При анализе причин отказов было установлено, что теневая сетка КСУ, изготовленная из гафния (работа выхода электронов – 3,5 эВ), работает в парах продуктов испарения активного вещества (Ва, ВаО) с поверхности металлопористого катода при температуре, близкой к температуре катода, и не обладает достаточными антиэмиссионными свойствами. Ток термоэлектронной эмиссии с теневой на управляющую сетку составляет для разных приборов от 15 до 30 мА. Выделившаяся на управляющую сетку дополнительная мощность электронного потока приводит к повышению температуры управляющей сетки, повышению скорости газоотделения с сетки и, при критически низкой скважности (высокой средней мощности, выделяющейся на управляющей сетке), к электрическому пробое между сетками и их разрушению. Кроме того, при высокой температуре происходит рекристаллизация гафния, что также способствует разрушению сеток.

Для устранения причин отказа приборов возникла необходимость поиска материала теневой сетки, работающей при более высокой температуре по сравнению с управляющей, обладающего лучшими антиэмиссионными свойствами, чем гафний.

Одним из таких материалов является анизотропный пиролитический графит (АПГ), способный рассеивать мощность электронного потока до 20 раз больше, чем молибден, и до 9 раз больше, чем гафний, и сохранять высокие антиэмиссионные свойства при конденсации на его поверхность продуктов испарения металлопористого катода [3].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИСТРОНА С СЕТКАМИ ИЗ ГАФНИЯ

Сравнение эксплуатационных характеристик сеточных структур из гафния и АПГ было проведено в 19-лучевом миниатюрном клистроне *Ku*-диапазона с выходной импульсной мощностью не менее 400 Вт в диапазоне скважностей от 20 до 3 при длительностях импульса 1,0...2,5 мкс. Схема электронной пушки приведена на рис. 1.

Каждый из девятнадцати парциальных электронных пучков формируется мини-пушкой с импрегнированным осмированным катодом в форме цилиндра высотой 0,5 мм и плоской эмитирующей поверхностью диаметром 0,42 мм. Мини-катоды были получены в керне из про-



питанной активным веществом вольфрамовой губки диаметром 3,1 мм электроискровым фрезерованием. На поверхности керна располагался фокусирующий электрод с 19-ю отверстиями диаметрами 0,5 мм, создающий в каждой мини-пушке электрическое поле, фокусирующее парциальные электронные пучки. Эмитирующая поверхность каждого мини-катода была заглублена на 20...30 мкм относительно обращенной к управляющей сетке плоскости фокусирующего электрода. В конструкции макрорешетки фокусирующий сеточный электрод с 19-ю отверстиями выполнял также роль теневой сетки, защищающей перемычки управляющей сетки от прямого перехвата тока с мини-катодов. Управляющая сетка размещалась на расстоянии 0,3 мм от теневой сетки. На расстоянии 0,5 мм от управляющей сетки размещался сетчатый анод с размещенными соосно 19-ю отверстиями диаметром 0,5 мм.

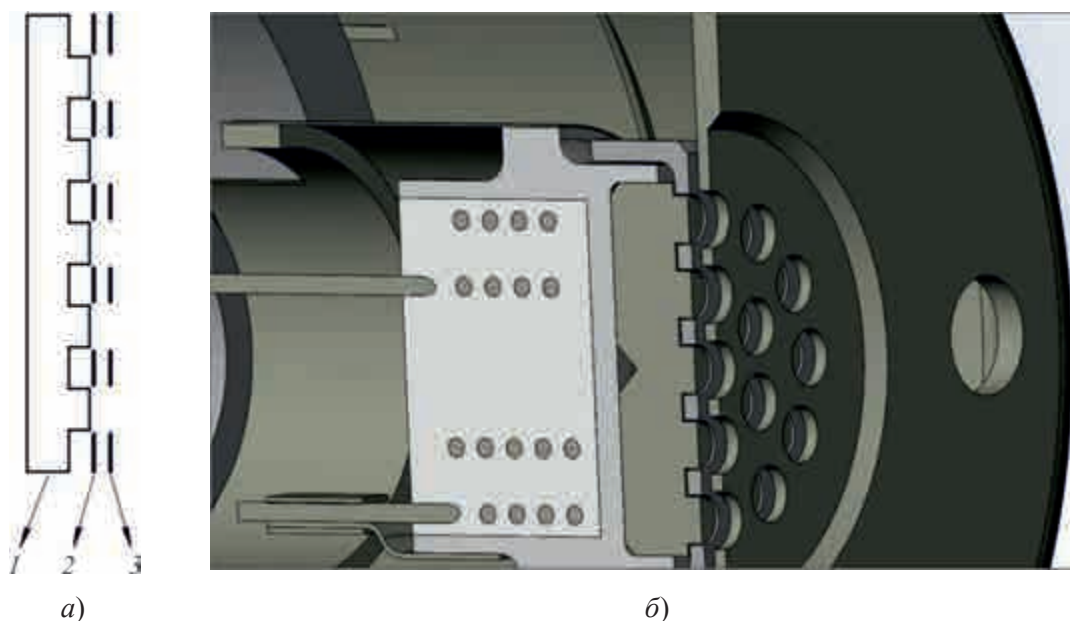


Рис. 1. Схема размещения электродов (а) и общий вид конструкции электронной пушки (б):
1 – металлопористый 19-лучевой катод; 2 – теневая сетка (фокусирующий электрод);
3 – управляющая сетка

При напряжении анода 3000 В, скважностях от 100 до 10 и паспортном значении напряжения подогревателя катода рабочий ток прибора (800 мА) и ток каждого парциального катода (42 мА с плотностью тока ~ 30 А/см²) достигались при напряжении превышения управляющей сетки +120 В относительно катода. Для определения температуры катода и теневой сетки исследуемая пушка помещалась в стеклянную колбу, обрабатывалась на откачном посту, после чего при помощи пирометра Keller PV-11 производился замер. Паспортному напряжению катода соответствовала яркостная температура катода 1200 °С при пирометрировании катода в электронной пушке в процессе изготовления многолучевого клистрона. Яркостная температура теневой сетки из гафния составляла ~ 1100 °С, а ток термической эмиссии с теневой сетки для разных приборов находился в пределах 15...30 мА. Устойчивая работа клистрона при токе катода 800 мА регистрировалась при скважностях не менее 10. Катод клистрона работал в режиме ограничения тока, поэтому при уменьшении скважности до 3-х ток катода падал до 500 мА. Снижение тока катода может быть связано с охлаждением катода за счёт эмиссии электронов



с поверхности катода при увеличении средней плотности тока катода. Однако при этом ток управляющей сетки возрастал без изменения электрических напряжений на электродах клистрона. Причиной этого могло быть изменение положения сетки относительно катода в результате повышения её температуры. Далее возникали пробой между управляющей и теневой сетками, которые приводили к разрушению перемычек теневой сетки, управляющей сетки или обеих сеток.

В режиме работы со скважностью 3 отказы регистрировались в течение 1...3 мин после включения клистрона.

При анализе причин отказа клистронов обнаруживались либо следы электрического пробоя, оплавления и разрушения сеточных электродов в местах действия пробоя, либо разрушение сеток по причине рекристаллизации гафния, либо и то и другое.

Перед началом испытаний прибора с сетками из анизотропного пиролитического графита были проведены испытания прибора с сетками из гафния. Время наработки этого прибора при скважности 100, 20, 10 составило 60 мин (по 20 мин в каждом режиме), при скважности 3 – около 17 с. С первых секунд работы клистрона со скважностью 3 возникла нестабильность тока катода, который изменялся в пределах от 450 до 680 мА. После примерно 17 с работы со скважностью 3 произошло аварийное отключение клистрона с потерей его работоспособности. При анализе причины потери работоспособности клистрона обнаружено разрушение сеток КСУ (рис. 2).

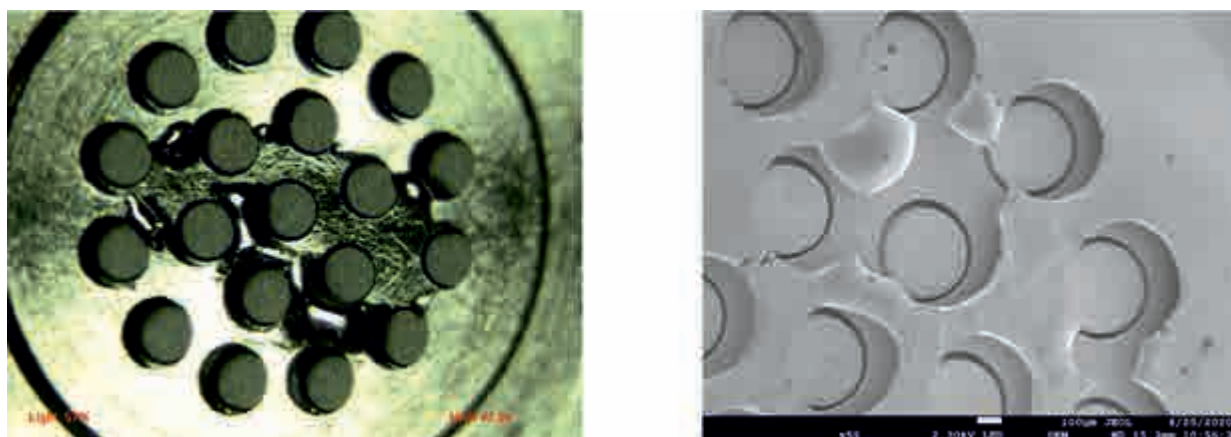


Рис. 2. Фотографии КСУ с теневой и управляющей сетками из Нf после пробоев

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ КЛИСТРОНА С ТЕНЕВОЙ СЕТКОЙ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА

В КСУ электронной пушки исследованного образца клистрона теневая сетка из гафния была заменена на сетку из АПГ с сохранением параметров конструкции КСУ (рис. 3).

Работу клистрона исследовали при яркостных температурах катода 1200 и 1250 °С в импульсных режимах с длительностями импульсов 1,0...2,5 мкс и скважностями от 100 до 3. Главным достоинством теневой сетки из АПГ являлось отсутствие термической эмиссии с её поверхности даже в режиме малых скважностей. Ток управляющей сетки равнялся нулю при всех режимах работы клистрона, сопоставимых с режимами работы клистрона с сетками из гафния.



Рис. 3. КСУ с теневой сеткой из АПГ

Время наработки клистрона: при испытании со скважностью 100, 20, 10 – 60 мин, по 20 мин в каждом режиме, а со скважностью 3 – 30 мин при напряжении накала катода, соответствующем яркостной температуре 1200 °С, и 7 мин при напряжении накала катода, соответствующем 1250 °С (ярк.).

Исследования были завершены после снижения тока катода во всех режимах на 25 % по сравнению с током в начале испытаний в результате выработки ресурса катода.

После проведенных испытаний прибор был вскрыт, при визуальном осмотре установлено, что целостность и геометрия сеток не нарушены (рис. 4).

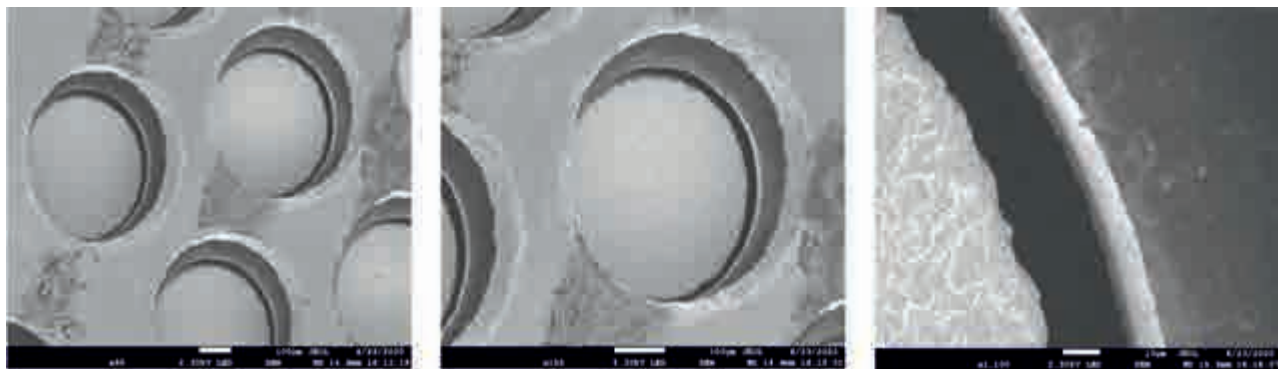


Рис. 4. Фотографии КСУ с теневой сеткой из АПГ
после вскрытия прибора

Это свидетельствует о том, что сетки из АПГ обладают необходимыми антиэмиссионными свойствами и при длительной тепловой нагрузке в режимах работы при низких скважностях (включая скважность 3) не подвержены рекристаллизации, деформациям и пробоям.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение теневой сетки из АРГ в малогабаритных импульсных клистронах позволяет повысить выход годных приборов при их производстве и обеспечить их эксплуатационную надежность за счёт устранения отказов, характерных для приборов с теневыми сетками из гафния, в режиме работы со скважностью менее 10.



ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Ю. А. / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 7. – 71 с.
2. Бабанов, А. Ж. / А. Ж. Бабанов, В. И. Козлов, В. Е. Авдеев, А. А. Андреев // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1980. – Вып. 8. – С. 14 – 17.
3. Журавлев, С. Д. Токонерхватывающие сетки из анизотропного пиролиитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом / С. Д. Журавлев, В. И. Шестеркин // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, вып. 9. – С. 1464 – 1468.

Статья поступила 20 августа 2020 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ЗИНОВЬЕВ Д. В. **Основы проектирования в КОМПАС-3D v17**. 2-е изд. / под ред. М. И. Азарова. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 232 с.: ил.

Книга «Основы проектирования в КОМПАС-3D v17» рассчитана на начинающих пользователей. В ней представлены уроки по основам проектирования в этой программе. Однако опытным пользователям она также пригодится – поможет систематизировать ранее полученные знания и навыки и узнать неочевидные приемы проектирования.

Книга поможет вам:

- быстро «войти» в КОМПАС-3D;
- правильно проектировать в КОМПАС-3D;
- систематизировать свои знания о КОМПАС-3D.

ГРИБАНОВ А. Н., КУЗНЕЦОВ И. А., КУРУШИН А. А. **Асимптотические методы электродинамики**. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 336 с.

Методы геометрической и физической оптики, а также равномерной теории дифракции позволяют расширить возможности тестовой электродинамической системы ANSYS HFSS при моделировании антенных систем, размеры которых составляют десятки и сотни длин волн. Несколько программ было добавлено в систему ANSYS, в том числе программы Savant, EMIT и др. Предлагаемое учебное пособие предназначено для начальных шагов освоения программы студентами и специалистами СВЧ. Может служить хорошим дополнением к уже опубликованным книгам, посвященным САПР СВЧ.

УДК 621.385.623

ВЫВОД ЭНЕРГИИ БАНОЧНОГО ТИПА СВЕРХМОЩНОГО КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА

А. В. Галдецкий, А. Н. Савин, Н. А. Ключников

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

Предложена и оптимизирована модификация конструкции вакуумно-плотного баночного окна, в которой электрическое поле на поверхности керамического диска формируется модами TE_{11} и TM_{11} круглого волновода, предназначенная для применения в сверхмощных клистронах S-диапазона. Приведены результаты теоретического исследования, показывающие, что минимизация тангенциальных компонент напряжённости электрического поля в центральных областях поверхностей керамического диска и соответственно диэлектрических потерь в нём в сочетании с применением эффективных согласующих элементов позволяют значительно увеличить передаваемую мощность и расширить рабочую полосу частот баночного окна по сравнению с известными аналогами.

КС: сверхмощные клистроны S-диапазона, вакуумно-плотные баночные окна, смешанная мода, диэлектрические потери

PILLBOX-TYPE ENERGY OUTPUT OF SUPERPOWER S-BAND KLYSTRON

A. V. Galdetsky, A. N. Savin, N. A. Klyuchnikov

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

A modification of the design of a vacuum-tight pillbox window is proposed and optimized, in which the electric field on the surface of a ceramic disk is formed by TE_{11} and TM_{11} modes of a circular waveguide. It is intended for use in superpower S-band klystrons. The results of theoretical studies are presented which show that minimization of tangential components of the electric field strength in the central parts of the surfaces of the ceramic disk and, accordingly, dielectric loss in it, in combination with the use of effective matching elements can significantly increase the transmitted power and expand the operating frequency band of the pillbox window as compared to the known analogs.

Keywords: superpower S-band klystrons, vacuum-tight pillbox windows, mixed mode, dielectric loss

1. ВВЕДЕНИЕ

Выводы энергии импульсных сверхмощных клистронов (СМК), используемых в системах накачки линейных ускорителей частиц [1], содержат вакуумно-плотные керамические окна, отделяющие область с высоким вакуумом внутри клистрона от нагрузки [2]. Основными характеристиками таких выводов энергии являются рабочий диапазон частот, а также связанные с передачей больших уровней мощности электрическая и механическая прочности, термостойкость [3].

Одним из типов выводов энергии электровакуумных приборов СВЧ является вакуумно-плотное окно баночного типа, представляющее собой отрезок круглого волновода с поперечной



керамической перегородкой и стандартными прямоугольными волноводами, подсоединенными соосно к его торцам (рис. 1) [1–3].

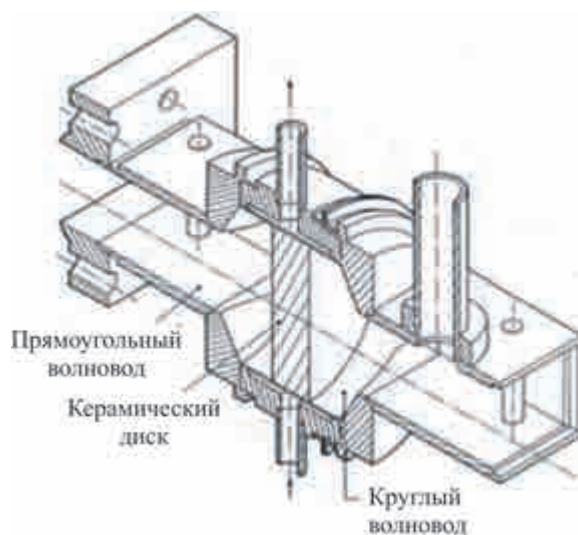


Рис. 1. Баночный вывод энергии клистрона TH2129 компании «THOMSON» [2]

Данная работа посвящена разработке конструкции баночного окна СМК S-диапазона, имеющего рабочую полосу частот не менее 1 %, мощность СВЧ-сигнала на выходе 20 МВт в импульсах длительностью 4...5 мкс, размеры поперечного сечения выходного волновода 90×45 мм.

2. КОНСТРУКЦИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНОГО БАНОЧНОГО ОКНА СМК

Прямоугольные волноводы в баночном выводе энергии (см. рис. 1) работают обычно на самом своем низкочастотном типе волны TE_{10} , имеющем плоскость симметрии YOZ в виде магнитной стенки, поэтому в соединённом с ними отрезке круглого волновода могут возбуждаться только волны с таким же типом симметрии. Наиболее часто в баночных выводах энергии мощных приборов СВЧ используют волны типов TE_{11} , TM_{11} круглого волновода или их комбинацию, удовлетворяющие указанному выше условию [1–3].

Традиционные баночные выводы энергии с рабочим типом волны TE_{11} в круглом волноводе позволяют обеспечить в широкой полосе частот пропускание значительных уровней импульсных и средних СВЧ-мощностей, т. к. сильный нагрев керамического диска за счёт диэлектрических потерь происходит в большой области его поверхности, что дает возможность эффективно отводить тепло на стенки круглого волновода. При этом длина всего отрезка круглого волновода (в основном определяющая продольные габаритные размеры баночного вывода) составляет примерно половину длины волны типа TE_{11} в нём.

Однако традиционные конструкции имеют ряд недостатков. Как показано в [4, 5], при обеспечении максимальной беспаразитной рабочей полосы частот диаметр керамического диска (при использовании керамик с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9 \dots 10$)



получается, как правило, меньше диагонали поперечного сечения прямоугольного волновода, используемого в мощных приборах СВЧ. Такая ситуация наблюдается, например, в баночном выводе энергии клистрона ТН2129 компании «THOMSON» (см. рис. 1), имеющего размеры поперечного сечения выходного прямоугольного волновода 72×34 мм [2].

Кроме того, в таких баночных окнах достаточно велика тангенциальная составляющая электрического поля на поверхности керамического диска в области его спая с круглым волноводом, что является нежелательным с точки зрения электрической прочности.

В работе [6] для решения указанных проблем предложено использовать для передачи СВЧ-энергии в баночном выводе комбинацию из двух распространяющихся типов волн полого круглого волновода, TE_{11} и TM_{11} , что при подобранных определённым образом размерах вывода приводит к значительному снижению (вплоть до 0 В/м) тангенциальной составляющей электрического поля на краю керамического диска (в области спая) и соответственно к значительному увеличению максимальной передаваемой мощности. Данная идея подтверждена приведёнными в [1] результатами испытаний такого баночного вывода энергии, функционирующего на частоте 11,42 ГГц. Однако размеры баночного вывода данного типа в требуемом S -диапазоне частот будут слишком большими ($\sim 2\lambda$).

В [7] на основе рассмотренного выше принципа предложена компактная конструкция баночного вывода энергии СВЧ с рабочей частотой 5,712 ГГц, использующего комбинацию из распространяющейся TE_{11} и затухающей TM_{11} волн в полом круглом волновод, что позволило исключить дополнительные круглые секции и практически вдвое уменьшить диаметр круглого волновода и керамического диска. При этом расстояния от керамического диска до прямоугольных волноводов близки к половине длины волны TE_{11} круглого волновода, а не равны приблизительно целой длине волны, как в [6]. Толщина и радиус керамического диска должны быть такими, чтобы резонансная частота круглого волновода с этим диском для волны TM_{11} была на 1,5...2 % выше рабочей частоты СВЧ-прибора. В этом случае амплитуды двух типов волн становятся близкими на краю диска, а фазы противоположными.

Как показано в [7], величина тангенциальной компоненты напряжённости электрического поля на краю поверхности керамического диска (в области спая) оказалась в 15 раз меньше, чем в его центре, что должно повысить электрическую прочность по сравнению с традиционными баночными выводами энергии СВЧ, работающими на волне TE_{11} . Однако при этом в 1,5...2 раза увеличилась величина тангенциальной компоненты напряжённости электрического поля в центре поверхности керамического диска и соответственно потери в диэлектрическом диске по сравнению с традиционными баночными выводами энергии СВЧ, работающими на волне TE_{11} .

Спроектированный по приведённым в [7] соотношениям баночный вывод энергии СМК для функционирования в S -диапазоне имеет размеры поперечного сечения входного/выходного прямоугольных волноводов не более 82×41 мм и полосу рабочих частот ≤ 1 % при КСВН $\leq 1,1$.

Однако, как указано выше, разрабатываемая конструкция вакуумно-плотного баночного окна СМК должна иметь размеры поперечного сечения входного/выходного прямоугольных волноводов 90×45 мм. Для решения этой задачи было предложено модифицировать представленную в [7] конструкцию баночного вывода энергии СВЧ, использующего комбинацию из распространяющейся TE_{11} и затухающей TM_{11} волн в полом круглом волновод.

При этом необходимо было уменьшить тангенциальные компоненты электрического поля



не только в области спая на краю поверхности керамического диска, но и в её центре для минимизации диэлектрических потерь. Также требовалось расширить рабочую полосу частот за счёт применения дополнительных согласующих элементов на входе и выходе баночного окна, в качестве которых было предложено использовать конусообразные выемки в сочетании с индуктивными диафрагмами (рис. 2).

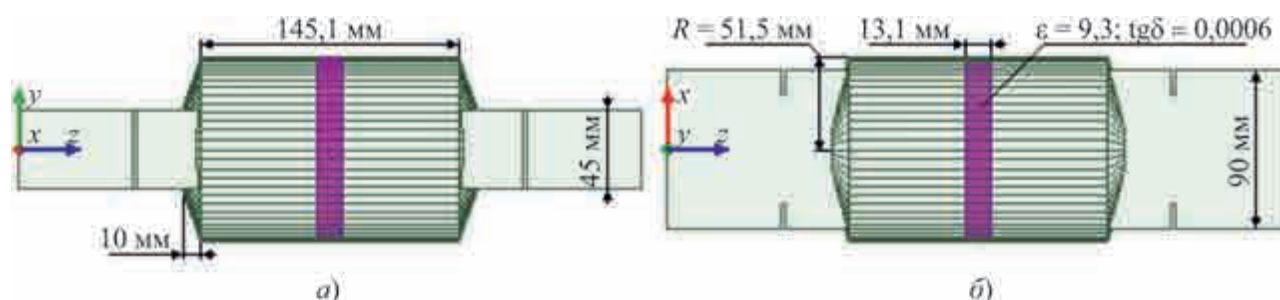


Рис. 2. Баночное окно (вакуумная часть)
с конусообразными выемками и индуктивными диафрагмами:
а – вид сбоку; б – сверху

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАНОЧНОГО ОКНА ВЫВОДА ЭНЕРГИИ СМК

Расчёт и оптимизация распределения электромагнитных полей (при входной мощности $P_{\text{вх}} = 20$ МВт) и параметров матрицы рассеяния баночного окна вывода энергии СМК осуществлялись в широкой полосе частот ($\Delta f = 350$ МГц с центром на рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц) методом конечных элементов в программе ANSYS HFSS.

Рассчитанные частотные зависимости КСВН входа и комплексного входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ оптимизированного баночного окна приведены на рис. 3. Маркер $m1$ указывает на рабочую частоту. Маркеры $m2$ и $m3$ определяют 1%-ную полосу частот симметрично относительно рабочей частоты. Маркеры $m4$ и $m5$ – полосу частот по уровню КСВН $\leq 1,1$.

Как видно из рис. 3, а, б, КСВН входа оптимизированного баночного окна на рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц и на границах рабочей полосы частот (1 %) имеет величину менее 1,01. Полоса частот по уровню КСВН $\leq 1,1$ составляет 3 %.

Пик КСВН на частоте 2968,2 МГц (маркер $m6$ на рис. 3, а) соответствует критической частоте волны типа TM_{11} круглого волновода с керамическим диском. Располагается он на 3,9 % выше рабочей частоты $f_0 = 2856$ МГц, что не является критичным для сверхмощных клистронов, имеющих, как правило, полосу усиливаемых частот ≤ 1 %.

Входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ в центральной 1%-ной частотной области (см. рис. 3, в, г) является практически действительной величиной, близкой к характеристическому сопротивлению Z_0 входного волноводного порта. Это обеспечивает согласованный режим передачи энергии через баночный вывод в рабочей полосе частот (см. рис. 3, б).

Таким образом, предлагаемая оптимизированная конструкция баночного окна вывода энергии СМК обеспечивает минимальные уровни отражённого сигнала в рабочей полосе частот и, следовательно, хорошие условия для передачи больших уровней мощности.



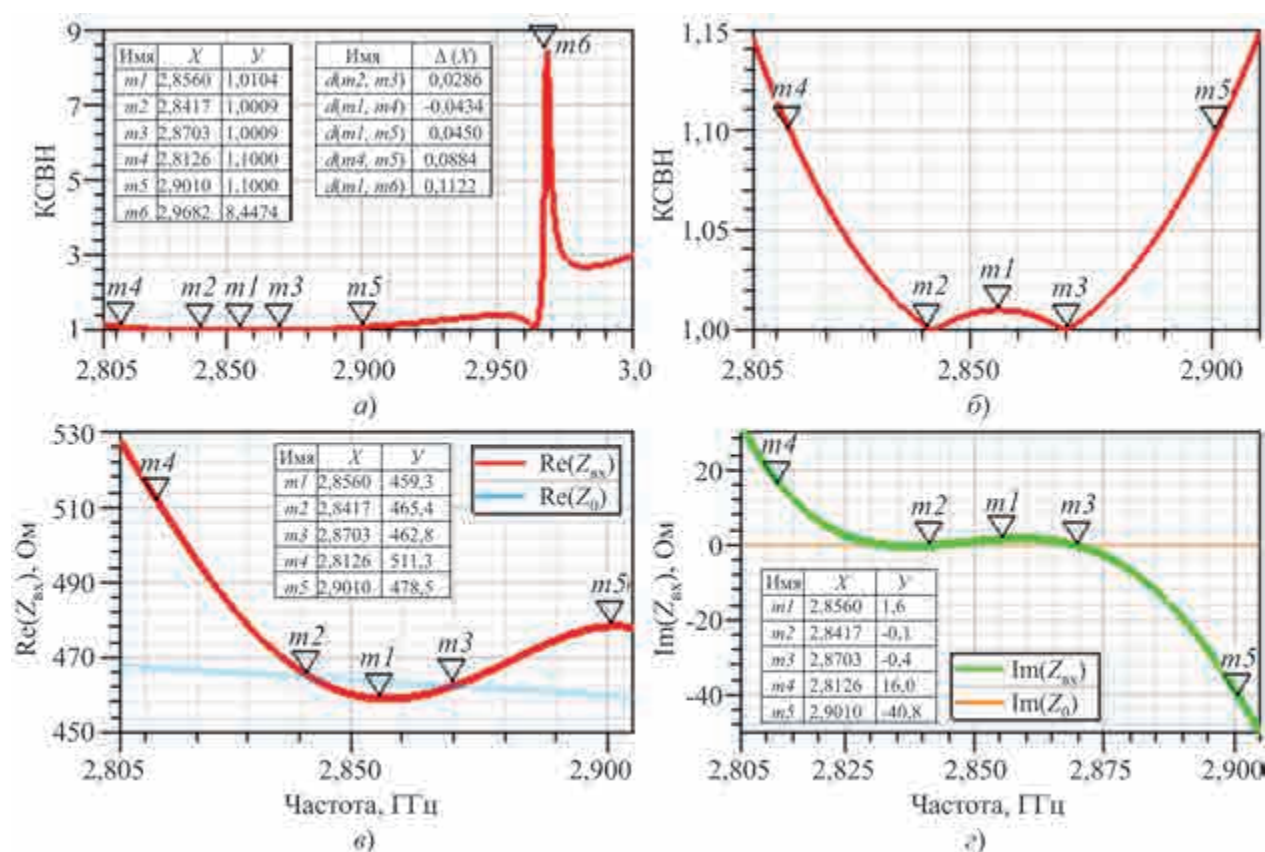


Рис. 3. КСВН входа в широкой (а) и узкой (рабочей) (б) полосах частот и входное сопротивление $Z_{вх}$ (в, г) оптимизированного баночного окна вывода энергии СМК

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПОТЕРЬ В БАНОЧНОМ ОКНЕ ВЫВОДА ЭНЕРГИИ СМК НА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ

Изучение принципа функционирования баночного окна вывода энергии СМК и выявление критических областей с точки зрения возникновения высокочастотных пробоев, приводящих к разрушению керамической перегородки, осуществлялось путём исследования распределения электромагнитных полей и потерь на рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности $P_{вх} = 20$ МВт.

Картина распределения мгновенных значений амплитуды напряжённости электрического поля в оптимизированном баночном окне приведена на рис. 4. Фаза колебаний подобрана таким образом, чтобы на керамическом диске было максимальное значение электрического поля.

На рис. 5 приведены распределения модулей комплексной амплитуды напряжённостей электрического и магнитного полей на оси OZ (по центру) оптимизированного баночного окна. Маркеры $m1, m3$ соответствуют краям керамического диска на оси OZ , а маркер $m2$ – его центру. Маркеры $m4, m5$ соответствуют центрам поперечных плоскостей соединения входного/выходного прямоугольных волноводов с круглым.

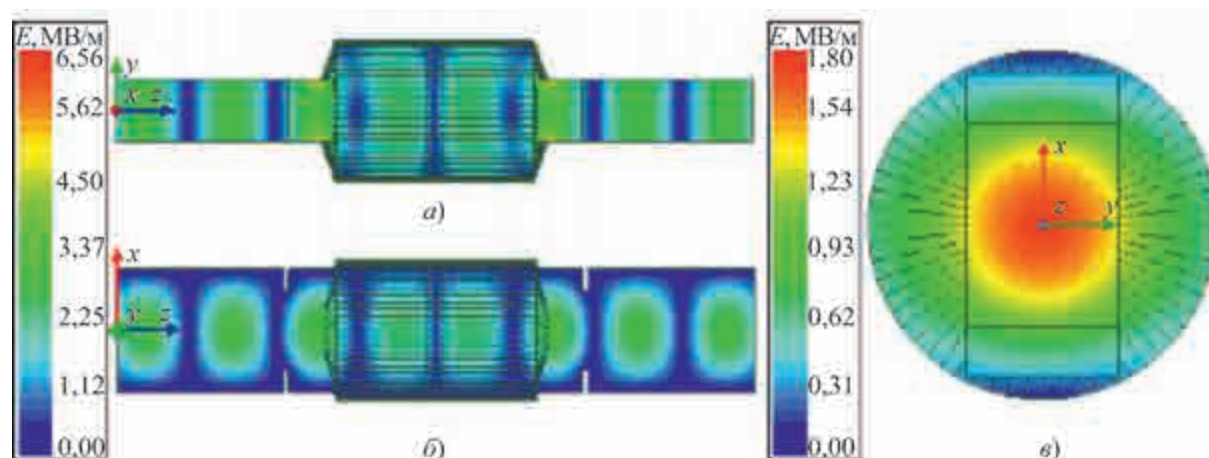


Рис. 4. Распределение амплитуды напряжённости электрического поля в баночном окне на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности 20 МВт: а – в плоскости YOZ (E -плоскости баночного окна); б – в плоскости XOZ (H -плоскости баночного окна); в – на поверхности керамического диска

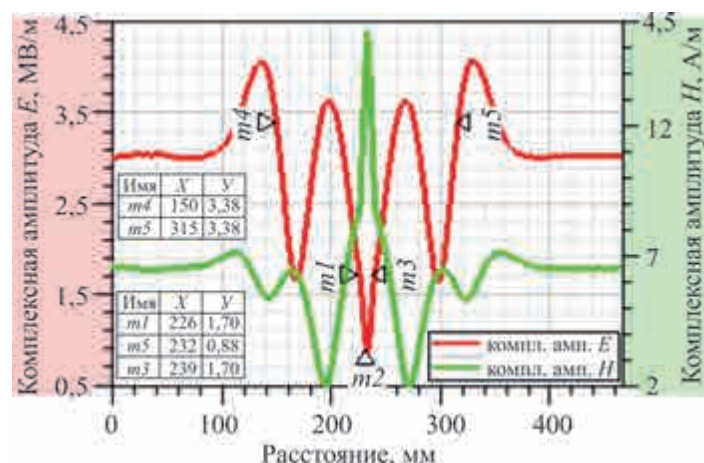


Рис. 5. Распределение модулей комплексных амплитуд напряжённостей электрического и магнитного полей на оси OZ баночного окна на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности 20 МВт

Как видно из рис. 4 и 5, электрическое поле с максимальной амплитудой располагается в области конусообразных выемок (маркеры $m4, m5$ на рис. 5), являющихся эффективными трансформаторами волны типа TE_{10} прямоугольного волновода в рабочие типы волн круглого волновода. Однако величина напряжённости электрического поля не превышает 6,8 МВ/м (6,4 МВ/м в исходном окне [7]), что значительно меньше критического значения (12 МВ/м). При этом керамический диск находится в минимуме электрического поля (маркеры $m1, m2, m3$ на рис. 5).

Распределение модуля комплексной амплитуды напряжённости электрического поля на поверхности керамического диска (см. рис. 4, в) и диэлектрических потерь в нём (рис. 6, а) показывает, что это поле сформировано волнами двух типов: распространяющейся TE_{11} и затухающей TM_{11} в круглом полом волноводе [6, 7]. Параметры керамического диска и раз-

меры баночного окна подобраны таким образом, чтобы тангенциальные компоненты напряжённости электрического поля на краях поверхностей керамического диска (в области спаев) уменьшились до безопасного значения 0,64 МВ/м (0,21 МВ/м в исходном окне [7]), т. е. в 1,5...2 раза по сравнению с традиционными баночными выводами энергии СВЧ, работающими на волне TE_{11} . При этом в центре поверхностей керамического диска тангенциальные компоненты напряжённости электрического поля практически не изменились и не превышают 1,74 МВ/м (3 МВ/м в исходном окне из [7]), а резонансная частота волны типа TM_{11} круглого волновода с керамическим диском располагается на 3,9 % выше рабочей частоты $f_0 = 2856$ МГц, что не является критичным по сравнению с 1,5...2 % в исходном окне [7].

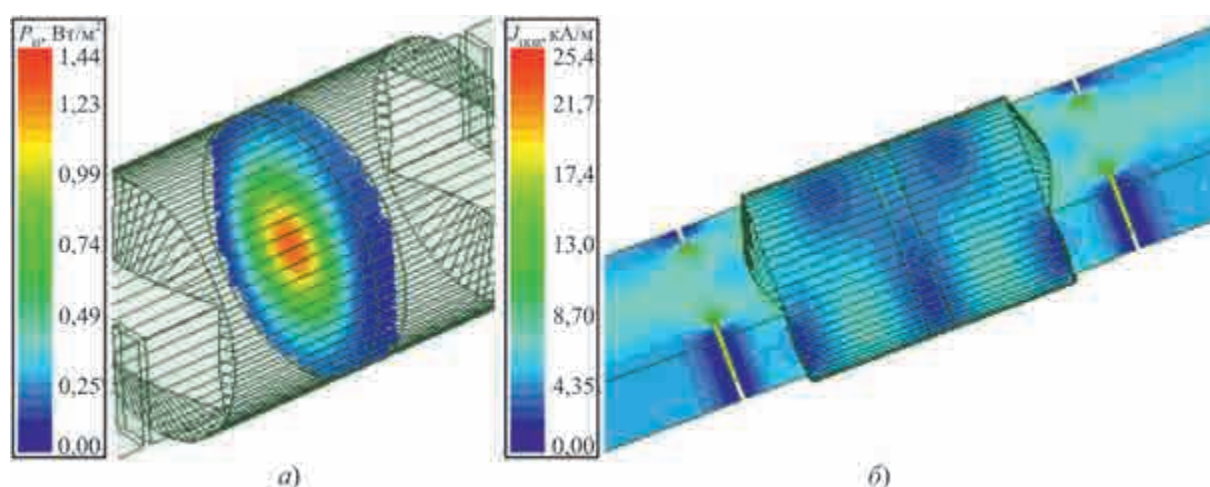


Рис. 6. Распределение диэлектрических потерь в керамическом диске (а) и модуля комплексной амплитуды плотности поверхностного тока (б) на металлических поверхностях баночного окна на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности 20 МВт

Относительно исходного окна [7] рассчитанная мощность диэлектрических потерь в керамическом диске уменьшилась в 1,8 раза, а мощность поверхностных потерь в металлических стенках не изменилась.

Распределение модуля комплексной амплитуды плотности поверхностного тока на металлических поверхностях оптимизированного баночного окна (и соответственно областей нагрева этих поверхностей) приведено на рис. 6, б.

В области спаев керамического диска поверхностные токи имеют незначительные величины.

Максимальный поверхностный ток с плотностью 25,4 кА/м протекает по торцевым поверхностям согласующих индуктивных диафрагм, имеющих в данном случае толщину 3 мм (см. рис. 6, б). При этом индуктивные диафрагмы, используемые для подстройки АЧХ баночного окна, не снижают его электропрочность (см. рис. 4 и 5).

5. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПОТЕРЬ В КРИТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ БАНОЧНОГО ОКНА ВЫВОДА ЭНЕРГИИ СМК

В результате анализа картины распределения электрического поля и потерь, рассчитанных на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности $P_{вх} = 20$ МВт (см. рис. 4...6), были определены параметры для контроля энергетических характеристик баночного окна (табл. 1, 2).

Таблица 1

Модули комплексной амплитуды компонент напряжённости электрического поля в баночном окне на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности 20 МВт

Контролируемый параметр	Значение при $P_{\text{вх}} = 20$ МВт, МВ/м	Предельное значение, МВ/м
Максимальная напряженность электрического поля в вакуумной части окна	6,8	12
Максимальная напряженность тангенциальной компоненты электрического поля на поверхности керамического диска	1,74	8
Максимальная напряженность тангенциальной компоненты электрического поля в области спая керамического диска	0,64	3
Максимальная напряженность нормальной компоненты электрического поля в керамическом диске	0,2	8

Таблица 2

Мощности потерь в металлических стенках баночного окна и в керамическом диске на частоте $f_0 = 2856$ МГц при входной мощности 20 МВт

Контролируемый параметр	Значение при $P_{\text{вх}} = 20$ МВт, кВт
Суммарные потери мощности на металлических поверхностях окна	32,6
Суммарные потери мощности в керамическом диске	29,4

Для оценки максимальной пробойной напряжённости электрического поля во входной (вакуумной) и выходной частях баночного окна вывода энергии СМК, а также на поверхности, внутри и на краях керамического диска, изготовленного из керамики на основе Al_2O_3 , использовались величины, приведённые в табл. 1 [6–8].

Также в табл. 1 приведены модули комплексной амплитуды тангенциальной (расположенной в плоскости, параллельной плоскости XOY) и нормальной (расположенной перпендикулярно плоскости, параллельной плоскости XOY , т. е. параллельно оси OZ) компонент напряжённости электрического поля $\left(\left| \vec{E}_\tau \right| \right.$ и $\left. \left| \vec{E}_n \right| \right)$.

В табл. 2 приведены величины мощности поверхностных потерь в металлических стенках баночного окна и объёмных потерь в керамическом диске.

Как видно из табл. 1, в вакуумной части баночного окна, а также на поверхности и внутри керамического диска напряжённость электрического поля значительно ниже критических значений. При этом мощности потерь в металлических стенках и в керамическом диске (см. табл. 2) имеют низкие значения (~0,15 % от входной мощности).

Для оценки предельной величины входной мощности баночного окна вывода энергии СМК на частоте $f_0 = 2856$ МГц был рассчитан ряд значений входной мощности, при которых каждый контролируемый параметр из табл. 1 достигал предельного значения (табл. 3).

Таблица 3

**Предельные величины входной мощности
для контролируемых параметров на частоте $f_0 = 2856$ МГц**

Контролируемый параметр	Предельное значение входной мощности, МВт
Напряженность электрического поля в вакуумной части окна	62,8
Напряженность тангенциальной компоненты электрического поля на поверхности керамического диска	426,2
Напряженность тангенциальной компоненты электрического поля на спае керамического диска	435,9
Напряженность нормальной компоненты электрического поля в керамическом диске	30150

Как видно из табл. 3, при входной мощности $P_{\text{вх}} \cong 62,8$ МВт на частоте $f_0 = 2856$ МГц напряжённость электрического поля достигает критического значения в месте стыка прямоугольного и круглого волноводов*. В остальных контролируемых областях (в том числе и в месте спая керамического диска с цилиндрическим волноводом) критических значений напряжённость электрического поля достигает при значительно больших входных мощностях.

**6. ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
БАНОЧНОГО ОКНА ВЫВОДА ЭНЕРГИИ СМК В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

В процессе оптимизации предложенной модифицированной конструкции баночного окна оценивались в широкой полосе ($\Delta f = 350$ МГц с центром на рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц) частотные зависимости критических параметров с точки зрения отсутствия высокочастотных пробоев и перегревов керамической перегородки (см. табл. 1, 2). По результатам этих исследований подбирались параметры керамического диска и соотношения размеров баночного окна, обеспечивающие оптимальные энергетические характеристики при оптимальных частотных характеристиках (см. разд. 4).

При оптимизации использовался следующий критерий: минимум тангенциальных компонент напряжённости электрического поля в центральной области поверхности керамического диска (с целью уменьшения диэлектрических потерь в нём), а также на краю поверхности керамического диска (для снижения вероятности пробоя в области спае). Для исключения высокочастотных пробоев минимизировались также максимальные напряжённости электрического поля во всём баночном окне, располагающиеся в области конусообразных выемок, являющихся трансформаторами волны типа TE_{10} прямоугольного волновода в рабочие типы волн круглого волновода (см. рис. 4 и 6).

На рис. 7 в полосе частот, определяемой по уровню КСВН $\leq 1,1$ (маркеры $m1$ и $m3$), приведены частотные зависимости мощности объёмных потерь в керамическом диске и поверхностных потерь в металлических стенках оптимизированного баночного окна (см. табл. 2), а на рис. 8 частотные зависимости электрических полей в критических областях (см. табл. 1), рассчитанные при входной мощности 20 МВт. Маркер $m2$ соответствует рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц.

* Шаг расчетной сетки в области максимума электрического поля составлял $\sim 2,5$ мм.

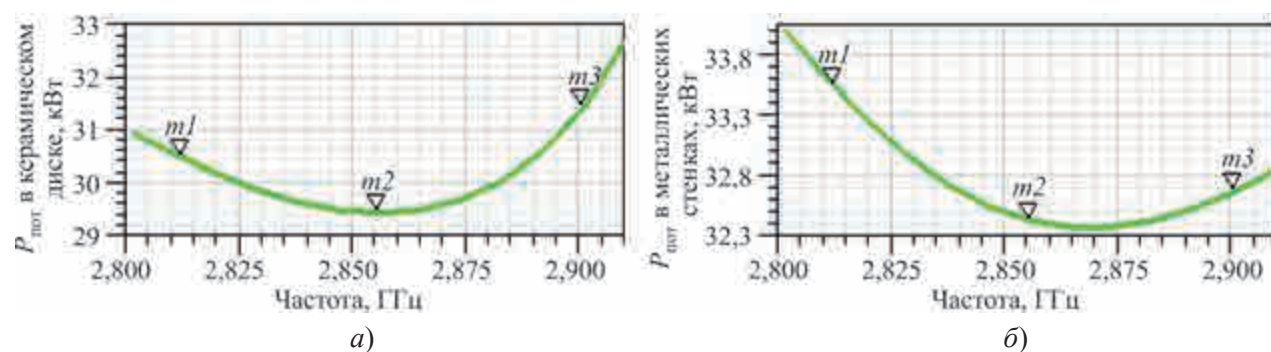


Рис. 7. Частотные зависимости мощности объёмных потерь в керамическом диске (а) и мощности поверхностных потерь в металлических стенках (б) оптимизированного баночного окна при входной мощности 20 МВт

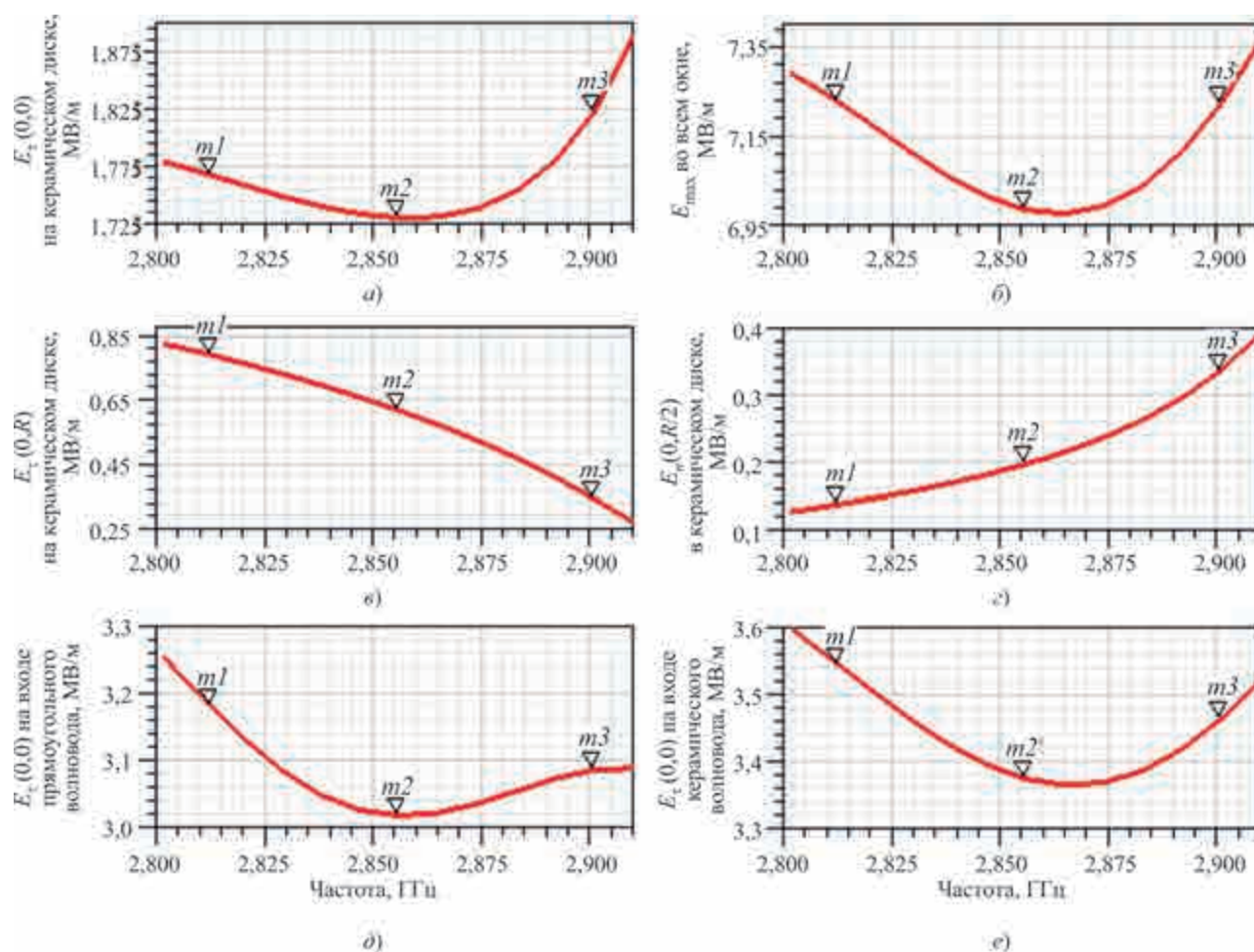


Рис. 8. Частотные зависимости модулей комплексной амплитуды компонент напряжённости электрического поля в критических областях оптимизированного баночного окна при входной мощности 20 МВт

Как видно из рис. 7, а и 8, а, на рабочей частоте $f_0 = 2856$ МГц тангенциальная компонента электрического поля в центре поверхности керамического диска и в основном определяемая ею мощность диэлектрических потерь в керамическом диске минимальны и незначительно возрастают к краям рассматриваемого частотного диапазона.

Тангенциальная компонента электрического поля на краю поверхности керамического диска в E -плоскости (рис. 8, в) в рассматриваемой полосе частот уменьшается с ростом частоты с 0,79 до 0,34 МВ/м, т. к. компенсируется соответствующей увеличивающейся компонентой поля типа TM_{11} [6, 7].

Это подтверждается (рис. 8, г) увеличением с ростом частоты нормальной компоненты электрического поля внутри диска в области максимума поля типа TM_{11} с 0,14 до 0,34 МВ/м.

Как видно из рис. 7, б и 8, б, области минимума максимальной напряжённости электрического поля во всём баночном выводе и мощности потерь в металлических стенках (см. рис. 4...6) находятся вблизи рабочей частоты $f_0 = 2856$ МГц. Эти величины незначительно возрастают на краях рассматриваемого частотного диапазона.

Аналогичным образом (рис. 8, е) ведёт себя тангенциальная компонента напряжённости электрического поля в центре поперечной плоскости соединения прямоугольного и круглого волноводов, т. к. эта область близка к месту нахождения максимальной напряжённости поля всего баночного окна (см. рис. 4, 5).

В рассматриваемом частотном диапазоне характер изменения мощности омических потерь подобен виду изменения максимальной амплитуды электрического поля в баночном окне (см. рис. 7, б и 8, б), т. к. максимальные поверхностные токи, вызывающие эти потери и соответственно нагрев металлических стенок, располагаются в области конусообразных выемок и индуктивных согласующих диафрагм, т. е. в области максимального электрического поля (см. рис. 4...6).

Приведённая на рис. 8, д тангенциальная компонента напряжённости электрического поля в центре поперечной плоскости на входе прямоугольного волновода пропорциональна квадратному корню из действительной части входного сопротивления $Z_{вх}$ (см. рис. 3, в, г). Соответственно она также имеет минимум, практически совпадающий с рабочей частотой $f_0 = 2856$ МГц, и в согласованном режиме определяет мощность активных потерь, вносимых баночным окном (см. разд. 4), которая состоит из мощности объёмных потерь в керамическом диске и мощности поверхностных потерь в металлических стенках, минимальных в области рабочей частоты (см. рис. 7, а, б).

Из анализа частотных зависимостей следует, что во всей 3%-ной полосе частот оптимизированного баночного окна мощности потерь в керамическом диске и металлических поверхностях являются незначительными, а по наиболее критичному параметру – максимальной напряжённости электрического поля обеспечивается 2,6-кратный запас по входной мощности.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и оптимизирована модификация конструкции вакуумно-плотного баночного окна вывода энергии СМК, использующая комбинацию из распространяющегося TE_{11} и затухающего TM_{11} типов волн полого круглого волновода и обеспечивающая передачу уровней импульсной мощности до 50 МВт при полосе частот 3 % в S -диапазоне.

С помощью анализа электромагнитных полей и потерь в критических областях оптимизи-



рованного баночного окна установлено, что применение предложенного критерия минимизации тангенциальных компонент напряжённости электрического поля в центральных областях поверхностей керамического диска и соответственно диэлектрических потерь в нём в сочетании с эффективными согласующими элементами позволяет значительно увеличить передаваемую мощность и расширить рабочую полосу частот вакуумно-плотного баночного окна вывода энергии СМК по сравнению с известными аналогами.

ЛИТЕРАТУРА

1. CHAPTER 5. X-band RF power sources // ISG Progress Report. – April, 2000. – P. 150 – 175.
2. **Faillon, G. J.** THOMSON high peak power klystrons / G. J. Faillon // PS Klystron Modulator Technical Meeting. October 7th and 8th 1991. – Cern. – P. 239.
3. **Сазонов, В. П.** Выходные устройства мощных СВЧ электровакуумных приборов / В. П. Сазонов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 11. – С. 47 – 72.
4. **Курилов, Г. В.** О резонансных частотах видов колебаний в окнах выводов энергии «баночного» типа / Г. В. Курилов, В. П. Сазонов, Н. В. Антохина // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1970. – Вып. 9. – С. 36 – 44.
5. **Буянов, О. П.** Экспериментальная разработка вывода энергии СВЧ-прибора / О. П. Буянов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1969. – Вып. 4. – С. 171 – 173.
6. **Kazakov, S. Yu.** A new traveling-wave mixed-mode RF window with a low electric field in ceramic-metal brazing area / S. Yu. Kazakov // KEK preprint 98 – 120. – 1998. – P. 1 – 4.
7. **Prokofiev, B. V.** A simple pillbox-type mixed-mode window for high power microwave devices / B. V. Prokofiev, M. A. Martynenko // Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2017. – 2017. – P. 1 – 2.
8. **Saito, Y.** Surface flasover on alumina RF window for high-power use / Y. Saito et al. // IEEE Transaction on Electrical Insulation. – 1993. – Vol. 28, No 4. – P. 566 – 573.

Статья поступила 12 октября 2020 г.



УДК 621.385.632

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КПД ЛБВ Q -ДИАПАЗОНА

А. Б. Данилов, В. И. Роговин, Ю. В. Симонова

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Проведено проектирование пространства взаимодействия ЛБВ Q -диапазона с выходной мощностью 260 Вт и коэффициентом усиления 45 дБ. Рассчитаны электродинамические характеристики спиральной замедляющей системы с различными размерами диэлектрических опорных стержней и материалами спирали (сплав МАГТ-02 и молибден, покрытый медным слоем). Использовано увеличение амплитуды магнитного поля на выходном участке пространства взаимодействия для устранения динамической расфокусировки.

КС: ЛБВ Q -диапазона, повышение электронного КПД, спиральная ЗС, спутниковая связь

THE INVESTIGATION OF A POSSIBILITY TO INCREASE THE Q -BAND TWT ELECTRONIC EFFICIENCY

A. B. Danilov, V. I. Rogovin, Yu. V. Simonova

JSC «RPE «Almaz», Saratov

The design of interaction space of Q -band TWT with an output power of 260 W and gain of 45 dB was carried out. High frequency characteristics of a helix slow-wave structure with different sizes of dielectric support rods and helix materials (alloy MAGT-02 and copper coated molybdenum) are calculated. An increase in the amplitude of the magnetic field at the output section of the interaction space is used to eliminate dynamic defocusing.

Keywords: Q -band TWT, electronic efficiency increase, high power millimeter-wave helix slow-wave structure TWT, satellite communication

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущих требований к скорости передачи данных и увеличению числа каналов связи возникает необходимость перехода в Q -диапазон частот для осуществления мультимедийного обслуживания и спутниковой связи. В наземных и спутниковых системах космической связи в качестве активных приборов в выходных каскадах аппаратуры космических связанных ретрансляторов в основном используются ЭВП СВЧ типа ЛБВО.

В настоящее время подробно рассмотрены вопросы проектирования ЛБВО в выделенных регламентом диапазонах частот от L до Ka . Показано, что основным способом повышения КПД таких приборов является выбор оптимальных размеров и материалов спиральной замедляющей системы (СЗС) [1], а также условий взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной [2].

В данной работе подробно рассмотрены вопросы увеличения электронного КПД за счет увеличения сопротивления связи, уменьшения ВЧ-потерь в пространстве взаимодействия (ПВ) и минимизации динамической расфокусировки из расчетов по двумерной программе.

2. ВЫБОР РАЗМЕРОВ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЗС

В качестве объекта исследования выбрана спиральная ЛБВ Q-диапазона с рабочей полосой 6,8 % и выходной мощностью не менее 180 Вт, полученной при ускоряющем напряжении $U_{зс} = 14700$ В и токе $I = 0,15$ А. Спираль представляет собой плющеную микроленту с прямоугольным поперечным сечением. Первоначальная конфигурация микроленты выбрана исходя из соотношения, связывающего обобщенный параметр спирали ($\gamma_{ea} = 0,7$) со средним радиусом пролетного канала. Отношение диаметра экрана $D_э$ к диаметру пролетного канала d_k составило 2,83. Отношение ширины микроленты к шагу – около 0,378. Среди рассмотренных конфигураций стержней – прямоугольные шириной 0,4 и 0,2 мм. В качестве исследуемых материалов спирали выбраны сплав МАГТ-02 (медь – 99,98 %, алюминий, гафний, титан – 0,02 %) и молибден, покрытый слоем меди (толщина покрытия приблизительно равна толщине скин-слоя, напыление присутствует только в выходной секции). Рассмотрены диэлектрические опорные стержни из оксида бериллия (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 6,8$, тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4}$) и нитрида бора ($\epsilon = 4,8$; $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4}$).

Расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) СЗС с различными стержнями и микролентами проводился по HFSS для наименьшего шага и наибольшей частоты. Оценка и сопоставление результатов расчета для коротковолновой области диапазона, где КПД и выходная мощность минимальны, обеспечивает запас по таким энергетическим характеристикам, как КПД, коэффициент усиления и выходная мощность, во всем диапазоне частот. Результаты расчета ЭДХ нескольких вариантов исполнения СЗС представлены на рис. 1.

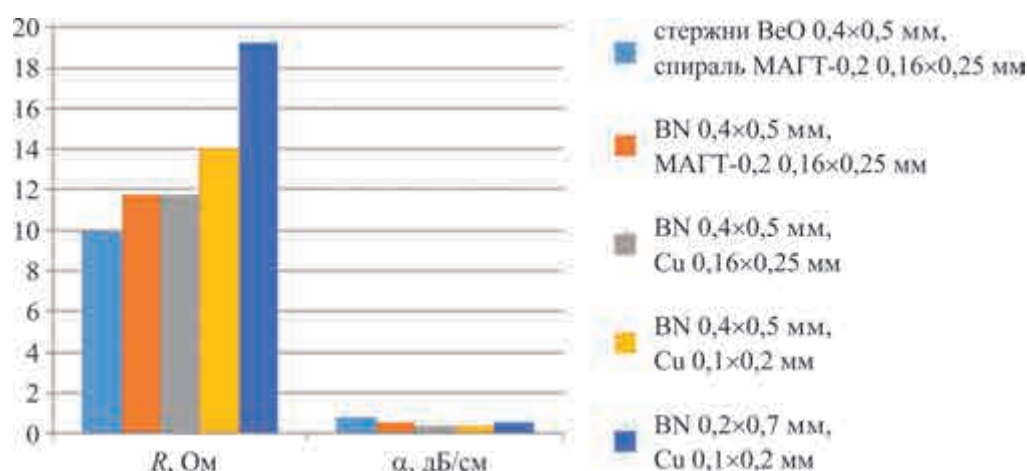


Рис. 1. Гистограмма сопровитления связи R и распределенных ВЧ-потерь α

Расчет показал, что использование нитрида бора в качестве материала стержней позволяет увеличить сопротивление связи на 18,5 % в сравнении с оксидом бериллия (толщина стержней составляет 0,4 мм в каждом случае), а использование покрытой медью спирали ведет к уменьшению распределенных ВЧ-потерь в 2,17 раз по сравнению со спиралью из сплава МАГТ-02. При оптимизации размеров плющенной микроленты получено увеличение сопротивления связи на 20 % (вариант с покрытой медью спиралью и стержнями из нитрида бора толщиной 0,4 мм). Исходя из известного отношения диаметров экрана и пролетного канала, диаметр экрана увеличен, с тем чтобы обеспечить увеличение сопротивления связи. Проведенные расчеты ЭДХ

СЗС с покрытой медным слоем спиралью и стержнями из нитрида бора толщиной 0,2 мм и высотой 0,7 мм выявили увеличение сопротивления связи на 93 % и снижение распределенных ВЧ-потерь на 36 % в сравнении с первоначально рассчитанной конструкцией СЗС (спираль – из сплава МАГТ-02 и прямоугольные стержни – из бериллиевой керамики толщиной 0,4 мм).

3. РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ПРОСТРАНСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Расчет ПВ осуществлялся по программе [3], в основу которой положена одномерная нелинейная теория ЛБВ. Изначально расчеты ПВ проводились для материалов, имеющихся в производстве и несильно ухудшающих ЭДХ (сопротивление связи – 9,929 Ом, распределенные ВЧ-потери – 0,799 дБ/см). Конструкция СЗС со спиралью из сплава МАГТ-02 и стержнями толщиной 0,4 мм из оксида бериллия выбрана в качестве варианта номер 1. В результате оптимизации размеров ВЧ-пакета (длин секций и поглотителей) получена оптимальная конструкция (рис. 2), позволяющая достичь требуемых выходных характеристик. Суммарное затухание локального поглотителя энергии составило 66 дБ. Распределение шага спирали по длине, длины секций ПВ и координаты скачков шага представлены на рисунке в нормированном виде (h_1 – начальный шаг спирали, l_1 – общая длина ПВ).

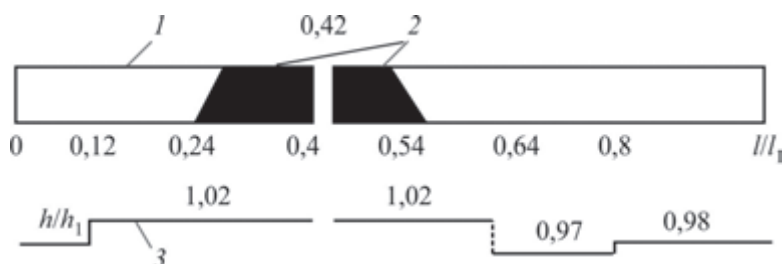


Рис. 2. Конструкция ПВ.

Вариант номер 1:

1 – стержень; 2 – поглотитель;

3 – шаг спирали

Расчет ПВ, проведенный для первого варианта, показал достаточный технологический запас по выходной мощности (рис. 3).

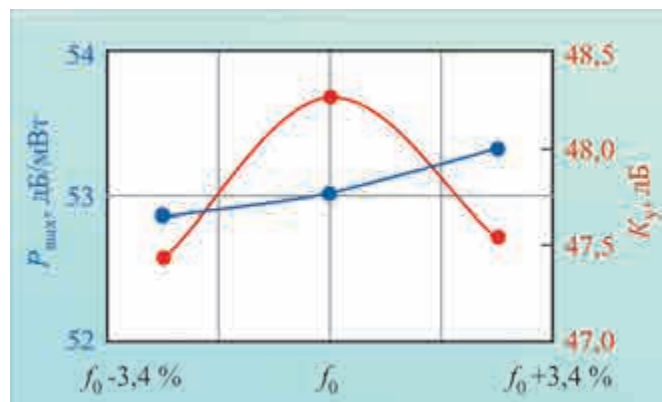
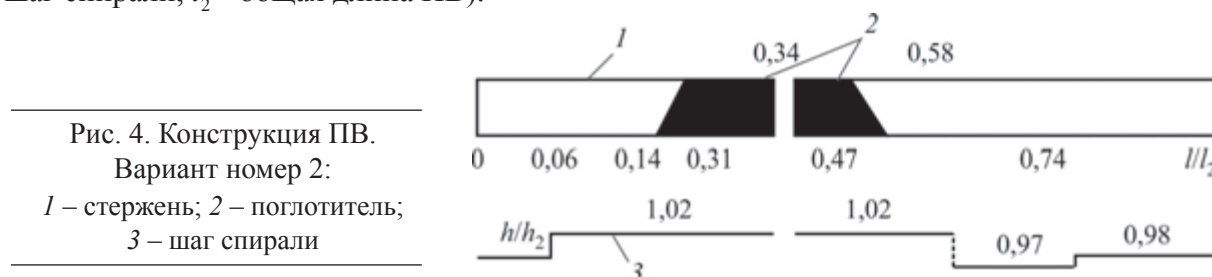


Рис. 3. Зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и коэффициента усиления K_y от частоты. Вариант номер 1

Проведен расчет конструкции ПВ для варианта СЗС номер 2 (медная спираль и прямоугольные стержни из нитрида бора толщиной 0,2 мм). В результате оптимизации основных размеров ВЧ-пакета получена оптимальная конструкция ПВ (рис. 4). Суммарное затухание локального поглотителя в этом случае равно 102 дБ. Распределение шага спирали по длине, длины секций ПВ



и координаты скачков шага представлены на рисунке в нормированном виде (h_2 – начальный шаг спирали, l_2 – общая длина ПВ).



Проведен поиск оптимального напряжения на ЗС. Выяснено, что для достижения наименьшего перепада по коэффициенту усиления необходимо выбрать напряжение на ЗС 14500 В. Использование улучшенного варианта СЗС с медным покрытием спирали и стержнями из нитрида бора толщиной 0,2 мм позволяет достигнуть выходных характеристик, значительно превышающих требуемые (рис. 5).

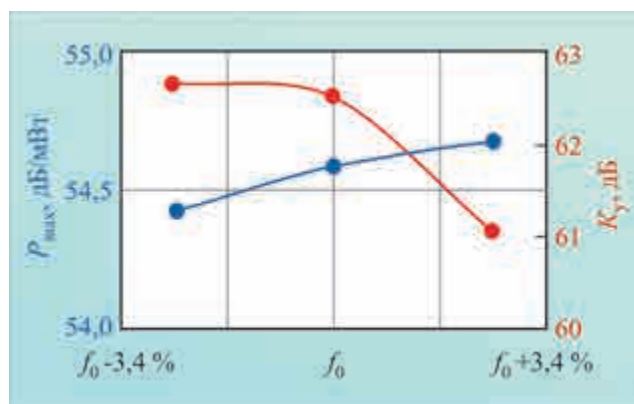


Рис. 5. Зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и коэффициента усиления K_y от частоты. Вариант номер 2

Так, электронный КПД второго варианта превосходит КПД варианта номер 1 в 1,43 раза. Это позволяет считать целесообразной разработку технологий производства тонких прямоугольных стержней из нитрида бора и покрытия спирали медным слоем. Кроме того, за счет использования меди в качестве материала покрытия спирали, а нитрида бора в качестве материала диэлектрических опорных стержней и сокращения ширины опор в два раза удалось получить коэффициент усиления и выходную мощность, превышающие требуемые значения (минимум 45 дБ и 12 % КПД соответственно в рабочей полосе). Так как получена выходная мощность 264 Вт, можно уменьшить подводимую энергетику для получения 180 Вт.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАСФОКУСИРОВКИ

При взаимодействии электронного пучка с электромагнитной волной возникает динамическая расфокусировка – увеличение внешнего радиуса пучка под действием выросшей гармоники тока, кулоновских сил расталкивания и влияния разброса тепловых скоростей. Поскольку данный эффект может привести к оседанию электронного пучка на СЗС, был про-



веден расчет выходных характеристик второго варианта исполнения СЗС по двумерной программе [4]. Результаты расчета показали, что оседание (рис. 6) происходит в длинноволновой части диапазона, что объясняется максимальным значением амплитуды первой гармоники тока.

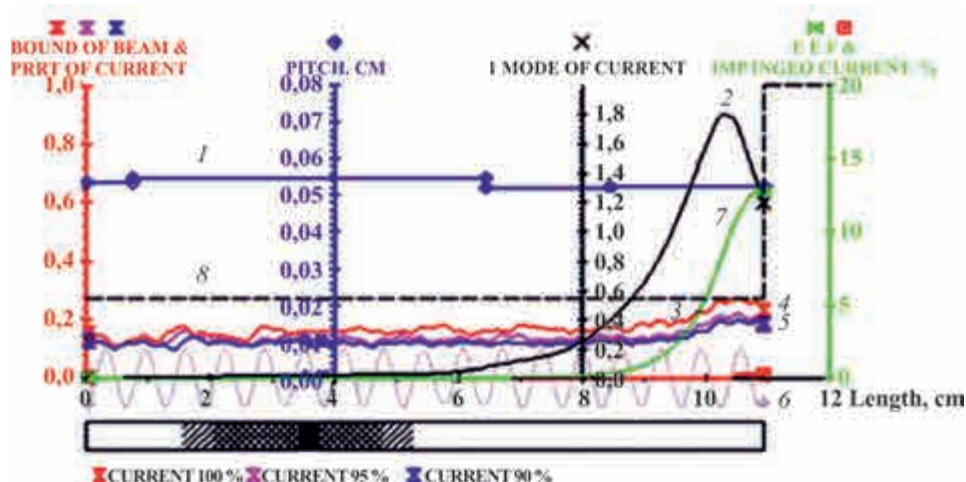


Рис. 6. Выходные характеристики ЛБВ и огибающие электронного пучка по длине ПВ в динамическом режиме ($B = 3500$ Гс):

1 – шаг спирали; 2 – 1-я гармоника ВЧ-тока; 3...5 – огибающие пучка, содержащие 100, 95, 90 % тока; 6 – распределение магнитного поля; 7 – электронный КПД; 8 – пролетный канал

Для решения проблемы минимизации динамической расфокусировки электронного пучка амплитуда магнитного поля нескольких колец МПФС в конце ПВ была увеличена. Для того чтобы обеспечить 100%-ное токопрохождение и запас по заполнению пучком пролетного канала, проводились расчеты с увеличенной на 5 и 10 % амплитудой магнитного поля нескольких магнитов МПФС в конце ПВ.

Анализ рассмотренных случаев (таблица) показал, что с увеличением амплитуды магнитного поля в конце ПВ устраняется динамическая расфокусировка за счет уменьшения заполнения электронным пучком пролетного канала и уменьшения выходной мощности.

**Результаты расчета выходной мощности и заполнения
для различных значений амплитуды магнитного поля МПФС**

Параметр	Амплитуда магнитного поля B , Гс		
	3500	3700	3850
$P_{\text{вых}}$, Вт	277	270	264
b/a	1	0,93	0,83

Исходя из полученных при расчете данных, оптимальным решением проблемы снижения динамической расфокусировки, создания запаса по заполнению электронным пучком пролетного канала и сохранения запаса по энергетическим характеристикам является увеличение амплитуды магнитного поля МПФС до 3850 Гс. На рис. 7 отражены результаты симуляции для длинноволновой части диапазона с оптимальной амплитудой магнитного поля МПФС.

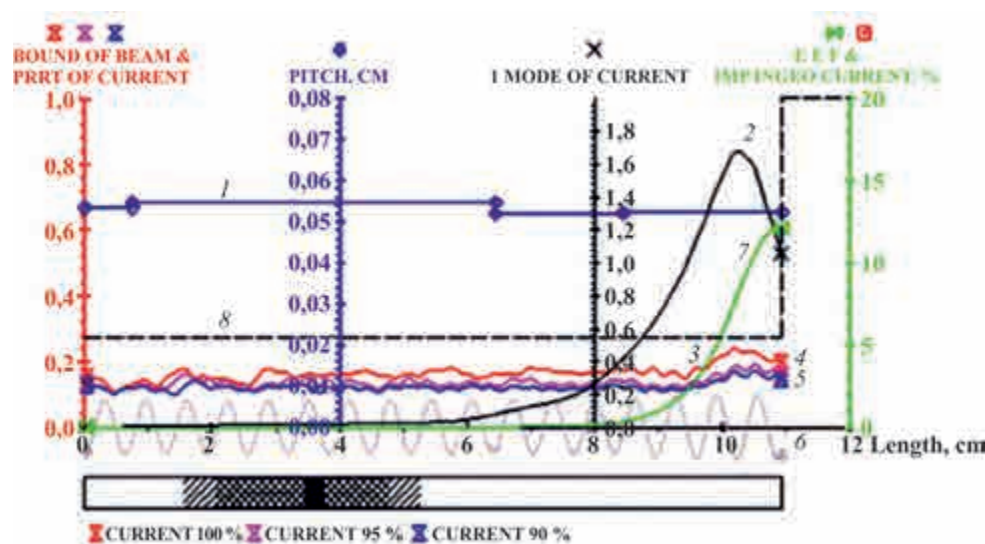


Рис. 7. Выходные характеристики ЛБВ и огибающие электронного пучка по длине ПВ в динамическом режиме. Оптимальный вариант амплитуды магнитного поля МПФС (3850 Гс в конце ПВ, 3500 Гс в регулярной части):

1 – шаг спирали; 2 – 1-я гармоника ВЧ-тока; 3...5 – огибающие пучка, содержащие 100, 95, 90 % тока; 6 – распределение магнитного поля; 7 – электронный КПД; 8 – пролетный канал

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты и оптимизация неоднородного пространства взаимодействия ЛБВ Q -диапазона с выходной мощностью 260 Вт для наземных станций спутниковой связи. Применением поддерживающих спираль стержней из нитрида бора вместо окиси бериллия и меднения выходной секции спирали из молибдена вместо спирали из сплава МАГТ-0,2 удалось повысить электронный КПД в 1,27 раза. Использование увеличенного в 1,1 раза магнитного поля на выходном участке ЛБВ обеспечило отсутствие токооседания, вызванного динамической расфокусировкой, и создало запас по заполнению пучком пролетного канала ($b/a = 0,83$).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhang, Jin.** Impacts of cubic boron nitride (CBN) support rods on TWT performance / Jin Zhang, Feng Wang, Huiyu Yuan¹, Ningfeng Bai, Hehong Fan, Xiaohan Sun, Bo Chen, Jinjun Feng, Tiechang Yan // 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC).
2. **Панин, А. Ф.** Применение неоднородных, нерезонансных ЗС для повышения электронного КПД ЛБВО / А. Ф. Панин, В. Е. Поляк, В. А. Филатов // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 8 (1265).
3. **Филатов, В. А.** Программа расчета в режиме диалога выходных характеристик, технического КПД и анализа устойчивости к самовозбуждению неоднородных спиральных ЛБВ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 3 (427). – С. 73 – 74.
4. **Контарин, Ю. Ф.** Расчет характеристик интенсивного электронного пучка в лампах бегущей волны / Ю. Ф. Контарин, В. И. Роговин, И. В. Роговин // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 77 – 79.

Статья поступила 11 сентября 2020 г.



ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.327.7: 621.791.378.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АКТИВНОЙ ПАЙКИ ЛЕГКОПЛАВКИМИ ПРИПОЯМИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С МЕТАЛЛАМИ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРАХ

С. В. Гавриш, Д. Н. Кугушев, В. В. Логинов, С. В. Пучнина

ООО «НПП «Мелитта», г. Москва

Рассмотрены результаты исследований, направленных на получение цилиндрического спая кварцевого стекла с коваром активной пайкой низкотемпературным оловянно-титановым припоем типа ОТ-1,5. Выполнен анализ механизма взаимодействия титана, входящего в состав припоя, с кварцем. Предложен способ предварительной металлизации кварцевого стекла магнетронным напылением пленки титана с последующей пайкой посредством индукционного нагрева. Проанализированы процессы при формировании спая, представлены результаты изучения растекаемости припоя по соединяемым материалам и исследования микроструктуры спая.

КС: газоразрядная лампа, спай, оловянно-титановый припой, кварцевое стекло, ковар, индукционный нагрев

THE INVESTIGATION OF THE ACTIVE SOLDERING PROCESS WITH LOW-MELTING SOLDERS OF QUARTZ GLASS WITH METALS IN GAS-DISCHARGE DEVICES

S. V. Gavrish, D. N. Kugushev, V. V. Loginov, S. V. Puchnina

JSC Ltd «RPE «Melitta», Moscow

The results of investigations aimed at obtaining a cylindrical junction of quartz glass with covar by active soldering with a low-temperature tin-titanium solder of the OT-1.5 type are considered. The analysis of the mechanism of interaction of titanium, included in the solder compound, with quartz is carried out. A method for preliminary metallization of quartz glass by magnetron sputtering of a titanium film followed by soldering by means of induction heating is proposed. The processes during the junction formation are analyzed, the results of studying the solder spreadability on the materials to be joined and the study of the junction microstructure are presented.

Keywords: gas-discharge lamp, junction, tin-titanium solder, quartz glass, covar, induction heating

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие оптико-электронных систем обеззараживания открытых поверхностей и окружающего воздуха, основанных на использовании УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп с кварцевой оболочкой [1]. В данном классе источников излучения разряд формируется между двумя электродами, токоподвод к которым пред-



ставляет собой комбинацию цилиндрических металлических деталей, тонкой молибденовой фольги (30...50 мкм) и штабика из кварцевого стекла (фольговый токоввод) [2]. Для получения качественного вакуумно-плотного соединения фольгового токоввода с оболочкой газоразрядной лампы требуются значительные временные затраты на подготовительные работы и высокая квалификация специалиста по огневой обработке кварца. Поэтому для удовлетворения возрастающего спроса на импульсные ксеноновые лампы с кварцевой оболочкой возникла необходимость в разработке промышленной технологии получения токовводов на основе достижений современного приборостроения. Сегодня в электронике получили широкое распространение технологии высокочастотной (ВЧ) индукционной пайки [3] и магнетронного напыления металлов на диэлектрики [4], которые легли в основу разработанного нами способа изготовления герметичных цилиндрических соединений кварца с колпачковыми металлическими деталями. Предлагаемая технология позволяет снизить трудоемкость, повысить надежность и воспроизводимость технологического процесса герметизации токоввода импульсной лампы с кварцевой оболочкой.

2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В 70-х годах прошлого века предпринимались попытки создать для импульсных газоразрядных ламп колпачковые токовводы, соединяемые с кварцевой трубкой легкоплавкими припоями [2, 5, 6]. Несмотря на то, что было получено несколько положительных результатов, в серийном производстве газоразрядных ламп разработанная технология не нашла применения в силу низкой смачиваемости и растекаемости легкоплавких припоев по кварцевому стеклу.

В то же время были достигнуты некоторые значимые результаты и предложено несколько важных технических решений.

1. При активной пайке кварцевого стекла с металлами необходимо использовать или активный припой, в котором одной из составляющих является активный металл, например титан, или неактивный припой, но поверхность в этом случае требуется покрывать активным металлом или его гидридом [2, 5].

2. В силу значительного различия КЛТР кварцевого стекла и металлов, необходимо применять легкоплавкие припои (на основе олова, свинца, индия и др.), компенсирующие напряжения в спае за счет пластической деформации [2].

3. В качестве конструкционных металлов токоподвода наиболее пригодны железоникелевые сплавы 36Н (инвар) или 29НК (ковар) [7], причем ковар имеет преимущество из-за более высокой растекаемости легкоплавких припоев по его поверхности и образования равномерной переходной зоны при меньшей температуре (600 °С) [5].

4. Оптимальная температура пайки припоем ОТ-1,5 – 850 °С. Увеличение до 950 °С способствует значительному взаимному растворению элементов ковара и припоя и образованию в переходном слое шириной 10 мкм интерметаллических фаз на основе соединений металлов Sn, Fe, Ti, Ni, Co, что приводит к повышенной хрупкости и высокой микротвердости (около 500 кг/мм²) в переходном слое [6].

5. В силу интенсивного взаимного растворения элементов ковара и припоя, время температурного воздействия на спаиваемые детали должно быть не более 30 с [6]. По этой причине широко применяемая технология пайки в вакуумных печах [4] неприемлема из-за инерционности тепловых процессов. В итоге наиболее подходящим способом быстрого достижения температуры плавления $T_{пл}$ припоя является индукционный нагрев [3].

6. Необходимо, чтобы рабочая температура спая колпачкового токоввода в газоразрядную лампу не превышала $T_{\text{пл}}$ используемых легкоплавких припоев, т. е. должна быть ниже 250°C . Поэтому, согласно работе [2], рассматриваемая технология активной пайки может быть применена в производстве импульсных ламп, работающих в режимах редких вспышек, когда рассеиваемая средняя электрическая мощность и температура токоввода незначительны. В случае импульсных источников УФ-излучения для оптико-электронных систем обеззараживания открытых поверхностей и окружающего воздуха [1] данное техническое требование выполняется (частота следования вспышек – менее 100 Гц), и после устранения некоторых технологических трудностей рассматриваемая технология может быть положена в основу серийного производства ксеноновых ламп с кварцевой оболочкой.

Остальные важные результаты работ [2, 5–7] будут рассмотрены в ходе дальнейшего изложения.

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СПАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Как следует из предыдущего раздела, самая большая трудность при активной пайке заключается в необходимости доставить атомы титана в зону контакта расплава припоя с кварцевой оболочкой для его химического взаимодействия с оксидом кремния. Учитывая тот факт, что чистого титана в основе припоя ОТ-1,5 всего 0,012 % (вес.), данная задача является достаточно сложной для воспроизводства качественного спая в серийном производстве. По нашему мнению, эту проблему можно решить путем магнетронного нанесения слоя титана на кварцевое стекло в зоне будущего соединения. Такое техническое решение нами было разработано для спаев сапфира с коваром [4] и освоено в серийном производстве импульсных цезиевых ламп. На рис. 1 представлено конструктивное исполнение сборки разрабатываемого токоввода перед пайкой с кварцевой оболочкой 1 импульсной ксеноновой лампы. Последовательность сборки следующая: электрод 2 механическим обжатием закрепляется на держателе 3, который затем лазерной сваркой герметично соединяется с коваровым колпачком 4.

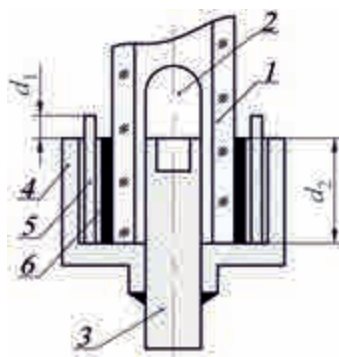


Рис. 1. Конструктивное исполнение токоввода импульсной газоразрядной лампы с кварцевой оболочкой:
1 – кварцевая оболочка; 2 – электрод; 3 – держатель электрода;
4 – коваровый колпачок; 5 – полоса припоя ОТ-1,5; 6 – слой титана;
 d_1 – высота выступающей части припоя; d_2 – длина спая

Кварцевая оболочка 1 лампы с предварительно нанесенным слоем титана 6 вертикально устанавливается в указанную сборку, как показано на рис. 1, а в образовавшийся коаксиальный зазор между коваровым колпачком 4 и слоем титана 6 размещается кольцо припоя 5. Высота выступающей части припоя d_1 выбирается таким образом, чтобы при пайке расплав полностью заполнил образовавшийся при сборке зазор на высоту d_2 . Избежать зазора невозможно из-за

особенностей производственной сборки узла. Однако, по нашему мнению, отсутствие плотного контакта между слоем титана и припоем дает положительный эффект, который будет рассмотрен позже.

Пайка выполняется при размещении сборки токоввода в индукторе высокочастотного генератора таким образом, чтобы середина высоты индукционной катушки совпадала с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку $d_2/2$ (см. рис. 1). Согласно работе [3], активная удельная мощность ВЧ-нагрева, выделяемая в изделии, равна

$$P = 2,0 \cdot 10^{-4} I W^2 F \sqrt{\rho \mu f},$$

где I, f – ток и частота индуктора; W – число витков индуктора; ρ, μ – удельное сопротивление и магнитная проницаемость металла; F – функция, зависящая от свойств индуктора, размеров детали и частоты тока.

Из приведенного соотношения следует, что при размещении сборки в индукторе в установившемся режиме работы ВЧ-генератора мощность нагрева каждого металла будет определяться его удельным сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью μ .

Так как размеры спаиваемых деталей невелики, различие в магнитной проницаемости (титан и олово – парамагнетики, ковар – ферромагнетик) существенного влияния на суммарную напряженность магнитного поля не оказывает. Значит, при воздействии ВЧ-поля температура нагрева детали определяется удельным электрическим сопротивлением ее материала.

В таблицу сведены значения, по данным работы [7], удельного электрического сопротивления всех участвующих в образовании спая металлов.

Металл	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^{-4}$, Ом/см
Сплав 29НК (ковар)	0,5
Титан	0,42 при 20 °С 1,65 при 800 °С
Олово	0,11

Как следует из приведенных данных, в момент приложения магнитного поля в первую очередь будет осуществляться нагрев коварового колпачка и титанового слоя. Причем по мере повышения температуры пленки титана активная удельная мощность ВЧ-нагрева будет сосредоточена на нем за счет теплового роста ρ этого металла. Это важный эффект, так как в силу отсутствия плотного контакта с припоем (см. рис. 1) будет происходить только реакция взаимодействия титана с кварцевым стеклом. При достижении температуры плавления припоя ($T_{пл} \sim 250$ °С) расплав ОТ-1,5 полностью заполнит весь объем высотой d_2 . Даже в этом случае припой не окажет влияния на слой титана, так как на его поверхности находится оксидная пленка, которая имеет высокий краевой угол смачивания (131...160 град [7]). При достижении температуры 700 °С указанная оксидная пленка растворяется в титане и начинается реакция с припоем. Таким образом, механизм формирования спая представляет собой два этапа: до 700 °С идут независимые процессы взаимодействия титана с кварцевым стеклом и жидкого припоя с коваром, а затем добавляется реакция воздействия расплава на титан.

Процессы, происходящие при пайке ковара различными припоями, подробно рассмотрены

в работах [4–7], в то время как изучению механизма образования переходной зоны титана с кварцевым стеклом посвящено всего несколько работ (см. библиографию публикаций [7, 8]). По нашему мнению, наиболее вероятен процесс формирования спая титана с кварцем, предложенный на основе рентгенофазового исследования взаимодействия Ti с SiO₂ в работе [9]. Как считают авторы этой статьи, начиная с температуры 500 °С титан восстанавливает оксид кремния, отнимая у него кислород и растворяя его в своей кристаллической решетке. При этом SiO₂ полностью восстанавливается до Si, который, реагируя с титаном, образует силицид Ti₅Si₃. По мере повышения температуры до 950 °С увеличивается активность взаимодействия Ti с SiO₂, что ведет к увеличению степени окисления титана и росту количества образовавшегося Ti₅Si₃. Тот факт, что при взаимодействии Ti – SiO₂ наряду с твердым раствором кислорода в титане образуется силицид, находится в полном соответствии со слабой растворимостью Si в α – Ti (0,09 % (вес.) при комнатной температуре и 0,31...0,54 % (вес.) в интервале температур 750...860 °С [9]). Образование Ti₅Si₃ и твердого раствора кислорода в титане свидетельствует о раздельном взаимодействии Ti с кремнием и кислородом при формировании переходной зоны в спае.

Механизм взаимодействия припоя ОТ-1,5 с титаном частично нами описан выше при рассмотрении ранее разработанной технологии пайки кварцевых оболочек импульсных ламп. В соответствии с известной диаграммой состояния олово – титан, сплавы, содержащие до 8,3 % (вес.) титана, имеют фазовое превращение эвтектического типа при температуре 231 °С, в результате которого образуется твердый раствор титана в олове и γ₂-фаза (Ti₃Sn₅). При увеличении содержания титана от 8,3 до 34,6 % (вес.) в сплавах появляется второе фазовое превращение при температуре 790 °С, природа которого не установлена. В то же время в работе [6] доказано, что при указанной температуре происходит превращение γ₂-фазы в γ₁-фазу (Ti₆Sn₅).

Таким образом, на основе выполненного нами литературного анализа и приведенных теоретических доводов можно предположить, что предлагаемая технология пайки кварцевого стекла с предварительно нанесенным слоем титана посредством расплава припоя ОТ-1,5 гарантировано обеспечит надежность коварового токоввода колпачкового типа.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде чем исследовать процессы формирования спая в целом, необходимо изучить взаимодействие контактирующих материалов между собой. Понятно, что в ходе расплавления припоя ОТ-1,5 он будет смачивать поверхности спаиваемых деталей (ковар и слой титана) и растекаться (растекаться) по ним. Известно, что на растекаемость влияют такие факторы, как жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение, характер взаимодействия жидкого и твердого металлов и др. При соединении деталей пайкой желательнее, чтобы коэффициент растекаемости K_p был не более 0,5. Указанное значение соответствует углу краевого смачивания около 40 град [10].

Коэффициент растекаемости определяется по формуле [10]

$$K_p = S_0/S_1,$$

где S_0 , S_1 – площадь капли припоя до и после расплавления соответственно.

Для определения растекаемости припоя (содержание титана – 2 %) из лент толщиной 0,7 мм вырезались образцы диаметром 8 мм, которые предварительно обрабатывались в соответствии с принятой технологией подготовки деталей к пайке.

Дополнительно нами было проведено исследование растекаемости припоя ОТ-1,5 по кварцевой пластинке. Целью данного эксперимента являлась необходимость исключить снижение процента выхода годных изделий в случае нарушения сплошности титанового покрытия (царапин, пятен и т. д.) при сборке токоввода. На таких дефектных участках должна происходить реакция титана, входящего в состав припоя ОТ-1,5, непосредственно с кварцем по механизму, описанному в работах [5, 6, 11].

Полученные результаты исследований в диапазоне температур 750...850 °С приведены на рис. 2.

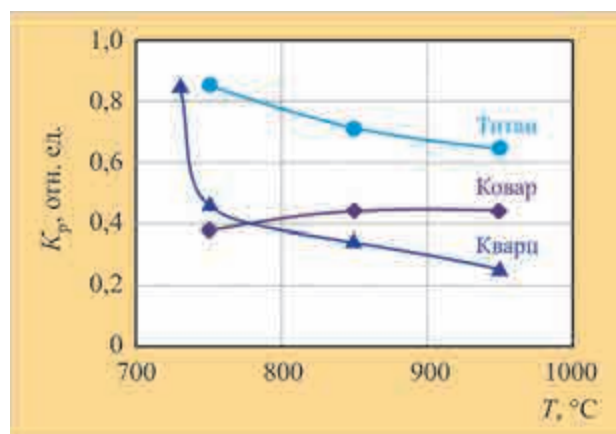


Рис. 2. Температурные зависимости растекаемости припоя ОТ-1,5 по материалам элементов спая

Из представленных данных следует:

- Коэффициент растекаемости припоя по поверхности сплава 29НК остается практически неизменным ($K_p = 0,38...0,44$).
- На титановой поверхности расплав ОТ-1,5 по мере повышения температуры нагрева распределяется незначительно (K_p снижается от 0,85 до 0,61). Данные результаты подтверждают правомочность предложенного выше механизма формирования спая, т. е. в первую очередь происходит смачивание коваровой детали, а затем по мере заполнения зазора расплавом ОТ-1,5 начинается его взаимодействие со слоем титана. За счет образовавшегося временного интервала нерастворенный титан успевает вступить в реакцию с кварцевым стеклом.
- В результате проведенных исследований нами выявлено, что на кварцевом стекле при повышении температуры нагрева от 730 до 850 °С коэффициент растекаемости припоя довольно быстро уменьшается от 0,85 до 0,4. Видимо, по этой причине температура 850 °С выбрана в качестве оптимальной при пайках, проводимых авторами работ [5, 6, 11].

Объяснение полученной температурной зависимости K_p для различных припоев по материалам спаев дано в монографии [10], из которой следует, что материалы с неметаллической связью (в нашем случае SiO_2) препятствуют растекаемости жидких металлов, так как они обладают низкой свободной энергией ΔG . Поэтому нагрев кварцевого стекла способствует росту ΔG и снижению K_p припоя. Возможно, по этой же причине происходит незначительный рост смачивания припоем окисленной пленки титана на поверхности кварцевого стекла.

Дальнейшие наши исследования были направлены на получение цилиндрического спая токоввода U-образного газоразрядного источника УФ-излучения. Сборка электродного узла, фрагмент которого приведен на рис. 3, а, производилась по схеме, показанной на рис. 1. На кон-

цевую часть кварцевой оболочки предварительно наносился магнетронным напылением (см. рис. 3, а) слой титана 4 толщиной $0,7 \dots 0,8$ мкм. Затем производилась сборка кварцевой оболочки и коварового колпачка. В образовавшийся зазор между деталями 1 и 4 (см. рис. 1) размещался припой ОТ-1,5 в виде кольца толщиной $0,35$ мм. Далее полученная сборка располагалась в вакуумированном резервуаре и в зоне d_2 (см. рис. 1) производился ВЧ-нагрев в течение $1 \dots 2$ мин с момента начала плавления ОТ-1,5 до образования равномерного мениска припоя 2 (см. рис. 3, а). После завершения пайки и остывания лампы производилась проверка герметичности спаев на гелиевом течеискателе Phoenix L300i (Leybold GmbH, Германия).

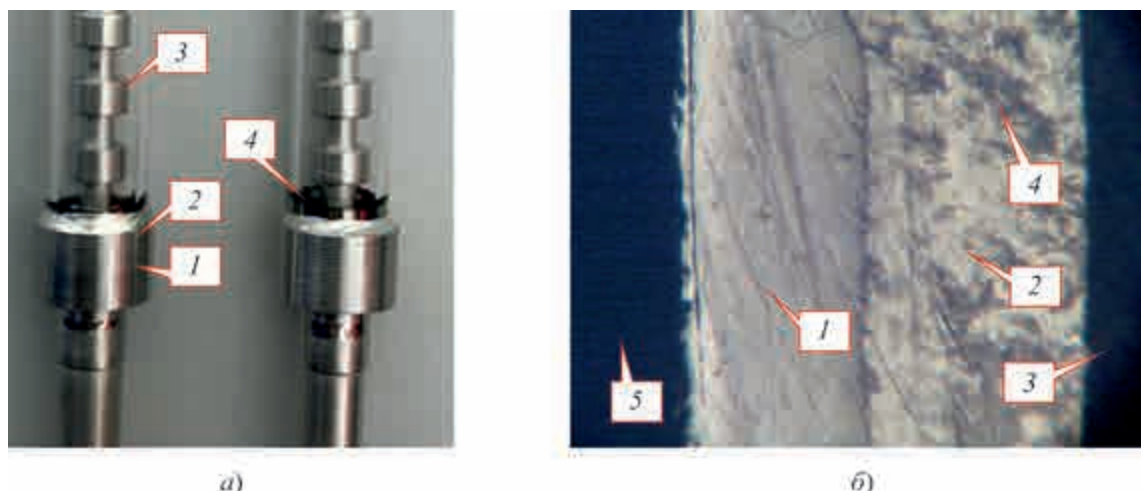


Рис. 3. Фото разработанного спая в составе газоразрядной лампы (а) и микроструктура соединения кварца со сплавом 29НК (б):

1 – ковар; 2 – припой ОТ-1,5; 3 – кварцевое стекло; 4 – вторая фаза Ti_5Si_3 [9];
5 – заливочный состав (эпоксидная смола)

Для анализа микроструктуры сформировавшихся слоев, образующих спай, нами был изготовлен шлиф продольного разреза соединения, который представлен на рис. 3, б. Из полученных результатов видно, что между коваровой деталью 1 и оловянно-титановым припоем 2 имеется незначительная переходная зона, связанная с проникновением расплава припоя по границам зерен коваровой детали [10]; в то время как титановый слой полностью растворился в расплаве ОТ-1,5 с образованием четкой границы между припоем 2 и кварцевым стеклом 3 (см. рис. 3, б). К сожалению, приборная оснащенность наших исследований не позволила определить наличие силицида титана в зоне границы, но пирометрический контроль температуры коварового колпачка при пайке показал температуру 850 °С, что дает возможность предположить, что, в соответствии с работой [9], он должен образоваться.

На завершающем этапе исследований нами проведены испытания импульсной ксеноновой газоразрядной лампы с разработанными колпачковыми токовводами в эксплуатационных режимах работы установок обеззараживания [1]. Полученные результаты подтвердили работоспособность токоввода источника УФ-излучения и правомочность разработанных технических и технологических решений.

В заключение авторы выражают надежду, что полученные результаты будут полезны разработчикам не только приборов плазменной электроники, но и в других отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдштейн, Я. А.** Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра / Я. А. Гольдштейн, С. Г. Киреев, С. Г. Шашковский и др. // Медицинский алфавит. – 2017. – Т. 2, № 18. – С. 5 – 8.
2. **Басов, Ю. Г.** Токовводы в кварцевые газоразрядные лампы / Ю. Г. Басов, В. И. Ролдугин, В. В. Сысун // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1988. – № 4. – С. 43 – 52.
3. **Ланин, В.** Высоочастотная конструкционная и монтажная пайка / В. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 6. – С. 23 – 27.
4. **Гавриш, С. В.** Вакуумно-плотные спаи сапфира с металлами / С. В. Гавриш, В. В. Логинов, Д. Ю. Пугачев, С. В. Пучнина // Успехи прикладной физики. – 2019. – Т. 7, № 5. – С. 480 – 501.
5. **Кулик, В. И.** Пайка металлокерамических узлов // В. И. Кулик, В. В. Степанов, Л. Л. Благутина и др. // Ритм машиностроения. – 2017. – № 6. – С. 32 – 35.
6. **Шабуркина, В. И.** Исследование оловянно-титанового припоя марки ОТ-1,5 и паяных соединений кварцевого стекла с коваром. Ч. 3. Исследование паяных соединений кварцевого стекла с коваром // В. И. Шабуркина, Н. В. Ермакова, Т. В. Болгова и др. // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1978. – № 8. – С. 101 – 105.
7. **Батыгин, В. Н.** Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами / В. Н. Батыгин, И. И. Метелкин, А. М. Решетников. – М.: Энергия, 1973. – 408 с.
8. **Костин, А. М.** Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром / А. М. Костин, А. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2014. – Т. 36, № 6. – С. 815 – 827.
9. **Жмудь, Е. С.** Рентгенофазовое исследование взаимодействия Ti с SiO₂ / Е. С. Жмудь, А. Е. Шмелев // Неорганические материалы. – 1974. – Т. 10, № 10. – С. 1816 – 1820.
10. **Гладков, А. С.** Пайка деталей электровакуумных приборов / А. С. Гладков, О. П. Подвигина, О. В. Чернов. – М.: Энергия, 1967. – 288 с.
11. **Шабуркина, В. И.** Исследование оловянно-титанового припоя марки ОТ-1,5 и паяных соединений кварцевого стекла с коваром. Ч. 2. Исследование фазового состава припоя ОТ-1,5 // В. И. Шабуркина, Н. В. Ермакова, Т. В. Болгова и др. // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1977. – № 11. – С. 109 – 114.

*Статья поступила 22 июня 2020 г.,
после переработки – 7 октября 2020 г.*



УДК 621.385.73

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ ОКСИДНЫХ КАТОДОВ

Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Д. Ю. Архипов, В. С. Парамонов,
В. В. Федотов, К. О. Долгих

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

Представлены результаты исследования работы молекулярно-напыленных оксидных катодов, изготовленных из 50-мкм вольфрамрениевой фольги. Конструкция катода, состоящего из подогревателя и соединенного с ним керна, выполнена в виде цельной детали на автоматизированной лазерной технологической установке «Каравелла-2М» для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ. Термоэмиссионное покрытие нанесено на керн методом ионно-плазменного напыления. Приведены эмиссионные и эксплуатационные характеристики новой конструкции катода.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), прецизионная микрообработка, лазерное технологическое оборудование, лазеры на парах меди, технологии химической очистки, недокальные характеристики, долговечность

APPLICATION OF LASERS ON COPPER VAPOR IN THE MANUFACTURING OF MOLECULAR SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODES

G. A. Zhabin, N. A. Lyabin, D. Yu. Arkhipov, V. S. Paramonov,
V. V. Fedotov, K. O. Dolgikh

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

The results of studying the operation of molecular sputter-deposited oxide cathodes made of 50 microns of tungsten-rhenium foil are presented. The design of the cathode, consisting of a heater and a core connected to it, is made in the form of a single part using an automated laser processing unit «Karavella-2M» for precision microprocessing of materials for electronic products. The thermal emission coating is applied to the core by ion-plasma spraying. Emission and performance characteristics of the new cathode design are given.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, precision microprocessing, laser technological equipment, lasers on copper vapor, chemical cleaning technologies, emission characteristics, working life

1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания новых СВЧ-приборов с улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками требуются новые подходы и способы в изготовлении термокато́дов. Одним из подходов является внедрение прецизионных и высокопроизводительных способов лазерной микрообработки материалов изделий электронной техники (ИЭТ) [1].

До настоящего времени в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) [2] применялся молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), подогреватель и керн которого изготавливались из вольфрамрениевой проволоки диаметром 50 мкм (П-образный подогреватель – из



сплава ВР-27; присоединяемый к нему лазерной сваркой керн – из ВР-20). На керн наносились тонкая пленка иридия и термоэмиссионное вещество состава $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ [3, 4]. Выбор в качестве материала керна вольфрамрениевого сплава обусловлен его физико-химическими и оптимальными механическими свойствами (жесткостью, твердостью и пластичностью). Термокатоды с керном из сплава вольфрам-рений обладают устойчивостью к отравлению кислородом благодаря наличию б-фазы [5, 6]. Недостатками конструкции из проволоки являются низкие технологичность и производительность изготовления из-за ручного труда и необходимости применения большого количества сложных прецизионных оправок.

Перед разработчиками новой конструкции катода стояли задачи повышения производительности изготовления, улучшения его эмиссионных свойств и увеличения вибропрочности, не изменяя при этом параметры по питанию ЦЗУ.

В настоящей работе предлагается усовершенствованный процесс изготовления новой конструкции МНОК с применением созданной на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина» автоматизированной лазерной технологической установки (АЛТУ) «Каравелла-2М» на основе импульсного лазера на парах меди (ЛПМ). АЛТУ позволяет с высокой производительностью и качеством производить прецизионную микрообработку любых металлических, в частности, тугоплавких материалов из фольги толщиной 0,01...0,2 мм с шероховатостью поверхности реза не более 1...2 мкм и зоной термического воздействия не более 2...5 мкм [7, 8].

В данной работе приведены результаты испытаний новой конструкции МНОК, изготовленной из фольги тугоплавкого сплава ВР-27 вакуумной плавки на АЛТУ «Каравелла-2М».

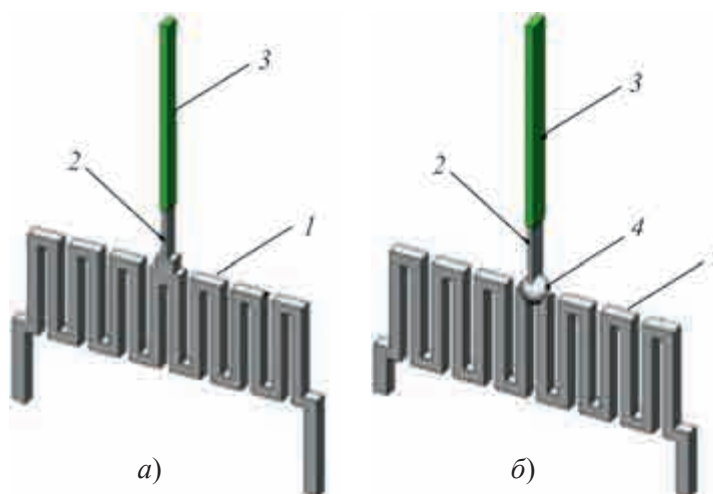
2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Заготовка из 50-мкм фольги сплава ВР-27 размерами 30×40 мм после химической обработки подвергалась формовочному отжигу в водороде при температуре 850 °С в течение 30 мин для обеспечения плоскостности ее поверхности. Отожженная заготовка устанавливалась на координатном столе АЛТУ «Каравелла-2М», где в соответствии с рабочим чертежом изготавливался катодный узел, состоящий из подогревателя в форме меандра и керна.

На рис. 1 представлены конструкции катодов с подогревателем в форме меандра и керном прямоугольного сечения, изготовленных в виде цельной детали из 50-мкм фольги ВР-27 лазерной резкой (а), и с отдельно изготавливаемыми подогревателем из фольги и керном из проволоки

Рис. 1. МНОК, изготовленные из фольги сплава ВР-27 в виде цельной детали (а) и в результате присоединения к подогревателю керна лазерной сваркой (б):

1 – подогреватель; 2 – керн катода;
3 – термоэмиссионное покрытие; 4 – место сварки керна с подогревателем



сплава ВР-20, который приваривается к подогревателю лазерной сваркой (б). Конструкция катода, изображенная на рис. 1, б, позволяет использовать керны из проволоки различного диаметра, а также из материалов, отличающихся по составу от материала подогревателя.

Технологические параметры АЛТУ «Каравелла-2М», применяемой при изготовлении катодов, приведены в таблице.

Параметр	Значение
Длина волны излучения, нм	510,6
Частота повторения импульсов, кГц	14
Длительность импульса излучения (по уровню 0,5), нс	10 – 12
Импульсная энергия, мДж	0,2 – 0,5
Расходимость пучка излучения, мрад	0,1
Фокусное расстояние объектива, мм	100
Диаметр рабочего пятна излучения, мкм	10 – 12
Плотность пиковой мощности излучения, Вт/см ²	$3 \cdot 10^{10}$
Средняя мощность излучения, Вт	1,6
Скорость резки, мм/с	0,8 – 1
Транспортная скорость перемещения, мм/с	0,8 – 1
Количество проходов (повторов)	5

Катоды, изготовленные на АЛТУ, подвергались химической очистке от нагара и грата при условии сохранения структуры поверхности и соответствия размеров рабочему чертежу. После химической обработки в трихлорэтилене проводили разрыхление грата с использованием водного раствора кипящей щелочи NaOH. Для финишной очистки использовался раствор перекиси водорода с последующей промывкой в деионизованной воде с ультразвуком (25...30 кГц). Затем катод подвергался отжигу в водороде при 1050 °С в течение 30 мин и уменьшению толщины керна методом прессования до номинального размера 20 мкм. Последнее обеспечивает узкий ленточный электронный луч в ЦЗУ. Контроль внешнего вида катода после каждой операции осуществлялся с помощью оптического микроскопа марки Olympus с увеличением 200...500.

На керн размерами 0,9×0,08×0,02 мм магнетронным распылением наносилась пленка иридия толщиной 0,25 мкм с последующим высокотемпературным отжигом в водороде и напылением в среде аргона и CO₂ термоэмиссионного покрытия (BaSrCa)CO₃ толщиной около 1 мкм. Параметры ионно-плазменного напыления: давление рабочего газа – 0,11 Па, напряжение разряда – 800 В, ток разряда – 200 мА [9].

Катод монтировался в ЦЗУ с соблюдением расстояния катод – анод 40 мкм. СВЧ-прибор откачивался до уровня вакуума 10⁻⁹ мм рт. ст., затем проводилось термическое разложение карбонатов до формирования оксидного покрытия на керне. Эмиссионные свойства МНОК исследовали на стенде термотренировки ЦЗУ по стандартной методике [3, 4].

После термотренировки продолжительностью 50 ч при напряжении $U_a = 14$ В на вход резонатора ЦЗУ подавалась в непрерывном режиме СВЧ-мощность 4 Вт для дополнительной тренировки параметров ЦЗУ [10]. Структурная схема технологического стенда прогона ЦЗУ на воздействие СВЧ-мощности высокого уровня (рис. 2) состояла из задающего генератора СВЧ-

сигналов, широкополосного усилителя мощности (УМШ) [11], вентиля, коаксиально-волноводного перехода. Схема обеспечивала стабилизацию эмиссионных характеристик МНОК в ЦЗУ. Нагрузкой являлся блок ЦЗУ, подключаемый к выходному разъему стенда входным СВЧ-трактом. Задающий генератор определял рабочую частоту стенда, уровень СВЧ-сигнала, поступающего на УМШ, и модуляцию СВЧ-мощности в импульсном режиме.

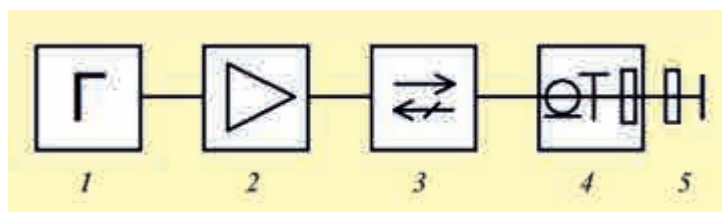


Рис. 2. Структурная схема технологического стенда испытания катода на воздействие СВЧ-мощностью:

1 – СВЧ-генератор; 2 – усилитель мощности; 3 – ферритовый вентиль;
4 – коаксиально-волновой переход; 5 – входной тракт ЦЗУ

Усиленная СВЧ-мощность поступала на ферритовый вентиль, обеспечивающий развязку выхода усилителя и отражающей нагрузки ЦЗУ. Отраженная от нагрузки СВЧ-мощность рассеивалась в нагрузке вентиль.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С увеличением содержания рения в вольфраме уменьшается хрупкость, возрастает пластичность и повышается температура начала его рекристаллизации (рениевый эффект), что важно для работы термоэмиссионных катодов. Так, при введении в вольфрам 1 % Re температура рекристаллизации сплава составляет 1300 °С. Для листового вольфрама с 30 % Re она составляет 1550 °С, для проволоки ВР-27 – 1300...1400 °С [12]. Проволока сплава ВР-27 изготавливается из порошкового металла и является по структуре менее плотной, чем фольга.

На рис. 3 изображены фрагменты катода, изготовленного из фольги ВР-27.

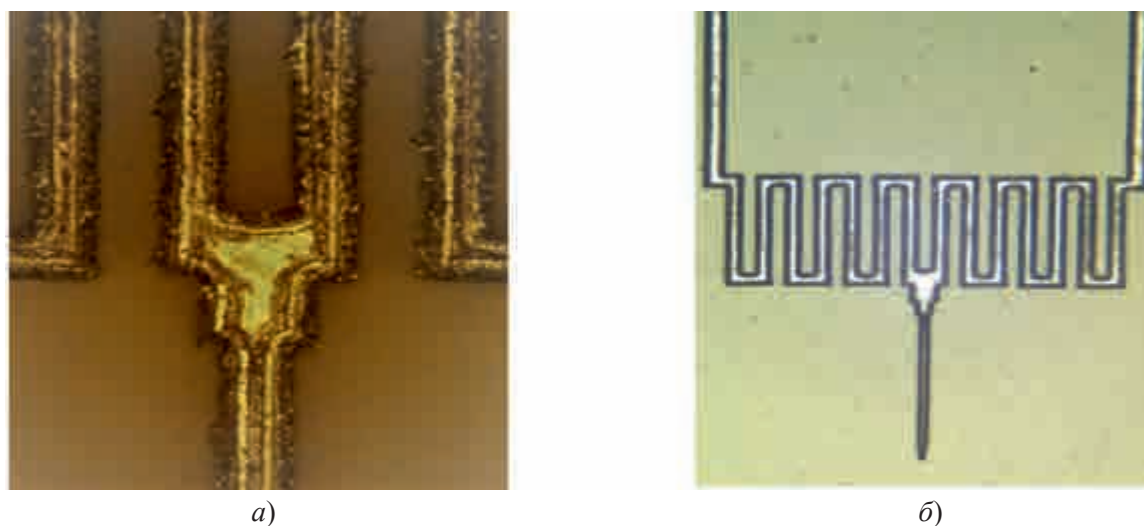


Рис. 3. Фрагменты катода из фольги ВР-27 ($\times 100...200$):

а – после лазерной резки; б – после химической очистки и нанесения эмиссионного покрытия на керн

На поверхностях реза видны участки в виде остывших капель металла (рис. 3, а). На рис. 3, б показан изготовленный из фольги катод после химической очистки и нанесения на керн эмиссионного покрытия.

Известно, что при увеличении средней мощности излучения ЛПМ возрастает ширина зоны термического воздействия (ЗТВ) и реза металлической фольги. Поэтому для минимизации ЗТВ и шероховатости поверхности применяется метод многопроходного прохождения луча при минимальной мощности излучения. Количество проходов при изготовлении катодов составляло 5 и более. При этом достигалась шероховатость поверхности реза менее 1 мкм.

Подогреватель катода с сечением $0,05 \times 0,04$ мм и общей длиной 5 мм, выполненный из ВР-27 в форме меандра, придает жесткость конструкции и обеспечивает равномерную теплопередачу керну длиной 0,9 мм. Общая длина меандра рассчитывается в зависимости от необходимого сопротивления подогревателя по формуле: $R = \rho \cdot L/S$, где R – сопротивление подогревателя, Ом; ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м; L – длина проводника меандра, мм; S – площадь сечения проводника, мм². Керн катода может иметь прямоугольное или круглое сечение.

На рис. 4 представлены недокальные характеристики образцов МНОК с подогревателем в форме меандра из фольги 1 (сплав ВР-27) и из проволоки 2.

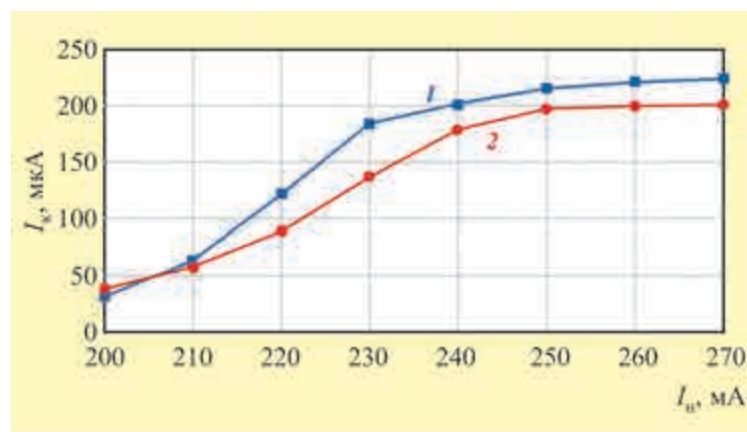


Рис. 4. Недокальные характеристики МНОК:

1 – подогреватель и керн из фольги сплава ВР-27; 2 – подогреватель из проволоки ВР-27 и керн из проволоки ВР-20

При анализе полученных недокальных характеристик видно, что характеристическая точка нового катода (кривая 1) соответствует накали 230 мА, а второго (кривая 2) – 250 мА. Работа выхода, рассчитанная по уравнению Ричардсона при постоянной $A = 120,4 \text{ A} \cdot \text{K}^{-2}/\text{cm}^2$ для катодов из проволоки и фольги в диапазоне рабочих температур 620...650 °С, имеет близкие значения и составляет 1,38 и 1,43 эВ соответственно. Размытый участок перехода характеристик от режима пространственного заряда к режиму насыщения показывает неоднородность распределения отбираемого тока и может быть связан с неоднородностью поля и работы выхода по эмитирующей поверхности катода [13]. Новый катод имеет лучшую эмиссионную однородность и активность, возможно, за счет плоской геометрии эмиссионной поверхности и повышения в керне концентрации атомов рения, диффундирующих в пленку иридия при отжиге в водороде [14].

На рис. 5 показаны кривые скорости восстановления эмиссии катодов из фольги (1, 2) и из проволоки (3, 4) во время воздействия на вход ЦЗУ СВЧ-мощности. Восстановление эмиссии

МНОК в ЦЗУ после воздействия СВЧ-мощности может длиться 60...180 мин, в зависимости от первоначального состояния активности катода, его рабочей температуры и вакуумных условий в СВЧ-приборе. Катоды 1 и 2 после воздействия СВЧ-мощности демонстрируют меньшее падение тока, чем катоды 3 и 4, что свидетельствует о меньшем отравлении эмиссионного слоя под действием бомбардировки ионами остаточных газов, десорбированных с внутренней поверхности ЦЗУ [10].

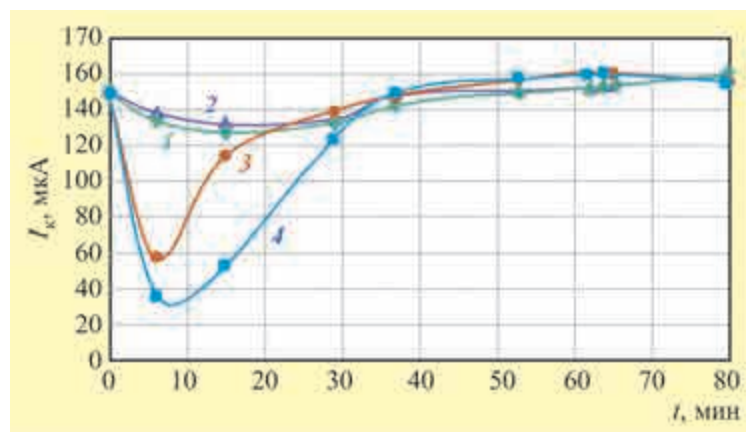


Рис. 5. Скорость восстановления эмиссии МНОК:

1, 2 – катод из фольги ВР-27; 3, 4 – катод с проволочным подогревателем ВР-27 и керном ВР-20

Дополнительными факторами, оказавшими влияние на улучшение эмиссионных характеристик и меньшее отравление остаточными газами катода из фольги ВР-27, являются более высокая температура керна (рис. 6) и однородность ее распределения по поверхности. В [15] показано положительное влияние на скорость восстановления эмиссии после отравления остаточными газами ЭВП повышения температуры катода с молекулярным напылением до 650...680 °С и увеличения плотности оксидного покрытия.

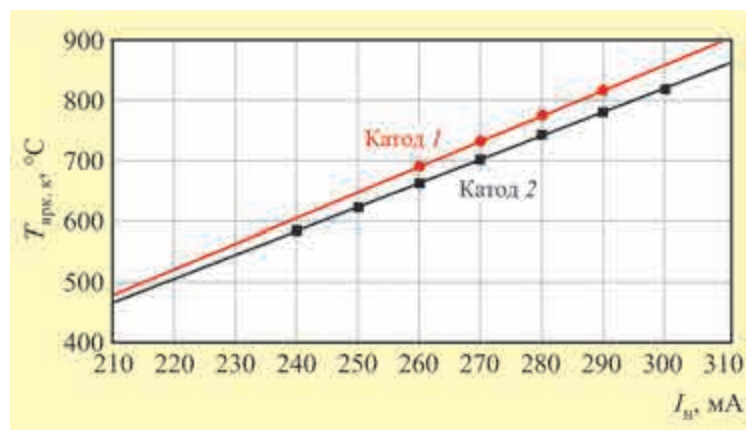


Рис. 6. График пирометрирования катодов:

1 – подогреватель и керн из фольги ВР-27; 2 – подогреватель из проволоки ВР-27, керн из проволоки ВР-20

Пирометрирование катодов из фольги и проволоки, смонтированных в колбы из стекла марки С-49-2 и откачанных до степени вакуума 10^{-7} мм рт. ст., осуществлялось на инфракрасном пирометре ВИМП-015 (рис. 6).

Пирометрирование показало, что kern катода из фольги в диапазоне рабочих накалиов имеет температуру на $25 \dots 30^\circ$ выше, чем из проволоки.

Испытания катода из фольги, проведенные в режиме циклического включения накала (4 с – включено, 4 с – выключено) при рабочей температуре 650°C , показали, что после 1385100 циклов формоустойчивость катода не ухудшилась.

При исследовании катодов из проволоки и фольги, установленных в ЦЗУ, на устойчивость к механическим колебаниям использовался анализатор сигналов Keysight PXA Signal Analyzer N 9030A. В качестве генератора сигналов использовался Agilent Technologies E8257D 250kHz-20GHz PSG. Исследование проводилось по следующей методике. На вход ЦЗУ с генератора поступал сигнал. Выходной сигнал с ЦЗУ поступал в анализатор сигналов. При воздействии на ЦЗУ внешних механических колебаний выходные сигналы имели спектры с дополнительными компонентами, сдвинутыми на частоты механических резонансов, показанные на рис. 7.

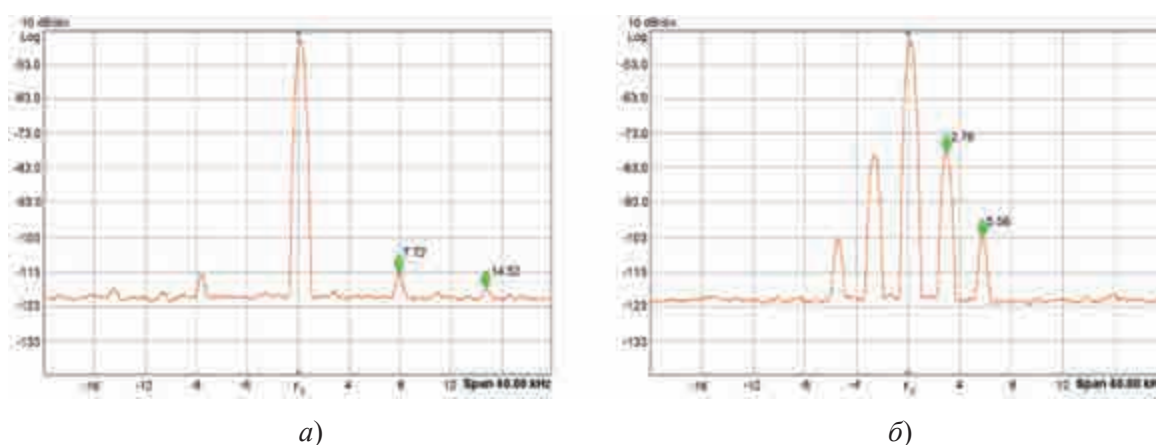


Рис. 7. Спектры выходного сигнала ЦЗУ:
а – катод из фольги ВР-27; б – катод из проволоки ВР-27, ВР-20

Из рис. 7 видно, что резонансные частоты катода новой конструкции из фольги ВР-27 равны 7,72 и 14,52 кГц. Для катода с подогревателем из проволоки резонансные частоты составляют 2,76 и 5,56 кГц. Таким образом, у новой конструкции паразитные компоненты выходного спектра оказываются на 25 дБ меньше, а резонансные частоты в 2,8 раза выше, чем у катода из проволоки. Можно сделать вывод, что катод с подогревателем из фольги имеет повышенную жесткость и виброустойчивость в диапазоне внешних воздействующих частот ЦЗУ [16].

Изготовленные с применением АЛТУ «Каравелла-2М» МНОК с ленточным электронным лучом показали стабильную работу в непрерывном режиме с рабочей температурой $600 \dots 650^\circ\text{C}$ при токоотборе $3 \dots 5 \text{ А/см}^2$ в течение 5000 ч.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что применение АЛТУ «Каравелла-2М» автоматизирует процесс изготовления миниатюрных МНОК из фольги и позволяет интегрировать его с современными групповыми технологиями изготовления ИЭТ.

Оптимизация технологии лазерной прецизионной микрообработки вольфрамениевой фольги ВР-27, режимов последующей химической очистки и нанесения эмиссионного покрытия позволила изготовить МНОК с улучшенными эмиссионными и эксплуатационными параметрами.

Конструкция катода из фольги дает паразитные компоненты выходного спектра на 25 дБ ниже, а резонансные частоты в 2,8 раза выше, чем катод из проволоки. Новый катод обеспечивает стабильную работу в непрерывном режиме с плотностью тока $3 \dots 5 \text{ А/см}^2$ и рабочей температурой $600 \dots 650 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5000 ч при повышенной жесткости и виброустойчивости конструкции.

Результаты проведенной работы применяются в производстве экспериментальных образцов ЦЗУ.

Авторы выражают признательность заместителю начальника НПК-8 по науке АО «НПП «Исток» Ю. А. Будзинскому за внимание к работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Levush, B.** The design and manufacture of vacuum electronic amplifiers: progress and challenges / B. Levush // Proceedings of the Conference IVEC. – 2019. – P. 1 – 5.
2. **Быковский, С. В.** Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты / С. В. Быковский, Ю. А. Будзинский, В. Г. Калина, В. Е. Котов, О. А. Саврухин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 43 – 49.
3. **Жабин, Г. А.** Молекулярно-напыленный оксидный катод с повышенной до 10 А/см^2 плотностью тока / Г. А. Жабин, З. М. Магамеднебиев, А. Н. Пашков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 50 – 58.
4. **Жабин, Г. А.** Влияние повышенного отбора тока на состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 4 (543). – С. 45 – 49.
5. **Raju, R. S.** Studies on W-Re mixed-matrix cathodes / R. S. Raju // IEEE Trans. Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, No 5. – P. 786 – 793.
6. **Zhou, F.** Sintering behavior and DC emission properties of tungsten-rhenium mixed matrix dispenser cathodes / F. Zhou et al. // 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, 2015. – P. 1 – 2.
7. **Григорьянц, А. Г.** Лазерная прецизионная микрообработка материалов / А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 416 с.
8. **Лябин, Н. А.** Прецизионная микрообработка материалов ИЭТ на автоматизированных лазерных технологических установках «Каравелла» / Н. А. Лябин и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 12 – 20.
9. **Жабин, Г. А.** Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темиряева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.
10. **Жабин, Г. А.** Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 49 – 53.
11. **Былкин, В. И.** Усилители мощности на монолитных интегральных схемах GaN в диапазоне частот 4...8 и 8...12 ГГц / В. И. Былкин, В. Л. Бровкина, С. М. Дерябкина // СВЧ-электроника. – 2019. – № 1. – С. 18 – 19.
12. **Савицкий, Е. М.** Сплавы рения в электронике / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, А. М. Левин. – М.: Энергия, 1980. – 216 с.
13. **Киселев, А. Б.** Металлооксидные катоды электронных приборов / А. Б. Киселев. – М.: МФТИ, 2001. – С. 35.
14. **Жабин, Г. А.** Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (538). – С. 15 – 21.
15. **Астраханцева, Н. Ф.** Способ оценки отравления оксидных катодов ЭВП / Н. Ф. Астраханцева, Б. П. Никонов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 8. – С. 94 – 96.
16. **Заявка на изобретение № 2020131146.** Молекулярно-напыленный оксидных катод / Ю. А. Будзинский, Н. А. Лябин, Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Р. И. Шерстяных, В. В. Федотов. – Приоритет 21.09.20.

Статья поступила 19 августа 2020 г.



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОГО СВЧ-ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ В ЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ ПО ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЕ

Д. В. Билевич, А. С. Сальников, А. Е. Горяинов

«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Представлена методика автоматического определения репрезентативного СВЧ-транзистора для усилительных применений в линейном режиме. Особенностью предложенной методики является выбор элемента одновременно по его характеристикам в частотном диапазоне и параметрам на постоянном токе. Разработанная методика была верифицирована на результатах численного моделирования. Также в статье представлено использование предложенной методики для поиска репрезентативного СВЧ-транзистора с последующим построением его малосигнальной модели. Построенная модель использовалась для проектирования малошумящего усилителя диапазона частот 17...24 ГГц. Результаты верификации и использования предложенной методики подтверждают её работоспособность и применимость для решения задачи поиска репрезентативного СВЧ-транзистора.

КС: репрезентативный элемент, СВЧ-измерения, СВЧ-транзистор, малосигнальная модель

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR AUTOMATIC DETERMINATION OF A GOLDEN MICROWAVE TRANSISTOR FOR AMPLIFYING APPLICATIONS IN A LINEAR MODE BY FREQUENCY CHARACTERISTICS BASED ON MEASUREMENTS ON A SEMICONDUCTOR WAFER

D. V. Bilevich, A. S. Salnikov, A. E. Goryainov

«Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics»

The article presents a technique for automatic determination of a golden microwave transistor for amplifying applications in a linear mode. The main feature of the purposed technique is the choice of the device simultaneously by its characteristics in the frequency range and DC parameters. Also, the article presents the use of the proposed methodology to search for a golden microwave transistor with the subsequent building of a small-signal model of the selected transistor. That model was used to design a 17...24 GHz low-noise amplifier. The efficiency of the proposed method is confirmed by the results of numerical modeling and experimental study.

Keywords: golden device, microwave measurement, microwave transistor, small-signal model



1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе проектирования СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) важную роль играет расчет характеристик устройства, для которого используются модели отдельных элементов МИС. Построение моделей проводится на основе измерения предварительно изготовленных тестовых элементов. Поскольку в процессе изготовления полупроводниковых приборов или элементов СВЧ МИС присутствует технологический разброс, характеристики отдельных образцов тестовых элементов отличаются друг от друга. Поэтому разработчику моделей приходится выбирать, какой из образцов использовать для построения модели. При решении задачи невозможно просто построить модель по параметрам, усредненным по всей пластине, так как при этом нарушается корреляция между параметрами [1]. Необходимо выбрать из партии элемент, имеющий характеристики, наиболее близкие к средним по пластине, во многих работах отмечается важность этого шага для построения моделей. Однозначного термина для такого элемента нет. В разных работах [1–3] его называют средним, среднестатистическим, типовым, в зарубежной литературе – *golden device*, что также можно перевести как эталонный элемент. В данной работе такой элемент будет называться репрезентативным. Иногда такой элемент подвергается более тщательным измерениям, например вольт-амперные характеристики (ВАХ) могут быть измерены с меньшим шагом напряжения. В данной работе рассматривается задача выбора репрезентативного СВЧ-транзистора.

Классический подход к поиску среднего элемента заключается в определении n ключевых параметров транзистора. Каждый параметр представляет собой переменную в n -мерном пространстве, каждый образец в таком пространстве обозначается точкой. Затем определяется точка, соответствующая среднему значению всех параметров, и для каждого образца рассчитывается расстояние до этой точки. Предварительно, до поиска среднего элемента, должны быть отсеяны выбросы, в том числе заведомо нерабочие элементы, поскольку они будут искажать среднее значение.

В работе [1] предлагается выбрать ключевые параметры полевого транзистора (крутизна, ток стока в насыщении, напряжение отсечки или граничная частота усиления и другие) и составить из них характеризующую матрицу параметров для каждого образца в партии. Затем нужно рассчитать среднюю характеризующую матрицу и отклонение каждого образца от средней матрицы. Группа, имеющая наибольшее отклонение от среднего, убирается из выборки, и процедура повторяется пока не останется только одна группа транзисторов, которые и будут типовыми. Также есть примеры реализации алгоритмов в коммерческих САПР. Например, в программе *Wafer Pro* (компания *Keysight*) реализованы алгоритмы расчета ключевых параметров элемента, отклонения от среднего значения и расчет параметра, определяющего близость к типовому значению [4]. В программном продукте *Sprayn* (компания *SILVACO*) на основе выбранных параметров элемента рассчитывается расстояние Минковского до среднего значения, а на выходе программы выдается заданное пользователем число образцов с наименьшим расстоянием [5]. Для цифровых транзисторов эта задача также актуальная, хотя и имеет свои особенности. После сбора статистики по партии транзисторов отбираются, как правило, транзисторы для трех случаев – типовой, наиболее и наименее быстродействующий. Затем эти параметры используются для статистического моделирования цифровой схемы [6]. В кремниевой электронике также предварительная версия модели может быть получена путем численного моделирования для предварительной оценки параметров интегральной схемы. Однако коммерческая версия модели, представленная в библиотеке базовых элементов (англ. *process design kit*) производителя, обязательно разрабатывается на основе измерений выбранного

эталонного элемента на эталонной подложке, которые задают также целевые характеристики для последующего контроля технологического процесса [3].

В СВЧ-технике инженеру чаще приходится иметь дело не с одним параметром, а с частотной характеристикой. Наиболее широко используются частотные зависимости параметров рассеяния (S -параметров). Частотные характеристики также можно использовать для решения рассматриваемой задачи, но они представляют собой набор однотипных данных и связаны с одной характеристикой, поэтому затруднительно представлять их как отдельные параметры и тем самым свести задачу к известным методам. Поэтому в данной работе рассматривается задача поиска репрезентативного полевого СВЧ-транзистора на основе его параметров и частотных характеристик.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Разработанная методика предназначена для поиска репрезентативного элемента по результатам измерений СВЧ рНЕМТ в линейном режиме. Типовое измерение СВЧ рНЕМТ в линейном режиме представляет собой получение матрицы S -параметров в одной рабочей точке. Также к основным малосигнальным параметрам транзистора относятся: коэффициент усиления по току $|H_{21}|$, максимальный коэффициент усиления по мощности $G_{\max}$, инвариантный коэффициент устойчивости K , которые рассчитываются из измеренных S -параметров. Предлагаемая методика позволяет выбрать репрезентативный элемент на основе измерений частотной характеристики S -параметров и дополнительно выбранных параметров элемента на постоянном токе. Алгоритм поиска репрезентативного элемента представлен на рис. 1.

На первом этапе происходит считывание S -параметров из имеющихся файлов с результатами измерений, расчёт малосигнальных параметров транзистора и формирование выборки



Рис. 1. Алгоритм поиска репрезентативного элемента

для работы алгоритма. В считываемом файле хранятся результаты измерений S -параметров транзистора в одной рабочей точке, а также параметры элемента на постоянном токе. После обработки всех образцов необходимо выбрать характеристики и указать частотный диапазон для поиска репрезентативного элемента. Поиск может совершаться с учетом следующих характеристик СВЧ-транзистора: модуль коэффициента отражения по входу $|S_{11}|$; модуль обратного коэффициента передачи $|S_{12}|$; модуль коэффициента усиления $|S_{21}|$; модуль коэффициента отражения по выходу $|S_{22}|$; фаза коэффициента отражения по входу $\text{Arg}(S_{11})$; фаза обратного коэффициента передачи $\text{Arg}(S_{12})$; фаза коэффициента усиления $\text{Arg}(S_{21})$; фаза коэффициента отражения по выходу $\text{Arg}(S_{22})$; коэффициент усиления по току $|H_{21}|$; максимальный коэффициент усиления по мощности $G_{\max}$; инвариантный коэффициент устойчивости K ; ток стока в измеренной рабочей точке I_{ds} .

После выбора характеристик и частотного диапазона начинается поиск репрезентативного элемента. На втором этапе поиска определяются и удаляются выбросы из полученной выборки. Для обнаружения выбросов используется подход, предложенный Тьюки [7]. Этот подход является общепринятым в описательной статистике. Для его применения необходимо разбить все

имеющиеся данные на квартили. Квартили представляют собой значения из выборки, которые делят имеющиеся данные на четыре группы, содержащие приблизительно равное количество наблюдений. Таким образом, первый квартиль Q_1 – это значение, которое не превосходят 25 % элементов выборки, значение медианы Q_2 делит выборку пополам, а значение, большее, чем третий квартиль Q_3 , принимают только 25 % элементов выборки.

После нахождения значений квартилей необходимо определить интерквартильный размах IQR , который рассчитывается по следующей формуле:

$$IQR = Q_3 - Q_1.$$

После разбиения выборки все числа набора, лежащие между нижним и верхним квартилями, являются наиболее характерными значениями для выборки. А те числа, которые отклоняются от нижнего и верхнего квартилей не больше чем на полтора интерквартильных размаха, т. е. удовлетворяют неравенству $f_* \leq x < Q_1$, где $f_* = Q_1 - 1,5 \cdot IQR$, или неравенству $Q_3 < x \leq f^*$, где $f^* = Q_3 + 1,5 \cdot IQR$, не столь характерны, но должны учитываться как значимые, так как их отклонения от типичных значений не очень большие. Соответственно числа, которые отклоняются от нижнего и верхнего квартилей больше чем на полтора интерквартильных размаха, т. е. удовлетворяют неравенству $x < f_*$ или неравенству $x > f^*$, следует считать выбросами.

Данный подход используется для того, чтобы найти выбросы в каждой частотной точке выбранного диапазона для всех выбранных характеристик. Проверка на выбросы происходит независимо для каждой характеристики и каждой частотной точки. Образец с измерениями считается выбросом, если для одной и более характеристик обнаружено, что более 5 % частотных точек были определены как выбросы.

На третьем этапе, после удаления выбросов, происходит расчет среднего значения параметра на каждой частотной точке для каждой из характеристик. Далее определяется отклонение значения измеренной характеристики от среднего значения:

$$D[X]_i = |X_i - \bar{X}|,$$

где X_i – текущее значение характеристики в исследуемой частотной точке; $\bar{X}$ – среднее значение характеристики в исследуемой частотной точке.

Так как величины некоторых характеристик несопоставимы друг с другом, значения отклонений от среднего подвергаются процедуре нормировки. Был использован метод линейной нормировки. Данный метод позволяет привести значения отклонений результатов по выборке в диапазоне от 0 до 1. Здесь нулевое значение соответствует наиболее близкому измерению к среднему, а единичное значение – наиболее отдалённому от среднего. Формула для нормировки имеет следующий вид:

$$\tilde{D}[X]_i = \frac{D[X]_i - D[X]_{\min}}{D[X]_{\max} - D[X]_{\min}},$$

где $D[X]_{\min}$, $D[X]_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значение отклонения характеристики в исследуемой частотной точке; $D[X]_i$ – абсолютное значение отклонения характеристики в исследуемой частотной точке; $\tilde{D}[X]_i$ – нормированное значение отклонения в исследуемой частотной точке.

После нормировки всех значений отклонения рассчитывается нормированное отклонение значения для каждого измерения по следующей формуле:

$$Err_i = \sum_{c=1}^N \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{D}[X]_{jc} \right),$$

где Err_i – нормированное суммарное усреднённое отклонение для i -го образца; N – количество характеристик, выбранных для поиска; n – количество частотных точек в выбранном частотном диапазоне.

На четвертом этапе выбирается образец с минимальным значением нормированного суммарного усреднённого отклонения, который и является репрезентативным для исследуемой выборки.

3. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ

Проверка предложенной методики поиска репрезентативного элемента была проведена на данных, полученных с помощью методов математического моделирования. Основная идея вычислительного эксперимента заключается в использовании выборки с заранее известным результатом. Такой подход позволит обнаружить ошибки в работе алгоритма, не связанные с входными данными.

Для верификации методики были подготовлены 1011 файлов с результатами моделирования S -параметров в диапазоне частот 0,1...50 ГГц. В качестве базового элемента использовался рНЕМТ с шириной затвора 4×50 мкм. Моделирование S -параметров проводилось при помощи линейного анализа эквивалентной схемы (ЭС) малосигнальной модели транзистора. Для имитации технологического разброса были сгенерированы 1000 образцов, их значения элементов ЭС изменялись случайно по нормальному закону в пределах 15 % от значения элементов базового элемента. Для моделирования выбросов были сгенерированы 10 образцов, их значения элементов ЭС малосигнальной модели изменялись случайно более чем на 80 % относительно базового элемента.

По результатам работы программы в качестве репрезентативного был обнаружен базовый элемент, 161 образец был определен как выбросы. Все 10 образцов, сгенерированных с большим отклонением от базового, также были определены как выбросы. Дополнительные 151 образец, определённые как выбросы, объясняются, по-видимому, тем, что при данных параметрах распределения сложно получить результаты, близкие друг к другу во всем частотном диапазоне. При этом выбросы составляют всего 15 % от выборки и большинство образцов расположены довольно близко к среднему значению во всем диапазоне, что дополнительно уменьшает дисперсию и повышает количество выбросов. В силу того что выборка содержит большое количество образцов, для представления результатов в таблице записаны диапазоны значений суммарного усредненного отклонения и количество образцов из выборки в данных диапазонах.

**Диапазоны суммарного усреднённого отклонения
для всей выборки**

Позиция	Количество образцов	Значение Err
1	1	0,11
2	1	0,82
3	1	0,88
4 – 120	117	1 – 2

Окончание таблицы

Позиция	Количество образцов	Значение Err
121 – 407	287	2 – 3
407 – 682	276	3 – 4
683 – 814	132	4 – 5
815 – 846	32	5 – 6
847 – 849	3	6 – 7
850 – 1011	161	Выброс

На рис. 2...4 изображены графики некоторых параметров рассеяния исследуемой выборки. Слева изображены измерения до удаления выбросов из выборки (пунктиром отмечены кривые, соответствующие выбросам), справа – измерения после удаления выбросов из выборки (жирным обозначена кривая, соответствующая репрезентативному элементу). Из-за большого количества образцов в выборке, на графиках отображена только часть из них.

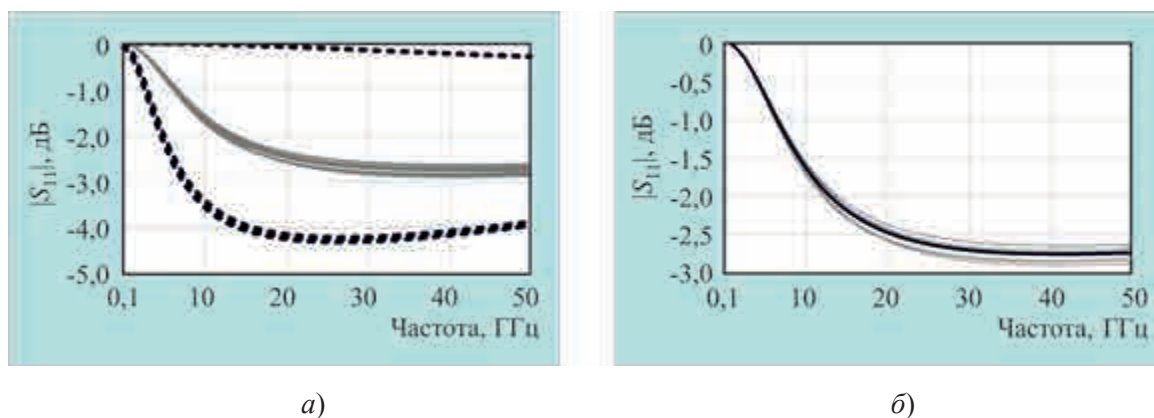


Рис. 2. Частотная зависимость $|S_{11}|$ для исследуемой выборки:
а – до удаления выбросов; б – после удаления выбросов

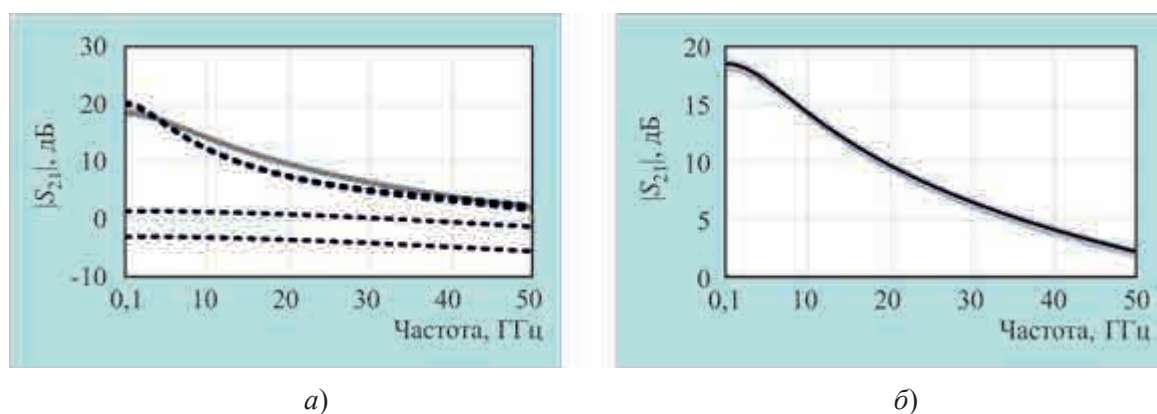


Рис. 3. Частотная зависимость $|S_{21}|$ для исследуемой выборки:
а – до удаления выбросов; б – после удаления выбросов

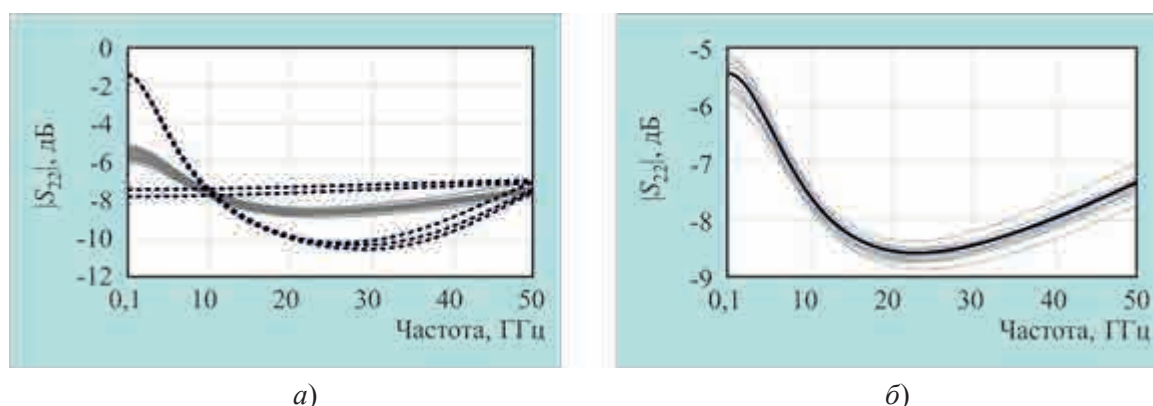


Рис. 4. Частотная зависимость $|S_{22}|$ для исследуемой выборки:

а – до удаления выбросов; б – после удаления выбросов

Как видно из представленных выше графиков, измерения, которые сильно отклоняются от основной группы, определились как выбросы.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что алгоритм по поиску репрезентативного элемента работает корректно. Это подтверждается тем, что по результатам работы программы найденный репрезентативный элемент соответствует заведомо известному репрезентативному элементу. Также в ходе работы алгоритма были обнаружены и удалены все выбросы в исходной выборке. Время работы алгоритма в данной задаче составляет 60 с.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ В НАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

После верификации методики на данных численного моделирования можно приступить к применению ее в натурном эксперименте. Применение разработанной методики в рамках данной статьи проводилось для поиска репрезентативного элемента из выборки измерений СВЧ рНЕМТ, изготовленных на основе GaAs с общей шириной затвора 4×40 мкм, в рабочей точке $U_{\text{си}} = 3$ В, $U_{\text{зи}} = -0,5$ В. Выборка состояла из измерений 78 транзисторов с одной пластины. Данные измерения были проведены в диапазоне частот 0,1...50 ГГц, количество частотных точек составляло 401. Поиск проводился по всем описанным во втором разделе характеристикам в частотном диапазоне 0,1...30 ГГц. Время работы алгоритма по поиску репрезентативного элемента с описанным количеством входных данных составило 10 с. В результате работы алгоритма 38 образцов были определены как выбросы, среди оставшихся образцов был отобран репрезентативный элемент. Данная задача также была решена разработчиком вручную. Репрезентативные элементы, выбранные автоматически и вручную, отличаются: элемент, выбранный разработчиком, имеет значение нормированного суммарного усреднённого отклонения больше, чем у трёх элементов в рассматриваемой выборке.

Для сравнения: разработчику для решения такой задачи потребовалось более двадцати минут, что на два порядка больше, чем время работы алгоритма. Также стоит отметить, что алгоритм рассматривает одновременно двенадцать характеристик на всех частотных точках, в то время как разработчик не может одновременно сравнивать такое количество характеристик. Зачастую перед разработчиком стоит задача обработать измерения транзисторов в среднем с 4...6 пластин, на каждой пластине находятся транзисторы различных периферий, в среднем восемь различных значений периферий. Для каждой из периферий – до восьмидесяти измерений. При



масштабировании данной задачи время, затрачиваемое на поиск репрезентативного элемента вручную, увеличивается, это связано с потерей концентрации и накапливающейся усталостью разработчика, что также может влиять на точность результатов выбора разработчика. В случае использования предлагаемой методики время на выполнение поставленных задач зависит только от количества входных данных и с масштабированием задачи поиск репрезентативного элемента будет осуществляться без потери точности. Принимая во внимание тот факт, что участие разработчика в данном процессе ограничивается только настройкой алгоритма, во время поиска репрезентативного элемента разработчик может решать другие поставленные перед ним задачи.

5. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВЫБРАННОГО РЕПРЕЗЕНТАТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

После нахождения репрезентативного элемента проводилось построение малосигнальной модели транзистора. Для этого была использована методика, описанная в [8]. Данная методика позволяет построить малосигнальную модель, используя аналитические вычисления и не прибегая к процедуре оптимизации. Для моделирования шумовых характеристик использовалась модель Поспешальского [9]. В предложенной им модели моделирование шумов осуществляется за счёт определения эквивалентной шумовой температуры для сопротивлений, находящихся в цепи стока T_d и цепи затвора T_g . Эквивалентная схема малосигнальной шумовой модели представлена на рис. 5.

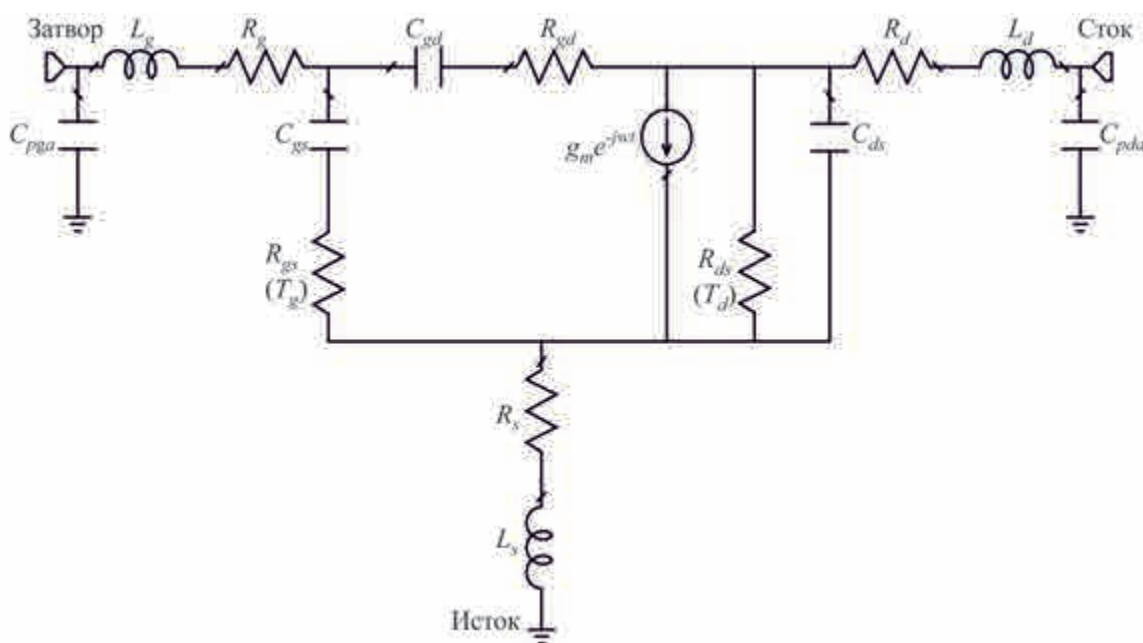


Рис. 5. Эквивалентная схема малосигнальной шумовой модели

Стоит отметить, что перед построением шумовой модели к измерениям коэффициента шума в тракте 50 Ом была применена процедура сглаживания данных [10]. Результаты моделирования и измерений представлены на рис. 6.

При сравнении результатов измерений и моделирования параметров рассеяния было установлено, что максимальное значение ошибки моделирования параметров рассеяния в каждой рабочей точке не превышает 0,5 дБ по модулю и 7 град по фазе в диапазоне частот 0,1...50 ГГц.

Хорошее совпадение результатов измерений и моделирования подтверждает, что построенные малосигнальные шумовые модели могут использоваться при проектировании СВЧ малошумящих усилителей (МШУ).

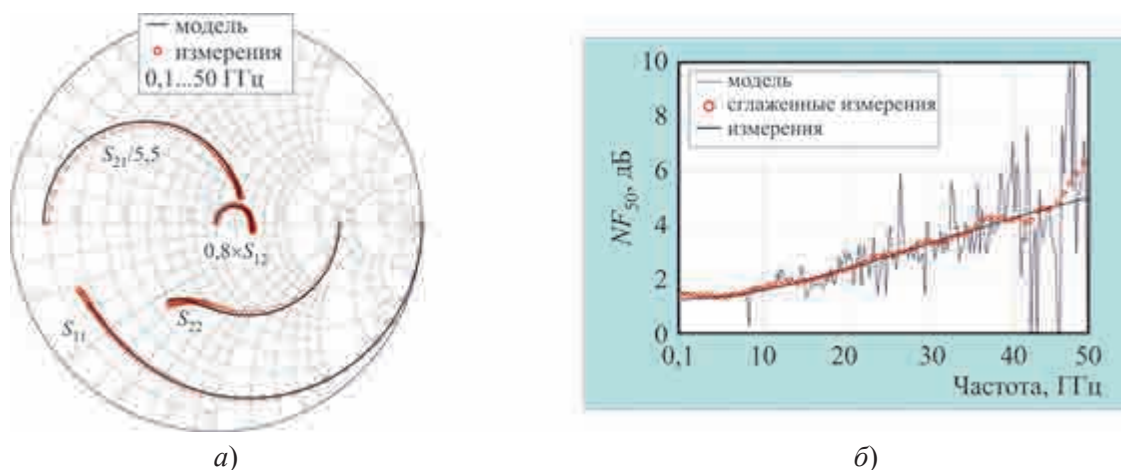


Рис. 6. Результаты измерений и моделирования параметров рассеяния и шумовых параметров в рабочей точке $U_{си} = 3$ В, $U_{зи} = -0,5$ В

Построенная модель использовалась для проектирования МШУ, обеспечивающего коэффициент усиления более 12 дБ и коэффициент шума менее 3 дБ в диапазоне 17...24 ГГц. Подробное описание построения модели СВЧ-транзистора, требования к проектируемому МШУ, электрическая схема и полученные характеристики описаны в [11]. Далее было проведено изготовление усилителя и измерение его параметров. Основные измеренные СВЧ-характеристики полученной тестовой МИС и результаты моделирования приведены на рис. 7.

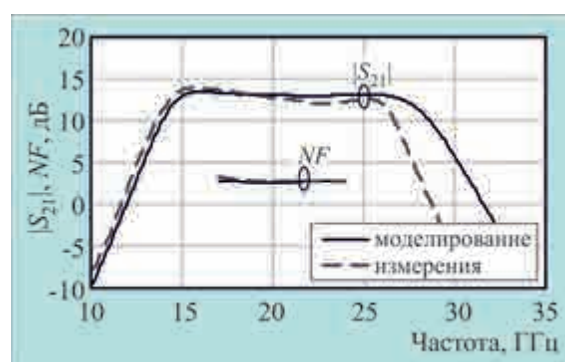


Рис. 7. Результаты моделирования и измерений СВЧ-характеристик МШУ диапазона частот 17...24 ГГц

Из рис. 7 видно, что в заданной полосе частот коэффициенты усиления и шума достаточно хорошо совпадают. Коэффициент усиления $|S_{21}|$ отличается от модельных данных не более чем на 1,2 дБ, а коэффициент шума – на 0,3 дБ. Изготовленный МШУ соответствует техническим требованиям, заданным на этапе проектирования, что свидетельствует о правильности выбора репрезентативного элемента и о точности построения малосигнальной шумовой модели.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика автоматического определения репрезентативного элемента была верифицирована на результатах численного моделирования с заранее известным результатом. Результат верификации показал, что методика точно определяет выбросы в выборке и производит поиск репрезентативного СВЧ-транзистора. Методика работает в автоматическом режиме и позволяет определять репрезентативный элемент одновременно по набору его частотных характеристик и параметров на постоянном токе; время работы на 1011 образцах составляет 60 с, что существенно меньше времени, затрачиваемого при решении задачи вручную. Также методика была использована на результатах измерений СВЧ-транзисторов. Выбранный по предложенной методике СВЧ-транзистор применялся для построения малосигнальной шумовой модели, которая в дальнейшем использовалась для проектирования малощумящего усилителя, работающего в диапазоне частот 17...24 ГГц. Совпадение результатов моделирования и измерений характеристик полученного усилителя свидетельствует о правильности выбора репрезентативного СВЧ-транзистора для построения модели.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Городецкий, А. Ю.** Принцип создания масштабируемых моделей транзисторов на основе наногетероструктур / А. Ю. Городецкий, К. В. Дудинов, А. М. Емельянов, У. Ю. Днестранская // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2012. – № 1 (512). – С. 84 – 94.
2. **Silveira, M. L.** VLSI: system on a chip / M. L. Silveira, S. Devadas, R. Reis // *Tenth International Conference on Very Large Scale Integration*. – Lisboa, Portugal. – 1999. – P. 675.
3. **Saha, S. K.** Compact models for integrated circuit design. Conventional transistors and beyond / S. K. Saha // *CRC Press*. – 2016. – 527 p.
4. **Sischka, F.** IC-CAP modeling handbook / F. Sischka // *Agilent Technologies*. – 2010. – 828 p.
5. **Friedman, H.** An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time / H. Friedman, J. L. Bentley, R. A. Finkel // *ACM Transactions on Mathematical Software*. – 1977. – Vol. 3, No 3. – P. 209 – 226.
6. **Saha, S. K.** Modeling process variability in scaled CMOS technology / S. K. Saha // *IEEE Design & Test of Computers*. – 2010. – Vol. 27, No 2. – P. 8 – 16.
7. **Tukey, J. W.** Exploratory data analysis / J. W. Tukey // *Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co.* – 1977. – 711 p.
8. **Добуш, И. М.** Разработка методик и программного обеспечения для автоматического построения моделей базовых элементов СВЧ монолитных интегральных схем / И. М. Добуш и др. // *Наноиндустрия*. – 2019. – № S89. – С. 453 – 462.
9. **Pospieszalski, M. W.** Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence / M. W. Pospieszalski // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 1989. – Vol. 37, No 9. – P. 1340 – 1350.
10. **Билевич, Д. В.** Исследование алгоритмов сглаживания для предварительной обработки результатов измерений коэффициента шума СВЧ-транзистора при построении малосигнальной шумовой модели / Д. В. Билевич и др. // *Вестник РГРТУ*. – 2020. – № 71. – С. 34 – 44.
11. **Попов, А.** A combined technique for amplifier oriented small-signal noise model extraction / A. Popov et al. // *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.* – 2020. – Vol. 30, No 9. – P. 1 – 12.

Статья поступила 24 августа 2020 г.

ЭКОНОМИКА

УДК 338.242

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОСОБЫМИ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ ТЕХНИКО-ВНЕДРЕНЧЕСКОГО ТИПА

М. В. Чекаданова¹, А. Д. Бобрышев²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

²ФГУП «ВНИИ «Центр», г. Москва

Приводятся результаты исследования практики создания и организации управления особыми экономическими зонами технико-внедренческого типа (ОЭЗ ТВТ). Отмечены проблемы, возникающие при формировании системы управления и организации финансирования управляющих компаний. Предложена авторская позиция в отношении структуры, состава функций и источников финансирования элементов системы управления ОЭЗ ТВТ.

КС: особая экономическая зона технико-внедренческого типа, система управления, финансирование, управляющая компания, наблюдательный совет, резидент

IMPROVING THE MANAGEMENT OF SPECIAL ECONOMIC ZONES OF TECHNICAL AND IMPLEMENTATION TYPE

M. V. Chekadanova¹, A. D. Bobryshev²

¹JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

²FGUP «VNII «Center», Moscow

The article presents the results of a study of the practice of creating and managing special economic zones of technical and implementation type (TVT SEZ). The problems that arise in the formation of the management system and organization of financing of management companies are noted. The author's position on the structure, composition of functions and sources of financing the elements of the TVT SEZ management system is proposed.

Keywords: special economic zone of technical and implementation type, management system, financing, management company, Supervisory Board, resident

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно разделу 1 «Приоритеты и цели государственной политики, в том числе общие требования к государственной политике субъектов Российской Федерации» Государственной программы Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика» [1], одним из таких приоритетов является *формирование и совершенствование эффективной системы управления особыми экономическими зонами (ОЭЗ)*, которые создаются в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации «Об особых экономических зонах» [2].

Сегодня в стране функционируют семь ОЭЗ технико-внедренческого типа (ОЭЗ ТВТ), главное отличие которых состоит в реализуемой технико-внедренческой деятельности, под «которой понимаются инновационная деятельность, создание, производство и реализация научно-технической продукции, создание и реализация программ для электронных вычислительных машин (программ для ЭВМ), баз данных, топологий интегральных микросхем, информационных систем, оказание услуг по внедрению и обслуживанию таких продукции, программ, баз данных, топологий и систем, а также предоставление резидентам ОЭЗ ТВТ услуг инновационной инфраструктурой, необходимой для осуществления их деятельности» [2, п. 2 ст. 10]. Перечень и специализация этих зон приведены в табл. 1.

Таблица 1

Приоритетные направления деятельности ОЭЗ ТВТ

Название	Статус	Приоритетные направления деятельности
ОЭЗ «Дубна»	Действующая	– информационные технологии – ядерно-физические и нанотехнологии – био- и медицинские технологии – композиционные материалы – проектирование сложных технических систем
ОЭЗ «Санкт-Петербург»	Действующая	– информационные технологии и телекоммуникации – фармацевтика и медицинские технологии – энергоэффективность – точное приборостроение
ОЭЗ «Технополис «Москва»	Действующая	– микроэлектроника – энергосберегающие технологии – биотехнологии и фармацевтика – информационные и коммуникационные технологии – машиностроение – нанотехнологии
ОЭЗ «Томск»	Действующая	– информационные технологии и электроника – нанотехнологии и новые материалы – медицина и биотехнологии – ресурсосберегающие технологии
ОЭЗ «Иннополис» (Татарстан)	Действующая	– информационно-коммуникационные технологии – электронные технологии – нанотехнологии – биотехнологии – медицинские технологии
ОЭЗ «Исток» (Фрязино)	Действующая	– СВЧ-электроника – фотоника и лазерное приборостроение – проектирование сложных технических систем
ОЭЗ Саратовской области	Вновь созданная	– микроэлектроника (в том числе для нужд энергетического машиностроения) – радиоэлектроника (для нужд оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации, аэрокосмической, энергетической и газовой отраслей) – электрохимическая промышленность – кабельная промышленность

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Законом [2] определены примерный состав элементов и функции системы управления ОЭЗ ТВТ. Ее образуют:

- уполномоченный Правительством Российской Федерации орган исполнительной власти, ответственный за разработку единой государственной политики в сфере создания и функционирования ОЭЗ ТВТ и управление ими. Сегодня эту роль исполняет Минэкономразвития России;
- орган исполнительной власти субъекта Российской Федерации, которому могут быть переданы отдельные полномочия по управлению ОЭЗ ТВТ;
- наблюдательный совет ОЭЗ ТВТ, координирующий деятельность органов управления зоны, в который, как правило, входят представители уполномоченного Правительством Российской Федерации федерального органа исполнительной власти, исполнительного органа государственной власти субъекта Российской Федерации; исполнительно-распорядительного органа муниципального образования; управляющей компании; резидентов ОЭЗ и иных организаций, в том числе вузов и НИИ, расположенных на территории, где размещается ОЭЗ ТВТ;
- управляющая компания, которой, помимо закрепленных за ней функций, могут быть также переданы отдельные полномочия по управлению ОЭЗ ТВТ.

В начальный период создания особых экономических зон практически вся полнота полномочий по управлению ими была сосредоточена в Минэкономразвития России. В частности, министерство регистрировало резидентов и вело их реестр; обобщало результаты функционирования ОЭЗ ТВТ; контролировало исполнение резидентами соглашений о технико-внедренческой деятельности; выполняло функции государственного заказчика по подготовке документации по планировке территории и созданию инфраструктуры; управляло недвижимостью и сдавало ее в аренду; получало технические условия подключения (технологического присоединения) к сетям инженерно-технического обеспечения... То есть во многом выполняло функции хозяйственного руководства, не свойственные федеральному органу исполнительной власти.

По мере накопления опыта функционирования ОЭЗ ТВТ часть функций, согласно закону, передавалась на уровень субъектов Федерации. Например, в соответствии с приказом Минэкономразвития от 6.07.2020 № 401, Правительству Саратовской области делегированы следующие полномочия: ведение реестра резидентов ОЭЗ ТВТ; выдача по требованиям резидентов ОЭЗ ТВТ или по запросам заинтересованных лиц выписки из реестра; заключение соглашений об осуществлении технико-внедренческой деятельности и осуществление контроля за их исполнением резидентами; выполнение функций государственного заказчика по подготовке документации; обеспечение проведения экспертизы проектной документации и экспертизы результатов инженерных изысканий [3]. Тем самым решение большинства вопросов организации и управления деятельностью резидентов ОЭЗ ТВТ передано структурам на уровень непосредственного управления социально-экономическим развитием территории, администрация которого максимально владеет ситуацией в регионе.

На этапе становления ОЭЗ функции управляющей компании, в которые, согласно закону, входило: обеспечение создания и функционирования объектов инфраструктуры, привлечение резидентов и инвесторов, а также разработка проекта планировки ОЭЗ, преимущественно были возложены на специально созданное Правительством Российской Федерации АО «Особые экономические зоны» [4]. В его владении находились пакеты акций АО, в статусе которых создавались ОЭЗ различного типа: «Моглино», «Титановая долина», «Иннополис», «Алабуга»,

«Калуга», «Лотос», «Зеленоград», «Липецк», «Санкт-Петербург», «Томск», «Дубна», «Ульяновск», «Тольятти», «Иркутск», «Бирюзовая Катунь». Создание новых ОЭЗ происходило с учреждением управляющих компаний уже на иных принципах. Например, согласно выпискам из Единого государственного реестра юридических лиц, АО «УК ОЭЗ «Исток» учреждено якорным резидентом одноименной зоны, учредителями ООО «Управляющая компания Ступино Квадрат» являются физические лица и т. д. Уникальное пока решение принято при формировании органов управления ОЭЗ Саратовской области – для выполнения функций управляющей компании ОЭЗ приглашена действующая управляющая компания иной ОЭЗ (АО «УК ОЭЗ «Исток»), которая имеет положительный опыт работы. Одновременно с Саратовской областью ОЭЗ созданы в Нижегородской области (ОЭЗ «Кулибин») и в Республике Башкортостан (ОЭЗ «Алга»). В этих зонах функции управляющей компании выполняют региональные корпорации развития – одни из наиболее значимых институтов развития на уровне субъектов Федерации в России.

По мере накопления опыта функционирования ОЭЗ Правительством Российской Федерации принято решение о передаче функций управляющих компаний вместе с пакетами акций АО на уровень субъектов Федерации [5]. Вместе с тем объем этих функций не изменился и остается в минимальных пределах, определенных законом [2], добавлена лишь функция обобщения и информирования Минэкономразвития России о показателях эффективности функционирования ОЭЗ [6]. Подобное положение дел следует, очевидно, объяснить стремлением органов государственного управления на федеральном и региональном уровнях все-сторонне контролировать расходование средств государственного и регионального бюджетов на создание инфраструктуры ОЭЗ. Однако, во-первых, инфраструктура не всех ОЭЗ создается за счет бюджетных средств (ОЭЗ «Исток», ОЭЗ Саратовской области, ОЭЗ «Ступино Квадрат»), во-вторых, конечная цель ОЭЗ ТВТ заключается в создании новых, высоко результативных условий для наращивания выпуска промышленной продукции и создания новой техники и не исчерпывается фактом наличия инфраструктуры. Ее и так в пределах промышленных, научно-производственных предприятий и НИИ было создано предостаточно.

Весь смысл ОЭЗ ТВТ заключается в задействовании ранее не применявшихся рыночных механизмов территориальной концентрации производства и организации управления, которые обеспечивают синергию совместного размещения и взаимодействия промышленных предприятий, специализированных инфраструктурных компаний, НИИ, вузов и иных участников научно-производственного процесса. А получение такой синергии требует участия специализированных компаний, способных организовать деятельность научно-промышленного комплекса на новых, ранее не применявшихся на практике принципах, – управляющих компаний ОЭЗ ТВТ. Для этого им необходимы иные, более широкие, нежели вышеперечисленные, компетенции и, самое главное, ясно определенные источники финансирования их деятельности.

Сегодня управляющая компания ОЭЗ строго подотчетна Минэкономразвития России по широкому кругу показателей, характеризующих деятельность возглавляемой ею ОЭЗ ТВТ. Например, Соглашение об управлении ОЭЗ ТВТ Саратовской области таких показателей насчитывает 22. Причем п. 5.6 этого Соглашения предусмотрено, что «финансирование создания, содержания и эксплуатации объектов инфраструктуры ОЭЗ, указываемых в Перечне объектов инфраструктуры, осуществляется за счет средств управляющей компании, а также иных внебюджетных источников финансирования» [6]. Однако указаний на то, откуда образуются эти немалые «средства управляющей компании», ни в одном из нормативных документов в отношении ОЭЗ встретить не удалось. В этой ситуации на практике управляющим компаниям при-

ходится импровизировать при решении данной проблемы. В одних случаях их работа оплачивается за счет средств якорного резидента, в других – в сметах на создание инфраструктуры закладываются расходы на содержание управляющей компании, в третьих – эти компании существуют за счет отчислений резидентов и т. д.

Следует заметить, что вопрос финансирования управляющих компаний не решен и в новом законопроекте «О внесении изменений в Федеральный закон «Об особых экономических зонах в Российской Федерации» и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», который проходит в настоящее время обсуждение, в том числе и с руководителями управляющих компаний ОЭЗ ТВТ. В проекте закона по-прежнему не определены источники доходов управляющих компаний при управлении особыми экономическими зонами. В соответствии с Соглашением об управлении ОЭЗ [7], управляющим компаниям были переданы полномочия по управлению ОЭЗ ТВТ и на них возложены обязанности финансирования создания, содержания и эксплуатации объектов инфраструктуры ОЭЗ ТВТ. Передача земельных участков в управление также влечет за собой необходимость разработки концепции использования земельных участков, проектно-сметной документации, поиска инвесторов, проведения конкурсов для выбора контрагентов, инвесторов, поиска резидентов ОЭЗ ТВТ и т. д. Однако данная работа должна выполняться за счет средств управляющих компаний, источники финансирования которых законодательно не определены, хотя их деятельность жестко регламентируется.

Установленный законом [2] статус резидентов и инвесторов ОЭЗ предоставляет им режим наибольшего благоприятствования, но совершенно не обеспечивает материальными ресурсами управляющие компании, которые лишены возможности ответственно исполнять возложенные на них функции. Для устранения возникших проблем представляется целесообразным внесение соответствующих изменений в действующее законодательство, регулирующее функционирование ОЭЗ, в части определения порядка финансирования управляющих компаний за счет средств федерального или регионального бюджета, средств резидентов и инвесторов, иных источников финансирования, оплаты арендаторами и резидентами расходов, необходимых для выполнения управляющими компаниями своих функций. Следует отметить, что данная проблема успешно решена на уровне управляющих компаний в сфере ЖКХ, которые имеют возможность получения компенсации своих затрат за счет средств собственников жилья.

Кроме того, целесообразно предоставить право управляющим компаниям контролировать исполнение заключенных договоров аренды земельных участков и объектов недвижимости путем получения арендной платы резидентов непосредственно на счет управляющей компании, с дальнейшим перечислением этих средств в доход бюджета и удержанием их части на цели финансирования работы управляющей компании. Без решения на законодательном уровне этой проблемы результативное функционирование управляющих компаний в ОЭЗ не представляется возможным, а соответственно и исполнение ими функций по управлению ОЭЗ, что приведет в дальнейшем к потере темпов развития ОЭЗ ТВТ в Российской Федерации.

В отношении состава функций и задач управляющих компаний мировая практика показывает, что наиболее востребованными направлениями деятельности органов оперативного управления кластерами, создаваемыми на принципах ОЭЗ ТВТ, являются: формирование идентичности и бренда (англ. identity and brand); определение видения и стратегии (англ. strategy and vision); инновации, исследования и разработки (англ. innovation and R&D); формирование предпринимательской среды (англ. business environment); привлечение инвестиций и развитие

(англ. growth and investment); обновление персонала (англ. HR upgrading); содействие экспорту (англ. export promotion); развитие производственно-сбытовых цепочек (англ. value chain development); подбор персонала (англ. HR supply); централизованное снабжение (англ. joint purchasing). На рис. 1 приведены оценки востребованности этих направлений деятельности.

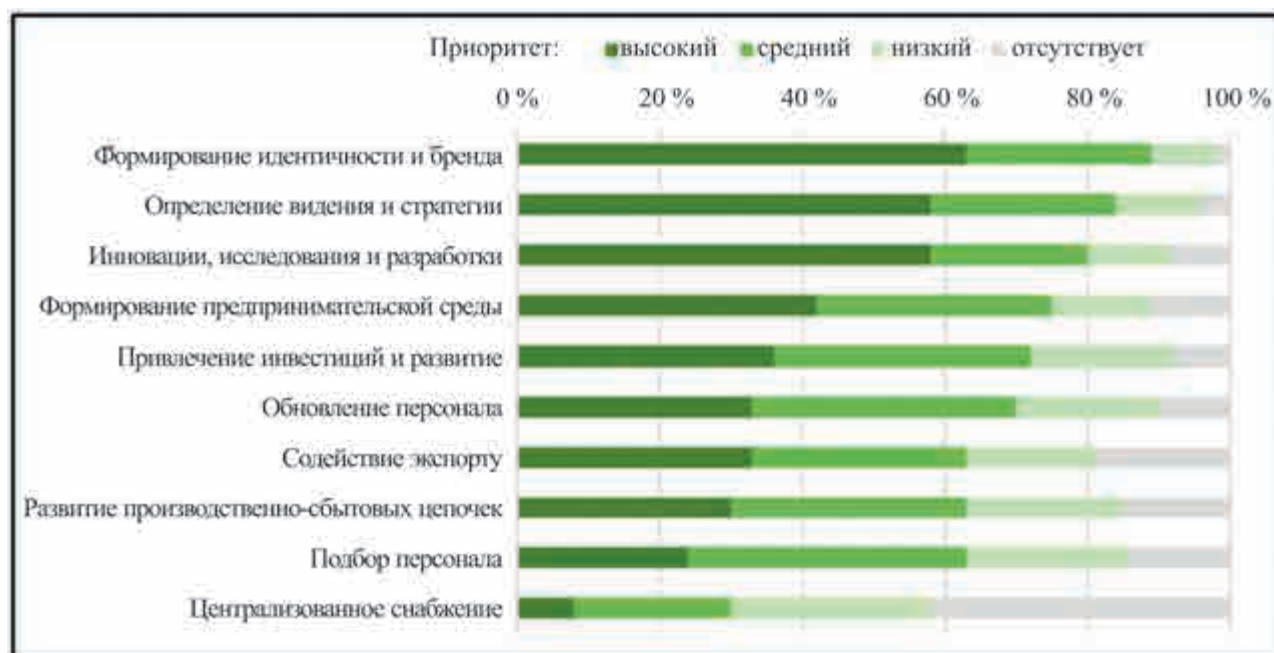


Рис. 1. Популярные направления деятельности органов управления территориально-отраслевыми структурами за рубежом [8]

Практика работы российских высокотехнологичных кластеров и ОЭЗ дает иное распределение приоритетов и востребованности услуг органов управления этими структурами (рис. 2), хорошо иллюстрирующее особенности современного (начального) этапа развития исследуемых организационно-экономических систем в России. Первое, что нужно отметить, – это острота потребности в инвестициях, второе – безоговорочный приоритет отношений с властью (у зарубежных аналогов его вообще нет) и третье – дефицит подготовленных специалистов. Еще один вывод: отечественных участников кластеров и ОЭЗ ТВТ не сильно заботит собственная стратегическая перспектива, ее видению они отводят явно второстепенное место.

Анализ состава, структуры и функций систем управления ОЭЗ ТВТ и кластерами¹ показал, что их современное состояние не полностью обеспечивает решение наиболее востребованных проблем участников этих перспективных хозяйственных структур.

Из поля зрения администрации кластеров выпадает вопрос организации выполнения совместных проектов, ради которых они и создаются. В частности, в янтарном кластере Калининградской области таких глобальных проектов девять [10]. Нормативные документы, регла-

¹Исследовалась подготовительная работа и фактическое состояние дел в ОЭЗ ТВТ «Исток», ОЭЗ ТВТ Саратовской области, ОЭЗ ТВТ «Иннополис», Кластере горно-добывающей промышленности Республики Алтай, Горно-промышленном кластере «Курджиново» (Карачаево-Черкесская Республика), Горно-металлургическом кластере Белгородской области; Кластере авиа- и судостроения Хабаровского края; Пермском кластере волоконно-оптических технологий «Фотоника»; Калужском кластере фармацевтики, биомедицины и биотехнологии (г. Обнинск); Архангельском судостроительном кластере.

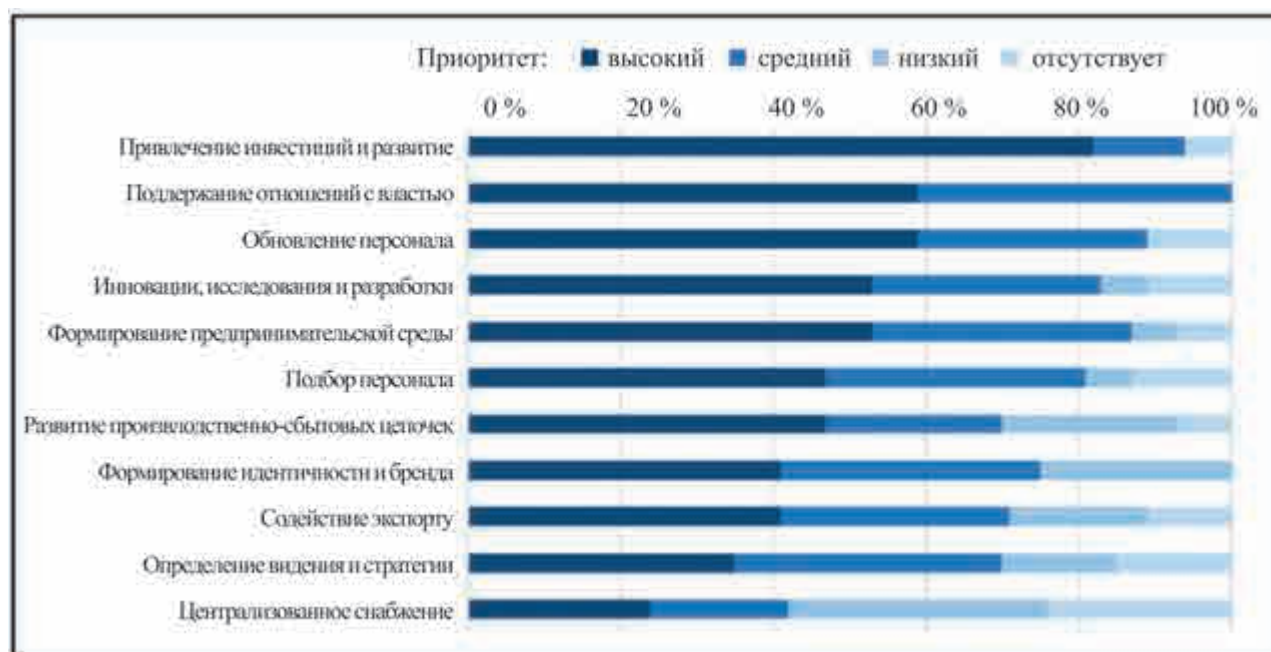


Рис. 2. Наиболее востребованные направления деятельности органов управления высокотехнологичными кластерами в России [9]

ментирующие деятельность системы управления кластером, в основном содержат задачи ее элементов, не раскрывая состав и содержательное распределение функций между ними. Штатная численность управляющей компании кластера зачастую не способна обеспечить выполнение поставленных перед ним задач. Например, устав Ассоциации янтарного кластера ставит перед ней 44 диаметрально различающиеся задачи: от конструкторско-инженерного сопровождения проектов до организации выставочно-ярмарочных мероприятий [11]. При этом в составе его специализированной организации – 3 человека [12], что явно недостаточно для их полноценного решения. Развивая подход, предложенный в «Методических рекомендациях по организации системы менеджмента управляющих компаний пилотных ИТК...» [13], можно предложить следующую конструкцию органов управления ОЭЗ ТВТ и кластерами и распределение функций между ними (рис. 3 и табл. 2).

Основной смысл рекомендаций сводится к трем главным идеям. Первая состоит в том, что если мы формируем систему управления ОЭЗ ТВТ, то необходимо и оперировать категориями теории управления при определении ее функций, а не направлениями деятельности того или иного органа. Вторая заключается в необходимости формального дополнения функций, выполняемых совещательно-руководящим органом (наблюдательный совет), обеспечивающим деятельность оперативно-управленческого органа (управляющая компания). И третья – в проектно-функциональном подходе к построению системы управления, адекватном задачам ОЭЗ ТВТ. В силу отсутствия отношений собственности в ОЭЗ, основной формой ее активности становится реализация проектов в интересах резидентов по направлениям, перечисленным на рис. 3.

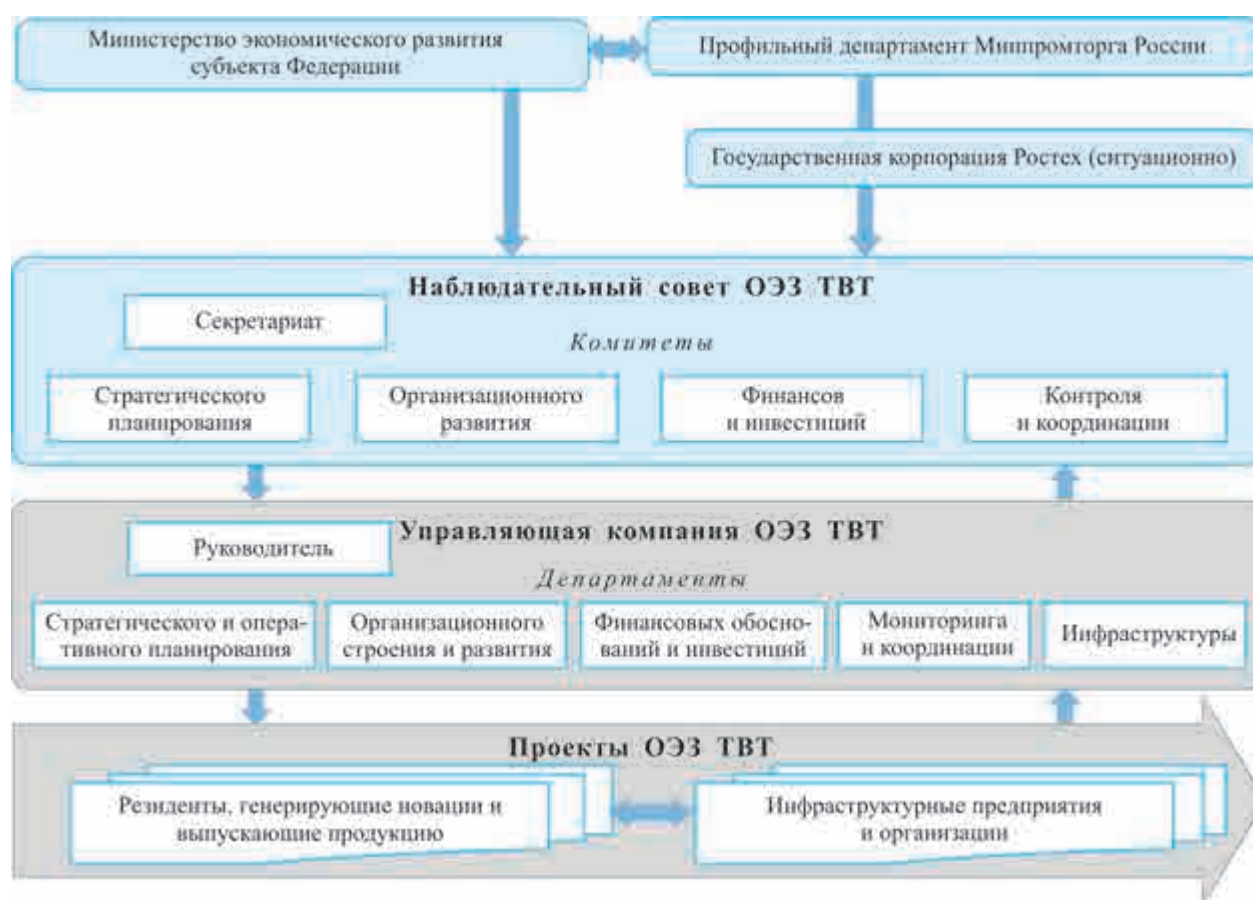


Рис. 3. Рекомендуемая организационная структура системы управления ОЭЗ ТВТ

Таблица 2

Рекомендуемые функции элементов системы управления ОЭЗ ТВТ

Орган управления	Содержание функций управления
Министерство экономического развития субъекта Федерации	Выполнение функций, предписанных законодательством об ОЭЗ
Профильный департамент Министерства промышленности и торговли России	Выполнение функций координации деятельности в отрасли промышленности, входящей в сферу ведения Департамента, в соответствии с Положением Министерства промышленности и торговли России
Государственная корпорация	Содействие разработке, производству и экспорту высокотехнологичной промышленной продукции путем обеспечения поддержки на внутреннем и внешнем рынках российских организаций – разработчиков и производителей высокотехнологичной промышленной продукции, в соответствии с Федеральным законом

Окончание таблицы

Орган управления	Содержание функций управления
Наблюдательный совет	• Выработка политики, экспертная оценка и утверждение стратегических решений о развитии кластера • Принятие решений по основным вопросам жизнедеятельности кластера, касающимся всех его участников • Утверждение регламентных документов кластера • Выполнение функций, предписанных законодательством об ОЭЗ
<i>Секретариат</i>	• Организация работы наблюдательного совета и его комитетов
<i>Комитет стратегического планирования</i>	• Экспертиза стратегических планов и проектов кластера
<i>Комитет организационного развития</i>	• Выработка рекомендаций о развитии бизнес-модели кластера
<i>Комитет финансов и инвестиций</i>	• Выработка рекомендаций об источниках финансирования и инвестиций в реализацию проектов кластера
<i>Комитет контроля и координации</i>	• Контроль и координация выполнения решений общего собрания участников и наблюдательного совета
Управляющая компания	• Реализация политики, стратегии и проектов кластера • Выполнение функций, предписанных законодательством об ОЭЗ
<i>Руководитель</i>	• Организация работы департаментов управляющей компании
<i>Департамент стратегического и оперативного планирования</i>	• Разработка стратегии, проектов и планов кластера (P)*
<i>Департамент организационного строения и развития</i>	• Организация выполнения проектов кластера (D)*
<i>Департамент финансовых обоснований и инвестиций</i>	• Привлечение финансирования и инвестиций в реализацию проектов кластера (D)*
<i>Департамент мониторинга и координации</i>	• Мониторинг организационного развития кластера (C)* • Подготовка материалов для принятия координирующих и корректирующих решений (C)* • Корректировка бизнес-модели кластера (A)*
<i>Департамент инфраструктуры</i>	• Развитие инфраструктуры кластера

* Такт цикла Деминга-Шухарта (P-D-C-A).

3. ВЫВОДЫ

Таким образом, как представляется, реализация рекомендаций исследования позволяет обозначить ключевые решения для построения научно обоснованной структуры системы управления ОЭЗ ТВТ и определения источников финансирования деятельности их управляющих компаний. Идеи статьи с некоторыми уточнениями могут быть использованы и для целей формирования органов управления инновационными промышленными кластерами [14], а также ОЭЗ иных помимо технико-внедренческого типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика». – Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 316 (в ред. постановления Правительства РФ от 31.03.2017 № 392).
2. **Российская Федерация. Законы.** Об особых экономических зонах в Российской Федерации: федер. закон РФ от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ (ред. на 03.07.2016).
3. О передаче Правительству Саратовской области отдельных полномочий по управлению особой экономической зоной технико-внедренческого типа, созданной на территориях Энгельсского, Балаковского муниципальных районов и муниципального образования «Город Саратов» Саратовской области. – Приказ Минэкономразвития России от 6.07.2020 № 401.
4. Об осуществлении от имени Российской Федерации прав акционера акционерного общества «Особые экономические зоны». – Постановление Правительства Российской Федерации от 5.08.2009 № 641.
5. Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по безвозмездной передаче имущества акционерного общества «Особые экономические зоны», 100 процентов акций которого принадлежит Российской Федерации, в собственность Российской Федерации и собственность субъектов Российской Федерации. – Распоряжение Правительства Российской Федерации от 4.10.2017 № 2155-р (ред. на 29.03.2019).
6. Соглашение об управлении особой экономической зоной технико-внедренческого типа, созданной на территориях Энгельсского, Балаковского муниципальных районов и муниципального образования «Город Саратов» Саратовской области. – Утв. Минэкономразвития России и АО «УК ОЭЗ «Исток» от 4.08.2020 № С-84-СГ/Д14.
7. Об утверждении примерной формы соглашения об управлении особой экономической зоной. – Приказ Минэкономразвития России от 6.04.2012 № 188 (с изменениями на 21.10.2019).
8. **Lindqvist, G.** The Cluster Initiative Greenbook 2.0 / G. Lindqvist, C. Ketels, Ö. Sölvell. – Stockholm. Ivory Tower Publishers, 2013. – С. 20.
9. **Куценко, Е. С.** Менеджмент и управление в российских пилотных инновационных кластерах / Е. С. Куценко. // Презентация на XV апрельской конференции Высшей школы экономики, 1 – 4 апреля 2014 г. – С. 26.
10. Программа развития янтарного промышленного кластера Калининградской области. – Утв. протоколом № 1 общего собрания членов Ассоциации «Кластер янтарной промышленности Калининградской области» от 04.06.2018 № 01-ос. – Калининград, 2018. – 94 с.
11. Устав Ассоциации «Кластер янтарной промышленности Калининградской области». – Утв. Общим собранием учредителей, протокол от 27.02.2018.
12. Реестр участников и инфраструктуры янтарного промышленного кластера Калининградской области. – URL: <https://www.amber-cluster.ru/upload/iblock/ded/dedfda4b7689bba707a9e654434381d7.pdf> (дата обращения 27.02.2019).
13. Система менеджмента для управляющих компаний инновационных территориальных кластеров Российской Федерации: научный отчет. – М.: НИУ ВШЭ и Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2014. – 250 с.
14. О промышленных кластерах и специализированных организациях промышленных кластеров. – Постановление Правительства Российской Федерации от 31.07.2015 № 779 (ред. на 2.08.2018).

Статья поступила 4 сентября 2020 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 51

СУММЫ КВАДРАТОВ ЦЕЛЫХ ЧИСЕЛ

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко, М. И. Сизоненко

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

Уравнение $t^2 = x^2 + y^2 + z^2$ в области целых положительных чисел имеет решение для любого нечетного $t > 5$ при различных числах x, y, z , ни одно из которых не равно 0. При этом сумма чисел $s = x + y + z$ совпадает с множеством нечетных чисел натурального ряда, кроме чисел вида 3^n . Доказано, что квадрат целого положительного четного числа, за исключением чисел вида 2^n , является суммой не более трех квадратов.

КС: теорема Лагранжа, трехквадратные числа, Диофантово уравнение $t^2 = x^2 + y^2 + z^2$, двух-квадратные числа

SUMS OF SQUARES OF INTEGERS

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, I. A. Balyko, M. I. Sizonenko

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

The equation $t^2 = x^2 + y^2 + z^2$ in the domain of positive integers has a solution for any odd $t > 5$ for various numbers x, y, z , none of which is equal to 0. Moreover, the sum of numbers $s = x + y + z$ coincides with a set of odd numbers of a natural series, except for numbers of the form 3^n . It is proved that the square of an even positive integer with the exception of numbers of the form 2^n is the sum of not more than three squares.

Keywords: Lagrange theorem, three-square numbers, Diophantine equation $t^2 = x^2 + y^2 + z^2$, two-square numbers

Сумма квадратов целых чисел на протяжении многих столетий привлекала внимание не только математиков. Возможно, это связано с тем, что в окружающем нас трехмерном пространстве квадрат расстояния между двумя точками равен сумме квадратов трех координат, а на плоскости квадрат расстояния равен сумме квадратов двух координат.

Кардинальный шаг в этом направлении теории чисел сделал великий французский математик Жозеф Луи Лагранж, в 1770 году (250 лет назад!) доказавший важную в теории чисел теорему [1, 2].

Теорема: каждое положительное целое число является суммой не более четырех квадратов.

Если ограничить число квадратов не четырьмя, а тремя, то суммы их квадратов уже не могут быть равны целым группам чисел натурального ряда: $8 \cdot k - 1$ (7, 15, 23, 31, 39, 47...); $4 \cdot (8 \cdot k - 1)$ (28, 60, 92, 156...); $16 \cdot (8 \cdot k - 1)$ (112, 240, 368...); $64 \cdot (8 \cdot k - 1)$ (448, 960...) и т. д. (табл. 1, где эти группы выделены жирным шрифтом).

Таблица 1

**Значения сумм не более трех квадратов
(в натуральном ряду чисел до 160)**

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	42	44	45	46	47	48	49
50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
60	61	62	63	64	65	66	67	67	68
70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
120	121	122	123	124	125	126	127	128	129
130	131	132	133	134	135	136	137	138	139
140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
150	151	152	153	154	155	156	157	158	159

В процессе создания приборов СВЧ большое значение приобретает поиск новых материалов. В последние годы большой интерес приобрели так называемые квазикристаллические материалы, которые обладают осями симметрии, запрещенными для обычных кристаллов. Квазикристаллы проявляют замечательные свойства, например они очень плохо проводят электричество и тепло – намного хуже, чем «обычные» кристаллы и аморфные вещества. Для описания структуры кристаллов и квазикристаллов используют не только теорию чисел, но и такие понятия, как сферические решетки, золотое сечение, плитки Пенроуза (в 2020 году этому ученому была присуждена Нобелевская премия по физике за исследование черных дыр). В этой связи важно отметить, что одним из первых, кто для характеристики кристаллов стал использовать теорию чисел, был академик АН СССР Александр Васильевич Шубников [3].

В рамках физических задач, решаемых в современной электронике СВЧ (определение резонансных частот объемных прямоугольных резонаторов, расчет кристаллической структуры полупроводниковых материалов и т. п.), интерес представляет решение уравнения

$$t^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

в целых числах, которое относится к классу Диофантовых уравнений [4].

В геометрической интерпретации уравнение (1) представляет собой теорему Пифагора для трехмерного пространства (t – длина диагонали прямоугольного параллелепипеда со сторонами x, y, z).

Поиск целочисленных решений уравнения (1) позволил нам сформулировать следующую теорему.



Теорема 1: квадрат целого положительного нечетного числа является суммой не более трех квадратов.

Доказательство. Рассмотрим произвольное нечетное число $t = 2n + 1$. На основании теоремы Лагранжа представим число $2t$ в виде суммы четырех квадратов:

$$2t = a^2 + b^2 + c^2 + d^2. \quad (2)$$

Для определенности будем считать, что a – наибольшее, а d – наименьшее (в том числе и равное 0) из чисел a, b, c, d .

Представим левую часть уравнения (2) в виде $2t = (t + z) + (t - z)$, где z – целое положительное число, меньшее t , и будем считать, что $t + z = a^2 + b^2$, $t - z = c^2 + d^2$. Тогда равенство $t^2 - z^2 = (t + z)(t - z)$, согласно уравнению Эйлера, преобразуется к виду

$$t^2 - z^2 = (a^2 + b^2)(c^2 + d^2) = (ac + bd)^2 + (ad - bc)^2. \quad (3)$$

Обозначая переменные $y = a \cdot c + b \cdot d$ и $x = |a \cdot d - b \cdot c|$ (либо $y = a \cdot d + b \cdot c$ и $x = |a \cdot c - b \cdot d|$), приходим к уравнению $t^2 - z^2 = x^2 + y^2$, то есть к уравнению (2). При этом третья переменная равна $z = (a^2 + b^2 - c^2 - d^2)/2$.

В качестве примера рассмотрим нечетное число $t = 67$. Удвоенное число $2t = 134$, согласно теореме Лагранжа, имеет пять представлений: $134 = 11^2 + 3^2 + 2^2 + 0^2$; $134 = 10^2 + 5^2 + 3^2 + 0^2$; $134 = 9^2 + 7^2 + 2^2 + 0^2$; $134 = 9^2 + 6^2 + 4^2 + 1^2$; $134 = 8^2 + 6^2 + 5^2 + 3^2$.

Для первого варианта имеем: $a = 11, b = 3, c = 2, d = 0$. Отсюда находим: $y = 22, x = 6, z = 63$. Таким образом, решение уравнения (1) имеет вид: $67^2 = 63^2 + 22^2 + 6^2$. Для других вариантов получаем: $67^2 = 63^2 + 18^2 + 14^2$; $67^2 = 58^2 + 33^2 + 6^2$; $67^2 = 58^2 + 30^2 + 15^2$; $67^2 = 54^2 + 33^2 + 22^2$; $67^2 = 50^2 + 42^2 + 15^2$.

Важно отметить, что во всех вариантах значений a, b, c, d числа x, y, z получаются разными. Это положение было нами доказано при рассмотрении всевозможных сочетаний чисел a, b, c, d , но доказательство не приводится из-за громоздкости.

Теорема 2: квадрат целого положительного нечетного числа, большего 5, является суммой трех квадратов различных чисел, ни один из которых не равен нулю.

Поскольку четное число, кроме чисел вида 2^n , где $n = 1, 2, 3, \dots$, представляется как удвоенное нечетное число, то теорема 1 распространяется и на четные числа.

Теорема 3: квадрат целого положительного четного числа, за исключением чисел вида 2^n , является суммой не более трех квадратов.

Представляет интерес рассмотреть сумму чисел в левой части уравнения (1) $s = x + y + z$. Поскольку среди чисел x, y, z одно нечетное, а два четных, то сумма s всегда нечетное число. Выполненные нами вычисления показали, что s равно всем нечетным числам, за исключением чисел вида 3^n , где $n = 1, 2, 3, \dots$. Доказательства этого положения нам пока найти не удалось.

Вернемся к исследованию уравнения (1). Перенесем z^2 в левую часть и обозначим $r = t - z$, $p = t + z$, тогда $2t = r + p$ и $x^2 + y^2 = r \cdot p$.

Числа вида $d = x^2 + y^2$ называются двуквадратными; они обладают следующими свойствами:

а) произведение двух двуквадратных чисел само является двуквадратным числом. Это следует из теоремы Эйлера $(y_1^2 + x_1^2)(y_2^2 + x_2^2) = (y_1 y_2 + x_1 x_2)^2 + (y_1 x_2 - x_1 y_2)^2$;

б) всякое четное двуквадратное число представимо в виде $2^v \cdot u$, где v – целое положительное число, u – нечетное двуквадратное число;



в) всякое нечетное двуквадратное число представимо в виде $d = 4 \cdot q + 1$, где q – ядро двуквадратного числа.

Для нечетного двуквадратного числа, положим, $x = 2m$, $y = 2n + 1$, тогда ядро представимо в виде $q = m^2 + n \cdot (n + 1)$, где n и m – целые, причем n может быть равно 0.

Если рассчитать ядра для всех двуквадратных чисел, то получим бесконечную последовательность чисел 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 13, 15, 16... Подавляющее число чисел, отсутствующих в этой последовательности (в табл. 2 они выделены жирным шрифтом), располагаются вдоль одной вертикали и описываются формулами $q_{1j} = 9j + 5$ и $q_{2j} = 9j + 8, j = 0, 1, 2, 3 \dots$

Таблица 2
Ядра двуквадратных чисел
(в ряду натуральных чисел до 51)

2	1			
	3	4	5	6
11	10	9	8	7
	12	13	14	15
20	19	18	17	16
	21	22	23	24
29	28	27	26	25
	30	31	32	33
38	37	36	35	34
	39	40	41	42
47	46	45	44	43
	48	49	50	51

Поскольку r и p в формуле $x^2 + y^2 = r \cdot p$ – двуквадратные числа, то рассмотрим случай, когда оба числа нечетные: $r = 4q_1 + 1, p = 4q_2 + 1$, причем одно из чисел, q_1 или q_2 , может быть равно 0. Если сложить эти равенства, то получим: $2t = r + p$, отсюда $t = 2(q_1 + q_2) + 1$. Поскольку число t в уравнении (1) нечетное ($t = 2n + 1$), то, сопоставляя два последних равенства, получаем: $n = q_1 + q_2$.

Теорема 4: *каждое целое положительное число представимо суммой двух ядер двуквадратных чисел.*

В дальнейших публикациях мы продолжим рассказывать о результатах, полученных в том числе и нами, в элементарной теории чисел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постников, М. М. Введение в теорию алгебраических чисел / М. М. Постников. – М.: Наука, 1982.
2. Серр, Ж.-П. Курс арифметики / Ж.-П. Серр. – М.: Мир, 1972.
3. Шубников, А. В. Избранные труды по кристаллографии / А. В. Шубников. – М.: Наука, 1977.
4. Башмакова, И. Г. История диофантова анализа / И. Г. Башмакова, Е. И. Славутин. – М.: Наука, 1984.

Статья поступила 12 октября 2020 г.



ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в течение 2020 г. в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника»

1. К 80-летию Александра Николаевича Королева. – Вып. 4 (547). – С. 6 – 23.
2. Нам 70 лет! – Вып. 3 (546). – С. 6 – 9.

I. История

1. *Балыко А.К., Балыко Т.А.* – Ученые «Истока» – ветераны Великой Отечественной войны. Часть 2. – Вып. 2 (545). – С. 77 – 89.
2. *Балыко А.К., Балыко Т.А.* – Ученые «Истока» – ветераны Великой Отечественной войны. Часть 3. – Вып. 3 (546). – С. 114 – 133.
3. *Балыко Т.А., Балыко А.К., Сизоненко М.И.* – Ученые «Истока» – ветераны Великой Отечественной войны. – Вып. 1 (544). – С. 94 – 113.

II. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Определение неизвестного числа флюктуирующих сигналов. – Вып. 2 (545). – С. 73 – 76.
2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Свойства периодических дробей. – Вып. 3 (546). – С. 108 – 113.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Сизоненко М.И.* – Связь распределения ионизированных частиц в полупроводнике с треугольником Паскаля. – Вып. 1 (544). – С. 80 – 87.
4. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Сизоненко М.И.* – Суммы квадратов целых чисел. – Вып. 4 (547). – С. 118 – 121.

III. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д., Власова И.И., Михальчик Е.В., Полников И.Г., Щелконогов В.А., Чеканов А.В.* – Изучение механизма действия микроволнового излучения в КВЧ-диапазоне на клетки цельной крови. – Вып. 1 (544). – С. 72 – 79.

IV. Радиоэлектронные устройства

1. *Богданов С.А., Гудкова Н.Б., Куприянов П.В., Николаев С.В., Петров С.А.* – Линеаризация выходных трактов широкополосных приемных устройств СВЧ. – Вып. 3 (546). – С. 45 – 50.
2. *Джуринский К.Б.* – Новейшие достижения в области радиочастотных соединителей. – Вып. 4 (547). – С. 24 – 36.
3. *Карасев М.С.* – Приемопередающий модуль X -диапазона с внутренней проверкой электрических параметров приемного и передающего каналов. – Вып. 2 (545). – С. 6 – 11.





4. *Карасев М.С.* – Приемопередающий субмодуль X-диапазона частот. – Вып. 3 (546). – С. 40–44.
5. *Семенов А.С., Налогин А.Г., Алексеев А.А.* – Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры Ka-диапазона частот. – Вып. 2 (545). – С. 12 – 21.

V. Твердотельная электроника

1. *Билевич Д.В., Сальников А.С., Горяинов А.Е.* – Разработка методики автоматического определения репрезентативного СВЧ-транзистора для усилительных применений в линейном режиме по частотным характеристикам при измерениях на полупроводниковой пластине. – Вып. 4 (547). – С. 98 – 107.
2. *Богданов С.А., Богданов Ю.М., Викторова Н.О., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Паиковский А.Б., Рожкова Е.Г., Федоров Н.А., Журавлёв К.С.* – Фазовые шумы автогенераторов на основе полевых транзисторов с повышенной линейностью передаточных характеристик. – Вып. 2 (545). – С. 22 – 28.
3. *Данилин Н.С., Димитров Д.М.* – О проблеме выпуска качественных отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре. – Вып. 1 (544). – С. 56 – 58.
4. *Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В., Мартынова Н.А., Трофимов А.А.* – Разработка гибридно-монолитной интегральной схемы усилителя диапазона 8...12 ГГц с выходной мощностью 2,5 Вт. – Вып. 3 (546). – С. 34 – 39.
5. *Попов А.А., Добуш И.М., Сальников А.С., Горяинов А.Е.* – Обзор методик построения мало-сигнальных моделей транзисторов для управляющих СВЧ-устройств. – Вып. 3 (546). – С. 10 – 33.
6. *Уткин М.Н.* – Синтез и исследование характеристик макета частотного компаратора для оценки нестабильности частоты бортовых квантовых стандартов частоты. – Вып. 1 (544). – С. 59 – 71.

VI. Технология и материаловедение

1. *Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Логинов В.В., Пучнина С.В.* – Исследование процесса активной пайки легкоплавкими припоями кварцевого стекла с металлами в газоразрядных приборах. – Вып. 4 (547). – С. 82 – 89.
2. *Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В., Киреев С.Г.* – Особенности технологии пайки металлическими припоями электродов газоразрядных приборов. – Вып. 3 (546). – С. 45 – 50.
3. *Жабин Г.А., Архипов Д.Ю., Седловец Д.М., Темиряева М.П.* – Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.
4. *Жабин Г.А., Лябин Н.А., Архипов Д.Ю., Парамонов В.С., Федотов В.В., Долгих К.О.* – Применение лазера на парах меди в изготовлении молекулярно-напыленных оксидных катодов. – Вып. 4 (547). – С. 90 – 97.
5. *Коняев И.В., Бородин И.И., Велигура Г.А., Бормонтов Е.Н.* – Влияние механического утонения и плазмохимического травления на морфологию поверхности кремниевых пластин. – Вып. 3 (546). – С. 84 – 90.





6. Мелешкевич П.М., Вашин С.А., Духновский М.П., Куликов Е.Н. – О возможности применения пластин CVD-алмаза в качестве конструктивных элементов в приборах СВЧ. – Вып. 3 (546). – С. 91 – 100.

7. Побединский В.В., Rogozin Н.В., Бормонтов Е.Н. – Исследование кинетики растворения платины в расплавленных припоях. Свойства смачиваемости поверхности платины расплавленным эвтектическим припоем. – Вып. 2 (545). – С. 29 – 36.

8. Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томаш К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А., Мальцев П.П. – Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона. – Вып. 1 (544). – С. 26 – 45.

VII. Экономика

1. Джамалдинова М.Д., Курдюкова Н.О., Вершинин А.А. – Стратегия-2030 как путь развития цифрового общества в современной России. – Вып. 1 (544). – С. 88 – 93.

2. Чекаданова М.В., Бобрышев А.Д. – Совершенствование управления особыми экономическими зонами технико-внедренческого типа. – Вып. 4 (547). – С. 108 – 117.

VIII. Электроракуумные приборы

1. Богомоллова Е.А., Галдецкий А.В., Рувинский Г.В., Солдатенко И.Г. – ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления. – Вып. 3 (546). – С. 66 – 83.

2. Быковский С.В., Будзинский Ю.А., Калина В.Г., Котов В.Е., Николаев С.В., Саврухин О.А. – Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров. – Вып. 1 (544). – С. 12 – 21.

3. Галдецкий А.В., Савин А.Н., Ключников Н.А. – Вывод энергии баночного типа сверхмощного клистрона S-диапазона. – Вып. 4 (547). – С. 64 – 75.

4. Данилов А.Б., Rogovin В.И., Симонова Ю.В. – Исследование возможности повышения электронного КПД ЛБВ Q-диапазона. – Вып. 4 (547). – С. 76 – 81.

5. Духина Н.Г., Мирющенко Н.И., Орехов А.А., Плешанов С.А., Ревенко К.В., Чугунов В.В. – Системы магнитного экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ. – Вып. 2 (545). – С. 48 – 61.

6. Духина Н.Г., Мирющенко Н.И., Плешанов С.А., Ревенко К.В., Чугунов В.В. – Исследование эффективности экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ-ЛН. – Вып. 4 (547). – С. 37 – 52.

7. Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Манжосин М.А., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. – 400-ваттный многолучевой импульсный клистрон Ки-диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита. – Вып. 4 (547). – С. 58 – 63.

8. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. – Эффективная площадь эмиссии катода в катодно-сеточном узле с теневой сеткой. – Вып. 4 (547). – С. 53 – 57.





9. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И., Горбачева М.В., Бессонов Д.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л. – Сеточные электроды из высокоплотного пиролитического графита для мощных импульсных ЛБВ. – Вып. 2 (545). – С. 67 – 72.

10. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И., Целиков Д.И., Горбачева М.В., Бессонов Д.А. – Формоустойчивость сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением. – Вып. 1 (544). – С. 22 – 25.

11. Калачев А.Д., Царев В.А. – Исследование влияния формы и размеров щели связи на электродинамические характеристики двухззорного щелевого резонатора миниатюрного многолучевого клистрона *K*-диапазона. – Вып. 3 (546). – С. 51 – 57.

12. Медведков И.П., Семенов С.О., Роговин В.И. – Расчет характеристик спутниковой ЛБВ *Ka*-диапазона с высоким КПД и охлаждением коллектора излучением. – Вып. 2 (545). – С. 37–47.

13. Мучкаев В.Ю., Онищенко А.П., Царев В.А. – Исследование эффективности отбора СВЧ-энергии от электронного потока в четырехззорном фотонно-кристаллическом резонаторе миниатюрного многолучевого клистрона *K*-диапазона. – Вып. 3 (546). – С. 58 – 65.

14. Петросян А.И., Роговин В.И., Семёнов С.О. – Уменьшение величины напряжения модуляции в приборах СВЧ. – Вып. 2 (545). – С. 62 – 66.

15. Симонов К.Г., Юнаков А.Н., Ключников Н.А., Мамонтов А.В., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И., Рыжов В.А., Цыберт А.О., Поливникова О.В., Галина Н.М., Соколов А.М., Голеницкий И.И., Морозов О.А. – Достигнутые результаты и пути развития разработок сверхмощных клистронов при существенно пониженных рабочих напряжениях. – Вып. 1 (544). – С. 6 – 11.



АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2020 г.

Цифры, стоящие рядом с фамилией автора, показывают: первая (римская) – номер раздела тематического указателя, в котором помещена статья, вторая (арабская) – порядковый номер статьи в соответствующем разделе.

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| <i>Алексеев А.А.</i> IV.5 | <i>Джамалдинова М.Д.</i> VII.1 |
| <i>Архипов Д.Ю.</i> VI.3, 4 | <i>Джуринский К.Б.</i> IV.2 |
| <i>Балыко А.К.</i> I.1 – 3; II.1 – 4 | <i>Добуш И.М.</i> V.5 |
| <i>Балыко И.А.</i> II.1 – 4 | <i>Долгих К.О.</i> VI.4 |
| <i>Балыко Т.А.</i> I.1 – 3 | <i>Дудинов К.В.</i> V.4 |
| <i>Бессонов Д.А.</i> VIII.9, 10 | <i>Духина Н.Г.</i> VIII.5, 6 |
| <i>Билевич Д.В.</i> V.1 | <i>Духновский М.П.</i> VI.6 |
| <i>Бобрышев А.Д.</i> VII.2 | <i>Енюшкина Е.Н.</i> VI.8 |
| <i>Богданов С.А.</i> IV.1; V.2 | <i>Ефимов А.С.</i> V.4 |
| <i>Богданов Ю.М.</i> V.2 | <i>Жабин Г.А.</i> VI.3, 4 |
| <i>Богомолова Е.А.</i> VIII.1 | <i>Журавлев К.С.</i> V.2 |
| <i>Бормонтов Е.Н.</i> VI.5, 7 | <i>Журавлев С.Д.</i> VIII.7 – 10 |
| <i>Бородкин И.И.</i> VI.5 | <i>Зуев А.В.</i> VI.8 |
| <i>Бугаев А.С.</i> VI.8 | <i>Казаринов К.Д.</i> III.1 |
| <i>Будзинский Ю.А.</i> VIII.2 | <i>Калачев А.Д.</i> VIII.11 |
| <i>Быковский С.В.</i> VIII.2 | <i>Калина В.Г.</i> VIII.2 |
| <i>Вашин С.А.</i> VI.6 | <i>Карасев М.С.</i> IV.3, 4 |
| <i>Велигура Г.А.</i> VI.5 | <i>Киреев С.Г.</i> VI.2 |
| <i>Вершинин А.А.</i> VII.1 | <i>Кириченко Д.И.</i> VIII.7 |
| <i>Викторова Н.О.</i> V.2 | <i>Ключников Н.А.</i> VIII.3, 15 |
| <i>Власова И.И.</i> III.1 | <i>Коняев И.В.</i> VI.5 |
| <i>Гавриш С.В.</i> VI.1, 2 | <i>Котов В.Е.</i> VIII.2 |
| <i>Галдецкий А.В.</i> VIII.1, 3 | <i>Крапухин Д.В.</i> VI.8 |
| <i>Галиев Р.Р.</i> VI.8 | <i>Кугушев Д.Н.</i> VI.1, 2 |
| <i>Галина Н.М.</i> VIII.15 | <i>Куликов Е.Н.</i> VI.6 |
| <i>Гамкрелидзе С.А.</i> VI.8 | <i>Куприянов П.В.</i> IV.1 |
| <i>Гнатюк Д.Л.</i> VI.8 | <i>Курдюкова Н.О.</i> VII.1 |
| <i>Голеницкий И.И.</i> VIII.15 | <i>Латин В.Г.</i> V.2 |
| <i>Горбачева М.В.</i> VIII.9, 10 | <i>Логинов В.В.</i> VI.1 |
| <i>Горяинов А.Е.</i> V.1, 5 | <i>Лукашин В.М.</i> V.2 |
| <i>Гудкова Н.Б.</i> IV.1 | <i>Лябин Н.А.</i> VI.4 |
| <i>Данилин Н.С.</i> V.3 | <i>Майтама М.В.</i> VI.8 |
| <i>Данилов А.Б.</i> VIII.4 | <i>Мальцев П.П.</i> VI.8 |
| <i>Димитров Д.М.</i> V.3 | <i>Мамонтов А.В.</i> VIII.15 |



Манжосин М.А. VIII.7
Мартынова Н.А. V.4
Матвеев О.С. VI.8
Медведков И.П. VIII.12
Мелешкевич П.М. VI.6
Мирющенко Н.И. VIII.5, 6
Михальчик Е.В. III.1
Морозов О.А. VIII.15
Мучкаев В.Ю. VIII.13
Налогин А.Г. IV.5
Николаев С.В. IV.1; VIII.2
Онищенко А.П. VIII.13
Орехов А.А. VIII.5
Павлов А.Ю. VI.8
Павлов В.Ю. VI.8
Парамонов В.С. VI.4
Пашиковский А.Б. V.2
Перминов И.Г. VIII.15
Петров С.А. IV.1
Петросян А.И. VIII.14
Плешанов С.А. VIII.5, 6
Побединский В.В. VI.7
Поливникова О.В. VIII.15
Полников И.Г. III.1
Попов А.А. V.5
Правдиковская Г.И. VIII.15
Пугачев Д.Ю. VI.2
Пучнина С.В. VI.1, 2
Ревенко К.В. VIII.5, 6
Роговин В.И. VIII.4, 12, 14
Рогозин Н.В. VI.7
Рожкова Е.Г. V.2
Рувинский Г.В. VIII.1

Рыжов В.А. VIII.15
Савин А.Н. VIII.3
Саврухин О.А. VIII.2
Сальников А.С. V.1, 5
Седловец Д.М. VI.3
Семенов А.С. IV.5
Семенов С.О. VIII.12, 14
Сизоненко М.И. I.3; II.3, 4
Симонова Ю.В. VIII.4
Симонов К.Г. VIII.15
Слаповский Д.Н. VI.8
Соколов А.М. VIII.15
Соколова Т.Н. VIII.9
Солдатенко И.Г. VIII.1
Сурменко Е.Л. VIII.9
Темиряева М.П. VI.3
Темнов А.М. V.4
Терешкин Е.В. II.1 – 4
Томош К.Н. VI.8
Трофимов А.А. V.4
Уткин М.Н. V.6
Федоров Н.А. V.2
Федоров Ю.В. VI.8
Федотов В.В. VI.4
Царев В.А. VIII.11, 13
Целиков Д.И. VIII.10
Цыберт А.О. VIII.15
Чекаданова М.В. VII.2
Чеканов А.В. III.1
Чугунов В.В. VIII.5, 6
Шалаев П.Д. VIII.7
Шестеркин В.И. VIII.7 – 10
Щелконогов В.А. III.1
Юнаков А.Н. VIII.15



=== НОВЫЕ КНИГИ ===

КОНДРАШИН А. А., ЛЯМИН А. Н., СЛЕПЦОВ В. В. **Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств:** Учеб. пособие. Изд-е 2-е, испр. и доп. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 210 с.

С развитием высоких технологий становится реальным выпуск трехмерных электронных устройств (ТЭУ), в том числе микронных и субмикронных многослойных схем. На основе классификации формирования ТЭУ на плоских (2D) и квазиобъемных (квази-3D) подложках рассмотрены основные принципы и характеристики технологий плоской печати. Сделан вывод о невозможности изготавливать по этим технологиям объемные структуры сложной формы в непрерывном технологическом цикле, а также проанализированы возможности современных технологий для производства ТЭУ. Классификация данных технологий по физическому принципу воздействия на конструкционный материал и выявление их общих недостатков показали, что использование данных технологий не позволяет эффективно формировать многослойные сложные 3D-объекты.

Решением данной задачи являются еще только разрабатываемые гибридные технологии, названные в данной работе квази-4D-технологиями формирования ТЭУ, так как в настоящее время они находятся лишь в стадии разработки (являются пред-4D-технологиями или 3D+-технологиями), практически не обеспечены необходимыми материалами и элементной базой, но имеют потенциальные возможности для создания полноценных 4D-объектов.

Первым шагом к созданию квази-4D-технологий формирования ТЭУ является внедрение 3D MID-технологий. Проведен сравнительный анализ возможностей различных 3D MID-технологий формирования ТЭУ, выявлены недостатки данных технологий и приведены примеры их реализации в промышленности.

В то же время, исходя из возможностей современных технологий, создана классификация 4D-объектов (способных менять свою форму или структуру после их создания в зависимости от внешних условий, например при изменении температуры, при механическом воздействии и т. д.) ТЭУ и технологий для их формирования.

Данное учебное пособие является первой книгой по технологиям изготовления, сканирования и визуализации трехмерных электронных устройств. Во второй книге будут рассмотрены технологии сканирования трехмерных электронных устройств различных диапазонов, в том числе нанометрового диапазона. Отдельный раздел второй книги будет посвящен возможностям изготовления трехмерных электронных устройств нанометрового диапазона с применением методов сканирующей микроскопии. Третья книга будет посвящена технологиям визуализации (средствам отображения информации) для контроля параметров ТЭУ, создания новых ТЭУ и технологий реинжиниринга ТЭУ.

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.



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

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

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

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

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.



ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

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

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. и направлять по адресу:

Куда

(почтовый индекс, адрес)

Кому

(название организации)

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____

на сумму _____ за _____ экз.



АО «НПП «Исток» им. Шокина»

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.

Переводчик Барабанова Л.В.

Компьютерная верстка Земскова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 21.12.2020 г.
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"
г. Москва

Усл. п. л. 16,0
Уч.-изд. л. 16,5
Индекс 36292

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

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





Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2020, вып. 4(547), с. 130

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

