



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (551)

2021

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(551)

2021

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. **В.М. Исаев**;
д.т.н. **П.В. Куприянов**; д.т.н. **Н.А. Лябин**;
д.ф.-м.н. **С.П. Морев**; 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;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
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;
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;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
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».

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(551)

2021

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. **V.M. Isaev**;
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**;
D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**, 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;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;
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;
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;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
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 ПИ № ФС 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», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Наши юбиляры

<i>Потапов А.В.</i> – К 80-летию Сергея Алексеевича Зайцева.....	6
<i>Стебунов В.П.</i> – К 90-летию Вадима Алексеевича Парилова.....	11

Твердотельная электроника

<i>Богданов С.А., Борисов А.А., Карпов С.Н., Клочкова Д.Э., Мартынов Я.Б., Пашковский А.Б., Терёшкин Е.В.</i> – Всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия.....	16
<i>Гамкрелидзе С.А., Гнатюк Д.Л., Зенченко Н.В., Зуев А.В., Мальцев П.П., Матвиенко О.С., Михалев А.О., Павлов А.Ю.</i> – Монолитные интегральные схемы на НЕМТ GaN для СВЧ-модуля с выходной мощностью 2,5 Вт и усилением 30 дБм в X-диапазоне.....	25

Радиоэлектронные устройства

<i>Демшиевский В.В., Богачев И.А., Сидоренко С.С., Кучмий А.Д., Ушанова С.Е., Мигалин М.М.</i> – Антенная решетка на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи, функционирующих в диапазоне частот 18...42 ГГц.....	35
<i>Демшиевский В.В., Богачев И.А., Сидоренко С.С., Кучмий А.Д.</i> – Экспериментальное измерение антенной решетки на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи.....	43

Катоды и материалы

<i>Хабачев М.Н., Макаров А.П., Дровненкова Г.В., Жуков Р.А., Ермаков А.В., Дубинина О.В., Белоконь Е.А.</i> – Промышленная технология производства бариевых катодных сплавов на основе платины и палладия для мощных СВЧ-приборов.....	49
<i>Турсунметов К.А.</i> – Эффект Киркендалла и закон «3/4».....	67

Краткие сообщения

<i>Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.</i> – К выводу уравнений Максвелла из законов Ньютона.....	75
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

История

<i>Балыко А.К., Фельдблюм И.С., Терешкин Е.В., Балыко Т. А.</i> – Знаменитые ученые «Истока»...	80
-------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Тематический указатель	97
-------------------------------------	----

Алфавитный указатель	100
-----------------------------------	-----

CONTENTS

Our anniversaries

- Potapov A.V.* – To the 80-th anniversary of Sergey Alexeevich Zaitsev..... 6
- Stebunov V.P.* – To the 90-th anniversary of Vadim Alexeevich Parilov..... 11

Solid-state electronics

- Bogdanov S.A., Borisov A.A., Karpov S.N., Klochkova D.E., Martynov Ya.B., Pashkovskiy A.B., Tereshkin E.V.* – Electron drift velocity overshoot in gallium nitride transistor heterostructures..... 16
- Gamkrelidze S.A., Gnatyuk D.L., Zenchenko N.V., Zuev A.V., Maltsev P.P., Matvienko O.S., Mikhailov A.O., Pavlov A.Yu.* – HEMT GaN monolithic integrated circuits for microwave module with 2.5 W output power and 30 dBm gain in X-Band..... 25

Radioelectronic devices

- Demshevskiy V.V., Bogachev I.A., Sidorenko S.S., Kuchmiy A.D., Ushanova S.E., Migalin M.M.* – Antenna array based on a substrate integrated waveguide for radars and communication systems operating within 18...42 GHz frequency band..... 35
- Demshevskiy V.V., Bogachev I.A., Sidorenko S.S., Kuchmiy A.D.* – Experimental measurement of the antenna array based on a substrate integrated waveguide for radars and communication systems.. 43

Cathodes and materials

- Khabachev M.N., Makarov A.P., Drovnenkova G.V., Zhukov R.A., Ermakov A.V., Dubinina O.V., Belokon' E.A.* – The industrial technology for the production of barium cathode alloys based on platinum and palladium for high-power microwave devices..... 49
- Tursunmetov K.A.* – Kirkendall effect and the «3/4» law..... 67

News in brief

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A.* – To the derivation of Maxwell equations from Newton laws..... 75

History

- Balyko A.K., Feldblum I.S., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – Famous scientists of «Istok»..... 80

- Subject index**..... 97

- Alphabetical index**..... 100

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

УДК 6(092)

К 80-ЛЕТИЮ СЕРГЕЯ АЛЕКСЕЕВИЧА ЗАЙЦЕВА

А. В. Потапов

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



С. А. Зайцев,
главный научный сотрудник «Истока»

5 июля 2021 года первый заместитель генерального директора АО «НПП «Исток» им. Шокина» Вадим Сергеевич Добров вручил Сергею Алексеевичу Зайцеву правительственную награду – медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» I степени, отметив, что Зайцев С. А. внес выдающийся вклад в развитие «Истока», в теорию и практику создания малогабаритных радиолокационных систем на «Истоке» и продолжает активную деятельность в этом направлении. Директор по персоналу Наталья Александровна Рубцова вручила награжденному огромный букет роз, а Евгений Васильевич Истомин, Сергей Владимирович Щербаков, Александр Александрович Вялов и другие члены дирекции, представители ведущих подразделений тепло поздравили Сергея Алексеевича с заслуженной наградой. Букет роз со своими поздравлениями вручила также помощник директора по экономике Елена Владимировна Крюкова.

В этом году Сергею Алексеевичу исполняется 80 лет, почти полвека из них отданы «Истоку», развитию научной и производственно-технологической школы, воспитанию высококвалифицированных конструкторов и технологов, он и сегодня не музейная фигура, а активно и плодотворно действующий специалист высочайшей квалификации.

Зайцев С. А. – главный конструктор изделия 50М, которое проходит завершающие испытания перед постановкой на серийное производство, решение об этом уже принято. Новое изделие и другие перспективные разработки, в которых он принимает участие, на многие годы определяют облик выпускаемой «Истоком» продукции.

И руководитель работы Сергей Алексеевич не формальный. Так, несколько лет назад на испытаниях изделия происходили отказы по одному из наиболее важных параметров. Сергей Алексеевич сам расписал требуемые алгоритмы функционирования изделия в этом режиме, провел моделирование на компьютере, затем испытания на огромном массиве экспериментальных данных и добился их включения в рабочую программу изделия, после чего отказы по этому параметру полностью исчезли.

Сергей Алексеевич родился 13 декабря 1941 г. в г. Кирове, но вскоре его семья переехала в г. Ярославль, а когда ему исполнилось 12 лет, семья еще раз переехала, на этот раз в Брянскую область, так что вырос он в рабочем поселке Белые Берега, бесконечно любит эти места и гордится ими, а о себе часто говорит: «Я брянский» или «Я белобережский».

Окончив школу в 16 лет, поступил монтером на работу в электросети, а через год был принят на заочное отделение МАИ, где проучился три года, а затем перешел на дневное отделение. В 1965 году окончил институт и был распределен во Фрязинскую часть Института радиотехники и электроники Академии наук СССР, в отдел выдающегося ученого Юрия Борисовича Кобзарева. Основанная им научная школа по статистической радиотехнике и радиолокации была уникальной и давала неоценимые знания в этих областях. Сергей Алексеевич в полной мере освоил методологию этой школы, и те, кто сталкивался с ним при решении каких-то практических задач, могли видеть, насколько виртуозно он владел различными приемами статистической обработки сигналов и помех, а в применении методов спектрального анализа ему вообще не было равных.

В 1971 году С. А. Зайцев успешно защитил кандидатскую диссертацию и в 1972 году перешел на работу в «Исток», в отдел 340, где начал заниматься разработкой системы автоматизированного проектирования гибридных интегральных схем. Уже через год он возглавил лабораторию в отделе, а еще через полтора года – и весь отдел 340.

В 1980 году ВПК при Совете Министров СССР перед предприятием была поставлена задача по выполнению НИЭР «Синтез», и Сергей Иванович Ребров преобразовал отдел 340 в отделение 34, передав в теоретический отдел все направления, связанные с автоматизированным проектированием ГИС. Сергей Алексеевич с головой ушел в работу по созданию уникальной бортовой радиолокационной системы, вложив в это весь свой накопленный опыт и знания. На разработку бортовой РЛС ушло три года. Еще год ушел на её отработку в безэховом зале НИИАС, а еще почти год – на успешное проведение летных испытаний. Впервые в нашей стране была создана и испытана на летающей лаборатории бортовая РЛС с многомашинным вычислительным комплексом, программируемым процессором сигналов, отлаженным прикладным и системным программно-алгоритмическим обеспечением.

В 1984 г. коллектив «Истока» постигла тяжелая утрата – ушел из жизни руководитель отделения 7 Русаков Владимир Никитович. Это был разгар работ по «Синтезу», и Сергею Ивановичу Реброву специалистами отделений 7 и 34 для оптимальной координации работ было предложено объединить их в одно подразделение – НПК-7. Сергей Иванович согласился с этим предложением, и объединенный коллектив возглавил Сергей Алексеевич Зайцев. Теперь, кроме работ по созданию бортового радиолокатора, на его плечи, как руководителя головного подразделения и заместителя руководителя всех «синтезных» работ, легли заботы по созданию малогабаритной радиолокационной системы.

В 1986 г. Сергей Алексеевич был назначен заместителем генерального директора НПО «Исток» по научной работе, и работал он на этом посту почти 30 лет. К нему на подпись поступали все технические задания на НИОКР, он их тщательно анализировал и заставлял главных конструкторов уже на начальном этапе предусматривать все, чтобы успешно сдать работу. По сути, он исполнял на предприятии роль своеобразного представителя радиопромышленности. Глубоко разбираясь в вопросах применения, он при необходимости сам встречался с радистами, если те необоснованно завышали свои требования к приборам СВЧ.



А. Г. Далингер, А. В. Потапов, К. В. Дудинов, В. Я. Батаев, С. А. Зайцев
(Фарнборо-2011, Англия)

Сергей Алексеевич работал научным руководителем предприятия при трех последовательно сменявших друг друга генеральных директорах, у которых я в разные годы брал интервью.

Приведем их краткие отзывы о С. А. Зайцеве.

Генеральный директор НПО «Исток с 1962 по 1988 год, генеральный конструктор предприятия с 1988 по 2007 г. Сергей Иванович Ребров:

Результаты работы крупных научно-исследовательских комплексов, в первую очередь, определяются квалификацией и слаженностью работы всего коллектива. Однако и здесь качественные прорывные скачки в техническом уровне связаны с наличием лидеров, способных предложить и, главное, материализовать новые идеи в виде конкретных результатов. Такие лидеры насчитываются единицами на многотысячный коллектив, и именно к таким лидерам относится Сергей Алексеевич Зайцев. Его участие и заслуги в создании аппаратного направления в тематической структуре нашего предприятия трудно переоценить, и именно это направление сейчас, в тяжелейшие годы, спасло коллектив и предприятие в целом.

На мой вопрос: «Какую роль, на Ваш взгляд, играет Сергей Алексеевич в жизни «Истока»?» – Александр Николаевич Королев, генеральный директор НПО «Исток» с 1988 по 2009 г., ответил так:

В сегодняшних достижениях «Истока» огромная заслуга Сергея Алексеевича, который сделал все, чтобы «Исток» смог создавать сложные радиоэлектронные комплексы. Он обладает способностью заранее предвидеть подводные камни и обходить их, активно генерирует новые идеи. Я думаю, что, когда на «Истоке» были поставлены аппаратные работы по программе «Синтез», без С. А. Зайцева вряд ли их удалось бы успешно решить.

Александр Анатольевич Борисов, генеральный директор АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 2009 г., оценил С. А. Зайцева так:

Кто такой Сергей Алексеевич для «Истока»? Во-первых, это совесть. Специалист высочайшей квалификации, много работающий с разными заказчиками, он никогда никого не обманывает. Он обладает огромными знаниями и, если говорит, что так не надо делать, то к этому следует не только прислушиваться, но и быть благодарным ему за это. Конечно, он достаточно тяжелый человек, но он всегда делает то, за что берется. Я считаю, что «Истоку» крупно повезло, что Сергей Алексеевич пришел сюда на работу в 1972 году. Благодаря ему и его единомышленникам, на «Истоке» появилось и продолжает развиваться аппаратное направление. Уже первую разработку – бортовой радиолокатор «Синтез-10», аналоги которого стоят сейчас на всех наших самолетах, мы впервые увидели на выставке «Истока», куда он попал после успешных испытаний в 1985 году. Ну, а основные изделия «Истока», которые мы выпускаем уже более 20 лет, тоже появились и были успешно освоены в производстве благодаря С. А. Зайцеву.

Все сотрудники «Истока», даже непосредственно с ним не работавшие, с глубоким уважением отзываются о нем как о специалисте и человеке.

Приведу и я свое стихотворное послание Сергею Алексеевичу:

Сереге

(С. А. Зайцеву)

Сереза на трубе играл, когда был молод,
Рулады выводил, и вальсы, и фокстрот.
Над школою сиял советский серп и молот,
И время шло вперед, а не наоборот.
Белобережский парень рос сильным и упрямым,
Окрестный брянский лес исследовать мастак,
Приучен с детских лет помощником быть маме,
Ну, а еще от Бога охотник и рыбак.
Он вырос, возмужал, и институт закончил,
И выбрал в жены Валю, с которой вместе рос.
Научную карьеру ему профессор прочил,
Но предпочел для жизни он Фрязинский колхоз.
Вот вырастил Сергей двух гавриков – двух дочек,
И вышли замуж те, когда пришел их срок,
И каждая из них счастливою быть хочет,
Но есть еще судьба, а ей плати оброк.
Уходят в мир иной несправедливо рано
Любимые родные, ближайšie друзья,
И остаются в сердце негаснущие раны,
Которые забыть и вылечить нельзя.
А время все бежит, торопится куда-то,
Не зная остановок, имея свой закон,
И отправляет молча, как будто мы солдаты,

На тот свет маму Валю, а дочку за кордон.
Что мир несправедлив, – не надо быть экспертом,
Об этом говорят послушник и злодей.
Вот забирает бог очередную жертву,
И это все из близких Сережиных людей.
А жизнь неумолима – ни радости, ни беды
Ее не остановят, она всегда права.
И если есть работа – она твоя победа,
Сережа, несомненно, в делах ты – голова!
Во всем авторитет, – как прежде, ты бесспорен,
Немного поседел, – ну, так тому и быть,
Но энергичен ты, где надо, там упорен,
И даже слово «старый» к тебе не применить.
Живи, Серега, друг! Упорства и терпенья
Тебе с далеких лет отпущено с лихвой,
Вот только бы души и сердца онеменье
Не приучили жить с проклятою бедой.
Пусть выручит тебя вниманье милых дочек,
И внуков-сорванцов неутомимый рост,
И даже если грусть тебя порою точит,
Ты только позвони – увидишь: днем и ночью
Любви рецепт всемогущ и бесконечно прост.

В заключение еще раз сердечно поздравим Сергея Алексеевича с юбилеем и пожелаем ему здоровья, долгих лет жизни и плодотворной работы на благо родного «Источка» и для своего удовольствия.

25 октября 2021 г.

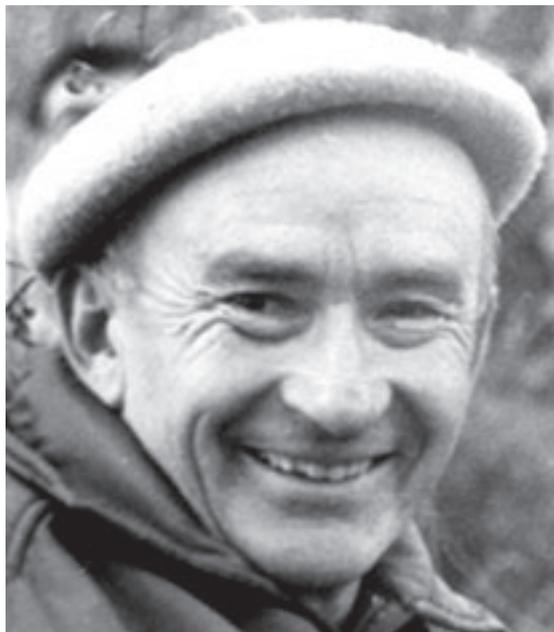
УДК 6(092)

К 90-ЛЕТИЮ ВАДИМА АЛЕКСЕЕВИЧА ПАРИЛОВА*

В. П. Стебунов

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

Не каждый художник – изобретатель, но каждый изобретатель в душе художник. Вадим Алексеевич родился 1 декабря 1931 года в городе Гаврилов-Ям, в 46 км от Ярославля, он прямой потомок рода Париловых, который с незапамятных времен славился своими «богомазами» и мастерами палехской миниатюры. Через всю жизнь Вадим Алексеевич пронёс чувство глубокого уважения к знаменитому деду, Павлу Львовичу Парилору, который слыл признанным иконописцем и выдающимся мастером по росписи соборов и храмов. Видимо, от него будущий конструктор и изобретатель унаследовал деловитость и творческий подход к любимой профессии.



В. А. Парилов

Детство и юность Вадима Парилова пролетели в Читинской области Забайкалья, куда его отца отправили на службу. Алексей Павлович работал начальником сельхозчасти на конно-военных заводах. Приходилось обслуживать три огромных участка общей площадью 6000 га. В тех краях без техники – никуда. Несмотря на то, что Алексей Павлович был неплохим наездником, покрывать огромные расстояния удобнее было на мотоцикле ИЖ-7. А за маленьким Вадимом был закреплён персональный велосипед, на котором он должен был развозить почту. Мама, Александра Павловна, работала по дому. Она привила сыну любовь к порядку и чистоте. Отец и сын души не чаяли в технике. Своими глазами мальчик видел, как отец творил настоящие слесарные чудеса. К примеру, освоил изготовление поршней и колец для своего мотоцикла из водопроводных труб.

Впоследствии, когда у Вадима Алексеевича появятся свои автомобили, он ни один из них не отдаст в автомастерскую. Весь ремонт производился только своими руками. О феноменальной способности В. А. Парилова угадывать причины поломки машин по Фрязино ходили легенды.

Из Забайкалья семья Париловых переехала в Иваново, и после окончания средней школы Вадим Алексеевич сначала поступил в Ивановский энергетический институт имени В. И. Ленина, а затем в числе одиннадцати отличников был переведён в легендарный Ленинградский политех – ЛПИ им. М. И. Калинина.

Там он обрёл многих друзей и единственную любовь всей своей жизни по имени Нонна. Произошло это вопреки распространённой пословице «Не ищи жену в хороводе, а ищи в огороде». С Нонной Михайловной знакомство состоялось на почве повального увлечения танцами. Молодые

*Статья подготовлена на основе автобиографических рассказов В. А. Парилова «В памяти моей».

люди, сами того не замечая, вошли в десятку лучших танцевальных пар Ленинграда. А потом решили связать себя узами брака, в котором счастливо прожили 60 лет. Впоследствии у них родились две дочери. А сегодня у Вадима Алексеевича четыре внука и три правнука.

В Ленинградском политехе молодого студента В. А. Парилова готовили на физика-ядерщика. Одним из его преподавателей был будущий академик и диссидент Андрей Сахаров. Однако его научный руководитель Алексей Бонч-Бруевич, сын известного ученого Михаила Бонч-Бруевича, обладал даром проницательности и увидел в смышлёном парнишке вкус и способности к электронике. И стал направлять Вадима Алексеевича по этой стезе.

После окончания ЛПИ встал вопрос о выборе будущего места работы. Кто-то из друзей посоветовал «приглядеться» к фрязинскому НИИ-160, одному из лучших предприятий советской послевоенной электронной промышленности. Совет этот, как увидим, оказался добрым. На благодатной фрязинской почве в полную силу проявился талант Парилова как выдающегося конструктора и разработчика.

Молодой выпускник ЛПИ приехал во Фрязино в 1955 году вместе с женой и полугодовой дочкой на руках. Был принят на работу, а буквально через два дня получил комнату. По тем временам – редчайший случай.

Отдел 170 НИИ-160, в котором начал свою трудовую деятельность Парилов, славился своими учёными и специалистами. Вадим Алексеевич попал в лабораторию 171, которая занималась разработкой серии отражательных клистронов. Руководил творческим процессом замечательный учёный Михаил Борисович Голант, которого все называли не иначе, как «наш учитель». В лаборатории 171 Вадим Алексеевич получил свое первое авторское свидетельство на уникальную шлифовально-полировочную пасту «ПАВА» (аналог известной пасты ГОИ), с помощью которой удалось значительно повысить класс чистоты внутренней поверхности высокооборотных резонаторов. По предложению М. Б. Голанта Вадим Алексеевич занялся разработкой лампы обратной волны (ЛОВ) с многократными пролётами электронов через замедляющую систему. После проработки теоретических основ этого прибора Вадим Алексеевич за полтора месяца написал и блестяще защитил кандидатскую диссертацию.

Присутствующий на защите член учёного совета В. А. Афанасьев пригласил Парилова поработать в московском НИИ «Титан». Однако, пока в столице искали подходящую квартиру, а это было нелегко, поступило предложение возглавить лабораторию № 30, которой руководил главный инженер И. И. Девяткин и сотрудники которой занимались вопросами применения электроники и СВЧ-энергии для нужд народного хозяйства. Вадим Алексеевич согласился и проработал в этом коллективе вплоть до конца своей службы на «Истоке».

Назовём только несколько интереснейших работ, проводившихся в стенах этой лаборатории. Практически ко всем из них В. А. Парилов был причастен лично. Это разработка серии лазерных визиров для горизонтальных и вертикальных строительных работ, использовавшихся в качестве геодезических приборов при разметке рисовых чеков и при строительстве Останкинской телебашни; двуханодный магнетрон М-81, на основе которого были разработаны установки СВЧ промышленного нагрева; СВЧ-установки для непрерывного изготовления сосисок без оболочек. Очень большой объём работ проводился по программе ускорения процесса вулканизации автомобильных шин. Самый экзотический проект – установка для снятия оперения с куриных тушек. Эффект был получен, однако до промышленного внедрения дело не дошло.

В 1976 году приказом С. И. Реброва лаборатория 30 была преобразована в отдел 330. Затем

в 1987 г. на базе отделов 330 и 340 создается отделение 20 под руководством Александра Васильевича Потапова, впоследствии преобразованное в НПК-20 (с цехом 7).

За годы с момента организации лаборатории 30 вплоть до объединения с отделом 340 коллективу, возглавляемому В. А. Париловым, удалось выполнить более 30 НИОКР по созданию СВЧ-аппаратуры для народного хозяйства. Были разработаны установка по СВЧ-сушке стеклопластиковой ленты, пропитанной эпоксидной смолой, для изготовления специзделий большого диаметра; оборудование для отверждения и сушки композитных пластиковых материалов; СВЧ-плазмотрон в качестве стабильного источника спектра для количественного спектрального анализа состава химических растворов; исследовались СВЧ-влагомеры для применения в различных процессах пищевой промышленности. Наибольшие успехи были достигнуты в области разработки устройств ближней радиолокации: измеритель скорости вагонов на сортировочных горках РИС-В2, который очень хорошо себя зарекомендовал; радиолокационный датчик скорости, ускорения и пройденного пути локомотивов РДС-Л1, прошедший испытания на Британских железных дорогах и на отечественных магистральных электровозах ВЛ-80 на Байкало-Амурской магистрали; радиолокационные датчики уровня РДУ-Х2 для измерения степени заполнения бункеров инертными материалами, нашедшие широкое применение в металлургии и промышленности строительных материалов.

Нельзя не упомянуть ещё об одной оригинальной разработке – первой в СССР бытовой индукционной плите «Юность» размером с портфель-дипломат. Во время презентации этой разработки в ЦНИИ «Электроника» в 1981 г. министру электронной промышленности СССР А. И. Шокину, накануне XXVI съезда КПСС, Вадим Алексеевич Парилов положил на конфорку плиты отпечатанный заранее приказ по МЭП о внедрении разработки в производство и премировании участников этой работы, а на лист с текстом приказа поставил чайник с водой. Через несколько минут вода вскипела, а бумага осталась целой. Министру Шокину ничего не оставалось, как вынуть из-под чайника приказ о внедрении «Юности» и подписать его.



В. А. Парилов, Н. Д. Девятков, С. И. Ребров, А. И. Шокин
на выставке в НПО «Исток», 70-е годы. Фото Р. М. Попова

Особняком в ряду разработок, проведенных под руководством Вадима Алексеевича, стоит цифровая аппаратура уплотнения телефонных каналов ЦАК 15/30. Она позволяла по одной кабельной линии передавать до 30 зашифрованных телефонных каналов. Во время второй чеченской войны она использовалась федеральными войсками для связи.

Венцом работ, проведенных под руководством Вадима Алексеевича, стала разработка ряда блоков для изделия 50Э. Это изделие многие годы позволяло нашему предприятию развиваться и оставаться на плаву.

В мае 2003 года Вадим Алексеевич уволился с работы. Его трудовой стаж на «Истоке» составляет 48 лет.

Вадим Алексеевич Парилов стал одним из первых сотрудников «Истока», награждённых почётной медалью имени С. И. Реброва. Произошло это в 2013 году, в год 70-летия нашего предприятия.

Вот что он написал спустя несколько лет в своих автобиографических записках: «Мы занимались своим делом, учили молодёжь и приносили славу нашей науке. С коллективом НПК-20 можно было решать самые сложные задачи. Не надо забывать, что все самые лучшие кадры советского времени были собраны в военно-промышленном комплексе. Это и есть наша «золотая кремниевая долина». Помогать надо ВПК, и на него опираться. А продавать и приватизировать нельзя».

Вся трудовая деятельность Вадима Алексеевича была связана с «Истоком». Он пришел сюда в далеком уже 1955 году молодым специалистом по атомной физике. Оставив расщепление атомов своим бывшим сокурсникам, он увлёкся электронами, и отныне СВЧ-электроника стала главным делом всей его жизни. Он стал ученым. Поняв законы взаимодействия начальства с подчиненными, он сам стал начальником лаборатории 30 и успешно вывел ее на траекторию превращения сначала в отдел 330, а в последующем и в НПК-20.

От лампы обратной волны «Гирлянда» до НИЭР «Синтез», от СВЧ-влажномеров до железнодорожного транспорта, от СВЧ-нагрева до радиолокационных датчиков скорости, от индукционной плиты до блоков изделия 50Э – вот диапазон научных интересов Вадима Алексеевича Парилова, творческих успехов и производственных достижений. Кандидат технических наук, заслуженный конструктор России, почетный изобретатель предприятия, лауреат многих наград ВДНХ СССР – вот основные вехи его творческого пути.

За многие годы совместной работы с Вадимом Алексеевичем мы узнали его не только как грамотного научного руководителя и высококвалифицированного специалиста в области СВЧ-электроники, но и как выдающегося исследователя, талант, эрудиция и настойчивость которого способствовали доведению многих разработок до серийного выпуска. Для многих сотрудников «Истока» Вадим Алексеевич не только известный ученый, но и мудрый учитель и наставник. Им подготовлены к успешной защите кандидатских диссертаций несколько талантливых молодых ученых, среди которых А. С. Зусмановский, М. А. Иванов, Н. И. Цемко. Помимо научных достижений, у Вадима Алексеевича прекрасные человеческие качества: внимательное отношение к людям и их заботам, готовность всегда прийти на помощь, отзывчивость и бескорыстие. Умение найти деловой и личный контакт снискало ему авторитет и заслуженное уважение не только среди работников «Истока», но и на многих предприятиях России и, как теперь говорят, ближнего зарубежья.

Всем известные увлечения Вадима Алексеевича в свободное время: организация мужского хора и эстрадного оркестра, участие в съемках любительских фильмов студии «Фрязино-фильм»,

исполнение собственных частушек и участие в команде КВН, автомобиль и садовый участок, рыбалка и моторная лодка – всего даже не перечислишь! – раскрывают и дополняют многогранность его характера, а о «золотых руках» Парилова по предприятию ходят легенды. Наверное, половина «истоковцев» носят отремонтированные им часы. А количество восстановленных им ксероксов, факсов, СВЧ-печек и радиоприемников вообще не поддается учету. Способность к экспромтам, общительность и жизнерадостность, юмор и находчивость, которые Вадим Алексеевич отшлифовал со своими друзьями на кавээновских баталиях, помогают ему и сейчас принимать нужные и единственно правильные решения во многих, казалось бы, безвыходных ситуациях. А авторитет тамады, умеющего любое заурядное застолье превратить в интересное праздничное мероприятие, восстанавливая при необходимости порядок простым постукиванием вилкой по стакану, признан всем предприятием.



В. А. Парилов с коллективом отдела 330, 1991 год. Фото Р. М. Попова

Мы, друзья уважаемого Вадима Алексеевича, желаем ему крепкого здоровья, бодрости духа, молодого задора и большого личного счастья!

1 ноября 2021 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.3

ВСПЛЕСК ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

С. А. Богданов, А. А. Борисов, С. Н. Карпов, Д. Э. Клочкова,
Я. Б. Мартынов, А. Б. Пашковский, Е. В. Терёшкин

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

Проанализирован всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида и арсенида галлия. Показано, что при влёте в область сильного поля поперечный пространственный перенос электронов в GaAs двойных псевдоморфных гетероструктурах в разы уменьшает всплеск их дрейфовой скорости по сравнению с чистым объёмным материалом, а для гетероструктур на основе GaN уменьшение всплеска в исследованных случаях не превышает 30 %.

КС: гетероструктура, полевой транзистор, нитрид галлия, нелокальный разогрев

ELECTRON DRIFT VELOCITY OVERSHOT IN GALLIUM NITRIDE TRANSISTOR HETEROSTRUCTURES

S. A. Bogdanov, A. A. Borisov, S. N. Karpov, D. E. Klochkova,
Ya. B. Martynov, A. B. Pashkovskiy, E. V. Tereshkin

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

Electron drift velocity overshoot in gallium nitride and arsenide transistor heterostructures is analyzed. It is shown that the real space transfer of electrons arising upon their entering into the strong electric field region of GaAs double pseudomorphic heterostructures significantly reduces the electron drift velocity overshoot compared to pure bulk material. In contrast to GaN-based heterostructures the decrease in the drift velocity overshoot does not exceed 30 % in the studied cases.

Keywords: heterostructure, field-effect transistor, gallium nitride, non-local heating

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы достигнут огромный прогресс в развитии технологий нитрида галлия. Транзисторы на его основе демонстрируют рекордные значения удельной мощности в различных частотных диапазонах [1]. Уверенно господствуя среди мощных приборов в сантиметровом диапазоне длин волн, нитрид галлия стал основным трендом современной мощной твердотельной электроники и в миллиметровом диапазоне. Длины затворов транзисторов, успешно работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, достигли уровня сотых долей микрона [1, 2], такие приборы уверенно закрепились в 3-мм диапазоне длин волн [2] и продвинулись почти до терагерц [3]. В литературе постоянно появляются сообщения по методам улучшения характеристик

нитридгаллиевых приборов: увеличения их мощности, крутизны, улучшения линейности [4–6]. Достигнутые успехи позволяют давать положительные прогнозы по дальнейшему продвижению нитридгаллиевых приборов вверх по рабочим частотам. Причины преимущества нитридгаллиевых приборов по удельной мощности перед GaAs-приборами очевидны – высокая теплопроводность карбидокремниевых подложек, большая величина запрещённой зоны и высокая поверхностная плотность электронов. Даже в нелегированных AlGaN – GaN-гетероструктурах она достигает величин порядка 10^{13} см⁻² [7], при этом в [6] сообщается, что введение в гетероструктуру градиентных слоев AlGaN, мольная доля алюминия в которых представлена функцией от координаты, также дает дополнительный прирост поверхностной концентрации. Однако достаточно высокий коэффициент усиления этих приборов вызывает определённые вопросы.

Максимальная частота усиления транзистора f_i пропорциональна средней дрейфовой скорости электронов под затвором, в свою очередь, коэффициент усиления пропорционален квадрату f_i . В транзисторах с субмикронным затвором средняя дрейфовая скорость электронов определяется всплеском дрейфовой скорости. Как было неоднократно показано [8, 9], в плане частотных свойств чистый объёмный нитрид галлия сильно уступает чистому объёмному арсениду галлия. В то же время сравнение мощных GaAs ДрНЕМТ с приборами на основе GaN-гетероструктур показывает, что при одинаковых длинах коротких затворов коэффициент усиления GaN-транзисторов часто оказывается не меньше, чем у GaAs-аналогов. Таким образом, транзисторы на гетероструктурах GaN/AlGaN по максимальным рабочим частотам практически не уступают, а иногда и превосходят приборы на традиционных псевдоморфных гетероструктурах. Объяснение этого эффекта, основанное на том, что в GaN в сильных полях дрейфовая скорость электронов больше, чем в GaAs, не выдерживает никакой критики [9]. Тот факт, что технологические работы по улучшению характеристик транзисторов на основе псевдоморфных GaAs-гетероструктур практически остановлены, а все усилия направлены на развитие технологий приборов с узкозонным каналом [10], в то время как нитридные приборы продолжают совершенствоваться, несомненно имеет место, однако не объясняет количественно все достижения транзисторов на основе GaN в сравнении с приборами на GaAs, поэтому вопрос остаётся открытым. Кроме того, сравнивать перспективы развития приборов по характеристикам чистых объёмных материалов [8, 9] не совсем корректно – современные приборы производят на основе гетероструктур, а не объёмных материалов. Динамика горячих электронов в гетероструктурах сильно отличается от их поведения в объёме. Например, для транзисторов на основе GaAs при анализе транспорта электронов большое значение имеют переходы электронов между слоями гетероструктуры (поперечный пространственный перенос) [11], которые сильно снижают дрейфовую скорость электронов под затвором прибора. Поэтому для объяснения физики происходящих явлений и прояснения ситуации представляет интерес проанализировать нелокальную динамику электронов именно в изготовленных на основе различных материалов современных транзисторных гетероструктурах.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Расчёт всплеска дрейфовой скорости с учётом специфики нитридгаллиевых гетероструктур проводился на основе простой феноменологической модели [11], предназначенной для анализа нелокального разогрева электронов в транзисторных гетероструктурах с идеализированным (бесконечно длинным) затвором при возможном сильном размерном квантовании в направлении, перпендикулярном поверхности структур. Потенциальный рельеф и уровни размерного кванто-

вания для этого направления определяются на основе численного самосопряженного решения уравнений Шредингера и Пуассона:

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d\Psi_i(x)}{dx} \right) + U(x)\Psi_i(x) &= E_i\Psi_i(x), \\ U(x) &= E_{c0}(x) - q \cdot \varphi(x), \\ \frac{d}{dx} \left(\kappa(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} \right) &= -\frac{\rho(x)}{\kappa_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее $\Psi_i(x)$ и E_i – собственные функции и собственные значения оператора Гамильтона; $E_{c0}(x)$ – функция, задающая на гетерограницах и внутри структуры профиль потенциальной энергии, соответствующей электрическому потенциалу дна зоны проводимости; $\kappa(x)$, κ_0 – диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума; m^* – эффективная масса электрона в зоне проводимости; q – абсолютное значение заряда электрона; \hbar – постоянная Планка.

В областях координатного пространства, в которые не проникают волновые функции локализованных и резонансных состояний, а также выше последнего найденного уровня (в этом случае считается, что дно зоны проводимости совпадает с $U(x)$ или последним найденным уровнем) энергетический спектр считается непрерывным и плотность объёмного заряда вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \rho(x) &= q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x), \\ \rho_c(x) &= -qn_c(x) = -q \cdot N_c(x) \cdot \int_0^\infty \frac{\sqrt{E_k} dE_k}{1 + \exp\left(\frac{E_k - E_F}{kT}\right)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где E_F – энергия Ферми; E_k – кинетическая энергия электронов в зоне проводимости; $N_c(x) = 2 \left(\frac{m^*(x)kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$ – эффективная плотность состояний в зоне проводимости; $N_D(x)$ и $N_A(x)$ – концентрации ионизованных доноров и акцепторов; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура (в данном случае температура горячих электронов).

В области пространства, в которой локализованы волновые функции дискретного энергетического спектра (квантовой области):

$$\begin{aligned} \rho(x) &= q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x) - q \sum_i n_i |\Psi_i(x)|^2, \\ n_i &= \left(\frac{m^*(x)kT}{\pi\hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{E_F - E_i}{kT} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Структуры на основе нитрида галлия имеют некоторые особенности. В них добавочный двумерный электронный газ на границе раздела гетероструктуры формируется благодаря полярной природе полупроводников. Все полупроводники на основе нитрида галлия оказываются полярными в результате спонтанной поляризации P_{sp} . Также на границах раздела возникают из-за несоответствия постоянных кристаллической решетки тангенциальные напряжения, которые приводят

к дополнительной пьезоэлектрической поляризации P_{pz} . Согласно [12], уравнение Пуассона для одномерного случая и структур на основе GaN примет вид

$$\frac{d}{dx} \left(\kappa_0 \kappa(x) \frac{d\phi(x)}{dx} + P_{tot}(x) \right) = -q (N_D(x) - n(x)), \quad (4)$$

где $P_{tot}(x)$ – суммарная поляризация полупроводника в точке x , представляющая собой сумму спонтанной и пьезоэлектрической составляющих поляризации:

$$P_{tot}(x) = P_{sp} + P_{pz}. \quad (5)$$

Согласно [13, 14], спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации определяются следующим образом:

$$P_{sp} = (-0,052y - 0,029), \quad (6)$$

$$P_{pz} = 2 \frac{a_{GaN} - a_{Al_yGa_{1-y}N}}{a_{Al_yGa_{1-y}N}} \left(e_{31} - e_{33} \frac{c_{13}}{c_{33}} \right). \quad (7)$$

Здесь y – мольная доля Al; a_{GaN} – постоянная решетки GaN; $a_{Al_yGa_{1-y}N}$ – постоянная решетки $Al_yGa_{1-y}N$; $e_{ij} = e_{ij}(AlN) \cdot y + e_{ij}(GaN) \cdot (1 - y)$ – пьезоэлектрические коэффициенты; $c_{13} = (5y + 103)$ и $c_{33} = (-32y + 405)$ – константы упругости.

Из решения системы (1) ... (7) находятся волновые функции электронов. По ним и заселённости уровней с учётом непрерывного спектра находится вероятность нахождения электронов в широкозонном материале.

В направлении, параллельном поверхности структуры, транспорт электронов описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии, аналогичной по форме [8, 15]. Эта система в предположении, что частота рассеяния электронов задается в виде $\nu = \nu_1 p_1 + \nu_2 p_2$, где p_1, p_2, ν_1, ν_2 – вероятности нахождения электронов и их частоты рассеяния в узкозонном слое канала и в более широкозонных слоях, обрамляющих канал, соответственно записывается как:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left(E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right), \quad (9)$$

$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)). \quad (11)$$

Здесь $q, V, m^*, \varepsilon = 3kT/2$ – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно; E – напряженность электрического поля; $V_{si}(\varepsilon), E_{si}(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие задаваемой энергии ε и получаемые из расчетов методом Монте-Карло [16] статических характеристик

материалов. При анализе динамики электронов уравнения гидродинамической модели и система Шредингер – Пуассон решаются самосогласованно (температура электронов в системе (1)...(7) определяется системой (8)...(11), а вероятности p_i в системе (8)...(11) – по волновым функциям, найденным из решения системы (1)...(7)).

Используемая гидродинамическая модель (уравнения (8)...(11)) хорошо описывает динамику электронов в ряде объёмных материалов (GaAs, InP, $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$) и несколько (в районе 10 %) занижает всплеск дрейфовой скорости электронов в GaN [8]. Однако очевидно, что механизмы рассеяния в гетероструктурах существенно отличаются от объёмных, кроме того, динамика электронов в них может носить достаточно сложный характер [17–21]. Поэтому можно предположить, что корректное численное описание всплеска дрейфовой скорости электронов в таких системах может быть получено, как минимум, на основании решения кинетического уравнения. В этой области достигнут серьёзный прогресс [22], но пока подобные модели оказываются достаточно сложны для полного анализа рассматриваемых проблем. Таким образом, из-за своей простоты используемая модель, скорее всего, довольно грубо описывает динамику горячих электронов. Кроме того, в канале реального транзистора распределение напряжённости электрического поля носит не ступенчатый, а несколько другой характер, зависящий от конкретного режима работы прибора, что заметно сказывается на распределениях дрейфовой скорости электронов. Поэтому используемая модель позволяет проводить сравнение различных гетероструктур только качественно и описывает эффекты, которые сильно влияют на динамику электронов. Следует отметить, что мольная доля алюминия в подобных структурах может несколько варьироваться, поэтому для расчёта динамики закладывались частоты рассеяния для $y = 25\%$, то есть рассматривался худший возможный вариант.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Рассматривались две структуры: типичная структура DpHEMT и структура нитридгаллиевого HEMT. В структуре $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} - \text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As} - \text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ширина квантовой ямы составляла 12 нм, расстояние от поверхности до канала – 31,5 нм, поверхностная плотность электронов – $3,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Структура GaN-транзистора включала в себя нелегированный слой $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ с мольной долей $x = 0,18$ и толщиной 22 нм и слой GaN толщиной 450 нм. Эффективная ширина канала оказалась равна 15 нм. Благодаря Ga полярной ориентации структуры, расчетная поверхностная плотность носителей заряда составила $9,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Расчеты проведены для электронов, которые двигались 0,2 пс в слабом поле напряжённостью 1 кВ/см, затем 1 пс в сильном поле, а потом опять в слабом поле. Напряжённость сильного поля подбиралась так, чтобы примерно соответствовать средней напряжённости в канале транзистора с коротким затвором. Для наглядности при каждой напряжённости поля проводилось два расчёта: строгий расчёт по используемой модели и расчёт, когда вероятность нахождения электронов в широкозонном материале не определялась из решения самосогласованной задачи, а изначально просто задавалась.

В принципе определённые выводы можно сделать, сравнивая статические зависимости дрейфовой скорости электронов в объёмных компонентах рассматриваемых гетероструктур (рис.1).

Видно, что при сравнительно низких напряженностях электрического поля, когда основной транспорт идёт по Г-долине, дрейфовые скорости в $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ даже для чистых

материалов отличаются в 3-4 раза. В то же время разница в скоростях для GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ не превышает 30 %. Кроме того, в гетероструктурах ДрНЕМТ квантовая яма прямоугольная, а в гетероструктурах на основе GaN треугольная, а влияние поперечного пространственного переноса на динамику электронов для треугольной ямы существенно ниже [11]. Поэтому можно предположить, что в первом случае переходы электронов между слоями гетероструктуры будут оказывать гораздо большее влияние на нелокальный разогрев электронов, чем во втором, однако для оценки величины эффекта нужен конкретный расчёт.

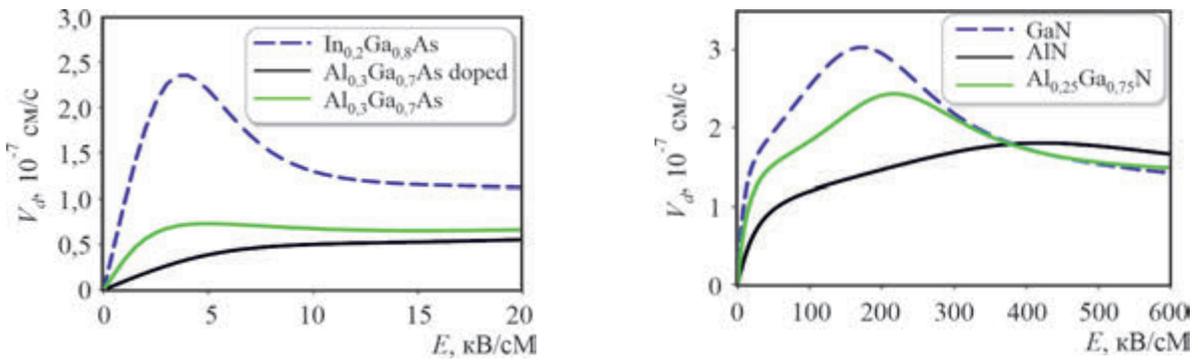
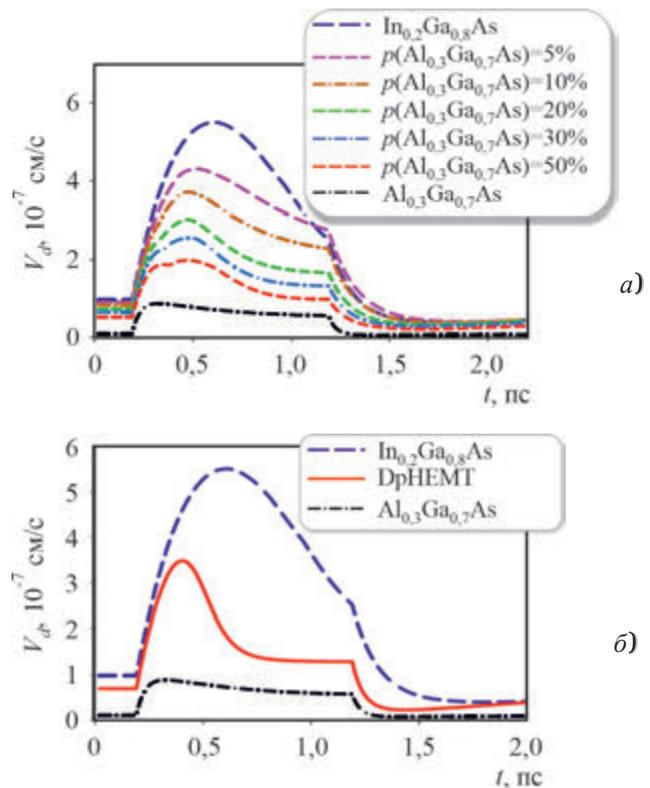


Рис. 1. Зависимости дрейфовой скорости электронов в объёмных материалах – компонентах рассматриваемых гетероструктур

Для первой гетероструктуры результаты расчётов всплеска дрейфовой скорости приведены на рис. 2, 3.

Рис. 2. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени для ДрНЕМТ-структуры (при $t = 0 \dots 0,2$ пс и $1,2 \dots 1,5$ пс $E = 1$ кВ/см, при $t = 0,2 \dots 1,2$ пс $E = 10$ кВ/см):
 а – вероятность нахождения электронов в широкозонном материале задается;
 б – самосогласованный расчёт



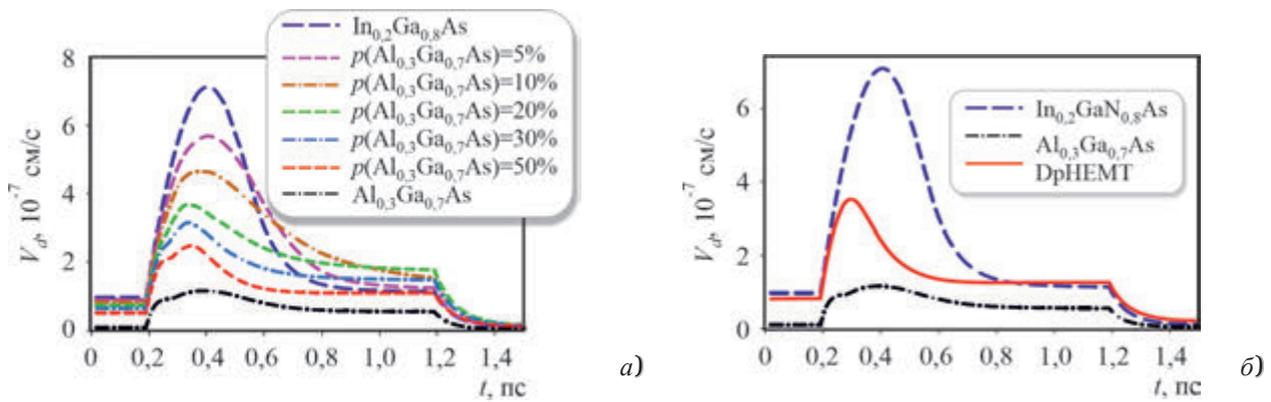


Рис. 3. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени для DpHEMT-структуры (при $t = 0 \dots 0,2$ пс и $1,2 \dots 1,5$ пс $E = 1$ кВ/см, при $t = 0,2 \dots 1,2$ пс $E = 20$ кВ/см):

a – вероятность нахождения электронов в широкозонном материале задается;

б – самосогласованный расчёт

Для второй гетероструктуры результаты расчётов всплеска дрейфовой скорости приведены на рис. 4, 5.

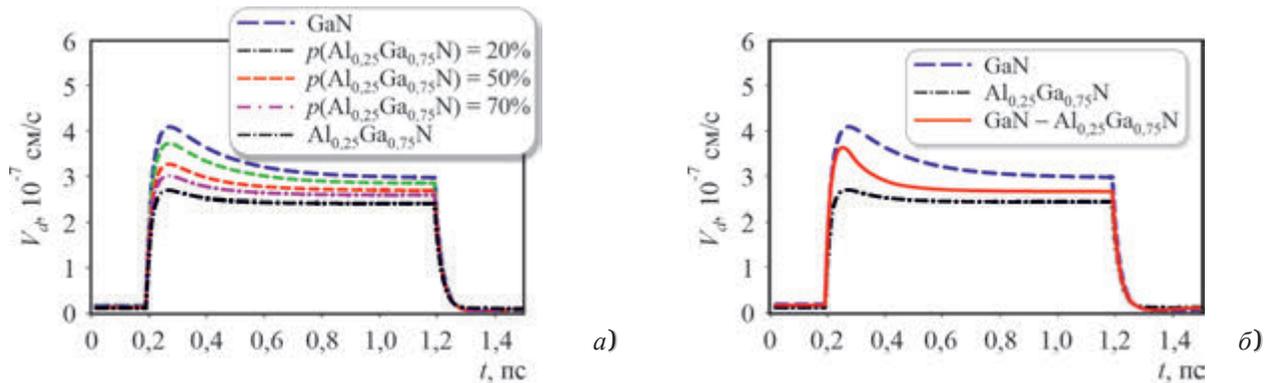


Рис. 4. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени для структуры AlGaIn – GaN (при $t = 0 \dots 0,2$ пс и $1,2 \dots 1,5$ пс $E = 1$ кВ/см, при $t = 0,2 \dots 1,2$ пс $E = 200$ кВ/см:

a – вероятность нахождения электронов в широкозонном материале задается;

б – самосогласованный расчёт

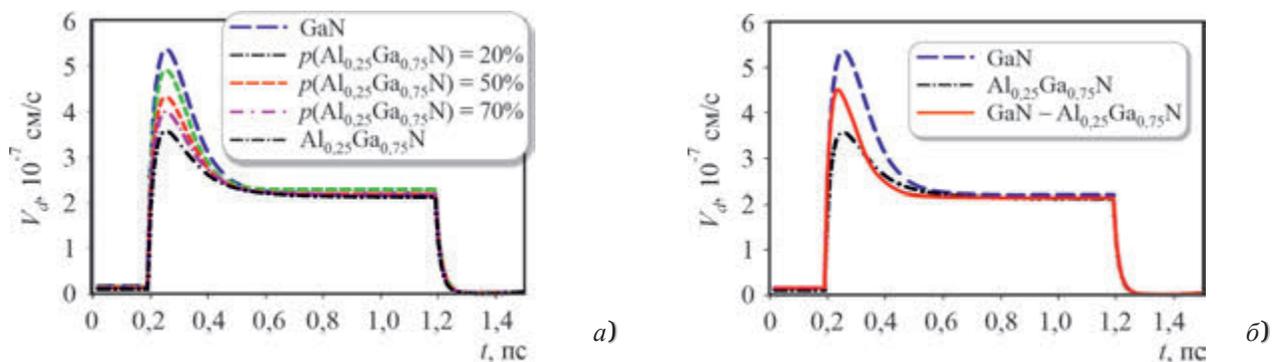


Рис. 5. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени для структуры AlGaIn – GaN (при $t = 0 \dots 0,2$ пс и $1,2 \dots 1,5$ пс $E = 1$ кВ/см, при $t = 0,2 \dots 1,2$ пс $E = 300$ кВ/см):

a – вероятность нахождения электронов в широкозонном материале задается;

б – самосогласованный расчёт

Видно, что в гетероструктуре на основе GaAs переходы электронов между слоями сильно влияют на их дрейфовую скорость. Очевидно, это происходит из-за того, что скорости электронов в $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ сильно отличаются, и особенно в случае нелокальной динамики. Например, при величине сильного поля $E = 20$ кВ/см, величина всплеска дрейфовой скорости в максимуме отличается в 5 раз. Так, в итоге при переходе 20 % электронов в широкозонный материал (вероятность изначально задана) величина всплеска падает почти в два раза. В условиях, когда вероятность зависит от температуры электронов (самосогласованный расчёт), падение ещё больше, кроме того, вдвое падает и длительность всплеска (рис. 2, б и 3, б). В то же время для структур на основе нитрида галлия ситуация совершенно другая (рис. 3, 4). Даже для чистых материалов в рассмотренных случаях разница нелокальных скоростей электронов в максимуме составляет менее 35 %. Таким образом, нелокальная динамика электронов в GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ по сравнению с предыдущей гетеропарой отличается не слишком сильно (рис. 3, б и 4, б). Зависимости скорости от времени для гетероструктуры должны находиться где-то между или в районе зависимостей скорости от времени для чистого GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$. Соответственно зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов и в самосогласованном расчёте (рис. 4, б и 5, б) не слишком сильно отличаются от зависимости в чистом GaN. Таким образом, для всех рассмотренных случаев уменьшение дрейфовой скорости в максимуме составляет менее 30 %.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, одним из важных факторов, объясняющих высокие усилительные характеристики GaN-гетероструктур, является удачный состав компонентов гетеропары (динамика в узкозонном и широкозонном материалах не слишком отличается). Из этого можно сделать следующие выводы. Всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N} - \text{GaN}$ близок к всплеску дрейфовой скорости в чистом GaN. Поэтому, в отличие от арсенидгаллиевых гетероструктур, существенно увеличить скорость электронов в гетероструктурах на основе GaN, без использования принципиально новых подходов, будет весьма затруднительно, а следовательно, будет затруднено и дальнейшее продвижение вверх по частотному диапазону. В то же время в транзисторных гетероструктурах на основе GaN, в отличие от структур на основе GaAs, дрейфовая скорость электронов будет слабо зависеть от формы квантовой ямы. Это открывает широкие возможности по улучшению чисто «транзисторных свойств» GaN HEMT, например, уменьшению разлёта электронов из канала для уменьшения крутизны исток – сток, минимизации расстояния затвор – канал для увеличения крутизны затвор – исток и соответственно уменьшения влияния паразитных элементов и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, H. (Jul. 2019). Power Amplifiers Performance Survey 2000. – Present. [Online]. Available: <https://gems.ece.gatech.edu/PAsurvey.html>.
2. Micovic, M. GaN MMIC PAs for MMW Applications HRL Laboratories LLC // mmicovic@hrl.com.
3. Tang, Y. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with f_r/f_{\max} of 454/444 GHz // IEEE Electron Device Lett. – Jun. 2015. – Vol. 36, No 6. – P. 549 – 551. – Doi: 10.1109/LED.2015.2421311.
4. Rahman, S. Optimization of graded AlInN/AlN/GaN HEMT device performance based on quaternary back barrier for high power application / S. Rahman, N. A. Farhana Othman, S.W. Muhamad Hatta and N. Soin // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2017. – Vol. 6, No 12. – P. 805 – 812. – DOI: 10.1149/2.0131712jss.

5. **Bajaj, S.** Graded AlGa_N channel transistors for improved current and power gain linearity / S. Bajaj, Z. Yang, F. Akyol, P. S. Park, Y. Zhang, A. L. Price, S. Krishnamoorthy, D. J. Meyer and S. Rajan // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Vol. 99 – P. 1 – 6. – DOI: 10.1109/TED.2017.2713784.
6. **Ancona, M. G.** Compositionally graded III-N HEMTs to improve linearity: a simulation study / M. G. Ancona, J. P. Calame, D. J. Meyer, S. Rajan and B. P. Downey // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Vol. 66, No 5. – P. 2151. – DOI:10.1109/TED.2019.2904005.
7. **Lenka T. R.** Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGa_N/Ga_N and Al–GaAs/GaAs-based HEMT / T. R. Lenka and A. K. Panda // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, No 5. – P. 650 – 656. – DOI: 10.1063/1.370577.
8. **Foutz, B. E.** Transient electron transport in wurtzite Ga_N, In_N and Al_N / B. E. Foutz, S. K. O’Leary, M. S. Shur and L. F. Eastman // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85, No 11. – P. 7727 – 7734. – DOI: 10.1063/1.370577.
9. **Пашковский, А. Б.** Нелокальный дрейф электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия / А. Б. Пашковский, В. М. Лукашин, Я. Б. Мартынов, В. Г. Лапин, А. А. Капралова, И. А. Анисимов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 4(523). – С. 5 – 16.
10. **Camarchia, V.** A review of technologies and design techniques of millimeter-wave power amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D. P. Nguyen, H. Wang and A.-V. Pham // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – Jul. 2020. – Vol. 68, No 7. – P. 2957 – 2983. – DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792.
11. **Пашковский, А. Б.** Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT / А. Б. Пашковский, С. И. Новиков, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, Я. Б. Мартынов // Письма в Журнал Технической Физики. – 2018. – Т. 44, вып. 17. – С. 103 – 110. – DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46577.17372.
12. **Shenqi Qu.** Analysis of transconductance characteristic of AlGa_N/Ga_N HEMTs with graded AlGa_N layer // Shenqi Qu, Xiaoliang Wan, Hongling Xiao et al. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. – (2014) 66:20101.
13. **Ambacher, O.** Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_N/Ga_N heterostructures // O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weiamann et al. // J. Appl. Phys. – (2000) 87, 334.
14. **Lenka, T. R.** Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGa_N/Ga_N and Al–GaAs/GaAs-based HEMT // T. R. Lenka and A. K. Panda // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, No 5. – P. 650 – 656.
15. **Shur M.** Influence of nonuniform field distribution on frequency limits of GaAs field-effect transistors // Electronics Letters. – 1976. – Vol.12, No 23. – P. 615 – 616.
16. **Гарматин, А. В.** Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках / А. В. Гарматин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1985. – № 3 (377). – С. 66.
17. **Кальфа, А. А.** Пространственный перенос двумерных электронов в структуре металл–Al_xGa_{1-x}As–GaAs с селективным легированием / А. А. Кальфа, А. Б. Пашковский // ФТП. – 1990. – Т. 24, вып. 3. – С. 521 – 526.
18. **Вагидов, Н. З.** Моделирование переноса электронов в реальном пространстве гетероструктуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As (для малых и больших значений *x*) / Н. З. Вагидов, З. С. Грибников, В. М. Иващенко // ФТП. – 1989. – Т. 23, вып. 2. – С. 793 – 798.
19. **Вагидов, Н. З.** Дрейфовая скорость горячих электронов в обогащённых слоях при нетемпературном характере их распределения по энергии / Н. З. Вагидов, З. С. Грибников, В. М. Иващенко // ФТП. – 1990. – Т. 24, вып. 6. – С. 1087 – 1094.
20. **Горфинкель, В. Б.** Описание переноса электронов в гетероструктурах с селективным легированием с помощью уравнений баланса / В. Б. Горфинкель, С. Г. Шофман // ФТП. – 1988. – Т. 22, вып. 5. – С. 793 – 798.
21. **Пашковский, А. Б.** / А. Б. Пашковский, С. А. Богданов // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45, вып. 20. – С. 11 – 14. – DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48385.17925.
22. **Protasov, D. Yu.** The influence of impurity profiles on mobility of two-dimensional electron gas in AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures modulation-doped by donors and acceptors / D. Yu. Protasov, K. S. Zhuravlev // Solid-State Electronics. – 2017. – Vol. 129. – P. 66 – 72. – DOI: 10.1016/j.sse.2016.12.013.

Статья поступила 26 августа 2021 г.

УДК 621.3.049.77

**МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА HEMT GaN
ДЛЯ СВЧ-МОДУЛЯ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 2,5 Вт
И УСИЛЕНИЕМ 30 дБм В X-ДИАПАЗОНЕ**

**С. А. Гамкрелидзе¹, Д. Л. Гнатыук¹, Н. В. Зенченко^{1,2}, А. В. Зуев¹, П. П. Мальцев^{1,2},
О. С. Матвиенко¹, А. О. Михалев^{1,2}, А. Ю. Павлов¹**

¹ИСВЧПЭ РАН, г. Москва

²РТУ МИРЭА, г. Москва

Рассмотрены результаты разработки монолитной интегральной схемы (МИС) на GaN HEMT буферного усилителя с линейной выходной мощностью до 1 Вт и выходной мощностью насыщения более 2,5 Вт при напряжении питания 30 В для X-диапазона. Длина и ширина затвора транзистора составляют 0,25 мкм и 1,6 мм соответственно. Проектирование МИС проводилось для копланарной технологии, разработанной в ИСВЧПЭ РАН, которая заключается в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины (с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами), поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10...14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложках из карбида кремния и сапфира.

КС: наногетероструктура AlGaN/AlN/GaN, нитрид галлия, карбид кремния, сапфир, каскодная схема включения транзисторов, монолитная интегральная схема, усилитель мощности

**HEMT GaN MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS
FOR MICROWAVE MODULE WITH 2.5 W OUTPUT POWER
AND 30 dBm GAIN IN X-BAND**

**S. A. Gamkrelidze¹, D. L. Gnatyuk¹, N. V. Zenchenko^{1,2}, A. V. Zuev¹,
P. P. Maltsev^{1,2}, O. S. Matvienko¹, A. O. Mikhalev^{1,2}, A. Yu. Pavlov¹**

¹IUHFSE RAS, Moscow

²RTU MIREA, Moscow

The results of the development of a GaN HEMT monolithic integrated circuit (MIC) of a buffer amplifier with a linear output power up to 1 W and a saturation output power of more than 2.5 W at 30 V supply voltage are considered for X-band. The gate length and width of the transistor are 0.25 μm and 1.6 mm, respectively. The design of MIS was carried out for the coplanar technology, developed in IUHFSE RAS, it consists of creating a ground plane above the front surface of the plate (with already manufactured active and passive microwave elements) on top of a polymer dielectric layer with a thickness of 10...14 μm , which avoids the need to form through holes in the substrate of silicon carbide and sapphire.

Keywords: AlGaN/AlN/GaN nanoheterostructure, gallium nitride, silicon carbide, sapphire, cascode transistor switching circuit, monolithic integrated circuit, power amplifier

1. ВВЕДЕНИЕ

Усилитель мощности (УМ) – один из важнейших узлов систем радиолокации, выходная мощность которого напрямую влияет на дальность действия РЛС. Для обеспечения выходной

мощности усилителя необходимо на его вход подать заданную минимальную мощность от буферного усилителя мощности (БУМ).

Технология изготовления МИС на GaN НЕМТ по сравнению с традиционной технологией на GaAs рНЕМТ позволяет получать высокую плотность мощности, высокое рабочее напряжение, повышенную теплопроводность подложки.

В статье представлены результаты разработки МИС на GaN НЕМТ буферного усилителя с линейной выходной мощностью до 1 Вт и выходной мощностью насыщения более 2,5 Вт при напряжении питания 30 В для X -диапазона, который может предварительно усиливать сигнал до 1,5 Вт или до 4 Вт (при балансном включении МИС) для гибридно-монокристаллических интегральных схем (ГМИС) СВЧ-усилителей на транзисторах GaN НЕМТ TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02 (ф. TriQuint, TGA2238, США) с выходной мощностью 10 и 20 Вт соответственно при напряжении питания 30 В для X -диапазона, разработанных в АО «НПП «Исток» [1].

2. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ

Одним из эффективных способов снижения потребляемой мощности МИС является уменьшение количества каскадов усиления (в идеале – до одного) путем повышения коэффициента усиления единичного каскада. В этой связи уникальными возможностями обладает каскадная схема включения транзисторов (первый транзистор включен с общим истоком, второй транзистор – с общим затвором), которая особенно интересна при использовании нитрида галлия, т. к. позволяет технологически совместить два транзистора в одном каскаде и значительно уменьшить его площадь. Потребность в минимизации площади кристалла СВЧ МИС связана с высокой стоимостью подложки карбида кремния по сравнению с арсенидом галлия (разница в цене достигает одного-двух порядков величины).

В ИСВЧПЭ РАН разработана МИС БУМ на GaN НЕМТ для диапазона частот 8...12 ГГц с выходной мощностью 2,5...3 Вт при напряжении питания 30 В, токе потребления 0,6 А и КПД не менее 30 %.

Электрическая схема МИС БУМ выполнена (рис. 1) на основе двух параллельно соединенных схем транзисторов в каскадном включении $T1$ с $T3$ и $T2$ с $T4$, работающих на общую нагрузку. Топология МИС приведена на рис. 2, размеры кристалла составляют 1,8×1,9 мм (3,42 мм²).

Для работы в классическом непрерывном режиме усиления без проявления короткоканальных эффектов транзисторы должны иметь аспектное соотношение длины затвора к толщине барьерного слоя $L_g/t_{bar} > 10...15$ [2–4].

При проектировании использованы параметры гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN отечественного производства (ЗАО «Элма-Малахит», г. Москва, Зеленоград). На подложке из карбида кремния (SiC) гетероструктуры имели толщину барьерного слоя 14,7 нм, а GaN НЕМТ разработаны с длиной затвора транзистора 0,25 мкм, что обеспечило аспектное соотношение 17; на подложке из сапфира (Al₂O₃) толщина барьерного слоя составила 13,0 нм и аспектное отношение – 19.

Проектирование усилителя производилось под разработанную в ИСВЧПЭ РАН технологию [3–15], заключающуюся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами, поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10...14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложках SiC и Al₂O₃. Заземление элементов схемы выполнялось через отверстия в слое диэлектрика. Конструктивно-технологический разрез МИС с металлизацией на верхнем слое пластины показан на рис. 3.

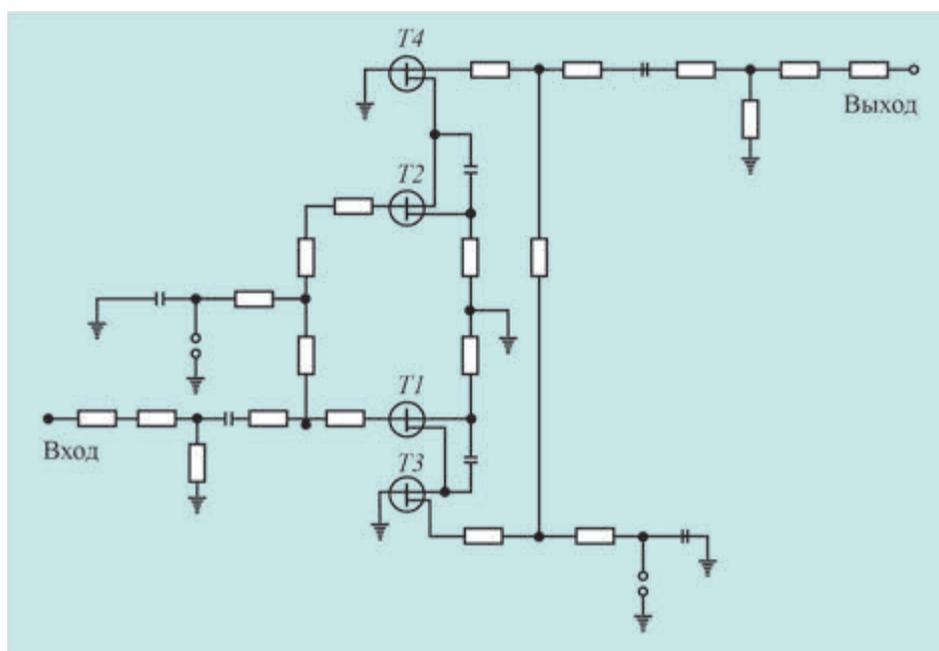


Рис.1. Электрическая схема МИС БУМ

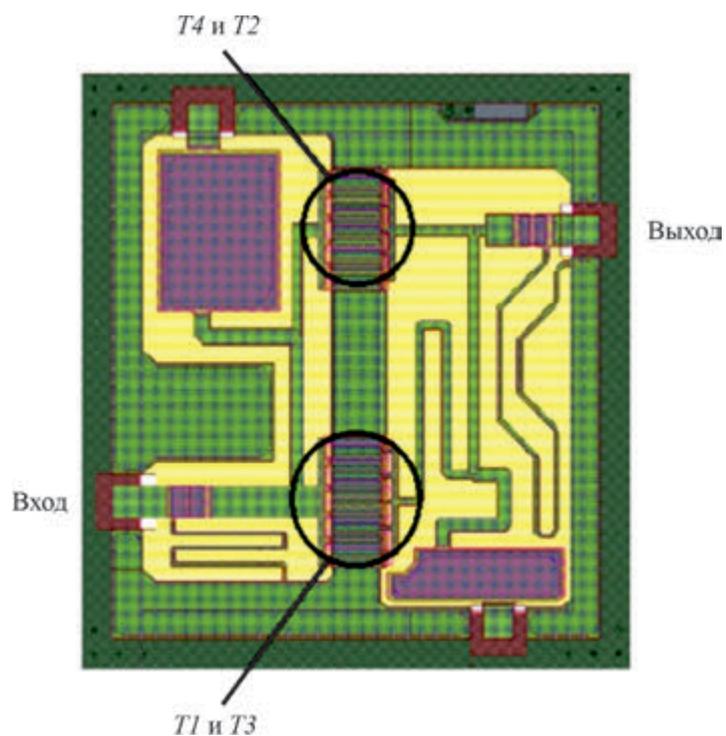


Рис. 2. Топологический проект МИС БУМ

Ширина затворов выходного транзистора каскодной схемы составляет 10×160 мкм (или 3,2 мм для параллельно работающих каскодных схем в балансном усилителе) и обеспечивает плотность мощности примерно 1 Вт/мм на частоте 10 ГГц.

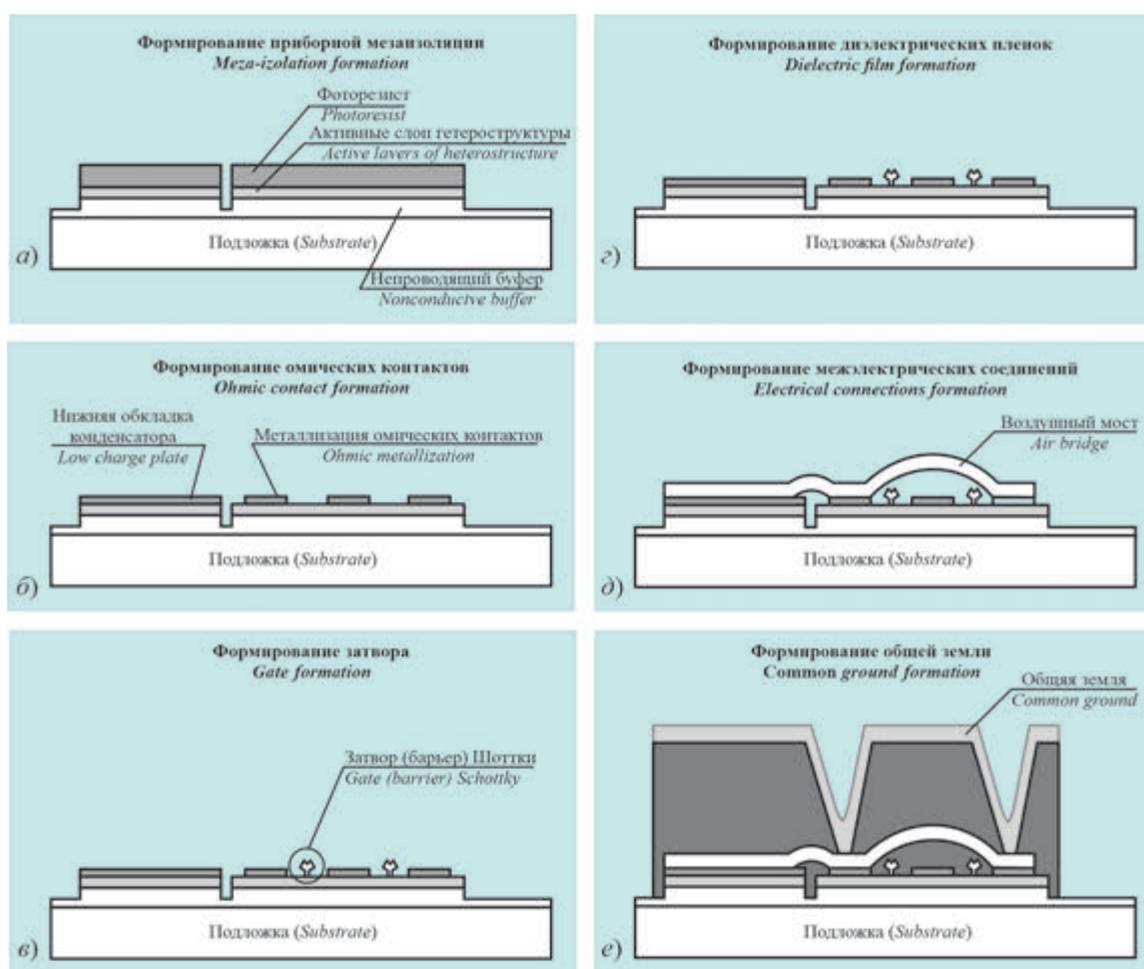


Рис. 3. Основные этапы технологического маршрута с металлизацией на лицевой стороне пластины МИС на GaN HEMT

В ИСВЧПЭ РАН разработана технология изготовления МИС на нитриде галлия при напряжении положительного питания 30 В и отрицательном напряжении смещения 3,5...6 В с плотностью мощности 1 Вт/мм, которая аналогична МИС на арсениде галлия и позволяет использовать ранее применяемые материалы и технологические приемы [3– 15]. По результатам работы получены свидетельства на топологии интегральных микросхем усилителей на GaN HEMT [13, 14].

Для обеспечения работы БУМ необходима входная мощность 10...20 дБм, и для решения этой задачи был разработан предварительный усилитель мощности (ПУМ) по аналогичной технологии. Электрическая схема МИС ПУМ показана на рис. 4. МИС ПУМ представляет собой двухкаскадную схему. В первом каскаде использованы два каскадно включенных транзистора, $T1$ и $T2$, с шириной затвора 2×100 мкм. Для повышения коэффициентов стабильности и усиления применена обратная связь. Во втором каскаде использовался транзистор 2×50 мкм. На основе принципиальной схемы разрабатывался топологический проект, приведенный на рис. 5, размеры кристалла – $1,9 \times 1,3$ мм.

При изготовлении каждого типа МИС использовался свой комплект фотошаблонов для работы на установке прецизионной контактной фотолитографии SUSS MJB4 IR (i -, g -, h -, line UV и

DUV ($\lambda = 200 \dots 250$ нм)). Одинаковые фотошаблоны использовались на разных типах подложек – карбиде кремния и сапфире. Затворы GaN HEMT формировались на установке электронно-лучевой литографии высокого разрешения Raith150-TWO (Raith GmbH).

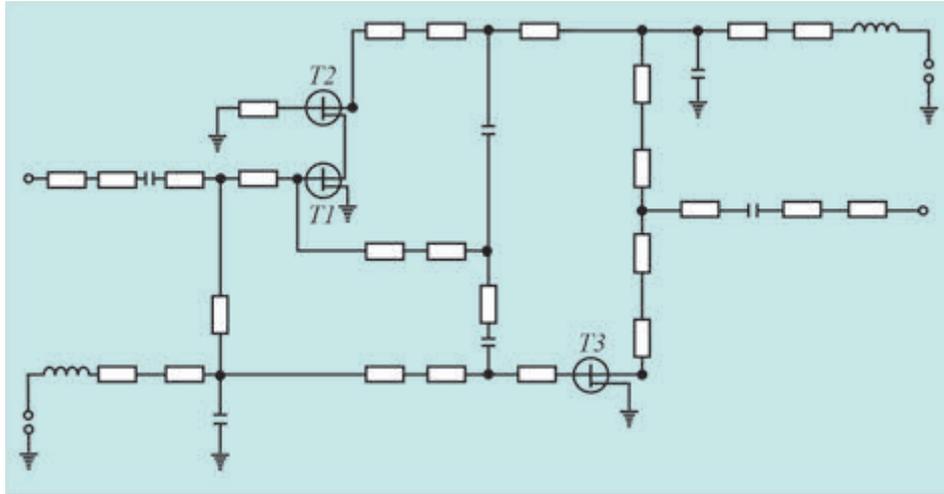


Рис. 4. Электрическая схема МИС ПУМ

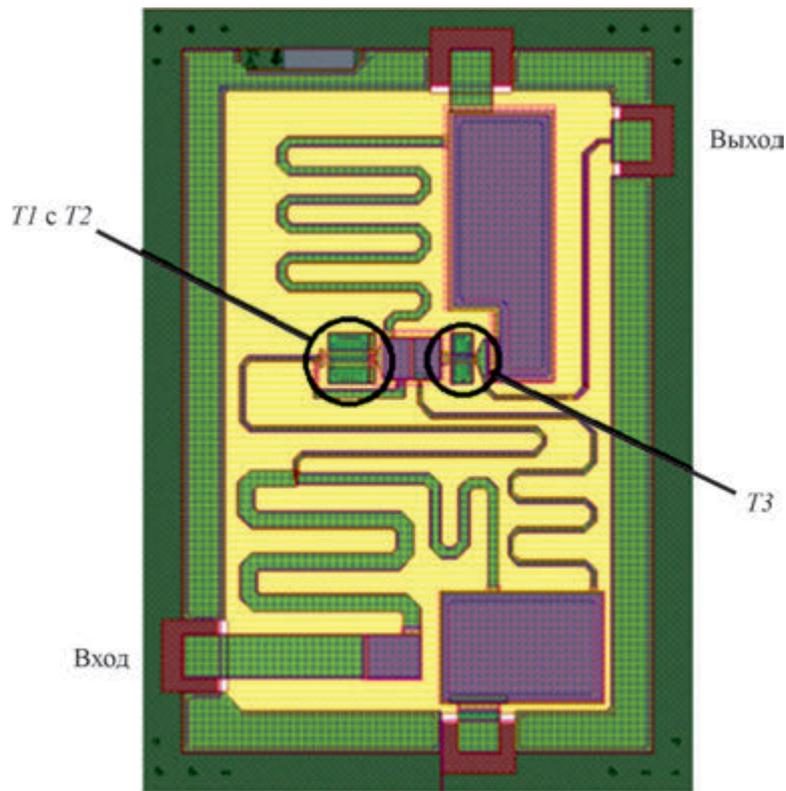


Рис. 5. Топологический проект МИС ПУМ

Опытная технологическая линейка ИСВЧПЭ РАН имеет возможность мелкосерийного производства МИС до 3,5 тысяч кристаллов в год на подложках диаметром 51 и 76 мм из материала-

лов A_3B_5 . Процент выхода годных – 28...32 %. Цена кристалла размерами 7,9×2,2 мм (17,38 мм²) из нитрида галлия на сапфире согласована в процессе выполнения завершённой ОКР и составляет 33 тыс. руб. [15].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведено сравнение характеристик МИС БУМ и ПУМ на подложках двух типов: карбиде кремния и сапфире.

В таблице приведены основные параметры на частоте 10 ГГц разработанных в ИСВЧПЭ РАН МИС БУМ на каскодных транзисторах с общей нагрузкой для двух типов подложек – SiC и Al₂O₃, а также ближайших зарубежных аналогов – трехкаскадных УМ TriQuint TGA2238 (производитель США) [16] на GaN/SiC и Sandra-semi SDC2016 (производитель Малайзия) [17] на GaAs.

МИС (размеры, мм), производитель	$U_{пит}$, В	$I_{потр}$, мА	$P_{вых max}$, дБм (Вт)	K_{p0} , дБм ($P_{вх} = 10$ дБм)	$K_{p,m}$, дБм ($P_{вх} = 20$ дБм)	КПД, %
GaN / Al ₂ O ₃ (1,8×1,9), ИСВЧПЭ РАН	30	600	34,46 (2,79)	17,5	14,5	30,1
GaN / SiC (1,8×1,9), ИСВЧПЭ РАН	20	600	32,96 (1,98)	18,1	12,5	33
	30	600	34,73 (2,96)	17,3	14,27	32,8
	40		(4)	–	–	–
GaN / SiC (5,49×7,0), TriQuint, США	28	650	36,02 (4)	31	25	40
GaAs (3,2×5,8), Sandra-Semi, Малайзия	8	1300	36,99 (5)	–	–	40
GaN / SiC (1,0×0,8), АО «Светлана-Рост»	28	400	(2,7)	–	8	50

В зарубежных МИС использованы сквозные отверстия в кристалле для отвода тепла от истока и стока на заземляющую плоскость с обратной поверхности пластины, и эта конструкция является стандартной микрополосковой технологией. Аналогичный конструктивно-технологический базис использован в транзисторе АО «Светлана-Рост» на GaN/SiC [18], транзистор X-диапазона с длиной затвора 0,25 мкм и шириной 4×150 мкм обеспечил плотность мощности 4,6 Вт/мм и выходную мощность 2,7 Вт при КПД 50 %.

В ИСВЧПЭ РАН выходная мощность измерялась на зондовой станции без теплоотвода в импульсном режиме по питанию при скважности $Q = 100$ и длительности импульса $t = 1$ мкс для обеспечения допустимого теплового режима при $P_{потр} \leq 10$ Вт, а у американского аналога измерения проведены при $Q = 10$ и $t = 100$ мкс.

Следует отметить, что, по расчетам, МИС на подложке из карбида кремния, разработанная

в ИСВЧПЭ РАН, при подаче напряжения питания 40 В и размещении в теплоотводящем корпусе обеспечит на выходе мощность 4 Вт.

Важно подчеркнуть значительное уменьшение массогабаритных характеристик (в 5...7 раз) при изготовлении МИС с $P_{\text{вых}} = 3$ Вт в конструктивно-технологическом базисе, разработанном в ИСВЧПЭ РАН, по сравнению с зарубежными аналогичными усилителями мощности на подложке из карбида кремния.

Из характеристик МИС, приведенных в таблице, видно, что выходная мощность нитрид-галлиевых МИС на подложках из сапфира примерно на 5...10 % меньше, чем на подложках из карбида кремния, а стоимость отечественных гетероструктур для GaN НЕМТ в 5...7 раз меньше, что является важным экономическим показателем для СВЧ усилительных модулей.

Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления по мощности от входной мощности для МИС БУМ приведены на рис. 6 для двух типов подложек: из карбида кремния и сапфира. Амплитудно-частотные характеристики МИС БУМ показаны на рис. 7.

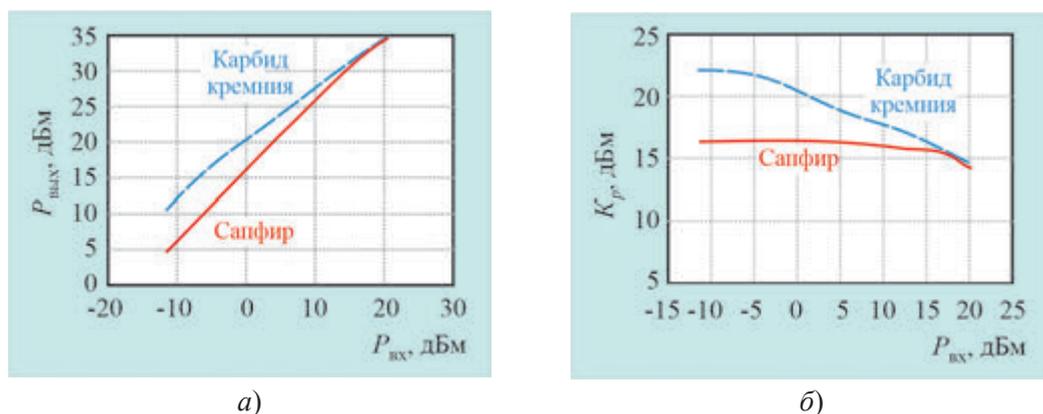


Рис. 6. Зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ (а) и коэффициента усиления K_p (б) МИС БУМ от входной мощности $P_{\text{вх}}$ для подложек из карбида кремния и сапфира при $U_{\text{пит}} = 30$ В

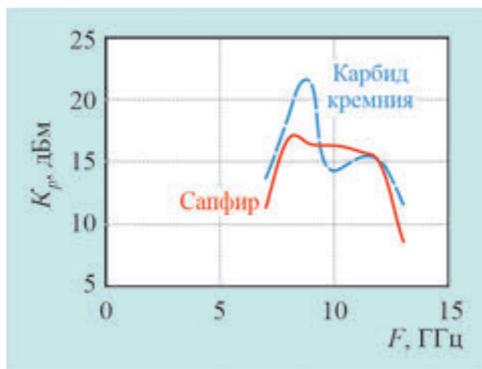


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики GaN МИС БУМ диапазона частот 8...12 ГГц для подложек из карбида кремния и сапфира

Исследования изготовленных в ИСВЧПЭ РАН макетов МИС ПУМ на двух типах подложек показали, что лучшие характеристики на 10...30 % имеют МИС на подложках из карбида кремния: коэффициент усиления – 14...24 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц при напряжении питания 10 В и токе потребления до 100 мА (рис. 8 и 9).

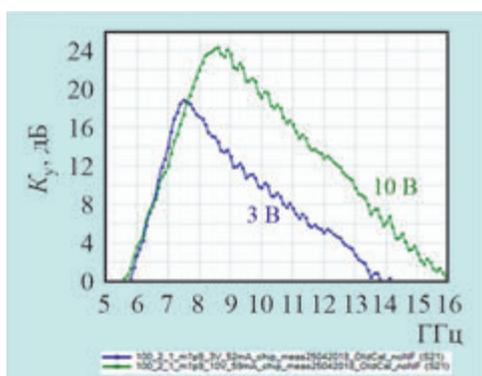


Рис. 8. Коэффициенты усиления при напряжении питания 3 и 10 В МИС ПУМ на подложке из карбида кремния

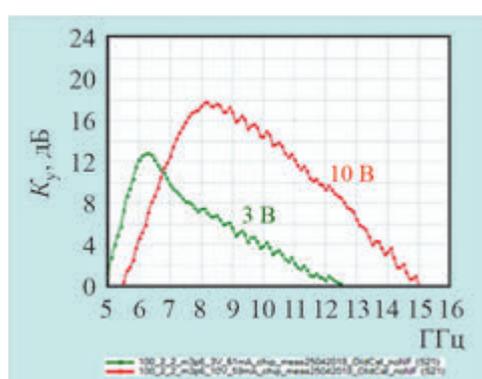


Рис. 9. Коэффициенты усиления при напряжении питания 3 и 10 В МИС ПУМ на подложке из сапфира

Замена подложки из карбида кремния на сапфировую приводит к снижению максимума коэффициента усиления до 18 дБ на 8 ГГц при напряжении питания 10 В. Уменьшение напряжения питания до 3 В снижает максимальный коэффициент усиления до 12 дБ и перемещает на частоту 6 ГГц.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в ИСВЧПЭ РАН каскодные схемы на нитриде галлия (гетероструктура AlGaN/AlN/GaN) с подложками из карбида кремния для буферного усилителя мощности имеют выходную мощность насыщения до 3 Вт при напряжении питания 30 В на частоте 9 ГГц, а занимают в 4...6 раз меньшую площадь кристалла, чем зарубежные.

Проектирование усилителя производилось по копланарной технологии, заключающейся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами, поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10...14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложке карбида кремния и сапфира.

Для изготовления БУМ с линейной выходной мощностью 1...1,5 Вт с кристалла при КПД 30...33 % можно использовать отечественную подложку из сапфира вместо зарубежного карбида кремния для GaN НЕМТ, при этом параметры ухудшаются незначительно – до 10 %.

Совместное использование МИС БУМ и ПУМ на GaN HEMT обеспечивает реализацию минимальных массогабаритных характеристик СВЧ-модулей при коэффициенте усиления по мощности до 30 дБм для применения в экстремальных условиях эксплуатации в радиолокационных системах робототехнических комплексов и малых космических аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефимов, А. С.** Гибридно-монолитные схемы усилителей с выходной мощностью 10 и 20 Вт в X-диапазоне / А. С. Ефимов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2 (549). – С. 32 – 37.
2. **Сечи, Ф.** Мощные и твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти. – М.: Техносфера, 2015. – 416 с.
3. **Мальцев, П. П.** Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ-приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров // Интеграл. – 2013. – № 3. – С. 25 – 29.
4. **Федоров, Ю. В.** Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные / Ю. В. Федоров, С. В. Михайлович // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 217 – 226.
5. **Павлов, В. Ю.** Технологии формирования сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN / В. Ю. Павлов, А. Ю. Павлов // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 10. – С. 635 – 644.
6. **Томош, К. Н.** Исследование процессов изготовления HEMT AlGaIn/AlN/GaN с пассивацией Si_3N_4 *in situ* / К. Н. Томош, А. Ю. Павлов, В. Ю. Павлов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 10. – С. 1434 – 1438.
7. **Климов, Е. А.** Неразрушающие методы контроля арсенидных и нитридных гетероструктур с квантовой ямой / Е. А. Климов, Д. В. Лаврухин, С. С. Пушкарев и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 19, № 5. – С. 302 – 316.
8. **Щаврук, Н. В.** Разделение полупроводниковых пластин из твердого материала на кристаллы / Н. В. Щаврук, С. В. Редькин, А. А. Трофимов и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 19, № 5. – С. 317 – 320.
9. **Павлов, А. Ю.** Переход от сплавной к несплавной технологии омических контактов при росте диапазона рабочих частот СВЧ МИС на основе нитрида галлия / А. Ю. Павлов // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 19, № 9. – С. 541 – 550.
10. **Федоров, Ю. В.** Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия / Ю. В. Федоров, А. С. Бугаев, А. Ю. Павлов и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 19, № 5. – С. 273 – 293.
11. **Gamkrelidze, S. A.** Microconsuming 8...12 GHz GaN power amplifiers / S. A. Gamkrelidze, D. L. Gnatyuk and all. // Russian Microelectronics. – 1 July 2019. – Vol. 48, Iss. 4. – P. 262 – 267.
12. **Гамкредидзе, С. А.** Каскодная монолитная интегральная схема маломощного усилителя в диапазоне частот 8 – 12 ГГц на наногетероструктурах нитрида галлия / С. А. Гамкредидзе, П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 98 – 102.
13. **Свидетельство о гос. регистр. № 2016630104.** Топология ИМС. Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8 – 12 ГГц / Ю. В. Федоров, М. В. Майтама. – От 19.08.2016.

14. **Свидетельство о гос. регистр. № 2016630103.** Топология ИМС. Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8 – 12 ГГц / Ю. В. Федоров, М. В. Майтама. – От 19.08.2016.
15. **Федоров, Ю. В.** Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона / Ю. В. Федоров, А. С. Бугаев, А. Ю. Павлов и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 26 – 45.
16. TGA2238 8 – 11 GHz 60 W GaN power amplifier [Электронный ресурс] // Triquint TGA2238. – URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2238> (дата обращения 16.11.2018).
17. SDC2016 8 – 12.5 GHz GaAs MMIC power amplifier [Электронный ресурс] // Sandrasemi SDC2016. – URL: <http://sandra-semi.com/pdf/SDC2016.pdf> (дата обращения 16.11.2018).
18. Get your GaN here: RF GaN foundry survey // Microwave Journal. – June 2016. – P. 21 – 34.

Статья поступила 8 сентября 2021 г.

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

Усилители мощности класса F и инверсного класса F / В. В. Воронович, В. П. Галах, В. А. Кузьмин, А. Ю. Потапов; под ред. В. В. Вороновича. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 154 с.

В книге изложены элементы теории и основы проектирования высокоэффективных усилителей мощности класса F и инверсного класса F. Материал, приведенный в настоящем издании, иллюстрируется примерами расчетов.

Для радиоспециалистов, связанных с созданием радиоэлектронной аппаратуры.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.67

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДА ДЛЯ РЛС И СИСТЕМ СВЯЗИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 18...42 ГГц

В. В. Демшевский¹, И. А. Богачев¹, С. С. Сидоренко¹,
А. Д. Кучмий¹, С. Е. Ушанова¹, М. М. Мигалин²

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

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Рассчитан коэффициент усиления 16-канальной печатной высокопотенциальной антенной решетки на основе интегрированного в подложку волновода в диапазоне частот 18...42 ГГц. Определено влияние неточностей изготовления антенной решетки на дальность работы радиолокационных систем и систем связи. Выявлены основные причины снижения коэффициента усиления антенной решетки в верхней части исследуемого диапазона частот.

КС: антенная решетка, дальность обнаружения, коэффициент усиления, радиолокационная система, система связи

ANTENNA ARRAY BASED ON A SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE FOR RADARS AND COMMUNICATION SYSTEMS OPERATING WITHIN 18...42 GHz FREQUENCY BAND

V. V. Demshevskiy¹, I. A. Bogachev¹, S. S. Sidorenko¹,
A. D. Kuchmiy¹, S. E. Ushanova¹, M. M. Migalin²

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

²Southern Federal University, Rostov-on-Don

The gain of a 16-channel printed high-potential antenna array is calculated on the basis of a substrate integrated waveguide in the frequency range of 18...42 GHz. The influence of inaccuracies in manufacturing the antenna array on the operating range of radar systems and communication systems is determined. The main reasons for the decrease in the antenna array gain in the upper part of the researched frequency range are determined.

Keywords: antenna array, detection range, gain, radar system, communication system

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной проблемой является разработка и создание малогабаритных высокопотенциальных РЛС и систем связи, использующих сверхширокополосные сигналы [1]. Такие системы могут устанавливаться на автомобилях (диапазон 22,0...24,0 ГГц) для обеспечения безопасного движения, применяться для обнаружения и автоматического распознавания беспилотных летательных аппаратов (диапазон 34,0...35,0 ГГц) в пределах зоны территориальной

охраны объектов, для решения задач навигации и безопасного плавания, метеорологии, обзора летного поля (диапазон 31,8...33,4 ГГц), для улучшения систем связи стандарта 5G (26,5...29,5 и 37...38,6 ГГц) и т. д.

Исходя из формулы дальности действия активной радиолокационной системы [2], формулы передачи Фрииса, требований к детальности получаемой радиолокационной информации, принципов конструктивного построения современных РЛС и систем связи, актуальной проблемой является выбор антенной системы.

Перспективным направлением создания малогабаритных антенных систем, обеспечивающих заданный энергопотенциал РЛС и систем связи, является разработка антенных решеток (АР), состоящих из сверхширокополосных высоконаправленных излучателей на основе интегрированного в подложку волновода (ИПВ) [3, 4].

Характеристики отдельного излучателя на основе ИПВ были рассмотрены в работе [5], однако функционирование отдельного излучателя в составе АР может значительно осложняться за счет возникновения паразитных взаимосвязей между соседними элементами, что зачастую снижает качество работы всей АР и впоследствии ухудшает выходные параметры системы. Чаще всего уменьшается угол сканирования АР, появляются провалы в значениях коэффициента усиления (КУ), дифракционные максимумы, углы ослепления (особенно в АР с выступающими излучателями), паразитные резонансные эффекты, влияющие на согласование излучателей [6–8]. Все перечисленные проблемы особенно актуальны для сверхширокополосных АР.

2. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

На наш взгляд, наиболее интересным решением является возможность полной интеграции антенного устройства с одноканальными и многоканальными приемопередающими модулями, входящими в состав АФАР. Такое решение позволяет уменьшить реальные потери (в среднем на 2 дБ) и искажения полезного сигнала при приеме/передатке и дает возможность снизить стоимость каждого отдельного приемопередающего модуля за счет отсутствия необходимости использовать СВЧ-соединители между антенной и приемопередающим модулем.

Решение особенно актуально по следующим причинам:

а) улучшение рабочих характеристик малоразмерных АР, где вклад каждого отдельного элемента существенен при формировании диаграммы направленности и определении фактического КУ;

б) при использовании СВЧ-переходов с повышением частоты становится сложнее сохранить амплитуду и фазу в заданных пределах в каждом отдельном канале, и это приводит к дополнительным погрешностям при отклонении луча диаграммы направленности или росту уровня боковых лепестков.

В статье представлены результаты исследований характеристик малогабаритной АР (4×4) в диапазоне частот 18,0...42,0 ГГц, которая приведена на рис. 1.

Итак, возьмем двумерную АР размерами 4×4 элемента, расположенных гексагонально (см. рис. 1, з). Характеристики этой АР были исследованы в работе [9]. Период расположения элементов равен 12 мм.

Значение КУ полностью возбужденной АР в направлении нормали к плоскости АР ($\theta = \theta_0$) определяется соотношением:

$$G_{AP}(\theta_0) = \frac{4\pi f_0^2(\theta_0)}{N\eta_0} \left[N^2 - \left| \sum_{n=1}^N \Gamma_n(\theta_0) \right|^2 \right] = Ng_0(\theta_0) [1 - |\Gamma(\theta_0)|^2], \quad (2)$$

где $g_0(\theta_0) = \frac{4\pi f_0^2 E_0 H_0}{V_0^2} = \frac{4\pi f_0^2(\theta_0)}{\eta_0}$ – КУ единичного изолированного элемента. Соответствующая зависимость КУ от частоты представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, она имеет наибольшие значения и характеризует максимально достижимые значения КУ для исследуемой АР в исследуемой полосе частот.

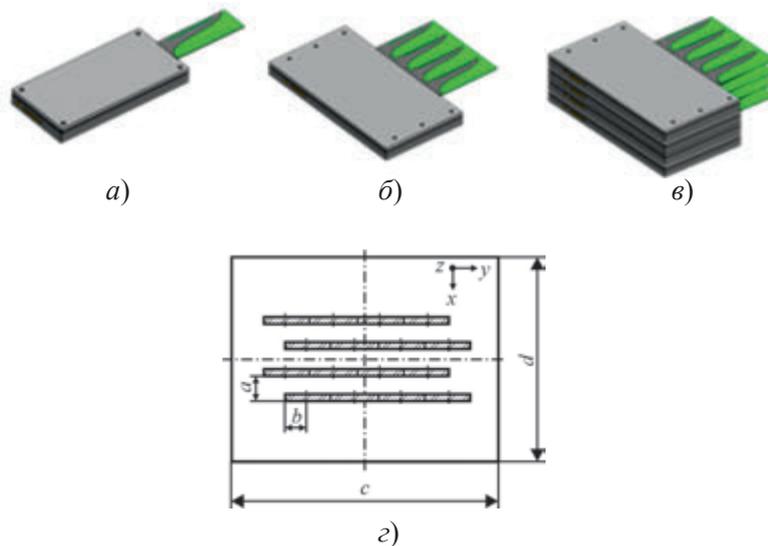


Рис.1. Антенна Вивальди, интегрированная с приемопередающим модулем:
 а – одноканальным; б – многоканальным; в – в составе АР;
 г – общий вид АР с гексагональным расположением излучателей

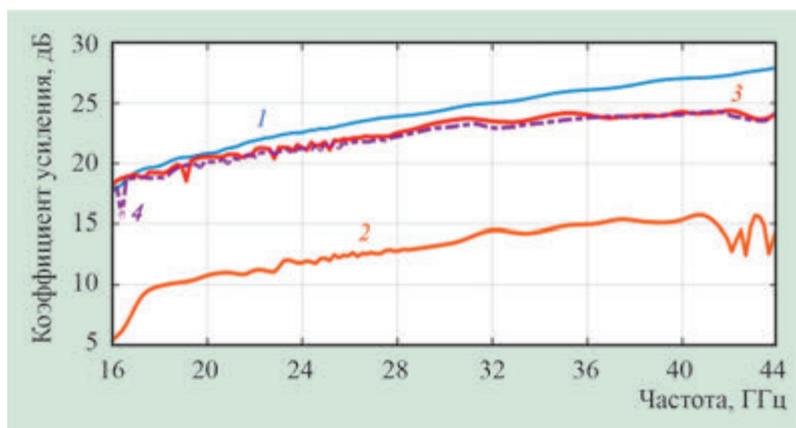


Рис. 2. КУ исследуемой двумерной антенной решетке:
 1 – КУ, полученный аналитическим расчетом; 2 – КУ одного элемента;
 3 – КУ 16-элементной АР с прямоугольным расположением элементов;
 4 – КУ 16-элементной АР с гексагональным расположением элементов

Кривые 2...4 показывают зависимость КУ от частоты при строгом электродинамическом моделировании АР.

Реализованный коэффициент исследуемой АР с ростом частоты увеличивается медленнее, чем в аналитическом расчете (кривая 1), и в конечном счете различие на верхних частотах составляет около 4 дБ, чего не наблюдается в нижней части диапазона.

Согласно результатам электродинамического моделирования, эффективность АР с ростом частоты снижается из-за уменьшения коэффициента использования поверхности реальной конструкции и увеличения потерь при прохождении в распределительной системе и излучении электромагнитной волны.

3. ОЦЕНКА НЕТОЧНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АР

При изготовлении АР всегда существует некоторый разброс геометрических параметров отдельных элементов и входных сопротивлений, что, в свою очередь, существенно влияет на выходные параметры всей АР.

Проведем статистическое исследование для АР с гексагональным расположением излучателей. Пусть в 1/4 части излучателей АР отклонение геометрических размеров от желаемых составляет от 2 до 4 % как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения размеров проводящей части.

На рис. 3 приведены АР для рассмотренных вариантов, где выделены те элементы, которые имеют случайное отклонение геометрических размеров от заявленных.

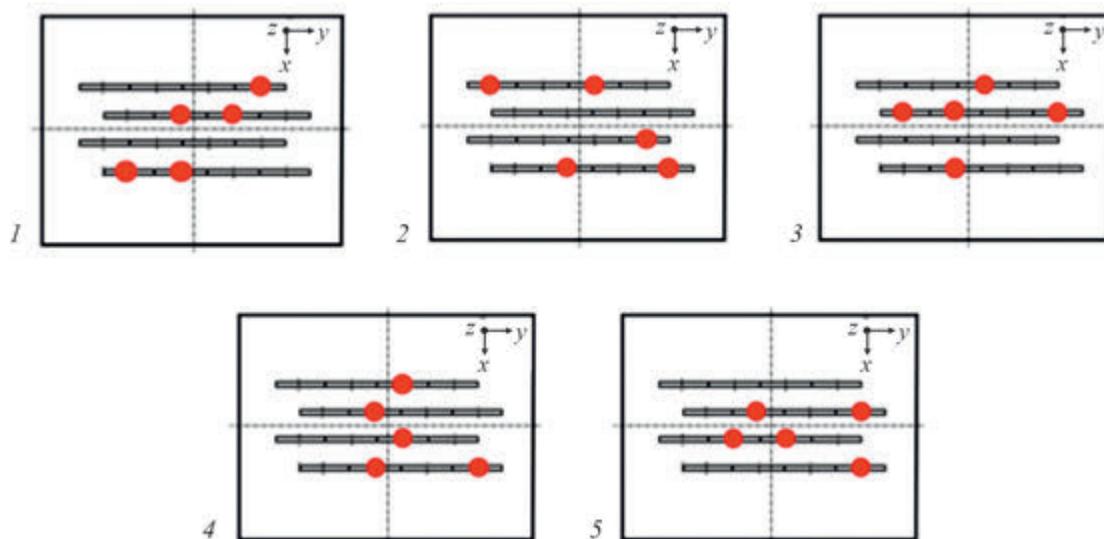


Рис. 3. Учет неточностей изготовления в исследуемой АР

Результаты электродинамического моделирования приведены на рис. 4. Красной сплошной линией обозначен КУ решетки, когда все элементы идентичны и соответствуют зависимости на рис. 2. Пунктирными линиями обозначены графики зависимости КУ решетки от частоты при отклонении геометрических размеров 1/4 части излучателей от заявленных. В нижней части диапазона (от 18 до 28 ГГц) несоответствие излучателей во всех рассмотренных случаях (кривые 1...5) не имеет существенного влияния на КУ АР. На частотах более 28 ГГц наблюдается снижение КУ на 1...1,5 дБ. Это связано напрямую с тем, что область щелевого перехода L_1 (см. рис. 4) становится больше, чем $\lambda/2$, и преобразование волны из H_{10} в TEM начинает нести более

сложный характер, что вносит дополнительные потери при прохождении волны. Фактически изменение геометрических размеров перехода в отдельных элементах ведет к изменению степени их энергетического вклада и, следовательно, к уменьшению КУ, то есть снижается их КПД и, как следствие, снижается потенциал АР.

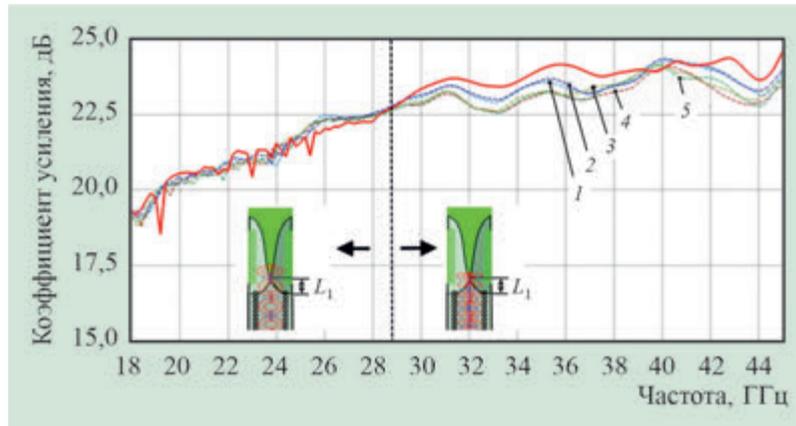


Рис. 4. Результаты исследования АР, приведенных на рис. 3, с элементами, имеющими случайное физическое отклонение проводящего рисунка от исходного варианта

4. ДАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМ С ИССЛЕДУЕМОЙ АР

Предположим, что система работает в импульсном режиме в диапазоне частот 18...42 ГГц и предназначена для обнаружения воздушных объектов.

Исходные данные для расчета приведены в таблице.

Параметр	Импульсная мощность, Вт	Уровень шума приемника, дБ	Длительность импульса, нс	Время наблюдения, мс	ЭПР объекта, м ²	Размеры АР, мм
Значение	150	5	1	100	1	75×50

Воспользуемся основным уравнением радиолокации для импульсной РЛС (2) и проведем оценку дальности обнаружения цели при параметрах, указанных в таблице, используя рассчитанные значения КУ для АР в полосе частот (см. рис. 2). Будем считать, что цель будет обнаружена и различена, когда пороговое отношение сигнал/шум будет равным 13 дБ.

$$D(R_0, G_R) = \sqrt[4]{\frac{2P_{av}T_{acc}G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_0 N_0 \alpha}} \quad (2)$$

Прежде чем перейти к результатам расчета дальности действия различных систем, следует сделать несколько важных замечаний:

– при увеличении размерности АР и, как следствие, увеличении направленных свойств АР реальный вклад каждого отдельного элемента уменьшается, а коэффициент направленного действия плоской решетки стремится к значениям, которые могут быть получены по формуле (3):

$$D = v \frac{4\pi S}{\lambda^2}; \quad (3)$$

– для малоэлементных АР направленные свойства каждого элемента очень важны, поэтому, чтобы достигнуть значений КУ, равных, например, 22 дБ, достаточно в исследуемой АР 16 элементов с КУ 12 дБ, 32-элементной АР с КУ отдельных излучателей 6 дБ и 64-элементной АР с КУ отдельных элементов 3-4 дБ. Площадь таких АР будет по отношению к исследуемой в 1,5 и 2 раза больше соответственно.

Расчеты проведем в соответствии с графиками КУ, приведенными на рис. 2 и 4 соответственно, и оценим влияние характеристик АР на дальность обнаружения в исследуемой полосе частот.

Полученные графики будут представлять собой зависимость дальности обнаружения от КУ АР в полосе частот. Фактически увидим, как будет изменяться дальность обнаружения цели с ЭПР 1 м^2 , если перестраивать рабочую частоту в РЛС (рис. 5, 6).

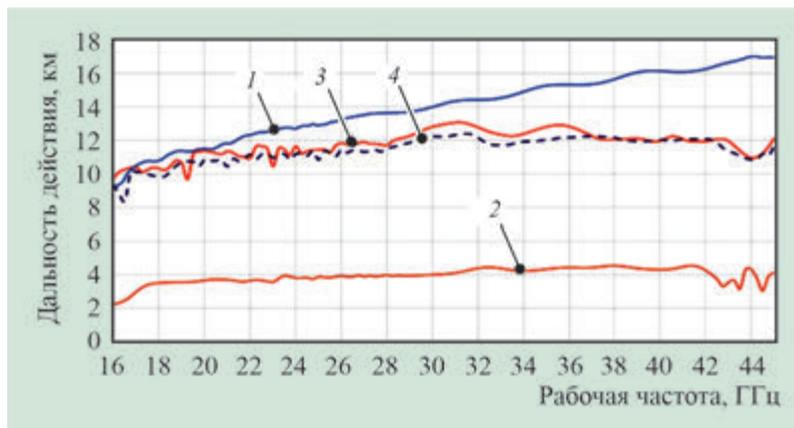


Рис. 5. Зависимости дальности работы импульсной РЛС с исследуемой АР от частоты:

- 1 – КУ, полученный аналитическим расчетом; 2 – КУ одного элемента;
- 3 – КУ 16-элементной АР с прямоугольным расположением элементов;
- 4 – КУ 16-элементной АР с гексагональным расположением элементов

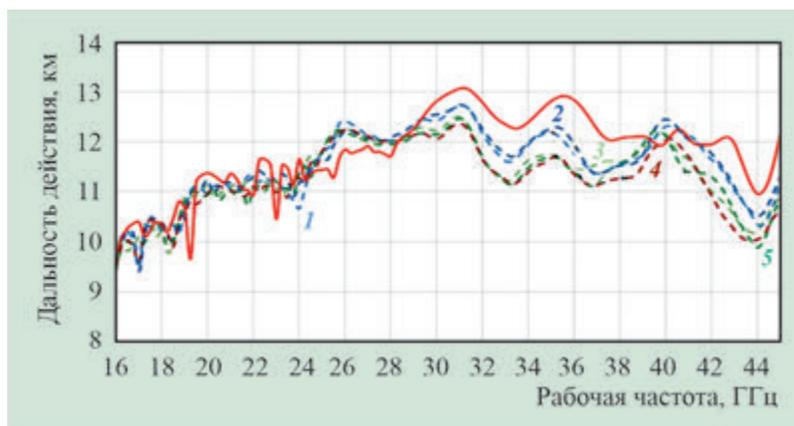


Рис. 6. Дальность работы АР с элементами, имеющими случайное физическое отклонение проводящего рисунка от исходного

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 видно, что максимальная дальность работы системы при использовании одного антенного элемента изменяется в зависимости от рабочей частоты с 2,2 до 4,3 км.

При использовании 16-элементной АР с прямоугольным и гексагональным расположением элементов графики имеют схожий характер. Дальность обнаружения в этом случае изменяется с 9,5 до 13 км.

Если использовать результаты аналитических расчетов КУ, то РЛС с такой АР способна обнаруживать цели от 9 до 17 км. Результаты обусловлены тем, что аналитические выражения не учитывают геометрические особенности антенных решеток.

При оценке дальности обнаружения в широкой полосе частот следует пользоваться значениями КУ, которые получены в ходе строгих электродинамических расчетов или экспериментальных измерений, так как аналитические формулы не учитывают многих особенностей АР.

Проведенные расчеты, согласно рис. 4, где отмечены элементы АР, на которых присутствуют дефекты, показали следующее:

- неточность изготовления элементов и наличие дефектов в излучателях не оказывает существенного влияния на характеристики АР в нижней части диапазона частот;
- наличие дефектов в излучателях исследуемой высокопотенциальной АР в диапазоне частот от 29 ГГц и выше может снизить дальность обнаружения системы до 13 %;
- наличие в центре антенной решетки трех и более излучателей с дефектами оказывает наибольшее влияние на ее характеристики.

6. ВЫВОДЫ

Используя малоэлементные высокопотенциальные АР в малогабаритных системах, можно обеспечить среднюю дальность обнаружения целей с ЭПР 1 м² около 12 км, однако следует учитывать, что возможно снижение дальности обнаружения до 13 % в связи с возможными дефектами в изготовлении самой АР.

Разработанная высокопотенциальная АР способна работать в диапазоне частот 18...42 ГГц и может быть использована в малогабаритных РЛС, так как имеет площадь в 1,5...2 раза меньше, чем АР, построенные по классическому типу. Тем более, что в этом случае, при использовании такой малоэлементной АР в РЛС или системах связи, значительно снижается сложность схем управления и обработки, а следовательно, уменьшается стоимость разработки и изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Skolnik, M.** An ultrawideband microwave-radar conceptual design / M. Skolnik, G. Andrews and J. P. Hansen // Proceedings International Radar Conference, 1995
2. **Бакулев, П. А.** Радиолокационные системы / П. А. Бакулев. – М.: Изд. Радиотехника, 2015.
3. **Djerafi, T.** (2015) Substrate integrated waveguide antennas / T. Djerafi, A. Doghri, K. Wu; eds. Chen Z. // Handbook of Antenna Technologies. – Springer, Singapore, 2015.
4. **Lin, S.** Development of a novel UWB vivaldi antenna array using SIW technology / S. Lin, S. Yang and A. E. Fathy // Progress In Electromagnetics Research. – 2009. – PIER 90, 369–384.

5. **Demshevsky, Valeriy V.** UWB antenna vivaldi based on substrate integrated waveguide / Valeriy V. Demshevsky; Mikhail M. Migalin; Maksim V. Papenyshev; Mikhail S. Levashov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW. – 2019. – P. 140 – 143.

6. **Хансен, Р.** Мир электроники. Фазированные антенные решетки / Р. Хансен. – М.: Изд. Техносфера, 2012. – 560 с.

7. **Воскресенский, Д. И.** Проектирование фазированных антенных решеток: учебное пособие / Д. И. Воскресенский. – М.: Изд. Радиотехника. – 779 с.

8. **Гринец, А. Ю.** Широкополосные системы излучения для антенных систем с электронным управлением лучом многофункциональных радиолокационных комплексов / А. Ю. Гринец, Д. В. Багно, Г. Ф. Мосейчук, А. И. Синани // Антенны». – 2013. – Ч. 3. – С. 52 – 61.

9. **Demshevsky, Valeriy V.** Investigation of an UWB antipodal tapered slot antenna element based on substrate integrated waveguide in an antenna array / Valeriy V. Demshevsky; Alexey A. Tsitovich; Igor A. Bogachev; Mikhail M. Migalin // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2020.

Статья поступила 30 сентября 2021 г.

≡≡≡ **НОВЫЕ КНИГИ** ≡≡≡

Диаграммообразование в антенных решетках / И. Б. Вендик, О. Г. Вендик, Д. С. Козлов, И. В. Мунина, П. А. Туральчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. – 112 с.

Монография посвящена проблемам проектирования антенных решеток. Приведены сведения по основным характеристикам антенн и антенных решеток. Рассмотрены принципы формирования диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР). Обсуждаются различные варианты антенных решеток. Особое внимание уделяется синтезу ФАР, характеристикам управляющих элементов и устройств, влиянию разрядности на характеристики ФАР, а также учету взаимной связи между излучателями в составе ФАР.

Издание рассчитано на научных, инженерных работников и аспирантов, занимающихся разработкой антенных устройств современных радиотехнических и коммуникационных систем.

УДК 621.396.67

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДА
ДЛЯ РЛС И СИСТЕМ СВЯЗИ**

В. В. Демшевский, И. А. Богачев, С. С. Сидоренко, А. Д. Кучмий

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

Проведены измерения диаграмм направленности разработанных экспериментальных макетов печатных антенн Вивальди на основе интегрированных в подложку волноводов и их сравнение с результатами электродинамических расчетов. Показано совпадение результатов теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений в азимутальной плоскости и небольшое расхождение в угломестной плоскости, что связано с ограничениями метода измерения в ближней зоне.

КС: антенна Вивальди, интегрированный в подложку волновод, измерение диаграммы направленности, поле в ближней зоне

**EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF THE ANTENNA ARRAY
BASED ON A SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE
FOR RADARS AND COMMUNICATION SYSTEMS**

V. V. Demshevskiy, I. A. Bogachev, S. S. Sidorenko, A. D. Kuchmiy

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

The radiation patterns of the developed experimental models of printed Vivaldi antennas based on substrate integrated waveguides are measured and compared with the results of electrodynamic calculations. The results of theoretical calculations coincide with the results of experimental measurements in the azimuthal plane, and a little discrepancy in the elevation plane is shown, which is due to limitations of the measurement method in the near zone.

Keywords: antenna Vivaldi, substrate integrated waveguide, radiation pattern measurement, near field

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое распространение получила UWB-технология (*ultra wide band technology*) беспроводного доступа, задача которой обеспечивать обмен данными между периферийными устройствами ПК и мобильными устройствами на относительно небольших расстояниях с очень высокой скоростью и малыми затратами энергии. Основным интерес в развитии таких систем состоит в увеличении дальности их работы при сохранении малых затрат энергии на работу и увеличении объема передаваемой информации [1].

Отметим, что в традиционных системах связи рабочая частота и ширина отведенной полосы спектра определяют пропускную способность канала связи, а мощность передатчика – ее дальность. В сверхширокополосных (СШП) системах связи эти понятия тесно взаимосвязаны и позволяют перераспределять имеющиеся возможности между дальностью и скоростью передачи [2, 3].

Так или иначе, чтобы обеспечить потенциальную возможность работы в сверхширокой полосе частот и вместе с тем обеспечить нужную дальность работы системы, прежде всего требуется провести разработку СШП-антенны. Основное направление работ по созданию таких СШП-антенн нацелено на разработку топологий, обладающих требуемыми характеристиками излучения в частотной и временной областях, малыми массогабаритными параметрами, удобством интеграции с приемопередающими модулями, технологичностью и низкой стоимостью производства.

При решении указанных задач наибольшее внимание привлекают антенны Вивальди, так как они обладают не только хорошими характеристиками направленности, но и относительно малыми габаритными размерами в сравнении с другими частотно-независимыми антеннами [4].

2. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ

В работе [5] были проведены исследования печатной антиподной СШП-антенны Вивальди на основе интегрированных в подложку волноводов (ИПВ) в полосе частот 18...42 ГГц и показана возможность ее реализации на практике (рис. 1). Также были исследованы особенности СШП-антенны Вивальди на основе ИПВ, например существенное влияние СВЧ-перехода GCPW-SIW на КСВН и коэффициент усиления. Было определено, что для сохранения выходных параметров антенны с использованием перехода GCPW-SIW требуется увеличить длину излучающего и трансформирующего участков антенны.

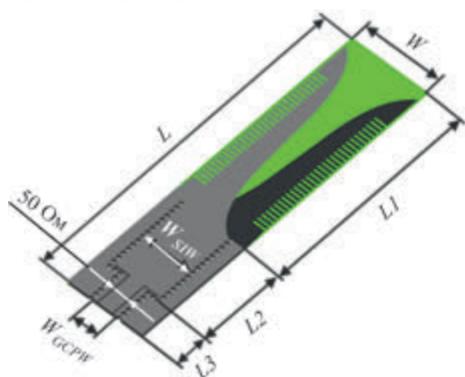


Рис.1. Электродинамическая модель антенны Вивальди на основе интегрированного в подложку волновода

Для экспериментальной проверки характеристик представленного варианта антенны Вивальди были разработаны три электродинамические модели макетов одно-, двух- и четырехэлементной антенн, как показано на рис. 2.

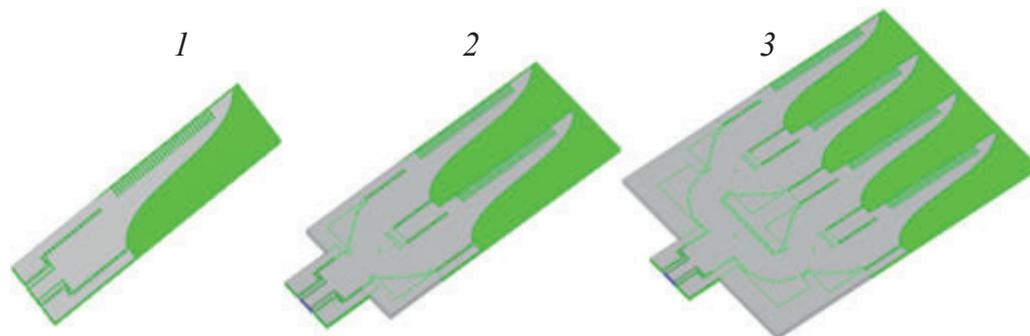


Рис. 2. Электродинамические модели экспериментальных макетов антенны Вивальди на основе ИПВ:

1 – одноэлементная антенна; 2 – двухэлементная антенна; 3 – четырехэлементная антенна

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МАКЕТЫ

На основе электродинамических моделей антенн Вивальди были изготовлены экспериментальные макеты (рис. 3). Материал диэлектрической подложки – RO5880 ($\epsilon = 2,2$). Диэлектрическая подложка имеет толщину 0,508 мм. Вход антенн во всех трех макетах представляет собой отрезок заземленной копланарной линии, имеющей входное сопротивление 50 Ом и служащей для возбуждения электромагнитной волны в ИПВ. В макетах, для обеспечения подключения к измерительной аппаратуре, припаян СВЧ-соединитель типа SMA. Измерения диаграмм направленности (ДН) антенн проводились в безэховой камере методом ближней зоны.

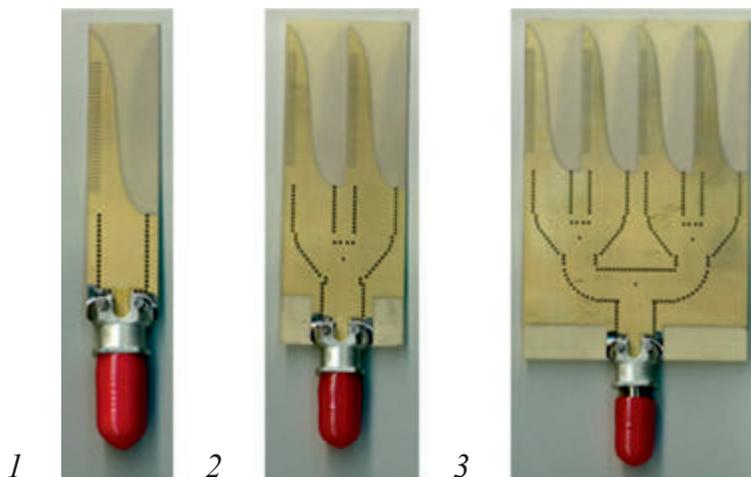


Рис. 3. Экспериментальные макеты антенн Вивальди на основе ИПВ:

1 – одноэлементная антенна; 2 – двухэлементная антенна;
3 – четырехэлементная антенна

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

На рис. 4 приведена структурная схема измерительной установки для проведения экспериментальных измерений ДН антенн Вивальди на основе ИПВ в ближней зоне.

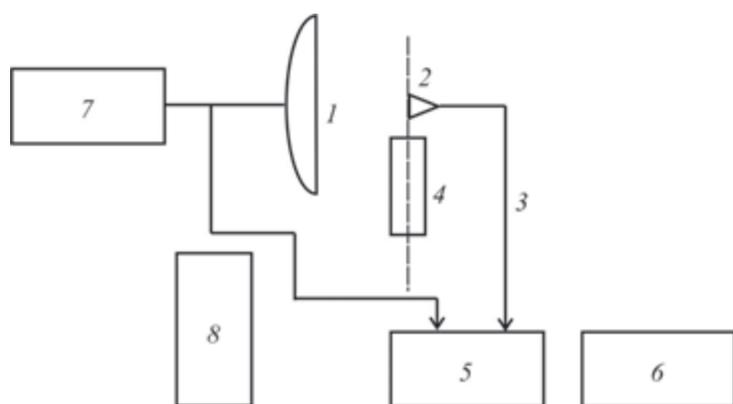


Рис. 4. Структурная схема измерительной установки для проведения экспериментальных измерений в ближней зоне:

1 – измеряемая антенна; 2 – зонд; 3 – линия передачи; 4 – механизм перемещения зонда;
5 – векторный анализатор цепей;
6 – устройство регистрации; 7 – генератор;
8 – опорно-поворотное устройство

В связи с ограниченной работой экспериментального стенда, измерения макетов антенн проводились на частотах до 20 ГГц (рис. 5).

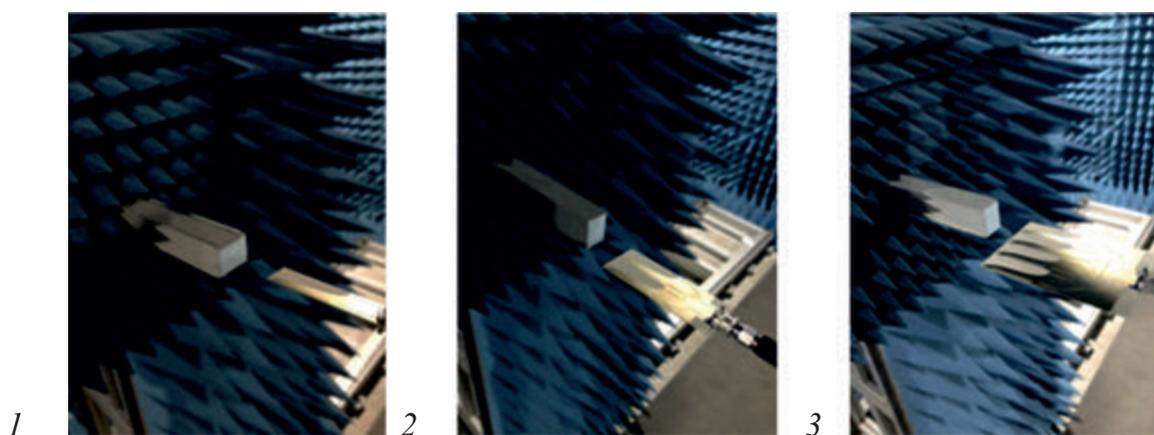


Рис. 5. Экспериментальные измерения макетов антенн Вивальди на основе ИПВ:
1 – одноэлементная антенна; 2 – двухэлементная антенна; 3 – четырехэлементная антенна

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6...8 приведены для сравнения рассчитанные (синий цвет) и измеренные (красный) ДН в азимутальной и угломестной плоскостях на частотах 18, 19 и 20 ГГц. Из графиков видно, что с увеличением количества элементов и частоты ширина ДН уменьшается. В азимутальной плоскости измеренные диаграммы совпадают с рассчитанными в секторе углов $\pm 30^\circ$. В угломестной плоскости измеренные и рассчитанные ДН имеют расхождения во всех случаях из-за ограничений, которые накладывает метод измерения в ближней зоне – ширина ДН измеряемой антенны по уровню минус 3 дБ не должна быть более $60 \dots 70^\circ$, что связано с характеристиками зонда и возможностями пересчета и восстановления ДН в дальней зоне по результатам измерений в ближней зоне.

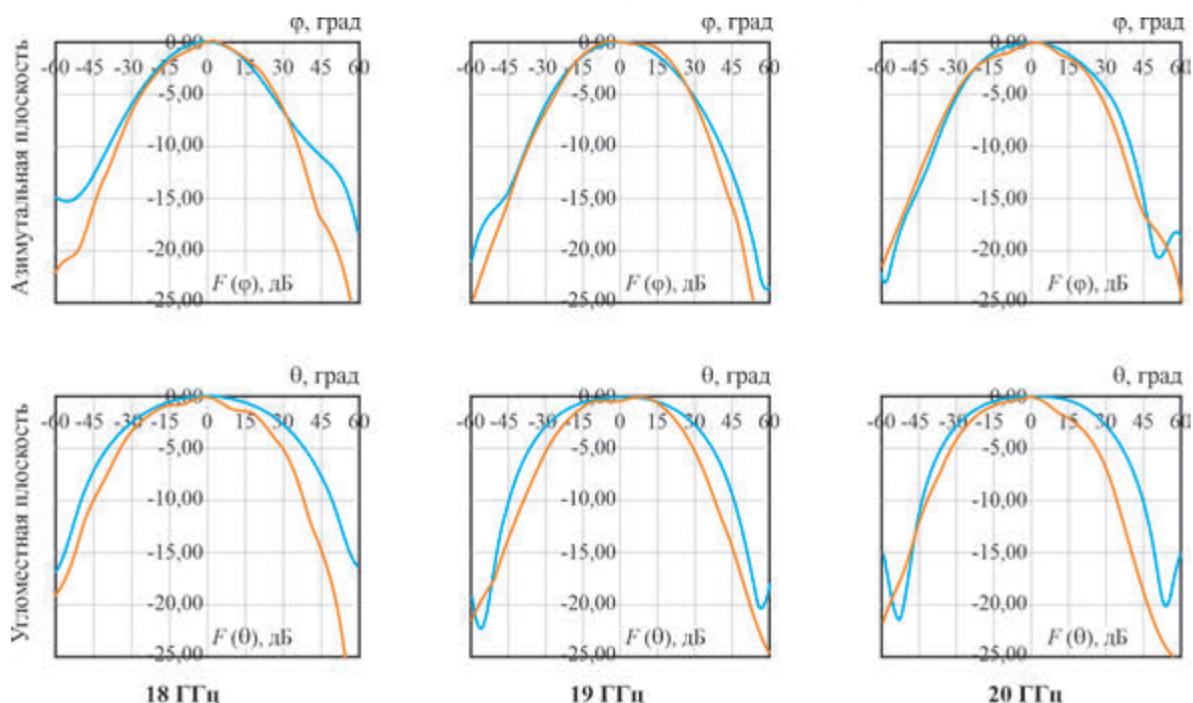


Рис. 6. Измеренные и рассчитанные нормированные ДН единичной антенны Вивальди на основе ИПВ

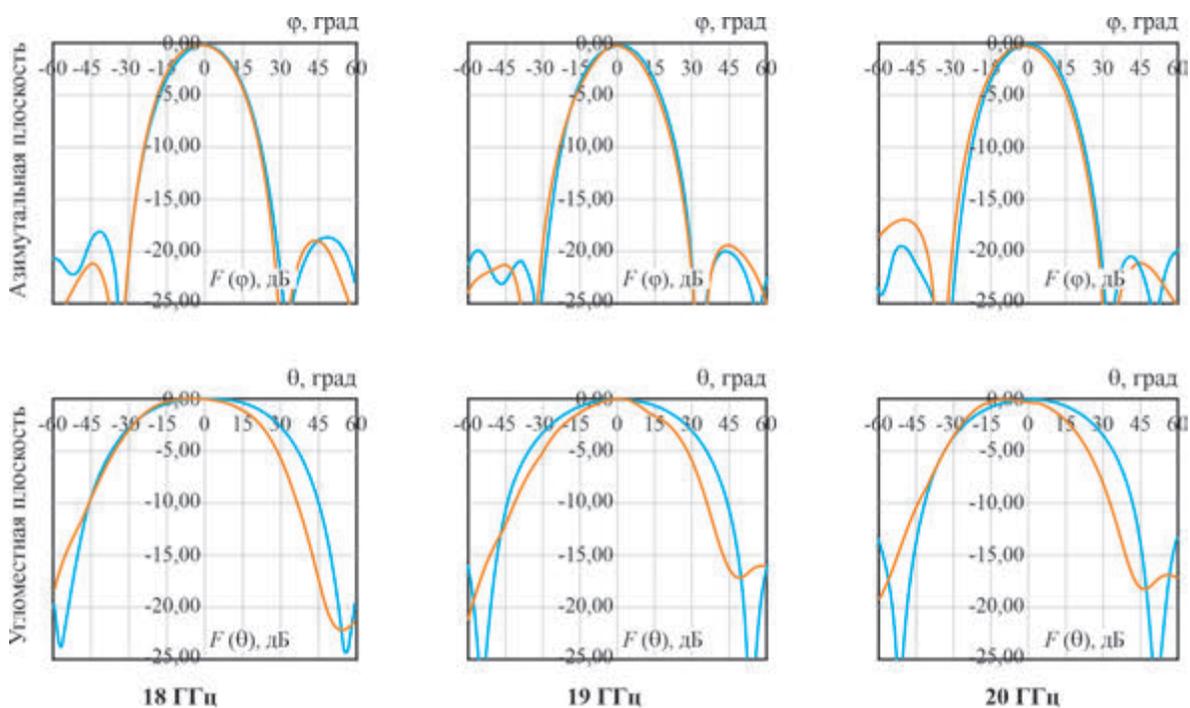


Рис. 7. Измеренные и рассчитанные нормированные ДН двухэлементной антенны Вивальди на основе ИПВ

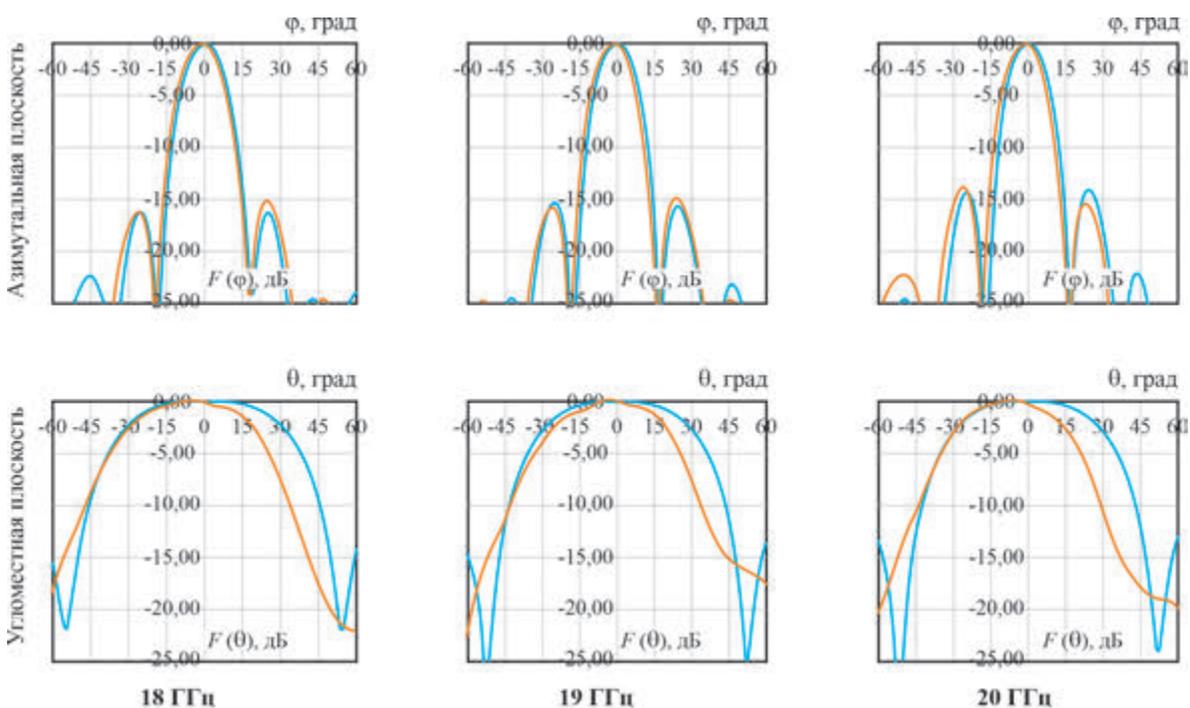


Рис. 8. Измеренные и рассчитанные нормированные ДН четырехэлементной антенны Вивальди на основе ИПВ

На рис. 9 приведены амплитудные распределения напряженности электрического поля E в ближней зоне. Из распределений видно, как обуживается ДН антенн в азимутальной плоскости при увеличении количества элементов.

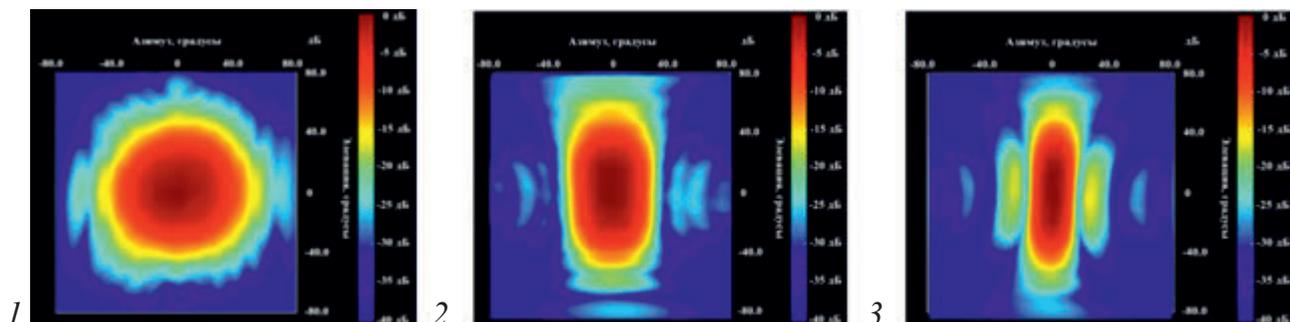


Рис. 9. Измеренные амплитудные распределения экспериментальных макетов антенн Вивальди на основе ИПВ:

1 – одноэлементной антенны; 2 – двухэлементной антенны; 3 – четырехэлементной антенны

6. ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных измерений ДН антенн Вивальди показывают хорошее совпадение с результатами проведенных электродинамических расчетов, а также потенциальную возможность реализации многоэлементных антенных решеток на основе ИПВ на практике. Изучение и развитие антенн и антенных решеток на основе ИПВ позволит добиться уменьшения габаритных размеров радиоэлектронной аппаратуры, снизить стоимость ее производства и увеличить ее защищенность. Полная интеграция антенн с приемопередающими модулями является следующим витком в развитии радиоэлектронных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lin, S.** Development of a novel UWB Vivaldi antenna array using SIW technology / S. Lin, S. Yang and A. E. Fathy // Progress In Electromagnetics Research (PIER). – 2009. – Vol. 90. – P. 369 – 384.
2. **Гринев, А. Ю.** Широкополосные системы излучения для антенных систем с электронным управлением лучом многофункциональных радиолокационных комплексов / А. Ю. Гринев, Д. В. Багно, Г. Ф. Мосейчук, А. И. Синани / Антенны. – 2013. – Ч. 3. – С. 52 – 61.
3. **Djerafi, T.** Substrate integrated waveguide antennas / T. Djerafi, A. Doghri, K. Wu; eds. Z. Chen // Handbook of Antenna Technologies. – Springer, Singapore, 2015.
4. **Demshevsky, Valeriy V.** UWB antenna Vivaldi based on substrate integrated waveguide / Valeriy V. Demshevsky; Mikhail M. Migalin; Maksim V. Papenyshev; Mikhail S. Levashov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019. – P. 140 – 143.
5. **Demshevsky, Valeriy V.** Investigation of an UWB antipodal tapered slot antenna element based on substrate integrated waveguide in an antenna array / Valeriy V. Demshevsky; Alexey A. Tsitovich; Igor A. Bogachev; Mikhail M. Migalin // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020.

Статья поступила 14 октября 2021 г.

КАТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.385.7

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БАРИЕВЫХ КАТОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ И ПАЛЛАДИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ

М. Н. Хабачев, А. П. Макаров, Г. В. Дровненкова, Р. А. Жуков,
А. В. Ермаков, О. В. Дубинина, Е. А. Белоконь

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

На основе процессов металлургии прецизионных сплавов разработаны специализированные промышленные технологии производства полос вторично-эмиссионных катодных сплавов Pt-Ba и Pd-Ba с содержанием бария до 2,3 % (масс.). Обоснованность выбранных технологических решений подтверждена результатами экспериментальных исследований влияния технологических параметров и особенностей формирования структуры сплавов на качество продукции. Выпускаемые по разработанным промышленным технологиям и современным стандартам контроля качества катодные сплавы марок ПлБа 98-2 и ПдБа 98-2 имеют стабильные эмиссионные свойства, контролируемый состав, пониженное содержание сопутствующих вредных примесей, а также однородное распределение активного компонента при его минимальном окислении.

КС: катодный сплав, вторичная эмиссия, металлосплавной катод, технология, эмиссионный материал

THE INDUSTRIAL TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BARIUM CATHODE ALLOYS BASED ON PLATINUM AND PALLADIUM FOR HIGH-POWER MICROWAVE DEVICES

M. N. Khabachev, A. P. Makarov, G. V. Drovnenkova, R. A. Zhukov,
A. V. Ermakov, O. V. Dubinina, E. A. Belokon'

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

Specialized industrial technologies have been developed for the production of strips of secondary emission cathode Pt-Ba and Pd-Ba alloys with barium content of up to 2.3 % (wt.) on the basis of precision alloys metallurgy processes. The validity of the selected technological solutions is confirmed by the results of experimental studies of the influence of technological parameters and peculiarities of the alloys structure formation on the quality of production. Produced according to developed industrial technologies and modern quality control standards, cathode alloys of ПлБа 98-2 and ПдБа 98-2 grades have stable emission properties, a controlled composition, a reduced content of associated harmful impurities, as well as a uniform distribution of the active component with its minimal oxidation.

Keywords: cathode alloy, secondary emission, metal-alloy cathode, technology, emission material

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность эффективного использования металлосплавных катодов в ЭВП СВЧ была установлена в 60-х годах на «Истоке» под руководством Б. Ч. Дюбуа, благодаря масштабным

исследованиям эмиссионных свойств металлических сплавов [1, 2], представляющих собой двухфазную систему тугоплавкий металл + эмиссионно-активный металл в составе интерметаллического соединения. В наиболее эффективных катодных сплавах (КС) к металлам первого типа относится в основном платиновая группа, второй компонент сплавов – это щелочноземельный или редкоземельный металл, обеспечивающий увеличение электронной эмиссии с тугоплавкого металла за счет формирования моно- или субмонослойной пленки на его поверхности.

Значительными преимуществами КС по сравнению с другими типами эмиссионных материалов являются [2]: повышенный отбор катодного тока, высокая электро- и теплопроводность, стабильность эмиссии под воздействием электронной и ионной бомбардировки, высокая термическая устойчивость состава, гладкость поверхности и относительно низкие скорости испарения компонентов. Комплекс перечисленных свойств определяет возможность использования КС в СВЧ-генераторах повышенного уровня мощности, в т. ч. мм-диапазона с термо- и вторично-эмиссионными катодами, а также благоприятствует их более длительной эксплуатации при повышенном токоотборе.

Первоначальные исследования эмиссионных свойств бариевых сплавов платины и палладия [3] показали, что максимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) σ_{\max} при 2 %-ном содержании бария (здесь и далее используются массовые %) превышает значение этого же параметра для чистых металлов до 1,7 раза, наибольшее значение КВЭЭ из двойных систем Pt/Pd/Rh/Au–Ba обнаружено у платинового сплава Pt–2%Ba: $\sigma_{\max} = 3$. Важные с точки зрения эмиссионной стабильности и долговечности сплавов результаты получены в работе [4] при исследовании скорости испарения компонентов сплавов с барием в вакууме. Установлено, что скорость испарения бария из сплавов с содержанием бария 0,5...6,0 % не зависит от их состава, а для сплава бария с палладием скорость испарения последнего даже превышает скорость испарения активного компонента, что позволяет считать сплавы в указанном концентрационном диапазоне термостабильными по составу, или, согласно терминологии [4], конгруэнтно-испаряющимися.

Дальнейшее развитие этого направления на предприятии стало возможным благодаря организованному к тому времени (конец 1962 г.) собственному специализированному металлургическому производству и созданной значительной материаловедческой базе по исследованию технологически значимых свойств различных материалов, применяемых в СВЧ-электронике, и способов их обработки. В работах [5, 6], проведенных под руководством Н. П. Есаулова и В. М. Рождественского, с использованием термического анализа и металлографии исследован фазовый состав сплавов. Диаграммы состояния систем Pt–Ba (до 23 % Ba) и Pd–Ba (до 40 % Ba), построенные по результатам этих исследований, приводятся в справочнике [7] и специализированном периодическом издании [8, 9] и до настоящего времени остаются наиболее достоверными и детальными. Эти же авторы исследовали пластическую деформацию и механические свойства деформированных сплавов [10, 11], что позволило им разработать полупромышленную технологию производства полос сплавов Pt–Ba и Pd–Ba.

Возможность выпуска вторично-эмиссионных сплавов бария с платиной и палладием в виде проката во многом предопределила более значительные, по сравнению с другими эмиссионными сплавами, масштабы их использования. Последовавший после периода исследований и разработки полупромышленной технологии производства вторично-эмиссионных КС период их внедрения и использования в ЭВП можно разделить на два этапа. На первом этапе наибо-

лее эффективным и масштабным оказалось использование КС Pt–Ba и Pd–Ba с 2 %-ным содержанием бария в импульсных широкополосных магнетронных усилителях (амплитронах) см-диапазона. Замена платины на эмиссионные сплавы платины и палладия с барием в холодных катодах пакетированной конструкции магнетронных усилителей позволила существенно увеличить их долговечность, а также улучшить стабильность работы и массогабаритные характеристики. Мощные (выходная импульсная мощность до 370 кВт) СВЧ-усилители с металлосплавными катодами, разработанные в 80-х годах, используются до настоящего времени в предконечных и конечных каскадах широкополосных передатчиков морских РЛС с дальностью зоны обзора до 500 км. Усилительные зарубежные приборы М-типа с использованием металлосплавных катодов до настоящего времени неизвестны.

Второй этап внедрения КС, продолжающийся до настоящего времени, связан с их использованием в разрабатываемых магнетронах мм-диапазонах. Кроме совершенствования конструкции таких магнетронов, решаются также технологические задачи соединения КС с кернами катодов, термической формоустойчивости и эффективного теплоотвода катодных систем и резонаторов (магнетроны с запускающим термокатодом), увеличения диффузионного потока активного компонента к эмиссионной поверхности и тока автоэлектронной эмиссии (магнетроны с безнакальным автоэмиссионным запуском) и др. Наиболее актуальной остается задача увеличения срока службы мощных магнетронов. Как показал практический опыт специалистов АО «Плутон», замена металлопористого вольфрам-алюминатного катода на КС марки ПДБ2 или металлосплавной пористый катод того же состава в магнетронах с безнакальным запуском увеличивает срок службы магнетрона до 50 раз, т. е. до 5000 ч [12].

Эффективное использование вторично-эмиссионных КС во многом связано с выбором и совершенством технологии их производства. Существующие способы производства КС до настоящего времени остаются лабораторными или полупромышленными, что не позволяет получать стабильные по качеству КС, необходимые при активном освоении высокочастотных диапазонов. Очевидными критериями выбора и разработки технологии являются технологически воспроизводимое и стабильное обеспечение высоких эмиссионных характеристик КС и снижение содержания в них примесей, негативно влияющих на работу и долговечность ЭВП.

В настоящей работе ставилась задача разработки промышленной технологии производства вторично-эмиссионных бариевых катодных сплавов на основе платины и палладия с использованием современного технологического оборудования и методов измерения их параметров. Согласно исходным требованиям к эмиссионному материалу для катодных узлов ЭВП магнетронного типа, создаваемая технология должна обеспечивать производство катодных сплавов с параметрами не хуже приведенных в табл.1. Кроме того, важными требованиями к технологии являются обеспечение стабильности фазового состава и однородности распределения бария, критерий которого для разработанной технологии установлен в настоящей работе.

Таблица 1

Основные параметры разрабатываемых вторично-эмиссионных бариевых катодных сплавов на основе платины и палладия и исходных благородных металлов

№ п/п	Параметр	Сплав Pt–Ba	Pt	Сплав Pd–Ba	Pd
1	Содержание бария в сплаве, %	1,2 – 2,3	–	1,2 – 2,3	–

Окончание табл. 1

№ п/п	Параметр	Сплав Pt–Ba	Pt	Сплав Pd–Ba	Pd
2	КВЭЭ	≥2,9	1,8*	≥2,6	1,75*
3	Содержание примесей, %, не более:				
	углерод	0,04	–	0,04	–
	медь	0,10	0,05**	0,10	0,001**
	цинк	0,06	0,03**	0,06	0,001**

* Данные [13].

** Данные по поставочным сертификатам качества платины марки ПЛАП-1 и палладия марки ППД1 ПДАП-1.

Разработка промышленной технологии и поэтапное изготовление образцов продукции на организованном производстве КС проведены по действующему стандарту [14]. В качестве базовой технологии (БТ) в настоящей работе принята разработанная ранее [10, 11] полупромышленная технология производства КС марок ПЛБ2 и ПДБ2, выпускавшихся до последнего времени по техническим условиям Яе0.021.079 ТУ (НИИМЭТ).

Разработанным в настоящей работе сплавам бария с платиной и палладием на основе действующих стандартов [15, 16] присвоены марки ПЛБа 98-2 и ПДБа 98-2. По имеющемуся опыту поставки полос КС, наиболее востребованными разработчиками и производителями СВЧ-приборов М-типа являются следующие габаритные размеры: 60...70 × 40...55 × 0,1...0,2 мм.

2. РАЗРАБОТАННЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ КАТОДНЫХ СПЛАВОВ

Измерение эмиссионных параметров σ_{\max} и φ по разработанной методике КРПГ.25803.00046 проводили с использованием вакуумированных диодов ТСЗ 309.112 СБ. Диаметр используемого при испытаниях эмиттера из КС составлял 4 мм, толщина – 0,2...0,4 мм. При обработке полученных эмиссионных данных была использована установленная ранее [1, 17] линейная зависимость между изменением работы выхода и КВЭЭ для этих сплавов. Погрешность измерения определяемого таким образом КВЭЭ по величине анодного тока при яркостной температуре 1000 °С составляла не более 3 %.

На рис. 1 представлена разработанная схема проведения контроля качества получаемых полос КС по линейным размерам, содержанию бария (КРПГ.25803.00056), примесей углерода (КРПГ.57806.00022), меди и цинка (КРПГ.25803.00095).

Дополнительно к основным параметрам, измеряемым по разработанным методикам, выбран критерий однородности распределения бария в КС – абсолютное расхождение по [18, 19] между двумя результатами определения содержания бария для любых двух участков (параллельные пробы) контролируемой изготовленной полосы.

Система контроля качества КС включает также две методики определения содержания платины (КРПГ.25803.00023) и палладия (КРПГ.25803.00006) в образующихся отходах, необходимые

для обеспечения существующей регламентированной отчетности по обороту драгоценных металлов. Общее количество сплава, используемого при контроле качества выпускаемой партии КС, не превышает 4,0 г.

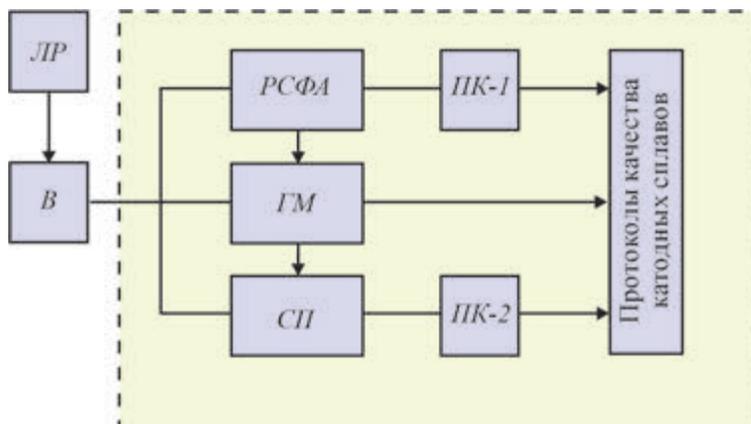


Рис. 1. Схема проведения контроля качества катодных сплавов Pt–2%Ba и Pd–2%Ba по содержанию активного компонента и примесей, а также однородности распределения бария:

ЛР – измерение линейных размеров (штангенциркуль, микрометр); *В* – взвешивание; *РСФА* – рентгеноспектральный флуоресцентный анализ; *ГМ* – гравиметрический анализ; *СП* – определение углерода при сжигании пробы

3. БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОС ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ КАТОДНЫХ СПЛАВОВ

Основные технологические проблемы производства бариевых КС на основе платины и палладия связаны с необходимостью использования высокотемпературных процессов сплавления тугоплавких благородных металлов с активным легкоплавким барием. В связи с этим к настоящему времени наибольшее распространение для синтеза слитков этих сплавов получили аргонодуговая и индукционная плавки исходных компонентов, обеспечивающие максимальную полноту взаимодействия и перемешивания компонентов в жидком состоянии в инертной контролируемой газовой среде. Таким способом получают слитки-заготовки для дальнейшей их деформационной обработки или слитки интерметаллического соединения платины и палладия с барием. В последнем случае получаемый материал используется в измельченном виде в смеси с порошками благородных металлов для изготовления металлосплавных пористых катодов (прессованных катодов) с использованием технологических приемов порошковой металлургии [20]. Дополнительно к этому имеются сведения о получении бариевых КС на основе палладия с применением прямого сплавления исходных компонентов в стеклянных отпаянных ампулах [21], которое часто используется в лабораторных условиях при изготовлении небольшого количества сплавов в исследовательских целях.

Условия проведения основных технологических операций БТ при получении полос КС установлены ранее в [5, 10]. Дополнительные технологические данные приводятся также в работе [22]. Основные технологические операции БТ при получении КС можно объединить в следующие группы.

1. Подготовительные и вспомогательные операции. К этим операциям относятся изготовление цилиндрических прессовок из расчетного количества порошков платины и палладия, подготовка бария к плавке, абразивная и химическая очистки от загрязнений поверхности заготовок и полос КС. Подготовка и использование бария проводятся с учетом его высокой химической активности и установленных нормативных потерь при переработке.

2. Высокотемпературная плавка. Для высокотемпературного прямого сплавления компонентов в настоящей работе использовали аргонодуговую плавку (АДП) с нерасходуемым вольфрамовым электродом на водоохлаждаемом медном кристаллизаторе с изложницей для плавки в виде перевернутого усеченного конуса высотой 18 мм и $\varnothing_{\text{верх/низ}} = 51 / 25$ мм. Качество получаемого слитка-заготовки (бездефектность, отсутствие пор, однородное распределение компонентов и др.) во многом определяет качество производимых полос КС. Это обеспечивается быстрым проведением плавки в условиях избыточного давления предварительно очищенного от кислорода проточного инертного газа. Важное значение имеют условия перемешивания и визуальный контроль состояния поверхности расплава. В целом успешность проведения плавки определяется квалификацией и опытом плавильщика АДП.

3. Пластическая деформация. Пластическая деформация осуществляется за два этапа последовательным проведением горячей и холодной прокатки. Необходимость проведения горячей прокатки определяется низкой пластичностью получаемых при плавке слитков. Прокат проводится с предварительным нагревом заготовки до температуры, обеспечивающей ее пластичность. Для сохранения равноосной текстуры при степени деформации 50...60% направление проката изменяется на 90°. Получаемая горячекатаная заготовка представляет собой полосу овальной формы толщиной 0,8...1,0 мм, общая степень деформации – 80%. Дальнейшую операцию холодной прокатки до конечной толщины проводят поэтапно с промежуточными вакуумными отжигами.

4. Термическая обработка. Промежуточный вакуумный отжиг заготовок после холодной прокатки проводится для снятия внутренних напряжений и увеличения их пластичности (обеспечения дальнейшего проката без нагрева заготовки), а также для частичного удаления примесей с поверхности.

В табл. 2 перечислено промышленное оборудование, используемое в настоящей работе для аппаратного обеспечения БТ, а также режимы обработки на основных этапах производства.

Таблица 2

Технологическое оборудование и режимы обработки при получении КС по БТ (основные технологические операции)

№ п/п	Технологическая операция	Используемое оборудование	Режим обработки
1	Прессование заготовок из Pt и Pd	Гидравлический пресс PST 400A	Давление прессования по манометру – 50...60 атм
2	Высокотемпературная плавка в АДП	Аргонодуговая печь 5 BELL JAR (США)	Рабочий ток – до 500 А. Время плавки – до 5 мин. Давление высокочистого (~10 ⁻¹⁵ % (об.) O ₂) проточного Ar – (1,1...1,2) · 10 ⁵ Па

Окончание табл. 2

№ п/п	Технологическая операция	Используемое оборудование	Режим обработки
3	Горячая прокатка до 80%-ной степени деформации	Высокотемпературная печь ТК.62.1500.3. Электромеханические вальцы ВЭМО-155	Температура обработки: ПлБ2 – 1200 °С; ПдБ2 – 1150 °С Режим обжатия: до 0,3 мм; время нагрева заготовки – не менее 5 мин
4	Холодная прокатка	Прокатный стан Кварто В4-246	Режим обжатия: от 0,1 мм за 1 цикл до 0,5 мм; от 0,05 мм до конечной толщины
5	Вакуумный отжиг	Вакуумная печь СНВЭ–2.4.2/16И1	1000 °С; $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па; 1 ч

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СПЛАВОВ ПЛАТИНА-БАРИЙ

Для исследования параметров были получены макетные и экспериментальные образцы КС. В качестве сырья использовали порошки платины марки ПлАП-1 и палладия марки ППд-1 ПдАП-1 (СТО 00195200-040-2008, АО «Екатеринбургский завод ОЦМ»), а также металлический барий марки БМ (ТУ 48-4-465-85) с содержанием основного компонента не менее 99,6 %. Используемые порошки содержат примеси меди и цинка в количестве не более 0,001 %. Содержание каждой из этих примесей в барии не превышает 0,005 %.

Результаты измерения параметров изготовленных макетных и экспериментальных образцов КС приведены в табл. 3. Содержание контролируемых в КС примесей меди и цинка на всех этапах разработки промышленной технологии не превышало целевые значения (см. п. 3 табл.1). Качество КС по этому показателю полностью определяется исходным содержанием примесей в используемых порошках платины и палладия. Значительное влияние на качество слитков могут оказать только аварийные отклонения от регламентированных технологических режимов работы АДП. Например, при коротком замыкании вольфрамового электрода на медный кристаллизатор печи может произойти его локальное подплавление, в результате этого медь растворится в КС до уровней, превышающих 0,1 %. Полученный таким образом слиток бракуется или переплавляется частями с более чистым по меди исходным порошком благородного металла.

Таблица 3

Основные параметры изготовленных КС платина-барий и палладий-барий на этапах разработки промышленной технологии их производства

№ п/п	Параметр	Базовая технология: макетные и экспериментальные образцы	Разработанная промышленная технология	
			Опытные и опытно-промышленные образцы	Промышленная партия
1. КС платина-барий				
1.1	Содержание бария, %	1,84 – 2,25	1,73 – 1,82	1,79

Окончание табл. 3

№ п/п	Параметр	Базовая технология: макетные и экспериментальные образцы	Разработанная промышленная технология	
			Опытные и опытно- промышленные образцы	Промышленная партия
1.2	Абсолютное расхождение по содержанию бария, %	0,01 – 0,12	0,001 – 0,05	
1.3	КВЭЭ	2,8 – 2,9	2,9 – 3,0	2,95 – 3,0
1.4	Содержание примесей, %:			
	углерод	0,0041 – 0,019	0,007 – 0,052	0,0038
	медь	0,003 – 0,03	0,002 – 0,02	0,004
	цинк	0,003 – 0,01	0,005 – 0,013	0,0005
2. КС палладий-барий				
2.1	Содержание бария, %	1,5 – 2,53	1,75 – 1,82	1,85 – 1,94
2.2	Абсолютное расхождение по содержанию бария, %	0,17 – 1,28	0,01 – 0,10	
2.3	КВЭЭ	2,5 – 2,9	2,70 – 2,75	2,85 – 2,90
2.4	Содержание примесей, %:			
	углерод	0,01 – 0,055	0,006 – 0,036	0,009 – 0,012
	медь	0,004 – 0,02	0,006 – 0,01	0,016
	цинк	0,007 – 0,03	0,005 – 0,009	0,003

Бариевые КС на основе платины, полученные по БТ, полностью удовлетворяют необходимым требованиям по КВЭЭ, по содержанию активного компонента и вредных примесей. Кроме того, обработка сплава не приводит к образованию существенных концентрационных неоднородностей: абсолютное расхождение по содержанию бария не превышает 0,12 %. Наблюдаемое на отдельных образцах снижение КВЭЭ до 2,8, вероятно, носит локальный статистический характер, а также может быть вызвано влиянием неконтролируемого изменения состава за счет технологических потерь бария.

При последующей доработке технологии для устранения указанных негативных факторов БТ производства КС марки ПЛБа 98-2 была дополнена рафинирующей плавкой прессонок порошка платины, обеспечивающей удаление содержащихся в исходном порошке платины растворенных газов, воды (0,24 % – собственные данные) и снижение содержания в платине легколетучих примесных компонентов. Таким образом, последующее высокотемпературное сплавление платины с барием позволяет избежать негативного влияния (пористость, усадочные раковины после затвердевания и др.) на качество заготовок КС взаимодействия сплавляемого бария с этими примесями. Кроме того, для снижения возможной пористости слитков и удаления примесей (растворенных газов, оксидов металлов и др.) целесообразно провести повторную плавку предварительно измельченного слитка при пониженном до $5,0 \cdot 10^4$ Па давлении аргона.

Полученные образцы, в т. ч. промышленной партии, имеют улучшенные стабильные показатели по КВЭЭ и однородности распределения бария. Количественный показатель этого (см. п. 1,2 табл. 3) снизился более чем в два раза. Содержание примеси углерода в сплавах промышленной партии стабильно не превышало 0,05 %. По результатам проведенных успеш-

ных испытаний разработанная технологическая схема была принята в качестве промышленной для КС марки ПЛБа 98-2.

Основными выявленными проблемами при получении по БТ полос КС на основе палладия являлись дефектность поверхности и большая неоднородность по содержанию бария. В первую очередь при внешнем осмотре поверхности готовых полос, произведенных по БТ, а также на горячекатаных заготовках были обнаружены темные пятна без металлического блеска, в основном ориентированные вдоль направления прокатки (рис. 2, *а*), которые не удаляются грубой абразивной обработкой поверхности. При внешнем осмотре без средств увеличения на отдельных полосах в местах потемнения выявлены также дефекты в виде углублений, сквозных отверстий (как правило, в центре темных пятен) и расслоений. В целом обнаруженные дефекты снижают прямой выход годной продукции, ухудшают механические свойства сплава и затрудняют его обработку. Для таких сплавов характерно (см. п. 2.2 табл. 3) наличие большого разброса по параметру однородности распределения бария, который на порядок превышает показатель для платиновых сплавов. Содержание бария в параллельных пробах некоторых образцов отличалось до 1,28 %, а соответствующее снижение содержания бария по сравнению с его исходным содержанием достигало 75 %. Наиболее наглядно неоднородность распределения бария выявляется с использованием рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА). На рис. 2, *б* показан пример такого исследования, проведенного с использованием рентгеновского аналитического микроскопа «РАМ 30т» (диаметр зонда – 30 мкм) с режимом сканирования: шаг – 60 мкм, скорость – 600 мкм/с.

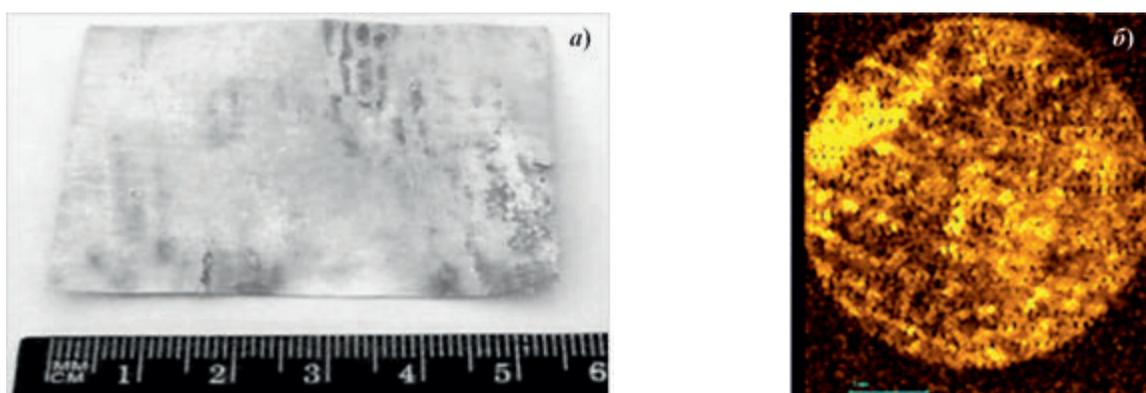


Рис. 2. Неоднородное распределение компонентов КС палладий-барий, изготовленного по БТ:

- а* – темные ориентированные пятна на поверхности КС, выявляемые при визуальном осмотре, $\times 1,5$;
- б* – светлые участки с повышенным содержанием бария (РФА диска $\varnothing = 4$ мм с элементным картированием по барию), $\times 10$

Таким образом, установлено, что участки с наибольшим содержанием бария совпадают с выявленными визуально темными пятнами на поверхности полос. Значительное увеличение концентрации бария до 6...9 % на отдельных участках полос по сравнению с исходным составом, а также их потемнение может быть связано как с увеличением содержания бария за счет локального избытка соответствующей структурной составляющей – Pd_3Ba (20,52 % Ba), так и с изменением фазового состава при производстве КС. В работах [23, 24] по результатам лабораторного исследования полос КС марки ПДБ2 с использованием растрового электронного микрос-

копа Mira 3 XMU с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром для электронно-зондового микроанализа Oxford X-Max^N 80 обнаружены следующие двойные соединения, содержащие кислород: BaO, PdO₂, Al₂O₃. Кроме того, определен состав структурных составляющих, одновременно содержащих барий, кислород и палладий, их содержание находилось в пределах 24,6...34,8; 35,3...51,8; 19,6...28,7 % (ат.) соответственно. На основе анализа этих исследований в нашей работе [25] высказано предположение о возможном наличии на поверхности полос ПДБ2 соединения Ba₂PdO₃, которое экспериментально подтверждено в настоящей работе с использованием рентгенофазового анализа (разд. 5).

Как известно [26], кислородосодержащее соединение Ba₂PdO₃ относится к сложным оксидам с перовскитоподобной структурой, которые часто имеют кислородную нестехиометрию. Электрические, магнитные и др. свойства таких соединений с многослойной кристаллической структурой и кислородными вакансиями в последнее время активно исследуются для прикладного использования. Например, некоторые перовскиты на основе стронция и бария, имеющие низкую расчетную работу выхода электронов (1,07...1,86 эВ), рассматриваются сейчас в качестве перспективных термоэмиссионных материалов [27]. Эмиссионные свойства Ba₂PdO₃ до настоящего времени не исследованы. В [28, 29] на основе проведенных теоретических расчетов «кристаллитной» модели работы металлосплавных пористых катодов системы Pd–Ba предполагается, что их эмиссионные свойства определяют «кристаллиты фазы BaO_(1-x) и фазы Ba_(1-y)O_(1-x)Pd_y». Необходимо отметить, что последняя, трехкомпонентная «фаза» определена авторами не как соединение, например, Ba₂PdO_{3-δ}, а как «кристаллиты BaO, содержащие кислородные вакансии, и растворенные атомы Pd».

Наблюдаемая неоднородность состава полос (см. п. 2.2 табл. 3) приводит к большому локальному разбросу эмиссионных свойств. КВЭЭ, измеренный для пяти различных участков полосы КС, представленной на рис. 2, а, находился в пределах 2,5...2,9. Соответствующая этому случайная составляющая погрешности измерения КВЭЭ – 0,13 при доверительной вероятности 90 % – почти в три раза превышает систематическую составляющую для используемой методики измерения эмиссионных параметров.

На негативное влияние неоднородности состава и распределения активного компонента в КС марки ПДБ2 разных производителей и поставочных партий на стабильность электрических параметров изготавливаемых магнетронов обращено внимание в [30]. В качестве предполагаемых причин неоднородности состава ранее указывали на возможность неполного взаимодействия исходных компонентов при их высокотемпературном сплавлении [5] и на загрязнение сплава при «многократной прокатке» [12]. Для устранения неоднородностей первого типа ранее разработчиками БТ предлагалось проводить повторные плавки слитков после их дробления и перемешивания [10]. В отличие от авторов зарубежного патента [31], проводивших тройной переплав в дуговой печи различных слитков КС, включая Pd–Ba, практическая реализация этого способа в нашей работе не подтвердила эффективность использования повторных плавков для обеспечения однородности распределения бария.

Необходимо также отметить, что в перечисленных работах не сообщается о важном, с нашей точки зрения, экспериментальном факте: наблюдаемые темные и серые пятна на поверхности полос, свидетельствующие о локальном изменении состава, находятся только с одной стороны полос, соответствующей нижней, по отношению к ориентации при плавке, части исходного слитка. Внешний вид с нижней стороны всех таких слитков, полученных после АДП, значительно отличается от слитка сплава Pt–2%Ba с таким же содержанием бария (рис. 3).

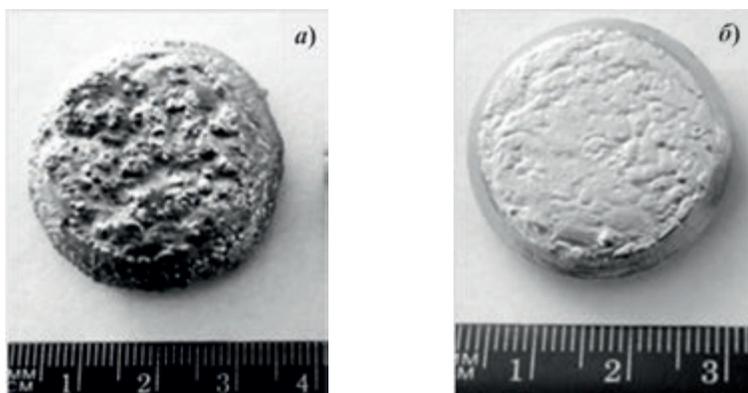


Рис. 3. Сравнение состояний поверхности нижней части слитков сплавов Pd–2%Ba (а) и Pt–2%Ba (б) после аргонодуговой плавки

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КАТОДНЫХ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЙ-БАРИЙ

Как известно, основными факторами образования неоднородности состава при сплавлении исходных компонентов являются их неполное взаимодействие (растворение, образование промежуточных фаз и др.) и ликвация, т. е. макроскопическое перераспределение компонентов получаемого сплава в составе структурных составляющих при кристаллизации. Для выявления их значимости для сплавов палладий-барий были проведены металлографические исследования с использованием оптического микроскопа Olympus BX51M. Для количественного определения содержания структурных составляющих и состава сплавов использовали специализированное ПО – анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS Photolab v.4.1. После резки слитка электроэрозионным способом по его диаметру поверхность сечения полировали на шлифовально-полировальном устройстве TegraPol-11. Травление исследуемой поверхности проводили аналогично [6].

По результатам исследований установлено, что микроструктура нижней части слитка значительно отличается от микроструктуры верхней и центральной его частей. На рис. 4 представлен участок слитка, где выявлена четкая граница между этими микроструктурами. Основная часть слитка имеет двухфазную структуру, характерную для сплавов с перитектическим равновесием, таких, как Pd–Ba (левая верхняя часть рис. 4), это палладий в виде светлых структурных составляющих округлой формы, между которыми имеются прослойки темной фазы перитектического состава (~23 % Ba). В нижней части слитка образуются зоны с повышенным содержанием бария, они также содержат светлую структурную составляющую, которая имеет значительно меньшие размеры и объемную долю (правая нижняя часть рис. 4), чем в остальной части слитка. Установленная концентрация бария в этих зонах (7,6 %) превышает его среднюю концентра-

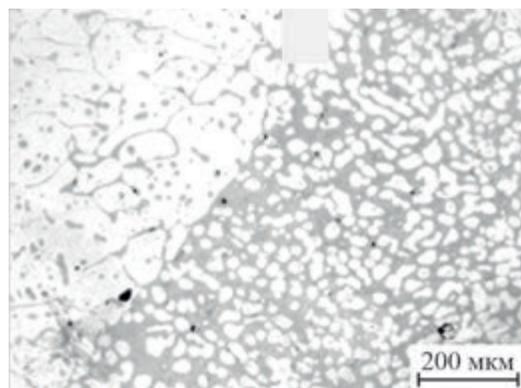


Рис. 4. Граница между участками слитка сплава Pd–2%Ba с различными микроструктурами. $\times 80$

цию в сплаве почти в четыре раза. Эти зоны с повышенной концентрацией бария формируются в виде выступов на поверхности нижней части слитка (см. рис. 3, а), их линейный размер по высоте составляет ~1 мм.

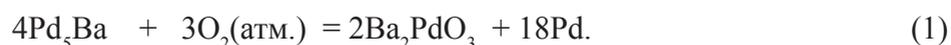
Выявленная неоднородность состава может быть связана только с разделением компонентов при затвердевании. Важной особенностью перитектических сплавов является их склонность к ликвации, которая в специальных условиях (направленная кристаллизация при интенсивной конвекции) может привести даже к полному разделению фаз [32]. В противоположность этому неконтролируемое затвердевание сплава при высоких скоростях охлаждения (до 150 °С/с) в медной изложнице должно было привести к однородной микроструктуре, но формирование зон с повышенным содержанием бария в этих условиях может указывать на более значительное влияние других факторов:

– возможное значительное переохлаждение относительно перитектической температуры (1260 °С) остаточного жидкого расплава, обогащённого барием, на последнем этапе затвердевания слитка;

– широкая температурная область кристаллизации сплава Pd–2%Ba (~300 °С).

В совокупности они приводят к двухэтапной кристаллизации, формирующей наблюдаемую неоднородную микроструктуру. Образование неровной поверхности в нижней части слитка указывает на то, что эта часть, содержащая более значительную долю легкоплавкой структурной составляющей, кристаллизовалась последней, со значительным отрицательным изменением объема. Противоположным примером является образование микроструктуры слитка сплава Pt–2%Ba: относительно узкая область кристаллизации в системе (~60 °С) и быстрое затвердевание расплава эвтектического состава (как правило, не склонного к переохлаждению) приводят к практически однокомпонентной кристаллизации и, как следствие, к бездефектной поверхности слитка, принимающего форму изложницы (рис. 3, б).

Дальнейшая обработка неоднородного слитка Pd–2%Ba по БТ приводит к образованию наблюдаемых дефектов на поверхности полос (см. рис. 2, а). При исследовании операции горячей прокатки основное внимание должно быть обращено на возможное окисление соединения Pd₅Ba атмосферным кислородом при 1150 °С по реакции:



В этом случае содержание кислорода в КС определяется по коррозионному привесу окисления интерметаллического соединения Pd₅Ba, его полное окисление в сплаве Pd–2%Ba соответствует общему коррозионному привесу 0,35 %.

С учетом потенциального влияния кислорода на обрабатываемость КС, представляет практический интерес исследование изменения его концентрации на этапах технологического передела, которые могут изменить его содержание, а также в исходном порошке палладия. Для проведения прямых измерений содержания кислорода использовали установку ELTRA ONH 2000. Как видно из полученных экспериментальных данных, представленных в табл. 4, в образцах КС, полученных по БТ, это значение находится в диапазоне 0,22...1,07 %. Максимальная степень окисления Pd₅Ba выявлена в изготовленных полосах, минимальная – в слитках после АДП. Наблюдаемое превышение 100%-ной степени окисления Pd₅Ba связано с выявленным ранее локальным увеличением содержания бария в обрабатываемом сплаве, которое на отдельных участках может значительно превышать среднее значение.

Таблица 4

**Содержание кислорода на этапах производства
КС палладий-барий по БТ**

№ п/п	Исследуемый образец	Содержание кислорода, %	Степень окисления Pd ₅ Ba, %
1	Порошок Pd марки ППд-1 ПдАП-1	0,19*	–
2	Слитки после АДП	0,0045 – 0,0083	1,3 – 2,4
3	Полоса КС с неоднородным распределением бария (рис. 2, а)	0,22 – 0,54	62,9 – 154,3
4	Наиболее «загрязненный» участок изготовленной полосы	1,07	305,7

*С учетом содержания воды.

Несмотря на явные следы окисления (см. рис. 2, а) и коррозионный привес горячекатаных полос сплава, при рентгенофазовом анализе, проведенном ранее [25], обнаружить Ba₂PdO₃ этим методом не удалось из-за отсутствия соответствующих эталонных спектральных данных. Кроме того, даже при полном окислении активного компонента сплава Pd–2%Ba, содержание фазы Ba₂PdO₃ не может превысить 3 %, что находится около минимального предела идентификации фаз использованным рентгеновским методом. Для более детальных исследований коррозионного поведения Pd₅Ba в условиях, моделирующих термическую обработку при горячей прокатке БТ, целесообразно использовать экспериментальные образцы со значительно большим исходным содержанием бария. В наших экспериментах исследован модельный слиток, полученный по БТ (см. п. 3 табл. 2), состав шихты для плавки которого соответствовал стехиометрии соединения Pd₅Ba (20,5 % Ba). После измельчения полученного образца до крупности 1...3 мм, его состав исследовали с помощью рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр «ДРОН-8», CoKα-излучение). Как видно из представленных данных (рис. 5, а), основным компонентом в исходном образце является интерметаллическое соединение Pd₅Ba, его расчетное содержание (обработка дифракционных данных с помощью программы «Синус Тета») составляет 76,8 %. Соответствующая концентрация бария 15,8 % меньше фактического содержания (20,2 %), установленного более точным весовым методом. Концентрация палладия, не входящего в состав Pd₅Ba, в этом случае должна составлять 1,8 %.

После термической обработки по режиму горячей прокатки в этом же образце выявлено значительно большее содержание палладия – 88,7 %. Вторая идентифицированная фаза – Ba₂PdO₃ (рис. 5, б) – составляет 11,3 %, что значительно меньше расчетного количества 31,5 % по реакции (1) при исходном фактическом содержании Pd₅Ba. Таким образом, более достоверные количественные экспериментальные данные могут быть получены только при определении содержания кислорода в изготовленном КС.

Анализ полученных экспериментальных данных однозначно указывает на необходимость учета выявленного влияния процесса окисления при разработке промышленной технологии производства КС.

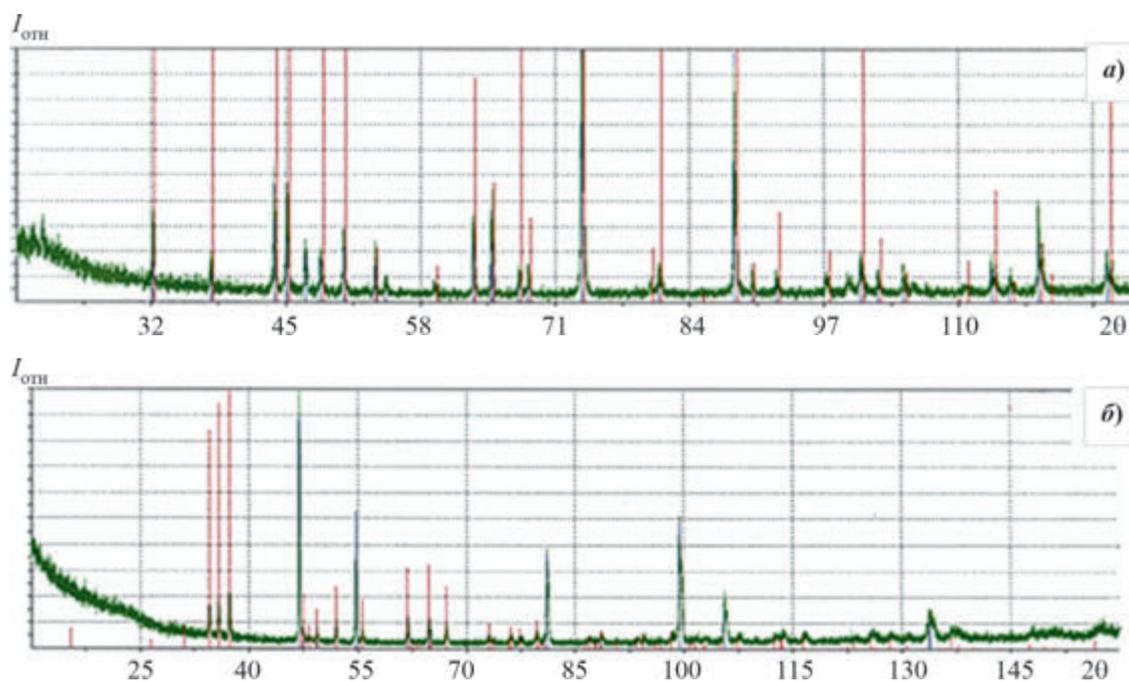


Рис. 5. Рентгенограммы исходного образца сплава Pd–20,2%Ba (а) и обработанного по режиму горячей прокатки (1150 °С, атмосферный воздух) (б).

Красными вертикальными линиями выделены дифракционные пики Pd_5Ba (а) и Ba_2PdO_3 (б)

6. ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ КАТОДНЫХ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЙ-БАРИЙ

Результаты проведенных экспериментальных исследований были использованы для разработки промышленной технологии производства КС палладий-барий, схема которой представлена на рис. 6. Кроме этого, учтены положительные результаты использования разработанной промышленной технологии производства КС марки ПЛБа 98-2, связанные с проведением рафинирующей плавки пресовок порошка платины и повторной АДП при пониженном давлении аргона. Эти операции позволяют обеспечить максимальную дегазацию сплава и снижение его пористости. Как видно из приведенной на рис. 6 схемы, дополнительно использованы технологические процессы производства лигатуры (ТП-1...ТП-4), т. е. сплава с повышенным до 20 % содержанием бария, применяемого при сплавлении вместо бария.

Более быстрое и эффективное введение активного компонента в таком виде (по сравнению с использованием бария по БТ) при проведении соответствующего технологического процесса получения слитка сплава (ТП-5, рис. 6) позволяет минимизировать негативное влияние высокотемпературной обработки на активный барий (испарение, окисление, образование гидроксида и др.). Важное значение для качества КС имеет проведение технологических операций, обеспечивающих минимальное окисление активного компонента:

- гомогенизация слитка сплава после АДП (ТП-8, рис. 6), исключая локальное увеличение концентрации бария при изготовлении полос сплавов;
- контролируемая термообработка заготовки, которая значительно снижает воздействие атмосферного кислорода при проведении горячей прокатки (ТП-9, рис. 6).

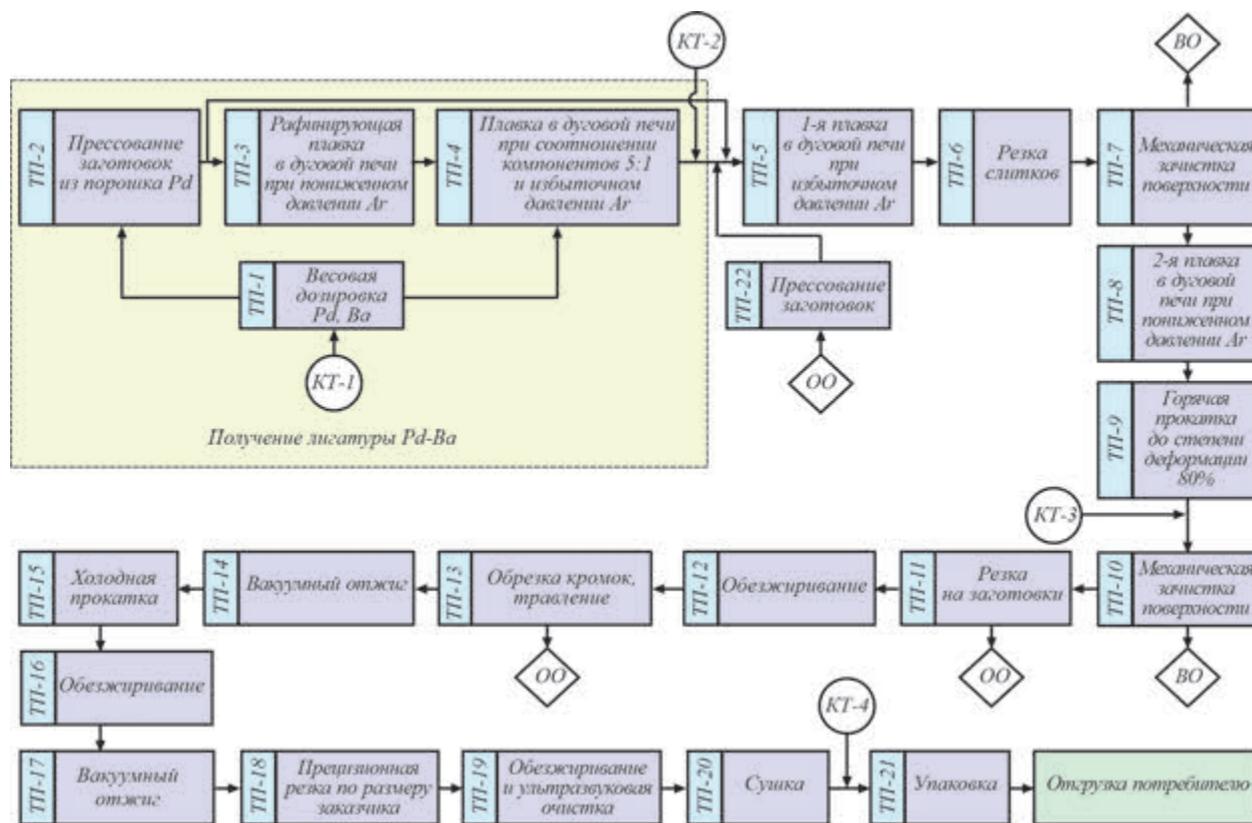


Рис. 6. Схема разработанной промышленной технологии производства КС палладий-барий марки ПдБа 98-2:

ТП-1... – технологический процесс с порядковым номером; КТ-1... – контрольная точка отбора пробы с порядковым номером; ОО – оборотные отходы; ВО – возвратные отходы

Установленные технологические параметры позволяют стабильно получать полосы КС с $\sigma_{\max} = 2,85...2,90$. В случае использования альтернативного варианта – технологии производства металлосплавных пористых катодов этот параметр при содержании $\sim 2\%$ Ва не превышает 2,5 [12].

Концентрация кислорода в КС, изготовленных по разработанной технологии, составляет $\leq 0,07\%$, т. е. в 3...15 раз меньше, чем для БТ (см. п. 3 и 4 табл. 4). Практическая значимость достигнутого снижения концентрации кислорода подтверждена существенным улучшением качества КС по сравнению с БТ. Сравнение данных, приведенных в табл. 3, показывает, что образцы промышленной партии имеют меньший разброс по КВЭЭ: соответствующая случайная составляющая погрешности измерения снизилась с 0,13 до 0,02%. Как показывает РФА (рис. 7), это достигается за счет более однородного распределения бария. Абсолютное расхождение по его содержанию для каждой из исследованных полос промышленной партии КС

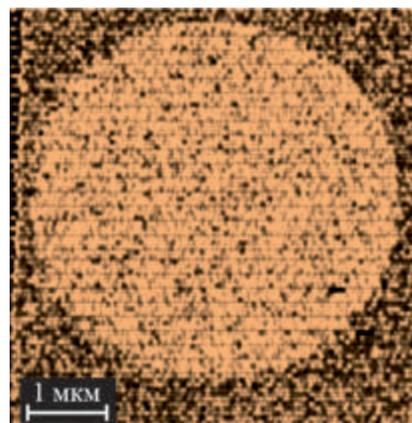


Рис. 7. Однородное распределение бария в КС марки ПдБа 98-2, изготовленном по разработанной промышленной технологии (РФА диска $\varnothing = 4$ мм с элементным картированием по барию). $\times 10$

не превышало 0,1 %, среднее значение по БТ – 0,73 %. Содержание примеси углерода в сплавах промышленной партии составило 0,009...0,012 %, по БТ – до 0,055 %.

По результатам успешных испытаний разработанная технологическая схема принята в качестве промышленной для КС марки ПдБа 98-2. Производимая продукция – КС марок ПлБа 98-2 и ПдБа 98-2 – соответствует современным требованиям (см. табл. 1) и в настоящее время выпускается по общим ТУ [33]. По совокупности положительного эффекта, достигаемого при проведении технологических операций, на качество КС выдан патент РФ [34].

В промышленных условиях производства КС установлены также показатели эффективности использования разработанных технологий (ПлБа 98-2/ПдБа 98-2): общий выход годной продукции – 93,5/85,0 % (с учетом переработки оборотных отходов), возвратные отходы – 5,0/13,0 %, безвозвратные потери – не более 1,5/2,0 %.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки промышленной технологии производства вторично-эмиссионных бариевых сплавов на основе платины и палладия. При выполнении комплексных исследований параметров сплавов и влияния на них соответствующих технологических процессов базовой технологии выявлены основные причины образования неоднородностей концентрационного и фазового составов сплавов, ухудшающих их эмиссионные свойства. По результатам анализа полученных экспериментальных данных установлены оптимальные параметры технологических процессов, обеспечивающие стабильные эмиссионные свойства, пониженное содержание сопутствующих примесей и однородное распределение активного компонента при его минимальном окислении.

Испытания промышленной партии полос КС марок ПлБа 98-2 и ПдБа 98-2, полученных по разработанной технологии, показали, что обеспеченные условия металлургического производства, а также учет выявленных технологически значимых особенностей обработки сплавов позволяют выпускать продукцию, соответствующую современным стандартам на вторично-эмиссионные катодные сплавы. В промышленных условиях производства установлены также важные технологические показатели эффективности разработанной технологии, которые существенно превосходят показатели предшествующих технологий.

Для контроля качества продукции разработаны специализированные методики измерения ее основных параметров с использованием современного измерительного оборудования. Впервые в технологическую практику производства полос КС введены показатели контроля однородности распределения активного компонента и степени его окисления. Дополнительным преимуществом разработанной промышленной технологии является возможность контроля состава образующихся отходов драгоценных металлов и их повторное использование в основном производстве.

Номенклатура и качество полос КС, выпускаемых на организованном специализированном производстве, обеспечивают текущие потребности разработчиков и производителей катодных систем для усилителей и генераторов М-типа повышенного уровня мощности в объеме до 5 кг продукции в год.

Работа выполнена в рамках подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» государственной программы РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» по государственному контракту № 13411.0924800.05.007

«Разработка технологий создания катодных и ферритовых материалов на основе щелочно-земельных и редкоземельных металлов для мощных электровакуумных СВЧ-приборов»

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дюбуа, Б. Ч.** Электронная эмиссия металлических сплавов и тугоплавких металлоподобных соединений: дис. ... докт. физ.-мат. наук / Б. Ч. Дюбуа. – М., 1971. – 252 с.
2. **Дюбуа, Б. Ч.** Современные эффективные катоды (К истории их создания на ФГУП «НПП «Исток») / Б. Ч. Дюбуа, А. Н. Королев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып.1 (508). – С. 5 – 24.
3. **Дюбуа, Б. Ч.** Электронная эмиссия сплавов Pt–Ba, Pd–Ba, Rh–Ba, Au–Ba / Б. Ч. Дюбуа, Н. П. Ермолаев, Н. П. Есаулов, И. П. Стародубов, Л. П. Якименко // Радиотехника и электроника. – 1967. – Т.12, вып. 8. – С. 1523 – 1524.
4. **Ильин, В. Н.** Скорость испарения бария из сплавов Pt–Ba, Pd–Ba / В. Н. Ильин, И. Д. Калинина, А. П. Казаков, В. В. Обухов-Денисов, Т. С. Златоустовская // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1971. – Вып. 5. – С. 120 – 127.
5. Исследование и разработка катодных материалов на основе тугоплавких металлов для СВЧ-приборов: технический отчет / НИИЭТ; О. В. Душина, Н. П. Есаулов, В. М. Рождественский, В. Ф. Фролова. – Фрязино, 1967. – 58 с. – № 180-3383.
6. **Дмитриева, В. Н.** Исследование фазового состава сплавов платина-барий и палладий-барий / В. Н. Дмитриева, Н. П. Есаулов, Н. Н. Журавлев, В. М. Рождественский // Благородные металлы и их применение. – 1971. – Вып. 62. – С. 58 – 68.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т.1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
8. **Okamoto, H.** The Ba–Pt (barium-platinum) system // J. of Phase Equilibria. – 1991. – Vol.12, No 4. – P. 464 – 466.
9. **Okamoto, H.** The Ba–Pd (barium-palladium) system // J. of Phase Equilibria. – 1991. – Vol.12, No 4. – P. 462 – 464.
10. Получение эмиссионных и антиэмиссионных сплавов тугоплавких металлов для применения в катодной технике: технический отчет / НИИЭТ; В. М. Рождественский, О. В. Душина, Н. П. Есаулов. – Фрязино, 1969. – 49 с. – № 96-3706.
11. **Есаулов, Н. П.** Пластическая деформация и механические свойства сплавов платина-барий и палладий-барий / Н. П. Есаулов, В. М. Рождественский // Благородные металлы и их применение. – 1971. – Вып. 62. – С. 313 – 322.
12. **Ли, И. П.** Прессованный металлосплавной палладий-бариевый катод для магнетронов с безнакальным запуском / И. П. Ли, В. С. Поляков, А. Д. Силаев, А. А. Минин, Н. Е. Харитоновна // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 4 (519). – С. 170 – 175.
13. Свойства элементов. Ч.1. Физические свойства: справочник / под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
14. **ГОСТ Р 15.301 - 2016.** Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. – М.: Стандартиформ, 2018. – 12 с.
15. **ГОСТ 13498-2010.** Платина и сплавы на ее основе. Марки. – М.: Стандартиформ, 2011. – 11 с.
16. **ГОСТ 13462-2010.** Палладий и сплавы на его основе. Марки. – М.: Стандартиформ, 2011. – 8 с.
17. **Ильин, В. П.** Электронная эмиссия сплавов платины и палладия с металлами II группы / В. П. Ильин, Н. П. Есаулов, А. П. Казаков // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1971. – Вып. 5. – С.138 – 142.
18. **ГОСТ Р 51672-2000.** Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия. Основные положения производство. – М.: Стандартиформ, 2008. – 21 с.
19. **ГОСТ Р 52599-2006.** Драгоценные металлы и их сплавы. Общие требования к методам анализа. – М.: Стандартиформ, 2007. – 11 с.

20. Пат. 2380784 РФ, МПК Н 01 J 25/00. Магнетрон с безнакальным катодом / И. П. Ли, Б. Ч. Дюбуа, Н. В. Каширина, С. В. Комиссарчик, Н. Д. Лифанов, М. Н. Зыбин. – Опубл. 27.01.10, Бюл. № 3. – 16 с.
21. Власко, А. В. Процессы, происходящие при магнитной сепарации твердых дисперсных сред, и их роль в технике получения экологически безопасных конструкционных материалов для радиоэлектроники: автореф. дис... к.т.н.: 01. 04. 07 / Власко А. В. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 16 с.
22. Есаулов, Н. П. Методы электроплавки при разработке сплавов для радиоэлектроники / Н. П. Есаулов // Электрометаллургия. – 2011. – № 4. – С. 30 – 33.
23. Костишин, В. Г. Исследование фазового и примесного состава лент катодных сплавов Pd–Ba и Pt–Ba / В. Г. Костишин, С. Д. Калошкин, А. Ю. Адамцов, Н. Д. Урсуляк, А. Г. Налогин, Г. В. Дровненкова, М. Н. Хабачев, Е. К. Горский / Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т.18, № 3. – С. 212 – 220.
24. Костишин, В. Г. Исследование фазового и примесного состава лент катодных сплавов Pt–Ba / В. Г. Костишин, С. Д. Калошкин, А. Г. Налогин, А. Ю. Адамцов, Е. К. Горский // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – 14 с.
25. Хабачев, М. Н. Получение катодных сплавов платины и палладия с барием с улучшенными характеристиками / М. Н. Хабачев, А. Г. Налогин, Г. В. Дровненкова, О. В. Дубинина // Тезисы докладов научно-технической конференции «СВЧ-Электроника-2016», Фрязино, АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2016. – С. 80 – 81.
26. Ropp, R. C. Encyclopedia of the alkaline earth compounds / Ropp R. C. – Amsterdam, 2013.
27. Jacobs, R. Perovskite electron emitters: computational prediction and preliminary experimental assessment of novel low work function cathodes / R. Jacobs, L. Lin, T. Ma, O. Lu-Steffes, V. Vlahos, D. Morgan, J. Booske // Conference Preceeding of IVEC 2018 (Monteray, USA, April 23–26). – P. 37 – 38.
28. Капустин, В. И. Физический механизм работы палладий-бариевых катодов СВЧ-приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, А. В. Шуманов, С. О. Москаленко, А. А. Буш, Ю. Ю. Лебединский // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, вып. 5. – С. 771 – 780.
29. Капустин, В. И. Теория термоэмиссионных и вторично-эмиссионных свойств палладий-бариевых катодов электровакуумных сверхвысокочастотных приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, С. О. Москаленко, А. В. Шуманов // ЖТФ. – 2020. – Т. 90, вып. 2. – С. 330 – 337.
30. Гурко, А. А. Методика оценки качества эмитирующего узла катода магнетрона с автоэмиссионным запуском / А. А. Гурко, К. И. Сучков // Радиофизика и электроника. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 76 – 79.
31. Пат. США US № 6,791,251 В 2, МПК Н 01 J 1/146. – Приоритет 21.02.01, опубл.14.09.04.
32. Хабачев, М. Н. Направленная кристаллизация перитектических сплавов в центробежном поле / М. Н. Хабачев, А. Г. Морачевский // ЖПХ. – 1999. – Т. 72, вып. 5. – С. 726 – 728.
33. КРПГ 741121.667/668 ТУ. Полосы из платино-бариевых и палладиево-бариевых сплавов. – Фрязино: АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2016. – 45 с.
34. Пат. № 2581151 РФ, МПК Н 01 J 1/32, Н 01 J 9/02. Способ изготовления эмиссионно-активного сплава катода / Н. Д. Урсуляк, М. Н. Хабачев, А. Г. Налогин, Г. В. Дровненкова и др. – Опубл. 20.04.16, Бюл. № 11. – 16 с.

Статья поступила 14 октября 2021 г.

УДК 621.385.7.002

ЭФФЕКТ КИРКЕНДАЛЛА И ЗАКОН «3/4»

К. А. Турсунметов

Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент

Рассматривается роль эффекта Киркендалла в изменении элементного состава поверхности и в образовании высокоэффективных эмиссионных систем сплав-кислород-цезий в зависимости от соотношения температур плавления компонентов сплавов. Экспериментально исследованы сплавы Mo–Zr, W–Zr, Nb–Zr, W–Hf, Ta–Hf методами электронной Оже-спектроскопии и термоэлектронной эмиссии и показано получение однородной пленки легкоплавкого компонента на поверхности тугоплавкого компонента при условии соотношения температур плавления компонентов сплавов, равного $\frac{3}{4}$.

КС: металлы, сплавы, температура плавления, легкоплавкий компонент, тугоплавкий компонент, эффект Киркендалла, однородная пленка металла, кислород, цезий, катод, электронная Оже-спектроскопия, термоэлектронная эмиссия, работа выхода, эффект Шоттки, закон «3/4»

KIRKENDALL EFFECT AND THE «3/4» LAW

K. A. Tursunmetov

National university of Uzbekistan, Tashkent

The role of Kirkendall effect in the change of elemental composition of the surface and in the formation of highly efficient alloy-oxygen-cesium emission systems depending on the ratio of the alloy components melting temperatures is considered. Mo–Zr, W–Zr, Nb–Zr, W–Hf, Ta–Hf alloys are experimentally investigated by Auger electron spectroscopy and thermionic emission, and it is shown that a homogeneous film of a low-melting point component is obtained on the surface of a refractory component under the condition that the ratio of the melting temperatures of the alloy components is $\frac{3}{4}$.

Keywords: metals, alloys, melting temperature, low-melting point component, refractory component, Kirkendall effect, homogeneous metal film, oxygen, cesium, cathode, Auger electron spectroscopy, thermionic emission, work function, Schottky effect, «3/4» law

1. ВВЕДЕНИЕ

Американский металлофизик Киркендалл обнаружил в 1947 году эффект, заключающийся в том, что при нагревании сплавов меди атомы легкоплавкого компонента выходят на поверхность сплава. Этот эффект имел большое научно-техническое значение, так как все сложные термоэлектронные катоды, в том числе металлосплавные, формируются на основе этого эффекта. В этих катодах, при нагревании их в вакууме, атомы легкоплавкого компонента: бария, цезия, тория, церия и т. д. – выходят на поверхность и, образуя пленки или островки пленок этих атомов, уменьшают работу выхода электрона катодов.

Теоретическое и математическое описание эффекта Киркендалла сложно, так как процесс накопления атомов легкоплавкого компонента на поверхности сплава в процессе его прогрева в вакууме противоречит закону Фика.

Диффузия на поверхности атомов легкоплавкого компонента изменяет поверхностный состав сплава, следовательно, значительно изменяются его эмиссионные и адсорбционные свойства.

Используя этот эффект с целью разработки эффективных эмиссионных систем сплав-кислород-цезий, нами был исследован состав поверхности ряда сплавов методом электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) [1, 2]. Отметим, что образование пленок легкоплавкого компонента на поверхности сплавов также было обнаружено в работе [3]. В работах [3–6] нами были показаны условия возможности образования однородной эпитаксиальной пленки атомов легкоплавкого компонента на поверхности сплава при концентрации легкоплавкого компонента 1...3 % (ат.) и при соотношении температуры плавления легкоплавкого компонента $T_{\text{л}}$ к температуре плавления тугоплавкого компонента $T_{\text{т}}$

$$\alpha = \frac{T_{\text{л}}}{T_{\text{т}}} = 0,75 \pm 0,02,$$

$$\text{т. е. } \frac{T_{\text{л}}}{T_{\text{т}}} = \frac{3}{4}.$$

Нами были изучены сплавы тугоплавких металлов с цирконием и гафнием при их концентрации 1; 3 и 10 % (ат.). Впрочем, относительное оптимальное значение концентрации кислородоактивного металла (циркония или гафния) составило 3 % (ат.). При значении концентрации 1 % время образования однородной пленки легкоплавкого компонента на поверхности сплава оказывается длительным (больше часа при $T = 1600 \dots 1700$ К). При более высоких концентрациях (10 % (ат.)) циркония или гафния в сплаве, на поверхности образуется более толстая пленка со структурой этих компонентов, и эмиссионные свойства таких систем были почти аналогичны эмиссионным свойствам $Zr-O-Cs$ и $Hf-O-Cs$ [4–6].

Цель настоящей работы – исследование ряда сплавов циркония и гафния на основе тугоплавких металлов методом термоэлектронной эмиссии и ЭОС для проверки выполнения эффекта Киркендалла и закона «3/4».

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты проводились в цельнометаллической вакуумной установке, позволяющей исследовать термоэмиссионные свойства образцов, их окисление в атмосфере кислорода, изучить состав поверхности методом ЭОС, масс-спектров компонентов продуктов испарения с поверхности образцов в вакууме $\leq 5 \cdot 10^{-10}$ Торр. Оже-спектрометр представлял собой модифицированную установку типа ИОС 005 с анализатором энергии типа цилиндрическое зеркало, с автоматической разверткой потенциала и регистрацией Оже-спектров.

Образцы в виде диска имели толщину ~ 1 мм и диаметр 8...10 мм. Они нагревались электронной бомбардировкой, и их температура измерялась термопарой типа ВР5/ВР20. Идентификация и калибровка Оже-спектров Mo, W, Nb, Hf, Zr, Ta, C и O проводились по принципам и закономерностям, изложенным в работе [7].

Исследуемые сплавы выбраны на основе следующих критериев [5, 6].

1. По эффекту Киркендалла, при нагревании сплава в вакууме на его поверхность должны выходить атомы легкоплавкого компонента и образовывать эпитаксиальные (однородные) пленки со структурой, сходной со структурой подложки.

2. Наличие атомов циркония или гафния существенно повышает растворимость кислорода в тугоплавких металлах.

3. Повышение активности тугоплавких металлов по отношению к кислороду.

4. Окислы, которые образуются на поверхности сплавов при их окислении, должны быть более термостойкими, чем окислы тугоплавких металлов.

5. В случае получения пленок циркония или гафния со структурой объемно центрированной кубической (ОЦК) решетки, на их поверхности при окислении должны образовываться двумерные (не объемные) окислы, которые могут создать системы, аналогичные системам $W-O-Cs$, $Mo-O-Cs$, и это должно увеличить результирующий дипольный момент двойного поляризованного слоя, позволяющий получить работу выхода электрона системы на уровне 1,2 эВ.

В соответствии с вышеизложенным, были исследованы термоэмиссионные свойства с контролем состава поверхности методом ЭОС следующих сплавов: $W-Hf$, $W-Zr$, $Ta-Hf$, $Mo-Zr$ и $Nb-Zr$. Концентрация легкоплавкого компонента во всех сплавах составляла 3 % (ат.). Перед снятием ЭОС-спектров элементов поверхности проводили «обезуглероживание» сплавов, окисляя их в атмосфере кислорода при температуре образца $T = (1100 \pm 20)$ К и давлении кислорода $(1 \dots 2) \cdot 10^{-6}$ Торр в течение 30 мин. Затем откачивали кислород. При достижении вакуума $p < 1 \cdot 10^{-9}$ Торр проводили краковременный прогрев при $T = 1600 \dots 1700$ К в течение 10 мин. После охлаждения сплава до комнатной температуры и разных температурных прогревов снимали Оже-спектры поверхности. Длительность каждого прогрева составляла 10 мин.

На рис. 1 приведены зависимости интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплава молибдена с цирконием (3 % (ат.)) от температуры прогрева. В отличие от образца, приведенного в работе [2], этот образец содержит очень малую концентрацию углерода. Поэтому, как видно из рисунка, содержание, т. е. интенсивность, Оже-пиков углерода во много раз меньше, чем в предыдущем образце. И поэтому процессы диффузии и образования пленки атомов циркония отличаются от предыдущего образца.

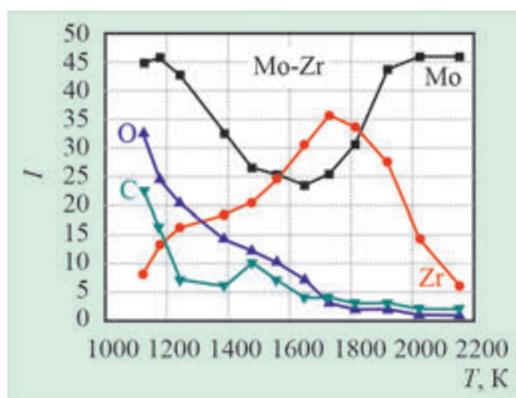


Рис. 1. Зависимости интенсивностей ОЖЭ-пиков (ОЖЭ-спектров) элементов поверхности сплава Mo-Zr от температуры

Как видно из рис.1, максимальная концентрация циркония на поверхности сплава Mo-Zr соответствует температурному интервалу 1600...1800 К.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплава $W-Zr$ от температуры. Характер и закономерность изменения интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплава $W-Zr$ почти аналогичны сплаву Mo-Zr. Однако вольфрам относи-

тельно молибдена более тугоплавков, и это сказывается на значении температуры максимального обогащения поверхности атомами циркония. Значение этой температуры составляет 1700...1900 К.

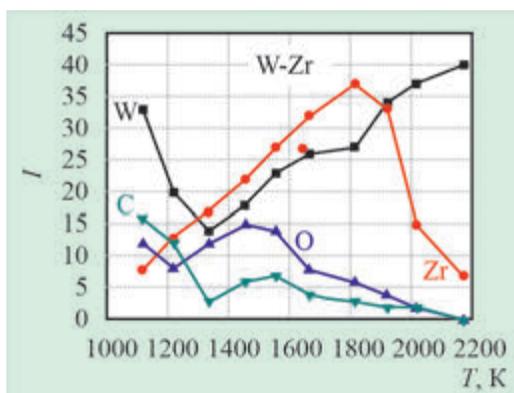


Рис. 2. Зависимости интенсивностей ОЖЭ-пиков элементов поверхности сплава W–Zr от температуры

Это можно объяснить более сильным взаимодействием атомов вольфрама по отношению к взаимодействию атомов молибдена. Энергия взаимодействия атомов в кристаллической решетке характеризуется их температурой плавления, так как энтропия плавления, т. е. отношение теплоты плавления λ к температуре плавления $T_{\text{плав}}$, является постоянной величиной для каждого типа кристаллической решетки [8]:

$$S = \frac{\lambda}{T_{\text{плав}}} = \text{const.}$$

Весьма интересна природа образования на поверхности сплава пленок атомов легкоплавкого компонента на основе эффекта Киркендалла. На рис. 3 приведена динамика изменения интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплава Mo–Zr. На этом же рисунке для сопоставления результатов приведена зависимость для аналогичного сплава (кривая *a*), содержащего значительную концентрацию атомов углерода, которая была представлена в работе [2]. Как видно из этих зависимостей, отсутствие примесных атомов углерода приводит к образованию на поверхности сплава более однородной пленки атомов циркония, что подтверждает выполнение закона «3/4» [4–8].

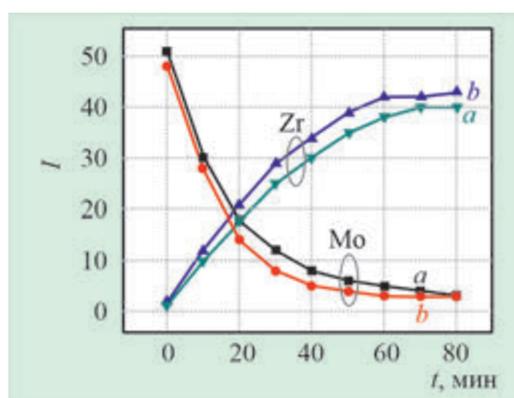


Рис. 3. Динамика изменения интенсивностей ОЖЭ-пиков Mo и Zr на поверхности сплава Mo–Zr (3 %)

Для проверки закономерности образования на поверхности сплавов однородной пленки атомов легкоплавкого компонента нами исследованы сплавы Nb–Zr и W–Zr (рис. 4), а также W–Hf и Ta–Hf (рис. 5). На рис. 4 приведена динамика изменения интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплавов Mo–Zr и Nb–Zr при $T = 1700$ К.

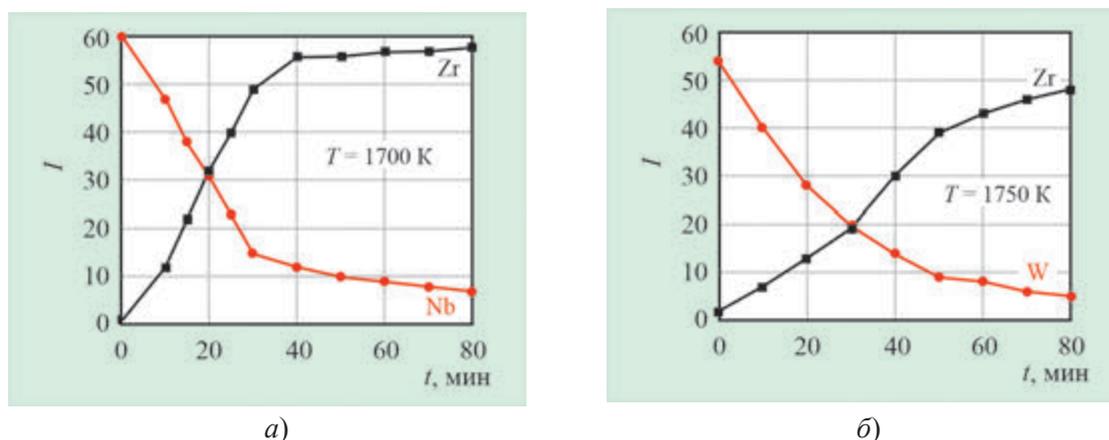


Рис. 4. Динамика изменения интенсивностей ОЖЭ-пиков компонентов на поверхности сплавов Nb–Zr (3 %) (а) и W–Zr (б)

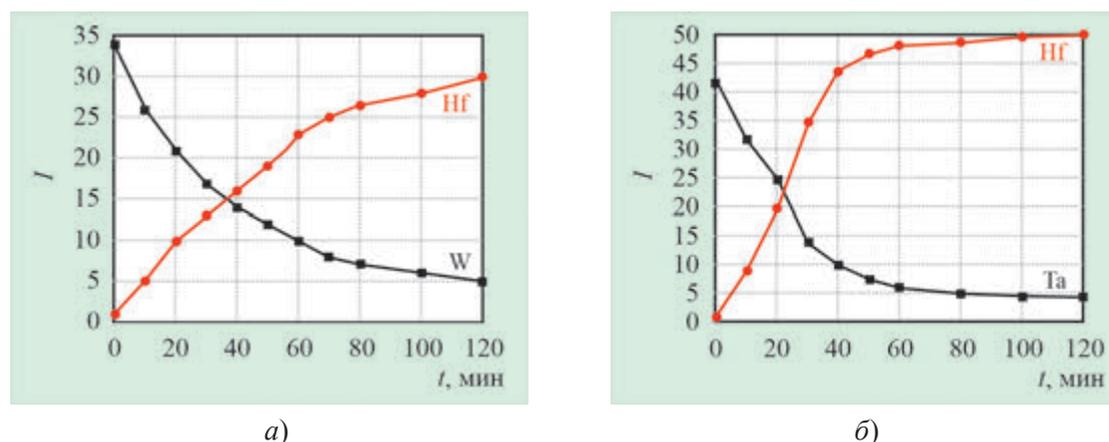


Рис. 5. Динамика изменения интенсивностей ОЖЭ-пиков компонента на поверхности сплавов W–Hf (а) и Ta–Hf (б)

Как видно из этих рисунков, более однородная пленка атомов циркония образуется на поверхности ниобия, где выполняется критерий $T_{\text{д}}/T_{\text{т}} = 3/4$.

Такая закономерность также была подтверждена на сплавах Ta–Hf и W–Hf [1]. На рис. 5 приведена динамика изменения интенсивностей Оже-пиков элементов поверхности сплавов W–Hf и Ta–Hf при $T = 1770$ К.

Для сплава Ta–Hf отношение $T_{\text{д}}/T_{\text{т}}$ составляет $0,76 \approx 3/4$, и при этом образуется однородная пленка атомов гафния на поверхности сплава тантала. В этом случае также достигается минимальное значение работы выхода системы сплав-кислород-цезий на уровне 1,2 эВ [5, 6].

Итоговые результаты исследования термоэлектронных свойств с контролем состава поверхности сплавов тугоплавких металлов с 3 % (ат.) примеси легкоплавкого компонента приведены в таблице.

№ п/п	Сплав	$T_d - T_r$	T_d/T_r	Характер пленки	φ_{\min} , эВ, системы сплав-кислород-цезий
1	W–Hf	1200	0,67	Неоднородная	1,39±0,03
2	Ta–Hf	776	0,76 ≈ ¾	Однородная	1,20±0,03
3	W–Zr	1573	0,57	Неоднородная	1,45±0,03
4	Mo–Zr	773	0,73 ≈ ¾	Однородная	1,22±0,03
5	Nb–Zr	663	0,76 ≈ ¾	Однородная	1,18±0,03
6	Nb–Hf	248	0,91	Неоднородная	1,40±0,03

Как видно из таблицы, предъявленным требованиям к образованию однородной пленки атомов легкоплавкого компонента (закону «3/4») соответствуют сплавы: Ta–Hf, Mo–Zr и Nb–Zr.

Доказательством этого предположения, кроме динамики изменения интенсивностей Оже-пиков атомов легкоплавкого компонента, являются следующие факты [5–6]:

1. На вольт-амперных характеристиках, снятых после термического обезгаживания этих сплавов в вакууме и стабилизации работы выхода при $T < 1700$ К, не наблюдается аномальный эффект Шоттки.

2. Не наблюдаются дополнительные максимумы «седлообразной» формы на «S-образных» (зависимость термоэлектрического тока в потоке атомов Cs от температуры: $\lg(I/T^2) + C = f(5040/T)$) кривых, снятых после обезгаживания и окисления сплавов.

3. Образование однородной субмонослойной пленки атомов легкоплавкого компонента со структурой, сходной со структурой подложки (ОЦК), позволяет получить работу выхода системы сплав-кислород-цезий на уровне 1,2 эВ.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образование пленки атомов легкоплавкого компонента на поверхностях сплавов происходит по-разному. Например, на поверхности сплава Nb–Hf реализуется островковый рост пленки гафния. Об этом свидетельствуют наличие в ВАХ эмиссионного тока аномального эффекта Шоттки, а также «седлообразная» форма на «S-образной» кривой в потоке атомов цезия, как это отмечалось в работе [9] и было обнаружено в данном исследовании для недостаточно тренированного сплава Nb–Zr, что подтверждается и наличием заметной интенсивности Оже-спектров углерода при контроле элементного состава поверхности сплава.

В остальных случаях при относительно низких температурах ($T < 1500$ К) наблюдается постоянный рост пленки атомов циркония или гафния на поверхностях сплавов. Однако при более высоких температурах подвижность атомов циркония и гафния увеличивается, эпитаксиальность пленки не сохраняется и, возможно, образуется «лабиринтная» структура пленки с последующим образованием островков, т. е. нарушением «двумерности» пленки циркония или гафния [10].

Из анализа этих данных с точки зрения образования металлических пленок следует, что при слабой связи адсорбированного атома с адсорбатом реализуется послойный рост пленки (механизм Франк-Ван-Мерве). А при сильной связи – островковый рост пленки (механизм Вольмера-Вебера). Причём при промежуточной связи реализуется механизм Странского-Крастанова.

Учитывая тот факт, что тип кристаллической решетки в рассматриваемых системах один и тот же, т. е. у адсорбатов (сплавов) – ОЦК и у адсорбентов (легкоплавкой компоненты сплавов) – гексагональная плотноупакованная, и что температура плавления характеризует энергию

взаимодействия атомов кристаллической решетки, были сопоставлены отношения температур плавления компонентов сплавов и их эмиссионные свойства в системе сплав-кислород-цезий (см. таблицу). В случаях, когда отношение температуры плавления легкоплавкого компонента $T_{\text{л}}$ к температуре плавления тугоплавкого компонента $T_{\text{т}}$ меньше $0,75 = 3/4$, реализуется послойный рост пленки легкоплавкой компоненты по эффекту Киркендалла. Однако целостность (однородность) и эпитаксиальность пленки не сохраняются при более высоких температурах, что подтверждается экспериментами.

В случаях $T_{\text{л}}/T_{\text{т}} > 0,75$ при прогреве сплава в вакууме на его поверхности реализуется островковый рост пленки легкоплавкого компонента, и только при больших концентрациях (10 % (ат.) и более) последнего, возможно, растут островки в виде плоских образований или сферической формы с последующим образованием пленки со структурой, отличающейся от структуры подложки.

Анализ периодической системы элементов показывает, что условие $T_{\text{л}}/T_{\text{т}} \approx 3/4$ выполняется и для систем Mo–Cr, Pd–Cu и др. [6], которые не используются в качестве эмиссионных материалов. Следует отметить, что наличие на поверхности сплава атомов кислорода и углерода может изменить закономерности, которые показаны на примере сплава Mo–Zr [2].

Проведенные теоретические расчеты энергии взаимодействия атомов металлов ОЦК-структуры по методике [11] показали, что отношение энергии взаимодействия поверхностного атома к энергии взаимодействия атома, находящегося в объеме, равно $\sim 3/4$, что энергетически подтверждает вышеизложенный критерий [12].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в случае изготовления сплава из тугоплавкого и легкоплавкого кислородо-активного (~ 3 % (ат.)) металлов с температурами плавления $T_{\text{л}}$ и $T_{\text{т}}$, подобранных так, что $T_{\text{л}}/T_{\text{т}} \approx 3/4$ ($0,75 \pm 0,02$), с последующим нагреванием его в вакууме до стабилизации работы выхода электрона, на поверхности сплава по эффекту Киркендалла образуется однородная субмонослойная пленка из атомов легкоплавкого компонента со структурой, подобной структуре подложки. Окисление в атмосфере кислорода таких систем позволяет получить двумерные окислы на поверхности, а в потоке атомов цезия достичь минимальной работы выхода системы на уровне 1,2 эВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tursunmetov, K. A.** / K. A. Tursunmetov and B. G. Atabayev // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 1994. – Vol. 68. – P. 695.
2. **Sabirov, A. K.** / A. K. Sabirov and K. A. Tursunmetov // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 1994. – Vol. 68. – P. 703.
3. **Карпухин, С. В.** / С. В. Карпухин, А. Ю. Камерцель // Электронная техника. Сер. 1. – 1987. – Вып. 3. – С. 47.
4. **Турсунметов, К. А.** / К. А. Турсунметов // Письма в ЖТФ. – 1992. – № 19. – С. 74.
5. **Турсунметов, К. А.** / К. А. Турсунметов, А. К. Собиров, Ж. Н. Эргашов // АН СССР, Сер. Физ. – 1991. – № 12. – С. 2353.
6. **Турсунметов, К. А.** Влияние эффекта Киркендалла на эмиссионные свойства сплавов / К. А. Турсунметов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 2 (456). – С. 47 – 49.

7. **Davis L. E.** / L. E. Davis et al. // Handbook of Auger Electron Spectroscopy. Eden Prarie. Phys. Electron. Industries, 1976.
8. **Турсунметов, К. А.** / К. А. Турсунметов // ФТТ. – 1994. – № 1. – С. 223 (Turkish Journal of Physica. – № 19969. – P. 1009).
9. **Холов, А.** / А. Холов и др. // Тезисы док. XIX конф. по физической электронике. – Ташкент, ФАН, 1984. – С. 128.
10. **Шредник, В. Н.** Проблемы современной кристаллографии / В. Н. Шредник. – М.: Наука, 1975. – 150 с.
11. **Кашетов, А.** / А. Кашетов, Н. А. Горбатый // Физика твердого тела. – 1969. – № 11. – С. 493.
12. **Турсунметов, К. А.** / К. А. Турсунметов // Узб. физ. журнал. – 1993. – № 6. – С. 62.

*Статья поступила 27 августа 2021 г.,
после переработки 30 сентября 2021 г.*

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

Синхронизированные векторные измерения и их применение. Второе издание / Фадке Арун Г., Тори Джеймс С. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 320 с.

Авторы этой книги стояли у истоков технологии векторных измерений, они вместе со своими коллегами и учениками подготовили обширный массив литературы, посвященной данной технологии и ее применению. Также значительный вклад в эту область внесли другие исследователи по всему миру.

Цель книги – представить заинтересованным читателям связный отчет о развитии технологии и о новых способах применения результатов этих измерений. Книга поможет инженерам энергосистем понять азы организации и работы систем синхронизированных векторных измерений.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53

К ВЫВОДУ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ИЗ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА

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

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

Из законов механики Ньютона путем применения векторного исчисления получены уравнения Максвелла и другие основополагающие формулы электродинамики.

КС: закон Ньютона, уравнения электродинамики

TO THE DERIVATION OF MAXWELL EQUATIONS FROM NEWTON LAWS

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

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

Maxwell equations and other fundamental formulas of electrodynamics were obtained from the laws of Newton's mechanics by applying vector calculus.

Keywords: Newton law, electrodynamics equations

На одном из теоретических семинаров, посвященных расширяющейся Вселенной, трижды Герой Социалистического Труда, академик АН СССР Я. Б. Зельдович, автор крупнейших достижений в теории горения, квантовой, атомной, ядерной физики, теории элементарных частиц и астрофизики, показал, что основные результаты расширения Вселенной можно получить, не прибегая к общей теории относительности Эйнштейна, а только на основе классической механики Ньютона. Участники семинара вспоминают, что, отойдя от доски, на которой были проведены соответствующие выкладки, он помолчал и сказал: «Какая все-таки замечательная наука – классическая механика! Я работал в разных областях физики, но ее люблю больше всего!»

Вопрос о том, с какого раздела физики надо начинать изучение этой области естествознания, стоял перед учеными со времен И. Ньютона, затем с открытием электричества и, особенно остро, с разработки теории относительности. В 1940 г. профессор С. Э. Хайкин издал книгу «Механика», которая вызвала огромный интерес среди студентов и преподавателей университетов страны и потому была переиздана двумя тиражами в 1947 и 1948 г. В последующие годы книга подверглась резкой критике со стороны советских физиков и философов. Автор вынужден был существенно ее переработать и издать в 1962 г. под новым названием «Физические основы механики» (750 с.).

В теме настоящей статьи нас эта уникальная книга привлекла тем, что в этом учебнике по механике была сначала определена сила взаимодействия электрического и магнитного полей с заряженной частицей (сила Лоренца), полученная экспериментальным путем, и только потом – законы механики (законы Ньютона). В реферате отмечается, что «такое построение книги является педагогически целесообразным новшеством», а в предисловии – «естественно было исключить из механики все те вопросы, для решения которых требуется применение каких-либо других законов, например законов электродинамики» [1].

В работе [2] было высказано предположение, что электродинамические уравнения Д. Максвелла могут быть получены из законов механики И. Ньютона. В настоящей статье продолжены исследования в этом направлении.

Рассмотрим движение материальной частицы массой m с зарядом e под действием силы F , вызванной наличием физического поля. Второй закон Ньютона констатирует, что эта сила равна произведению массы частицы на ее ускорение:

$$\vec{F} = -m \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad (1)$$

где $\vec{V}(x, y, z, t)$ – скорость частицы, зависящая от координат и времени.

Полный дифференциал векторной функции $\vec{V} = V_x \cdot i + V_y \cdot j + V_z \cdot k$, согласно [3], равен

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V}, \quad (2)$$

где $\vec{\nabla}$ – векторный оператор частных производных по координатам («набла»), $\vec{\nabla} \vec{V} = \text{div} \vec{V}$. Таким образом,

$$\vec{F} = -m \frac{d\vec{V}}{dt} = -m \cdot \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{div} \vec{V} \right). \quad (3)$$

Для любого вектора имеет место соотношение [3]: $\vec{V} \cdot \text{div} \vec{V} = \text{grad} \left(\frac{1}{2} \cdot V^2 \right) - \vec{V} \times \text{rot} \vec{V}$.

Подставляя это выражение в уравнение (3) и обозначая величину кинетической энергии как $W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$, получаем

$$\vec{F} = e \cdot \left(-\frac{m}{e} \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \frac{1}{e} \cdot \text{grad} W \right) + e \cdot \left(\frac{m}{e} \cdot \vec{V} \times \text{rot} \vec{V} \right). \quad (4)$$

Вводя обозначения для двух составляющих уравнения (4):

$$\vec{E} = -\frac{m}{e} \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \text{grad} \left(\frac{W}{e} \right), \quad (5)$$

$$\vec{B} = \frac{m}{e} \cdot \text{rot} \vec{V}, \quad (6)$$

приходим к выражению для силы Лоренца

$$\vec{F} = e \cdot (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}), \quad (7)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – магнитная индукция.

Найдем два основных оператора (div и rot) для векторных функций (полей) \vec{E} (5) и \vec{B} (6).

Из уравнения (5), с учетом векторного тождества $\text{rot}(\text{grad}(W/e)) = 0$ [3], справедливого для любой скалярной величины, в том числе и для W/e , имеем

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\left(\frac{m}{e}\text{rot}\vec{V}\right)}{\partial t}. \quad (8)$$

Выражение в скобках совпадает с формулой (6), поэтому получаем

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}. \quad (9)$$

Это **первое** уравнение Максвелла [4].

Поскольку для любого вектора [3] $\text{div}(\text{rot}\vec{V}) = 0$, то из соотношения (6) получаем

$$\text{div}\vec{B} = 0. \quad (10)$$

Это **второе** уравнение Максвелла [4].

Для упрощения выкладок введем обозначения скалярной $\varphi = W/e$ и векторной $\vec{A} = (m/e)\vec{V}$ функций, тогда из уравнения (5) имеем

$$\text{div}\vec{E} = -\frac{\partial(\text{div}\vec{A})}{\partial t} - \Delta(\varphi), \quad (11)$$

где Δ – дифференциальный оператор Лапласа (лапласиан).

Добавим и вычтем из правой части уравнения (11) выражение $\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$, где c – скорость света в свободном пространстве, в результате получим

$$\text{div}\vec{E} = -\frac{\partial(\text{div}\vec{A})}{\partial t} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \left\{ \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta\varphi \right\}. \quad (12)$$

Поскольку $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$, то выражение в фигурных скобках в (12) представляет собой функцию от этих же переменных, которую обозначим как $\frac{\rho(x, y, z, t)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$, где $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$ – постоянная величина.

$$\frac{\rho}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = -\Delta\varphi + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Тогда уравнение (12) преобразуется к виду

$$\text{div}\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\text{div}\vec{A} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (14)$$

Полагая выражение в скобках равным нулю:

$$\text{div}\vec{A} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0, \quad (15)$$

получаем

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (16)$$

Это **третье** уравнение Максвелла [4].

Отметим, что уравнение (15) в электродинамике носит название «лоренцевой калибровки» для свободного пространства [4].

Найдем теперь $\operatorname{rot} \vec{B}$. Поскольку $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A}$ [3], то $\operatorname{rot} \vec{B} = \operatorname{rot} \left(\frac{m}{e} \cdot \operatorname{rot} \vec{V} \right) = \operatorname{rot} \left(\operatorname{rot} \frac{m}{e} \vec{V} \right) = \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A}$. Из соотношения (15) $\operatorname{div} \vec{A} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t}$, поэтому приходим к равенству $\operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial(\operatorname{grad} \phi)}{\partial t}$. С учетом (11) формулу (5) запишем в виде $\operatorname{grad} \phi = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{E}$. Тогда

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \left\{ \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \Delta \vec{A} \right\} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (17)$$

Воспользуемся тем же приемом, что и при выводе уравнения (16). Обозначим выражение в фигурных скобках через вектор $\vec{j} / (c^2 \cdot \epsilon_0)$, то есть

$$\Delta \vec{A} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\frac{\vec{j}}{c^2 \cdot \epsilon_0}. \quad (18)$$

Тогда из (17) получим

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\vec{j}}{c^2 \cdot \epsilon_0}. \quad (19)$$

Это **четвертое** уравнение Максвелла [4].

Возьмем дивергенцию от уравнения (18), продифференцируем по времени уравнение (13) и сложим оба уравнения. В результате получим

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left\{ \operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} - \epsilon_0 \cdot c^2 \cdot \left\{ \operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\}.$$

Выражения в фигурных скобках, согласно (15), равны 0, поэтому

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (20)$$

В электродинамике формула (20) называется уравнением сохранения непрерывности заряда [4].

Обратимся еще раз к уравнению (15). В соответствии с (10) имеем

$$m \cdot c^2 \cdot \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\partial W}{\partial t} = 0. \quad (21)$$

Исходя из размерности слагаемых в (21) (V – скорость, м/с; W – кинетическая энергия, Дж; div , м^{-1}), получаем известную формулу для энергии $E_0 = m \cdot c^2$.

Таким образом, из закона движения Ньютона получены: четыре электродинамических уравнения Максвелла, сила Лоренца, уравнение сохранения непрерывности заряда, «лоренцева калибровка» и формула $E_0 = mc^2$. Все эти уравнения и формулы были получены исключительно из концепции сохранения движения и материи М. В. Ломоносова и уравнений динамики И. Ньютона с помощью векторного исчисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хайкин, С. Э.** Физические основы механики / С. Э. Хайкин. – М.: Наука, 1971. – 750 с.
2. **Балыко, А. К.** От уравнений механики – к уравнениям электродинамики / А. К. Балыко, И. А. Балыко / Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 2. – С. 63 – 70.
3. **Лагалли, М.** Векторное исчисление / М. Лагалли; перевод с нем. под ред. А. М. Лопшица. – М.-Л.: Объединенное научно-техн. издательство НКТИ СССР, 1936.
4. **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М.: Наука, 1978.

Статья поступила 18 октября 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Методы и средства радиоэлектронной борьбы: монография / Ю. М. Перунов, А. И. Куприянов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 376 с.

Рассматриваются радиоэлектронные системы и средства, функционирующие в условиях информационного противоборства, а также средства и способы радиоэлектронного подавления информационных каналов радиоэлектронных систем различной структуры и функционального назначения. Приводятся технические решения при построении средств радиоэлектронного противодействия, методы оценки эффективности средств радиоэлектронной борьбы и тенденции развития этих средств.

Для студентов и аспирантов радиотехнических специальностей. Может быть полезно специалистам в области радиоэлектронной борьбы.

ИСТОРИЯ

УДК 9

ЗНАМЕНИТЫЕ УЧЕНЫЕ «ИСТОКА»

А. К. Балыко, И. С. Фельдблюм, Е. В. Терешкин, Т. А. Балыко

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

FAMOUS SCIENTISTS OF «ISTOK»

A. K. Balyko, I. S. Feldblum, E. V. Tereshkin, T. A. Balyko

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

Название статьи выглядит многообещающим, но сразу оговоримся, что рассказать о всех ученых «Истока» в одном номере журнала просто невысказано, поэтому мы будем последовательно публиковать статьи о наших выдающихся ученых, разработчиках, конструкторах, исследователях.

СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КАНТЮК



С. П. Кантюк

С. П. Кантюк родился 14 июня 1929 года в г. Киеве. После окончания средней школы он поступил в Киевский политехнический институт (КПИ), который был одним из лучших вузов в Советском Союзе. КПИ готовил кадры для сравнительно новой отечественной области науки и техники – электроники СВЧ. В 1954 году, защитив дипломную работу, Сергей Кантюк был направлен по распределению во Фрязино на развивающееся мощными темпами предприятие п/я № 17, ныне АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Минимум времени потребовалось С. П. Кантюку, чтобы определить свое место в научной и производственной деятельности отдела 160 – подразделения, где он начал работать. Уже через год на страницах научно-технического сборника «Электроника СВЧ» появились статьи с фамилией молодого специалиста. Он подает заявки на изобретения и получает на них авторские свидетельства. Эти работы отражают результаты, полученные С. П. Кантюком совместно с сотрудниками при создании электровакуумных приборов СВЧ. Руководство отдела с большим вниманием отнеслось к деятельности молодого специалиста. Сначала С. П. Кантюку доверяют ответственные научно-исследовательские работы,

а позднее и руководство серьезными опытно-конструкторскими разработками. Сравнительно быстро он прошёл путь от инженера до начальника лаборатории, которым стал в возрасте 33 лет.

Все работы С. П. Кантюка и возглавляемого им коллектива характеризуются высоким научно-техническим уровнем и оригинальностью инженерных решений. Изобретенные Сергеем Павловичем новые типы приборов – электростатические усилители – дали начало перспективному направлению в электронной технике СВЧ, связанному с созданием, конструированием и изготовлением сверхмалошумящих усилителей СВЧ. Используя особенности электростатических усилителей, он выдвинул целый ряд уникальных конструкторских решений в части защиты входных усилителей от СВЧ-перегрузок. Им предложена конструкция прибора на основе циклотронного резонанса, сочетающего функции СВЧ-генератора, малошумящего и коммутирующего устройства, – потенциалотрона. Практически все приборы, разработанные в лаборатории Сергеем Павловичем, внедрены в производство.

В 1978 году С. П. Кантюк назначается начальником крупного научно-производственного отдела (ныне НПК-8) и с головой уходит в административную работу, демонстрируя высочайшую квалификацию, ответственность в принятии важнейших решений, огромную энергию и силу воли, деловитость и прекрасный контакт с коллективом и руководителями предприятия.

Время его активной научной и производственной деятельности совпало с периодом интенсивного развития СВЧ-радиоэлектроники в нашей стране. Практически во всех радиолокационных и связных системах 1960 – 1980 годов использовались малошумящие лампы бегущей волны (ЛБВ), впервые созданные в отделе 160. Уникальными являлись также электронно-лучевые параметрические и электростатические усилители, которые до настоящего времени применяются в приёмниках РЛС самых современных систем ПВО. Под руководством и при непосредственном участии С. П. Кантюка в НПК-8 успешно решались сложные проблемы создания этих электронных приборов и освоения их в производстве.

Помимо электровакуумных приборов, в НПК-8 под руководством С. П. Кантюка началась разработка полупроводниковых устройств СВЧ: усилителей (малошумящих и сверхширокополосных), смесителей, преобразователей, приемных устройств. Огромную поддержку в этом начинании оказали ему начальники лабораторий Г. В. Ровенский, В. Г. Калина, Р. М. Матафонов, Э. И. Рыжик, Ю. И. Молдованов и другие. Заслугой Сергея Павловича явилось то, что он осуществил плавный и практически безболезненный переход ряда лабораторий от разработок электровакуумных приборов к твердотельным приборам СВЧ.

С. П. Кантюк проработал на «Истоке» 48 лет. Коллектив НПК-8 с уважением и любовью вспоминает своего начальника, мудрого и чуткого руководителя. На протяжении всей жизни Сергей Павлович отличался внимательным и предупредительным отношением к людям, стремлением одобрить, помочь, вселить уверенность. Эти высокие качества присущи истинному интеллигенту, каким и остался в памяти сотрудников Сергей Павлович Кантюк.

В течение многих лет он отдавал свои силы развитию отечественной СВЧ-электроники, обеспечивал становление и развитие коллектива НПК-8, поддерживал и привлекал к работе специалистов, сам участвовал в разработке приборов. С. П. Кантюк был удостоен многих государственных наград. Одно то, что Сергей Павлович одним из немногих на «Истоке» удостоен званий лауреата Ленинской и Государственной премий СССР, говорит о масштабе работ этого человека и ученого. Уникальный организаторский талант, авторитет ученого и разработчика, порядочность, доброе отношение к людям снискали Сергею Павловичу уважение не только истоковцев, но и сотрудников других предприятий.

С. П. Кантюк скоропостижно скончался 7 апреля 2002 года. Похоронен он на Родине, рядом со своими родителями.

Жизнь и деятельность Сергея Павловича Кантюка – пример полнейшей самоотдачи, истинной преданности науке. Он был патриотом великой нашей Родины, дорогого его сердцу «Истока» и города Фрязино. По решению Фрязинской городской пионерской организации в 2002 году именем С. П. Кантюка была названа пионерская дружина Фрязинской средней школы № 4.

Из воспоминаний кандидата технических наук Олега Ивановича Обрезана:

Большинство людей живёт и совершает малозначащие и серьезные поступки, не задумываясь до поры, до времени, к каким последствиям приведут эти поступки, зло или добро они принесут окружающим. На склоне жизни человек задумывается об этом, а у гроба его родные, близкие, друзья, коллеги пытаются вспомнить что-то существенное, что как-то оправдало бы скоротечно прожитые годы, чтобы оставшиеся ещё в живых и те, кто находится в начале жизненного пути, могли испросить Создателя даровать им Мудрость.

С. П. Кантюк – лауреат Ленинской и Государственной премий за работы, которые он выполнял по созданию электровакуумных приборов СВЧ с уникальными параметрами, заложившими базу для научно-технического направления, которое и сейчас является актуальным и успешно развивается его последователями и учениками – Ю. А. Будзинским, С. В. Быковским и др.

Сам Сергей Павлович с первых дней трудовой деятельности начал работать с Героем Социалистического Труда, доктором технических наук, профессором В. А. Афанасьевым. Чтобы стать первым учеником В. А. Афанасьева, были нужны неординарные качества: способность к анализу событий, способность постоянно наращивать знания об изучаемом предмете, трудолюбие, способность к контакту с сотрудниками, коллегами и руководителями (особенно предприятий-заказчиков).

Такие качества у С. П. Кантюка формировались и в школе, и в Киевском политехническом институте (КПИ) и на «Истоке». Сергей Павлович хорошо учился, по крайней мере он экстерном сдал экзамены за 8-й класс и из 7-го перешёл сразу в 9-й класс.

В 1945 – 1947 годах Киев, особенно его центральная улица Крещатик, еще лежал в развалинах, и комсомольцы были брошены на расчистку и уборку развалин, а Сергей Павлович был секретарем комсомольской организации, и мы встречались с ним и на Крещатике, и в Дарнице, где расчищали место для укладки железнодорожных путей. В КПИ проявились в полной мере такие его человеческие свойства, как общительность, отсутствие зазнайства, контактность – то, что впоследствии способствовало его успехам. Мало кто может вообразить, что этот человек во время учёбы в КПИ участвовал в велосипедных гонках под руководством Л. М. Людомирского – организатора первого в истории СССР пробега на велосипедах по южным границам нашей страны.

Светлая память о Сергее Павловиче навсегда сохранится в наших сердцах.

ВЛАДИМИР НИКИТОВИЧ РУСАКОВ*

Владимира Никитовича Русакова можно отнести к третьему инженерному поколению «Истока». Он работал в период, когда отношения традиционной для «Истока» электровакуумной СВЧ-электроники с наступающей полупроводниковой переходили от уровня «кто кого» к мирному взаимодействию и даже взаимообогащению. В этот период, переходный в политике и радиотехнике, перед талантливым человеком открывался широкий творческий простор, на котором свободно могли проявиться как его научные, так и организаторские способности. Все зависело от самого человека, от его отношения к труду, самоотдачи и самодисциплины, от умения впитать богатые традиции «Истока», заложенные корифеями первых поколений.

Володя Русаков родился в июле 1941 года. Жизнь его была тяжелой. Отец погиб в войну: сын его никогда не видел. В школьные годы домашний адрес мальчика был: «Красноярск, школа № 5». Мать работала в школе завхозом, там они и жили. Володя начал трудиться в девятом классе, в той же школе, слесарем-электриком, потом – лаборантом физического кабинета. Рассчитывать приходилось только на себя: на мамины копейки прожить было невозможно.

В 1959 году Русаков поступил в Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) и, конечно, одновременно – на работу, сначала наладчиком-монтажником электровакуумного оборудования на завод п/я 729, а со второго курса – в отдел главного механика ЛЭТИ.

В 1964 году он получает направление на практику в «Исток», оформляется техником, а после окончания института – инженером в отдел 170, и с этого времени идет постоянный труд по самосовершенствованию, учеба у всех, кто может что-то дать, для внутреннего роста и развития.

Он был очень способным учеником и быстро усвоил уроки своего учителя – Ларисы Анатольевны Парышкуро: подчинять интересам дела личные интересы; трудиться, не считаясь со временем; доводить все разработки до практического применения; работать в тесном контакте с заказчиками; максимально использовать передовой опыт решения сложных научно-технологических проблем, в том числе и зарубежный.

Учился он постоянно. Я помню, когда после работы на островных семинарах или в машине по дороге в командировку в Москву или Жуковский возникали литературные споры, он «делал стойку» – замирал, внимательно слушал и записывал что-то в блокнотик. Это были названия произведений, которые он назначал себе прочитать.

В сочетании с основательной вузовской подготовкой природная сметка, стремление доходить в любом деле до конца, до полного понимания сути, критичность, привычка самому все пробовать «на зуб» привели к потрясающим результатам: за короткое время работы в отделе 170 (НПК-17) В. Н. Русаков издал 40 научных трудов, получил 4 авторских свидетельства, создал, как замес-



В. Н. Русаков

*Статья была написана начальником информационного отдела «Истока» И. С. Фельдблюмом в 1992 году и опубликована в «истоковской» газете «За передовую науку».

титель, а потом главный конструктор ряда НИОКР, 16 оригинальных, выше мирового уровня приборов – отражательных и пролетных клистронов малой мощности, можно сказать, «с колес» использовавшихся в различных системах.

Под руководством И. И. Бродуленко Володя в 1977 году защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и создание высокостабильных перестраиваемых генераторов на пролетном клистроне с многоконтурной колебательной системой». Он имел право на эту защиту: к этому времени он стал ведущим специалистом направления задающих генераторов и гетеродинов РЛС на эффекте Допплера. В библиотеке карточка читателей диссертации исписана вдоль и поперек.

Наряду с работами по электровакуумным приборам Володя – в духе времени – начал работать и в области твердотельной электроники – генераторов на ЛПД и широкополосных ГИС СВЧ.

Для Русакова был характерен подход к электронному прибору, так сказать, со стороны радиотехнической системы. Система должна выполнить определенную функцию – значит, дело конструктора-электронщика – определить средство, оптимальное для выполнений данной функции, определить, вакуумный или твердотельный прибор наиболее подходит для решения задачи. Одна из его характерных работ так и называется: «Выбор комплекта приборов СВЧ и их параметров, необходимых для разработки маломощного генераторно-усилительного устройства сантиметрового диапазона длин волн для передающего устройства бортовой аппаратуры».

Очень скоро Русаков стал одним из видных специалистов предприятия по системному подходу к делу, умению находить решение, исходя из интересов целого. Это было от Бога, от таланта, было подкреплено школой Парышкуро и совершенно соответствовало духу времени.

Творческое счастье Русакова состояло в том, что он – по природному дедуктивному способу мышления (от общего к частному) – был как бы предназначен для творчества именно в тот период развития радиоэлектроники, когда начала исчезать, стираться граница между задачей разработки аппаратуры и задачей создания электронных приборов для нее, когда стало развиваться направление комплексированных устройств.

«Комплексированное устройство СВЧ, – пишут С. И. Ребров и С. А. Перегонов в своей статье 1977 года, – представляет собой законченный функциональный блок радиоэлектронной аппаратуры, оптимизация параметров и компоновка которого производится по заданным функциям блока, а не по функциям отдельного элемента».

В конце 70-х годов «Исток» стал настолько мощной научно-производственной организацией с развитой технологической, машиностроительной и измерительной базой, что именно ему было поручено правительством создание уникальных сверхсложных радиотехнических систем, синтезирующих все лучшие достижения электроники того времени. Подчеркну, что речь идет не об отдельных приборах, которые привычно сдаются заказчику из радиотехнического министерства, создающему радиоэлектронную систему, а о самих законченных радиоэлектронных системах. Для «Истока» это была новая задача, и она была успешно решена.

Генеральный директор (он был и главным конструктором новых систем) Сергей Иванович Ребров, естественно, в числе других привлек к решению задачи и Володю Русакова.

Они любили и очень уважали друг друга.

На базе отдела 270 было создано новое – радиотехническое – подразделение, НПК-7, и в июле 1978 года Русаков стал его начальником.

Удивительно, сколько было сделано им на этом посту. Талант его, организаторский и научно-технический, раскрылся здесь полностью. За шесть лет он сумел привлечь лучшие силы «Истока» – радистов, системотехников, электронщиков-конструкторов полупроводниковых приборов,

технологов, программистов, вычислителей; сумел оснастить комплекс современной техникой; завязал тесные связи с десятками предприятий электронной и радиотехнической промышленности.

В короткое время Русаков – заместитель главного конструктора системы – стал известен в стране как крупный организатор и специалист. Он был жаден к работе. С. И. Ребров вспоминает: в 1982 году наступил момент, когда разработку одной из автономных частей аппаратуры пришлось передать из НПК-7 в НПК-1. Русаков очень тяжело переживал эту необходимость, понимая ее и в то же время глубоко сожалея, что не его голова и руки поведут дальше эту часть интереснейшей работы.

В 1986 году системы успешно прошли первые натурные испытания, но Владимиру Никитовичу не суждено было пережить эту радость победы – он умер 14 ноября 1984 года в возрасте 43-х лет, на взлете, на подъеме творческих сил и устремлений.

Для меня Володя раскрылся, когда сказал, что любимая его книга – повесть В. Богомолова «Момент истины» («В августе сорок четвертого») – одно из лучших произведений о войне в советской литературе. Писатель воспеваает профессионализм, терпение, выдержку и холодное мужество и показывает, к каким трагическим последствиям приводит дилетантский подход к делу.

Любимым героем Володи в повести Богомолова был старший лейтенант контрразведки Таманцев – «володав», «чистильщик», «сорохврат». Таманцев с глубоким сарказмом относится к пустым, только мешающим делу хлопотам начальства; он с огромной и, если можно так сказать, врожденной ответственностью за порученное дело выполняет труднейшие задания. Это черты самого Володи.

Рудольф Попов, который считает, что участвовать в турэксспедициях под руководством Русакова дело большой чести, вспоминает, что в одном из турпоходов, когда все спали в палатках на плоту из трех связанных байдарок, дежурный Русаков обнаружил, что байдарки заливаются водой. Еще немного – и все пошло бы ко дну, спеленутые в спальнях мешках. Другой бы на его месте поднял панику. Володя прошелся по палаткам и, отогнув полог, спокойно, хладнокровно, даже ласково, попросил: «Ребятки, вставайте. Тонем».

Коренной сибиряк, Володя очень любил охоту и рыбалку. У него был острый глаз и твердая рука. Приходилось ему ходить на медведя, охотиться на лосей и кабанов, лисиц и зайцев. Я с ним на рыбалке не был, но по рассказам знаю, что у него клевалось, когда другим оставалось только любоваться окружающей природой.

Он умел приготовить икру из свежельвленной рыбы, как никто другой; нежно закоптить леща; его жареная особым способом картошка неизменно вызывала бурный восторг.

Он был уверенным (но не самоуверенным!) в себе человеком. Поставленную цель он накрывал со снайперской точностью и преследовал с железной настойчивостью. Жизненный опыт давал ему все основания для такой уверенности.

Мне, начальнику отдела информации ГНПП «Исток», часто приходится сталкиваться и беседовать с молодыми людьми – новым поколением «Истока». И, признаюсь, часто испытываешь досаду. Не про всех это скажешь, но про многих: какие-то несобранные они, живут только сегодняшним днем, нет у них потребности в совершенствовании, в профессиональном росте, нет стремления сделать деловую карьеру. Работа для них служба, а не служение.

Я всегда вспоминаю в таких случаях Владимира Никитовича Русакова, человека, который ставил перед собой крупные цели и умел их достигать, человека, который был в постоянном внутреннем движении, человека, который сделал себя сам и оставил по себе яркий незабываемый след.

ЛЕВ ВАСИЛЬЕВИЧ ШУБИН



Л. В. Шубин
(28.01.1928 – 12.08.1971)

Лев Васильевич Шубин был главным проектировщиком электронно-оптических систем (ЭОС) электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ на «Источе». Всю свою недолгую жизнь (он ушел из жизни не дожив до 50 лет) он проработал в теоретическом отделе, много лет – начальником лаборатории.

Лаборатория была организована практически с начала существования теоретического отдела, в 1948 году, из группы сотрудников лаборатории 95, занимавшихся моделированием ЭОС с помощью электролитических ванн – детища будущего начальника отдела, доктора технических наук, профессора В. С. Лукошкова, а также разработкой нового оборудования, моделирующего физику работы этих сложных электронных систем.

Интенсивное развитие СВЧ-приборов в послевоенные годы потребовало надежных методов расчета систем формирования электронных пучков. Невозможность аналитического решения большинства практических задач, возникающих при конструировании СВЧ-приборов, и отсут-

ствие в то время быстродействующих ЭВМ определили развитие методов математического моделирования как основного средства для решения инженерных задач электроники СВЧ.

Под руководством В. С. Лукошкова в 1950 году были начаты работы по моделированию пространственного заряда в электронных пучках в специальной электролитической ванне с токовводящими элементами. С помощью немецких специалистов, работавших на «Источе» в те годы, уже велись работы по созданию автомата для построения траекторий движения электронов в ЭВП, так называемого траектографа. Однако в этих работах не учитывалось влияние пространственного заряда на движение электронов, что приводило к существенным ошибкам при моделировании. В 1952 году начальником лаборатории был назначен Л. В. Шубин. Льву Васильевичу тогда всего-то было 28 лет. Несмотря на свою молодость, он буквально преобразил деятельность лаборатории. С его приходом начались систематические работы по теории и методам расчета статистических характеристик электронных ламп с несколькими сетками между катодом и анодом. И главное, что сделал Л. В. Шубин, он настоял на обязательной экспериментальной проверке результатов расчета. Для этого по его требованию в теоретическом отделе были созданы экспериментальные установки и организованы группы сотрудников для работы на них.

Глубокие идеи В. С. Лукошкова о моделировании пространственного заряда в электролитической ванне с помощью придонных токовводящих элементов оказались весьма плодотворными. Уже в 1950 – 1951 годах вступила в действие первая, а затем вторая электролитические ванны, проектированием и отработкой конструкции которых занималась инженер лаборатории Л. В. Шубина Л. А. Шерель, которая затем возглавила группу научных сотрудников, исследовавших уникальные явления в ЭОС ЭВП. Работы этой группы быстро завоевали популярность среди разработчиков ЭВП СВЧ предприятия, а затем получили мировое признание. Другая группа сотрудников занималась разработкой методов инженерного расчета электронных

ламп с сетками и экспериментальной проверкой теории. Эта тематика активно велась до 1957 года и закончилась созданием уникальных справочных материалов по расчету электронных ламп.

Обобщив собственные исследования и подтвердив их большим экспериментальным материалом, полученным вместе с сотрудниками лаборатории, Шубин Л. В. в 1955 году с блеском защитил кандидатскую диссертацию, которая до сегодняшнего дня представляет собой пример многогранной и глубокой научной деятельности ученого».

Однако освоенная к середине 50-х годов методика моделирования ЭОС, учитывающая влияние пространственного заряда, не удовлетворяла начальника лаборатории. Поскольку некоторые операции по моделированию приходилось выполнять вручную, то расчет оптимального варианта расположения системы электродов в ряде случаев длился более месяца. Особенно актуальным стал вопрос об ускорении процесса решения задач формирования электронных пучков большой мощности. В связи с этим был выполнен ряд исследовательских работ по созданию новых автоматизированных траектографов, практически исключаящих ручной труд и позволяющих достаточно быстро решать широкий класс задач электронной оптики. Основная блок-схема была принята такой же, как и в стенде немецких специалистов. Однако в нее были внесены существенные изменения отечественных ученых и изобретателей. Электромеханические интеграторы были заменены на электронные, выполненные на усилителях постоянного тока. Переход к постоянному току, повысивший в итоге надежность и точность работы траектографов, потребовал разработки ряда новых узлов, что и было осуществлено сотрудниками лаборатории.

Первый проект нового автомата был составлен И. М. Блейвасом уже в 1954 году, он стал и главным конструктором ОКР. Окончательная же модель «большого» автомата была разработана и изготовлена в течение 1955 – 1957 гг. Руководство этой разработкой осуществлял Л. В. Шубин. В 1957 – 1959 годах И. М. Блейвасом при активном участии инженеров В. Б. Хомича и Я. И. Местечкина разработана малогабаритная модель автоматического траектографа, которая впоследствии была изготовлена малой серией на опытном заводе и до конца 60-х годов эксплуатировалась в отделениях «Истока», а также на других предприятиях МЭП СССР.

Начиная с середины 50-х годов в лаборатории, кроме оптимального выбора электронных пушек для конкретных ЭВП, проводились работы по исследованию ЭОС в более общем плане. И. М. Блейвасом и Р. А. Хомичем были выполнены исследования в области формирования электронных потоков в приборах магнетронного типа. Л. А. Шерель проводила работы по оптимальному выбору формы электродов для серии электронных пушек, а также по исследованию условий формирования трубчатых электронных потоков. Г. В. Балашова исследовала оптику отражательных клистронов и подбирала форму электродов для серии пушек клистронов, а В. Т. Хмелева исследовала оптику потенциалоскопов с сетками.

В 1957 году лаборатория выпустила первый уникальный альбом ЭОС ЭВП с топологией электростатических полей и электронных траекторий. В 1963 году вышел второй альбом с расширенной тематикой, включающий описание 100 систем различной сложности. Активное участие в их создании принимали: Шерель Л. А., Балашова Г. В., Хмелева В. Т., Полякова Л. Е., Марычева Л. Н., Сенько Л. М., Буланова В. В., Сапрынская (Большева) Л. А., Князева Л. А., Мордовичева М. В., Захарова Р. В., Кайсина В. И. и другие.

В 1959 году под руководством Е. С. Евтифеевой, перешедшей в теоретический отдел из НПК-17, была создана экспериментальная группа, были проведены исследования условий моделирования ЭОС в вакууме и установлены области режимов, где это моделирование возможно.

В начале 60-х годов численность сотрудников лаборатории Л. В. Шубина достигла 60 человек – это была самая многочисленная лаборатория за всю историю теоретического отдела. После защиты И. М. Блейвасом кандидатской диссертации в 1961 году из лаборатории вместе с ним была выделена группа сотрудников, занимавшаяся разработкой вычислительных устройств, и на ее базе организована лаборатория математического моделирования. В лаборатории Л. В. Шубина осталась только электронно-оптическая тематика. Большой объем работ в это время был выполнен группой В. Б. Хомича по исследованию области формирования электронных потоков электро- и магнитоэлектронными периодическими полями. В 1967 году В. Б. Хомич защитил кандидатскую диссертацию. Результатом работы группы В. Б. Хомича стал расчет ЭОС ЭВП СВЧ для высотомера, позволившего осуществить в ноябре 1970 г. мягкую посадку на Луну станции «Луна-17», доставившей туда первый советский луноход.

С начала 1960-х годов началось систематическое освоение и дальнейшее развитие методов синтеза ЭОС. Исследованиями в этой области занимались Л. В. Шубин и Я. И. Местечкин в тесном сотрудничестве с доктором технических наук В. Т. Овчаровым из Москвы. Группой, руководимой Я. И. Местечкиным, была проведена серия работ по экспериментальной проверке методов синтеза ЭОС, которые составили основу кандидатской диссертации Я. И. Местечкина.

С большим успехом велись работы в группе Шерель Л. А. по созданию методов математического моделирования электронных пушек для приборов СВЧ специального назначения (магнетронного типа и на циклотронном резонансе), условий формирования тонкостенных трубчатых пучков и систем коллекторов для них, выбору формы электродов для ЭОС клистронов и ЛОВ О-типа с электростатическим формированием электронного потока. Можно сказать, что для большинства ЭВП СВЧ, выпущенных на предприятии, отработка ЭОС была проведена в лаборатории Л. В. Шубина.

К началу 60-х годов большой скачок сделала электронная цифровая техника. Появилась реальная возможность решения задач статической СВЧ-электроники на цифровых машинах. По инициативе Л. В. Шубина и начальника теоретического отдела доктора технических наук В. П. Сазонова аспиранткой Т. П. Кущевской, выпускницей МГУ им. М. В. Ломоносова и однокурсницей всемирно известного математика академика В. И. Арнольда, были разработаны программы для решения задач формирования электронных потоков в электростатических и магнитных полях с учетом пространственного заряда. Полученные результаты, доложенные на Всесоюзных семинарах по численным методам расчета ЭОС, имели ошеломляющий успех, а созданные ею программы позволили исследовать ЭОС, формирующие разнообразные пучки: плоские, аксиально-симметричные, кольцевые и т. п. Т. П. Кущевская подготовила и успешно защитила кандидатскую диссертацию по численным методам расчета.

Необходимо отметить, что первые ЭВМ М-220 появились на предприятиях в Москве. Для отладки программ и расчетов по ним сотрудникам «Истока» приходилось ездить в столицу. С приобретением предприятием «Исток» ЭВМ типа М-220 и советских супермашин БЭСМ-6 число расчетов выросло в геометрической прогрессии. После безвременной кончины Л. В. Шубина лабораторию возглавил кандидат технических наук И. И. Голеницкий.

Лев Васильевич Шубин прожил недолгую жизнь, из которой четверть века он проработал на «Истоке». Он, несомненно, приумножил славу легендарного «Истока».

АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ АЛЕКСЕЕНКО

15 мая 2021 года исполнилось 90 лет со дня рождения Александра Михайловича Алексеенко – выдающегося ученого, организатора науки и производства в НПП «Исток», главного конструктора уникальных СВЧ-приборов, кандидата технических наук, легендарного КВН-щика, музыканта, автора музыки к Гимну наукограда Фрязино (автор слов Ю. Т. Деркач).

А. М. Алексеенко пришел работать на «Исток» в 1952 году после окончания Горьковского государственного университета. С первых же дней он окунулся в кипучую творческую атмосферу отдела 170. В 1957 году при реорганизации отдела его перевели в лабораторию Нины Михайловны Афанасьевой, основу которой составляли сотрудники, создавшие до этого первую в стране лампу обратной волны (ЛОВ) с магнитной фокусировкой.

В 1964 г. молодой ученый, за два года до того защитивший диссертацию, возглавил ставшую уже родной лабораторию № 1705. Вот тогда-то перед новым начальником и встала дилемма: либо самому продолжать активную научную работу, подготовить и защитить докторскую диссертацию, либо в ущерб карьере ученого все внимание сосредоточить на организации работы вверенной ему лаборатории. Он выбрал последнее и не ошибся.

Почти 35 лет А. М. Алексеенко успешно руководил талантливым творческим коллективом, демонстрируя свои незаурядные организаторские способности. Всю свою неиссякаемую энергию, весь могучий запал души и сердца Александр Михайлович отдал родной лаборатории, не жалел ни времени, ни сил, создавая многочисленные уникальные приборы: первые в мире ЛОВ с электростатической фокусировкой, широкодиапазонные твердотельные СВЧ-генераторы, высокостабильные малошумящие генераторы с быстрой дискретной перестройкой частоты и многие другие. Приборы, созданные под его руководством, обеспечили мягкую посадку космических станций на Луне и многоразового (но, к сожалению, первый и последний раз) космического корабля «Буран» на Земле.

Его огромные заслуги в развитии электровакуумных и твердотельных СВЧ-генераторов, а также устройств на их основе высоко оценены бывшим министерством электронной промышленности, правительством. Цикл работ по твердотельным генераторам номинировался на Государственную премию Российской Федерации.

За создание уникальных приборов для автоматической станции «Луна-16» Александр Михайлович был награжден орденом Трудового Красного Знамени, а за создание приборов для системы «Энергия-Буран» – орденом Октябрьской Революции. Разработанные под его руководством изделия СВЧ по сей день широко используются в самолетах Ту-204 и Ил-96.

Большой вклад Александр Михайлович внес в становление и развитие НПК-17, являющегося одним из лучших комплексов «Истока». Его имя известно и внесено в летопись (и энциклопедию) не только на нашем предприятии и в наукограде. Его знают и уважают ученые и специалисты всех



А. М. Алексеенко

предприятий отрасли. Более того, благодаря активному участию в общественной и культурно-массовой деятельности, как создателя и исполнителя замечательных художественных номеров его знают по всей России, кто может забыть успешное выступление фрязинской команды КВН по телевидению.

А. М. Алексеенко являлся главным конструктором и научным руководителем десятков работ, он автор и соавтор более 30 научно-технических трудов и десятка изобретений. Результаты его работ внедрены на многих предприятиях. Богатый жизненный опыт и знания Александра Михайловича помогли становлению многих молодых специалистов, которые превратились в зрелых разработчиков и умелых руководителей, хотя не все работают теперь на «Истоке». В 1987 году Александр Михайлович оставил должность начальника лаборатории, передав руководство любимому своему ученику – молодому талантливому разработчику Виталию Юрьевичу Мякинкову.

Сотрудники предприятия выражают чувства глубокой признательности и благодарности за счастливые годы совместного самоотверженного труда на благо Родины и настолько же интересного и веселого отдыха с Александром Михайловичем Алексеенко.

А. М. Алексеенко автор многочисленных изобретений, среди которых есть и такие, которые позволили резко продвинуться вперед отечественной технике, разработать новые совершенные электронные приборы СВЧ, по своим параметрам существенно превосходящие зарубежные аналоги. Александр Михайлович рассказывал о судьбе одного из своих изобретений.

50-е годы прошедшего столетия были временем бурного развития авиационной и ракетно-космической техники. Разработки новых летательных аппаратов требовали и соответствующего радиоэлектронного обеспечения, в том числе и в части СВЧ-генераторов малой мощности (до 1 Вт). Доминировавшие тогда отражательные клистроны не обладали широкой электрической перестройкой частоты и не могли применяться в упомянутой аппаратуре. Необходимую перестройку имели только что появившиеся в то время электровакуумные СВЧ-генераторы – лампы обратной волны (ЛОВ). Однако применение ЛОВ в ракетно-космической технике было затруднено, поскольку их масса достигала нескольких килограммов, а объем значительно превосходил допустимый предел.

Причина тому заключалась в необходимости использования для фокусировки электронного потока крупногабаритных и тяжелых магнитных систем в виде соленоидов или постоянных магнитов.

Поэтому легко понять желание отечественных и зарубежных исследователей и разработчиков – обеспечить в ЛОВ безмагнитную фокусировку электронного потока. Предлагались различные варианты периодической электростатической фокусировки (ПЭФ) на спиральных и штыревых замедляющих системах и устройства с центробежной электростатической фокусировкой. Однако получить ЛОВ с безмагнитной фокусировкой, не уступающей по своим электрическим параметрам приборам с магнитными системами, так и не удалось.

Стало ясно, что успех может быть достигнут лишь тогда, когда поток электронов даже при значительных пульсациях не будет покидать область интенсивного электромагнитного поля. Проверив на специальном макете фокусирующие и электродинамические свойства новой системы и убедившись в ее эффективности, мы подали заявку на изобретение и в 1959 г. получили на конструкцию ЛОВ с ПЭФ авторское свидетельство № 217538 (авторы: А. М. Алексеенко, Ю. Д. Самородов, А. С. Тагер, приоритет от 15.04.59 г.). Позднее конструкция была

запатентована в США, Англии, Франции и Италии. Это изобретение и легло в основу дальнейших НИР и ОКР по созданию ЛОВ с ПЭФ на «Истоке», а впоследствии и в СКБ киевского завода «Генератор».

Исследование первых макетов показало, что реализация этого изобретения сопряжена с необходимостью решения сложнейших теоретических и конструктивно-технологических задач. Теоретические работы В. Б. Хомича и И. И. Голеницкого, выполненные в нелинейном приближении с учетом влияния на электронный поток СВЧ-полей, позволили не только определить предельную выходную мощность и КПД ЛОВ с ПЭФ, но и оценить допуски на основные геометрические размеры системы.

Результаты этих работ, а также исследования саратовского профессора Н. И. Синицина подтвердили перспективность использования ПЭФ в ЛОВ с повышенным уровнем выходной мощности и указали пути снижения питающих напряжений до нескольких десятков вольт.

Однако из этих же работ следовало, что для реализации их результатов необходимо было обеспечить высочайшую точность (до 1-2 мкм) изготовления пролетных каналов в замедляющей системе и сохранить эту точность в процессе изготовления прибора и его эксплуатации в условиях жестких механических и температурных воздействий. К счастью, уже в самом начале работ мы располагали электроискровым способом обработки металлов и сплавов непрофилированным электродом (движущейся проволокой), предложенным М. Б. Голантом, Б. И. Ставицким и Ю. А. Шевелевым, который позволял с необходимой точностью осуществить нарезку многоканальной системы типа «встречных пластин». Тем не менее, на пути внедрения этого способа возникли серьезные препятствия.

Одно из этих препятствий состояло в том, что широко используемая в вакуумном приборостроении медь, обладающая наилучшей электро- и теплопроводностью и с этой точки зрения наиболее перспективная в качестве материала замедляющей системы, после нарезки периодической структуры и многочисленных отжигов и паек в процессе изготовления прибора теряла механическую прочность. Сотрудник предприятия В. А. Рождественский буквально за несколько месяцев решил возникшую проблему. Был создан новый материал – кобальтовая бронза, сочетающая в себе все положительные свойства меди и высокую механическую прочность. В последующие годы кобальтовая бронза нашла широкое применение в электровакуумном производстве.

Второе препятствие было вызвано отсутствием необходимого электроискрового оборудования. Нарезка первых замедляющих систем осуществлялась вручную и занимала по времени несколько десятков часов. Необходимо было автоматизировать процесс и резко сократить время нарезки – только тогда можно было говорить о промышленном выпуске ЛОВ с ПЭФ. Решающую роль при решении этой задачи сыграл предложенный нами способ автоматизированного изготовления замедляющих систем (авторы: А. М. Алексеенко, Н. М. Астафьева, Е. Т. Максимов, Б. Л. Морозов).

Созданные под руководством Б. И. Ставицкого на основе этого метода электроискровые станки с программным управлением довели время изготовления периодической структуры до нескольких часов.

Остальные узлы также требовали неординарных решений. Пример тому – катодно-подогревательный узел. Предварительные оценки допускали использование в ЛОВ с ПЭФ экономичных, хорошо освоенных в производстве оксидных катодов. Строгий теоретический анализ, выполненный

А. Б. Киселевым, показал, что эмиссия с катода по сечению канала распределена неравномерно и имеет максимум, превышающий предельно допустимые значения для оксидного катода в 1,5...2 раза. Это обстоятельство побудило ученого разработать высокоэмиссионные металлизированные оксидные катоды, которые впоследствии нашли широкое применение во многих электровакуумных приборах. Но не только катод определяет надежность и долговечность прибора. Важную роль при этом играют степень вакуума в приборе и состав остаточных газов. Разработанная А. Я. Астафьевым специально для ЛОВ с ПЭФ серийная технология ускоренной автоматизированной откатки и тренировки обеспечила высокую стабильность параметров приборов в течение всего срока службы.

Оригинальное решение было найдено при отработке согласования замедляющей системы. Предложенные В. И. Роговым конструкции поглотителей СВЧ-энергии и фильтра питания на основе объемно-поглощающей керамики КТ-30, разработанной В. Н. Батыгиным и А. В. Иноземцевой, сняли проблему возбуждения паразитных колебаний, устранили излучение и позволили достичь высокой линейности частотной характеристики. Важную роль сыграла также предложенная тем же В. И. Роговым конструкция коллектора, позволившая в 2-3 раза повысить КПД приборов.

Успешное решение всего комплекса научно-технических проблем позволило более чем на порядок снизить массу и габариты ЛОВ. В итоге с сотрудниками СКБ киевского завода «Генератор» мы разработали более 20 типов патенточистых СВЧ-генераторов с широким диапазоном электрической перестройки частоты, не имеющих зарубежных аналогов. Практически все созданные приборы были освоены в серийном производстве и поставлялись многочисленным потребителям в необходимых количествах. Основной вклад в создание этих приборов внесли сотрудники «Истока» Н. М. Афанасьева, Е. Т. Максимов, В. М. Долич, Л. А. Амелькина, В. И. Рогов, Р. М. Давыденко, А. А. Зиновьев и киевляне А. И. Руденко, В. Ф. Крицкий, В. С. Балюк и А. И. Матвиенко. Разработанные приборы нашли широкое применение.

Особенно хочется отметить создание системы мягкой посадки автоматических лунных станций «Луна-16», «Луна-17» и т. д., в которой ЛОВ использовалась в качестве задающего генератора радиовысотомера, управляющего тормозными двигателями на заключительном этапе при полете станции к Луне. Сейчас можно признаться, что за несколько суток полета станции «Луна-16» разработчики ЛОВ не сомкнули глаз: тяжесть ответственности за труд тысяч людей была невероятной.

Тем не менее все окончилось замечательно: и доставка лунного грунта, и высадка Лунохода, и все последующие полеты прошли великолепно.

Важную роль сыграли ЛОВ с ПЭФ в различных радиоэлектронных системах военного и гражданского назначения: на самолетах, вертолетах и морских судах. Созданные на их основе панорамные измерительные установки многие годы обеспечивали измерение важнейших параметров СВЧ-приборов. Судьба этого изобретения сложилась на редкость счастливо. Оно стало основой важнейшего научно-технического направления в области СВЧ-электроники, завершившегося созданием оригинальных отечественных приборов, не имеющих зарубежных аналогов. Но этим не ограничивается значение изобретения. Каждый шаг на пути его реализации сопровождался поиском оригинальных решений, в результате чего возникли новые направления в теории СВЧ-приборов, прецизионном станкостроении, в катодной технике, материаловедении и электровакуумном приборостроении.

БОРИС ИВАНОВИЧ СТАВИЦКИЙ

В феврале 2021 года на 94-м году ушел из жизни кандидат технических наук, лауреат Ленинской премии Борис Иванович Ставицкий. Вся его творческая деятельность на «Истоке» была связана с созданием уникального специального технологического оборудования.

НПП «Исток» принадлежит мировой приоритет в создании электроискровых вырезных прецизионных станков, которые начали разрабатываться на предприятии с середины 50-х годов. Б. И. Ставицкий является основателем и руководителем на протяжении многих десятилетий мощного комплекса работ по электроискровым станкам.

К числу выдающихся достижений двадцатого века относится изобретение в 1943 году советскими учеными супругами Лазаренко принципиально нового способа обработки металлов, основанного на использовании электрических разрядов. Идея обработки металлов электроискровым способом полностью захватила Бориса Ставицкого еще в студенческие годы. С первых шагов своей производственной деятельности на «Истоке» он предлагал использовать этот метод для изготовления деталей сложного профиля и в конце концов убедил руководителей поставить сначала НИР, а затем ОКР по этому направлению. Однако особых преимуществ этот способ по сравнению с механической обработкой сначала не давал.

Переломный момент произошел, когда в НПК-17 под руководством профессора М. Б. Голанта начались работы по освоению диапазона миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. В приборах этого диапазона размеры элементов и узлов были настолько малыми, что не поддавались механическому воспроизведению. Разработанный Б. И. Ставицким электроискровой способ обработки металлов движущейся проволокой позволил с необходимой точностью (1...2 мкм) осуществить нарезку многоканальных замедляющих систем для ламп обратной волны (ЛОВ). Целый ряд ЛОВ, созданный кандидатом технических наук А. М. Алексеенко с сотрудниками, стал широко использоваться в качестве задающих генераторов в радио-высотомерах для бортовой аппаратуры различного назначения, в том числе для управления тормозными двигателями на заключительном этапе при подлете станций к Луне. Благодаря этому в свое время была создана система посадки автоматических станций «Луна-16», «Луна-17» и т. д. и наша страна получила приоритет в доставке лунного грунта на Землю и высадке Лунохода.

В течение многих последующих лет Борис Иванович посвящает себя новому научному направлению – электроискровой обработке материалов. В своих работах он указывает на широкие перспективы использования этой обработки при изготовлении многочисленных деталей СВЧ-приборов: сеток клистронов, анодных блоков магнетронов, катодов и анодов клистронов и малошумящих усилителей, электронно-оптических систем индикаторных электронно-лучевых приборов. Предлагает использовать способ при изготовлении сложнопрофильного инструмента для холодного выдавливания деталей. Разрабатывает новые технологические процессы, находит оптимальные режимы обработки, изучает различные материалы, повышающие эффективность



Б. И. Ставицкий

обработки. Вокруг него формируется мощная научная школа, в первых рядах которой стоят известные в стране «истоковские» ученые В. Л. Кравченко, К. К. Гуларян, И. И. Сажин, Е. В. Холднов и другие.

На первом этапе обработка металлов электроискровым способом осуществлялась вручную. По мере расширения областей применения этого способа все более возрастала необходимость в автоматизации процессов обработки. В течение почти десятилетия после появления в 1954 году первых экспериментальных электроискровых установок широкому внедрению этого оборудования мешали в основном две причины: недостаточная производительность процесса и отсутствие систем программного управления. Для решения этих важнейших проблем руководством «Истока» в НПК-6 в 1957 году была создана специализированная лаборатория с производственным участком, которую возглавил Б. И. Ставицкий. Позднее лаборатория была преобразована в большой отдел. Усилиями Бориса Ивановича и его сотрудников первая проблема была решена уже к середине 60-х годов в результате применения специальных тиристорных генераторов двухполярных импульсов. Им также было установлено, что в процессе обработки в качестве межэлектродной среды можно использовать вместо керосина обычную воду и тем самым исключить нежелательные загрязнения поверхностей. Вторая проблема потребовала больших усилий и была решена в начале 70-х годов с появлением мини-ЭВМ, а затем микро-ЭВМ и систем числового программного управления (ЧПУ) на их базе. На протяжении десятилетий во фрязинском филиале МИРЭА студенты выполняли лабораторные работы по созданию программы управления электроискровым станком.

Демонстрация электроискровых станков «Истока» на международных выставках в Брно и Монреале в конце 60-х годов способствовала широкому развитию этого направления во многих странах, а Б. И. Ставицкий становится всемирно известным ученым и признанным авторитетом в области станкостроения. Созданные под руководством Бориса Ивановича электроискровые станки с программным управлением позволили осуществить революционный переворот не только в электроискровой обработке металлов в электронной технике, но и в инструментальном производстве, а «Истоку» занять ведущее место в области прецизионного электроэрозионного станкостроения. В середине 80-х годов был разработан и освоен в серийном производстве вырезной станок А207.86, ставший базовым для целого ряда станков специального назначения.

Работы, начатые Б. И. Ставицким, продолжили его ученики и коллеги. В НПК-6 под руководством П. И. Бойко, Б. М. Рыбачука, В. Г. Даурова, А. С. Мясина, И. В. Кузнецова и других был освоен выпуск станков, в которых начали использоваться персональные компьютеры. Обработка металлов и создание уникальных инструментов долгое время были немислимы без электроискровых станков с ЧПУ. В советское время в стране насчитывалось около сотни различных типов электроискровых станков. Только машиностроительным цехом НПК-6 было выпущено более 2500 единиц оборудования. Ими были оснащены практически все подразделения «Истока». Разработанное и созданное на «Истоке» оборудование широко использовалось в стране и выпускалось на заводах Ленинграда, Волгограда, Смоленска, Саратова, Ульяновска, Луганска и других городах страны.

Сотрудники «Истока» с болью восприняли уход из жизни Бориса Ивановича Ставицкого. Память о выдающемся отечественном ученом, разработчике, изобретателе навсегда останется в наших сердцах.

ИГОРЬ ПАВЛОВИЧ СТАРОДУБОВ

И. П. Стародубов – видный ученый и организатор, главный технолог «Истока», лауреат Государственной премии СССР, кандидат технических наук, на протяжении многих лет успешно работавший в одной из самых трудоемких областей СВЧ-приборостроения – технологии.

И. П. Стародубов родился 10 декабря 1930 года в г. Куйбышеве. После окончания Горьковского государственного университета в 1954 году он был распределен на бурно развивающееся предприятие в г. Фрязино, на котором проработал более 40 лет, пройдя путь от инженера-технолога до начальника технологического отдела и главного технолога предприятия.

Уже в 1956 году Игорь Павлович был переведен во вновь образованный катодный отдел, где молодому специалисту практически сразу доверили решать весьма важную и актуальную проблему, связанную с разработкой и измерением параметров магнетронных катодов. Позднее под руководством И. П. Стародубова впервые был создан новый класс металлосплавных термо- и вторично-эмиссионных катодов, не имеющих аналогов за рубежом, и технология их изготовления, основанная на порошковой металлургии. За крупные достижения в области катодной техники группа «истоковских» ученых, в том числе и И. П. Стародубов, была удостоена Государственной премии СССР.

В 1968 году после успешной защиты кандидатской диссертации Игорь Павлович принимает руководство крупным технологическим отделом 180. В короткие сроки ему удалось сделать отдел носителем передовых идей химической технологии. Он более широко взглянул на место химии в отрасли. Химическая технология получила новые области приложения.

Последующие работы И. П. Стародубова в большей части были связаны с применением в электронике СВЧ методов электрохимии. В 60-е годы новые проблемы перед электрохимиками встали в связи с широким применением в технологии изделий электронной техники титана и алюминия. Появилась необходимость в простой и надежной технологии нанесения на эти и другие металлы гальванопокрытий из электролитических сплавов, которые отличаются особыми свойствами, не достигаемыми при нанесении покрытий из чистых металлов. И. П. Стародубов дал физическое объяснение некоторым видам электронной эмиссии сплавов и предложил новый технологический способ получения покрытий и припоев из эмиссионных сплавов. Для эффективной реализации этих технологий под его руководством были созданы уникальные полуавтоматические установки для локального нанесения гальванопокрытий, для химического никелирования и другие. Одной из важных черт Игоря Павловича было то, что он всегда стремился создать такие условия работы сотрудников в технологических процессах, при которых их контакт с химически активными веществами был бы минимальным.

Другой привлекательной чертой И. П. Стародубова являлось стремление к новому, желание исследовать и внедрить такие технологические методы, которые никто в мире еще не применял. При нем новые технологические возможности по защите СВЧ-изделий открыли тонкопленочные покрытия на основе теплопроводящих полимеров, получаемые методом осаждения из газовой



И. П. Стародубов

фазы в вакууме. Достижения «Истока» в области полимерных материалов внедрены на всех предприятиях отрасли.

И. П. Стародубовым с сотрудниками впервые были внедрены технология изготовления деталей методом фотофрезерования и технология очистки мелких деталей и узлов на малогабаритной полуавтоматической линии с программным управлением.

В 1982 году, в поворотный период деятельности «Истока», связанный с разработкой уникального изделия, Игоря Павловича назначают главным технологом предприятия. Огромная ответственная работа по передаче технологической документации по этому изделию на радиотехническое предприятие легла на плечи И. П. Стародубова. Кроме того, примерно в это же время «Исток» начинает усиленно развивать твердотельное направление электроники СВЧ. Разработка СВЧ твердотельных изделий поставила новые задачи: создание гибридной интегральной технологии, сборки модулей и обеспечение их надежности в процессе эксплуатации. Под руководством Игоря Павловича была создана унифицированная технология и выпущен отраслевой стандарт по микрополосковым платам для ГИС СВЧ.

В должности главного технолога И. П. Стародубов большое внимание уделяет организации структуры и расширению функций всех технологических служб предприятия, внедрению компьютерной техники и программных средств при создании конструкторской и технологической документации, координации деятельности главных технологов предприятий подотрасли и многим другим проблемам.

Пытливость, настойчивость, разносторонность знаний И. П. Стародубова были хорошо известны на предприятии. Игорь Павлович не только сам активно работал на научном поприще – он автор 25 статей, 7 изобретений, 10 отчетов, но и активно помогал молодым сотрудникам найти свой путь в науке. На протяжении 15 лет он был бессменным членом диссертационного совета.

За заслуги перед отечественной электроникой И. П. Стародубов был награжден орденом «Знак Почета», юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», знаком «Почетный работник электронной промышленности».

Высокие человеческие качества: доброжелательность, надежность, простота в общении, развитое чувство ответственности за порученное дело – привлекали к нему людей. Он пользовался огромным уважением и авторитетом среди сотрудников «Истока» и за пределами предприятия.

И. П. Стародубов ушел из жизни в 2006 году. У него было много настоящих друзей, с которыми Стародубовы дружили семьями. Много сил придавали ему общение с природой, любовь к животным, интерес к книгам, искусству. Многими своими знаниями он делился с людьми – иначе жить он просто не умел. Таким остается в нашей памяти замечательный человек и ученый Игорь Павлович Стародубов.

Статья поступила 8 ноября 2021 г.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ
статей, опубликованных в течение 2021 г. в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника»

I. История

1. *Балыко А.К., Балыко Т.А.* – Вместе с «Истоком». – Вып. 1 (548). – С. 66 – 81.
2. *Балыко А.К., Балыко Т.А.* – Наши доктора наук. – Вып. 3 (550). – С. 71 – 88.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Все мы вышли из теоретического отдела. – Вып. 2 (549). – С. 94 – 113.
4. *Балыко А.К., Фельдблюм И.С., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Знаменитые ученые «Истока». – Вып. 4 (551). – С. 80 – 96.

II. Катоды и материалы

1. *Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В., Москаленко С.О.* – Применение спектроскопии потенциалов появления при исследовании материалов для катодов СВЧ-приборов. – Вып. 1 (548). – С. 34 – 44.
2. *Турсунметов К.А.* – Эффект Киркендалла и закон «3/4». – Вып. 4 (551). – С. 67 – 74.
3. *Хабачев М.Н., Макаров А.П., Дровненкова Г.В., Жуков Р.А., Ермаков А.В., Дубинина О.В., Белоконь Е.А.* – Промышленная технология производства бариевых катодных сплавов на основе платины и палладия для мощных СВЧ-приборов. – Вып. 4 (551). – С. 49 – 66.

III. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – К выводу уравнений Максвелла из законов Ньютона. – Вып. 4 (551). – С. 75 – 79.
2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – «Непростые» простые числа. – Вып. 1 (548). – С. 53 – 59.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Свойства периодических дробей. Часть 2. – Вып. 3 (550). – С. 54 – 59.
4. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Спиричев И.И.* – Движение отрицательно заряженной частицы между двумя положительными зарядами. – Вып. 2 (549). – С. 87 – 93.
5. *Попов И.П.* – Об излучательной способности зарядов. – Вып. 3 (550). – С. 49 – 53.

IV. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д.* – Особенности реакции клеток крови на микроволновое излучение. – Вып. 3 (550). – С. 42 – 48.
2. *Казаринов К.Д., Полников И.Г.* – Микроволновое излучение способно стимулировать движение внутриклеточной жидкости. – Вып. 1 (548). – С. 45 – 52.

V. Наши юбиляры

1. *Потапов А.В.* – К 80-летию Сергея Алексеевича Зайцева. – Вып. 4 (551). – С. 6 – 10.
2. *Стебунов В.П.* – К 90-летию Вадима Алексеевича Парилова. – Вып. 4 (551). – С. 11 – 15.

VI. Радиоэлектронные устройства

1. Демшиевский В.В., Богачев И.А., Сидоренко С.С., Кучмий А.Д. – Экспериментальное измерение антенной решетки на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи. – Вып. 4 (551). – С. 43 – 48.

2. Демшиевский В.В., Богачев И.А., Сидоренко С.С., Кучмий А.Д., Ушанова С.Е., Мигалин М.М. – Антенная решетка на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи, функционирующих в диапазоне частот 18...42 ГГц. – Вып. 4 (551). – С. 35 – 42.

3. Карасев М.С. – Оперативный контроль электрических параметров приемопередающих модулей X-диапазона частот. – Вып. 3 (550). – С. 6 – 14.

VII. Твердотельная электроника

1. Билевич Д.В. – Обзор цифровых драйверов управления СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе GaAs-технологии. – Вып. 3 (550). – С. 26 – 41.

2. Богданов С.А. – Нелинейные искажения усилителей на основе полевых транзисторов с различными концентрационными профилями. – Вып. 2 (549). – С. 6 – 18.

3. Богданов С.А., Борисов А.А., Карпов С.Н., Клочкова Д.Э., Мартынов Я.Б., Паиковский А.Б., Терёшкин Е.В. – Всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия. – Вып. 4 (551). – С. 16 – 24.

4. Богданов С.А., Карпов С.Н., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Паиковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В., Щербачков С.В., Бакаров А.К., Журавлев К.С. – DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн. – Вып. 2 (549). – С. 19 – 31.

5. Гамквелидзе С.А., Гнатюк Д.Л., Зенченко Н.В., Зувев А.В., Мальцев П.П., Матвиенко О.С., Михалев А.О., Павлов А.Ю. – Монолитные интегральные схемы на HEMT GaN для СВЧ-модуля с выходной мощностью 2,5 Вт и усилением 30 дБм в X-диапазоне. – Вып. 4 (551). – С. 25 – 34.

6. Демшиевский В.В., Паиков А.Н., Семенов А.С., Алексеев А.А., Налогин А.Г., Троицкая Л.А., Воробьев Д.А., Пирожкова Е.С., Цыберт А.В. – Ферритовый вентиль на основе интегрированного в подложку волновода для устройств, работающих в Ka-диапазоне частот. – Вып. 2 (549). – С. 38 – 45.

7. Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В., Мартынова Н.А., Трофимов А.А. – Гибридно-монолитные схемы усилителей с выходной мощностью 10 и 20 Вт в X-диапазоне. – Вып. 2 (549). – С. 32 – 37.

VIII. Технология и материаловедение

1. Вяхирев В.Б. – Применение измерителя-анализатора Л2-109 для измерения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников. – Вып. 2 (549). – С. 53 – 60.

2. Жабин Г.А., Будзинский Ю.А., Лябин Н.А., Скупневский Е.В., Архипов Д.Ю., Долгих К.О., Федотов В.В. – Сравнительные характеристики термоэмиссионных катодов, изготовленных с применением наносекундного лазера на парах меди и фемтосекундного волоконного лазера. – Вып. 2 (549). – С. 61 – 66.

3. Лукашин В.М. – Особенности формирования омических контактов в DA-DpHEMT. – Вып. 3 (550). – С. 15 – 25.

4. Парменов А.А., Дозорова Д.С., Вашин С.А., Смирнов В.А., Паиков А.Н., Белоконь Е.А. – Исследование состава гальванического покрытия М6Ср15, применяемого в процессе пайки антенных устройств. – Вып. 2 (549). – С. 46 – 52.

5. *Смирнов В.А., Потапов Ю.А., Коннов А.В.* – 55 лет плазменной технологии эффективных термокатодов для мощных СВЧ-приборов. – Вып. 2 (549). – С. 67 – 79.

IX. Экономика

1. *Вершинин А.А., Киричек М.О.* – Современное состояние и экспортная активность предприятий отечественного машиностроения. – Вып. 3 (550). – С. 60 – 65.

2. *Мамонтова Е.В.* – Система управления отходами на промышленном предприятии. – Вып. 1 (548). – С. 60 – 65.

3. *Шутов Д.Г.* – Внутрихолдинговый баланс «затраты – выпуск» для предприятий радиоэлектронного комплекса. – Вып. 3 (550). – С. 66 – 70.

X. Электровакуумные приборы

1. *Иванов А.А., Розенталь Р.М., Вилков М.Н., Гинзбург Н.С.* – Генерация широкополосного шумоподобного излучения с малой неравномерностью спектра на основе спиральной ЛБВО с запаздывающей обратной связью. – Вып. 2 (549). – С. 80 – 86.

2. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А.* – Циклотронное защитное устройство. Построение 3D-резонатора секции ЦЗУ, двухзвенной фильтрующей системы с заданной полосой частот. – Вып. 1 (548). – С. 6 – 19.

3. *Медведков И.П., Роговин В.И., Семенов С.О.* – Математическое моделирование распространения шумовых сигналов в лампах бегущей волны методом крупных частиц. – Вып. 1 (548). – С. 20 – 33.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2021 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.

- Алексеев А.А. VII.6
Архипов Д.Ю. VIII.2
Бакаров А.К. VII.4
Балыко А.К. I.1 – 4; III.1 – 4
Балыко И.А. III.1 – 4
Балыко Т.А. I.1 – 4
Белоконь Е.А. II.3; VIII.4
Билевич Д.В. VII.1
Богачев И.А. VI.1, 2
Богданов С.А. VII.2 – 4
Борисов А.А. VII.3
Будзинский Ю.А. VIII.2; X.2
Вашин С.А. VIII.4
Вершинин А.А. IX.1
Вилков М.Н. X.1
Воробьев Д.А. VII.6
Вяхирев В.Б. VIII.1
Гамкрелидзе С.А. VII.5
Гинзбург Н.С. X.1
Гнатюк Д.Л. VII.5
Демшиевский В.В. VI.1, 2; VII.6
Дозорова Д.С. VIII.4
Долгих К.О. VIII.2
Дровненкова Г.В. II.3
Дубинина О.В. II.3
Дудинов К.В. VII.7
Ермаков А.В. II.3
Ефимов А.С. VII.7
Жабин Г.А. VIII.2
Жуков Р.А. II.3
Журавлев К.С. VII.4
Зенченко Н.В. VII.5
Зуев А.В. VII.5
Иванов А.А. X.1
Казаринов К.Д. IV.1, 2
Калина В.Г. X.2
Капустин В.И. II.1
Карасев М.С. VI.3
Карпов Н.С. VII.3, 4
Киричек М.О. IX.1
Клочкова Д.Э. VII.3
Коннов А.В. VIII.5
Кучмий А.Д. VI.1, 2
Латин В.Г. VII.4
Ли И.П. II.1
Лукашин В.М. VII.4; VIII.3
Лябин Н.А. VIII.2
Макаров А.П. II.3
Мальцев П.П. VII.5
Мамонтова Е.В. IX.2
Мартынов Я.Б. VII.3
Мартынова Н.А. VII.7
Матвиенко О.С. VII.5
Медведков И.П. X.3
Мигалин М.М. VI.2
Михалев А.О. VII.5
Москаленко С.О. II.1
Налогин А.Г. VII.6
Павлов А.Ю. VII.5
Парменов А.А. VIII.4
Пашков А.Н. VII.6; VIII.4
Пашковский А.Б. VII.3, 4
Пирожкова Е.С. VII.6
Полников И.Г. IV.2
Попов И.П. III.5
Потапов А.В. V.1
Потапов Ю.А. VIII.5
Рогачёв И.А. VII.4

Роговин В.И. X.3
Розенталь Р.М. X.1
Семенов А.С. VII.6
Семенов С.О. X.3
Сидоренко С.С. VI.1, 2
Скупневский Е.В. VIII.2
Смирнов В.А. VIII.4, 5
Спиричев И.И. III.4
Стебунов В.П. V.2
Темнов А.М. VII.7
Терешкин Е.В. I.3, 4; III.1 – 4; VII.3, 4
Троицкая Л.А. VII.6
Трофимов А.А. VII.7
Турсунметов К.А. II.2
Ушанова С.Е. VI.2
Федотов В.В. VIII.2
Фельдблюм И.С. I.4
Хабачев М.Н. II.3
Цыберт А.В. VII.6
Шуманов А.В. II.1
Шутов Д.Г. IX.3
Щербаков С.В. VII.4

**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 опубликования (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 2022 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 2022 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.

Переводчик Барабанова Л.В.

Компьютерная верстка Земскова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.12.2021 г.

Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.

г. Фрязино

Усл. п. л. 12,5

Уч.-изд. л. 13,0

Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}

Тираж 500

10 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

Подписной индекс 36292



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2021, вып. 4(551), с. 102