



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (549)

2021

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(549)

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. **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;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

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

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

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(549)

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. **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 «Salub», Nizhny Novgorod;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

<i>Богданов С.А.</i> – Нелинейные искажения усилителей на основе полевых транзисторов с различными концентрационными профилями.....	6
<i>Богданов С.А., Карпов С.Н., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В., Щербаков С.В., Бакаров А.К., Журавлев К.С.</i> – DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн.....	19
<i>Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В., Мартынова Н.А., Трофимов А.А.</i> – Гибридно-монокристаллические схемы усилителей с выходной мощностью 10 и 20 Вт в X-диапазоне.....	32
<i>Демшиевский В.В., Пашков А.Н., Семенов А.С., Алексеев А.А., Налогин А.Г., Троицкая Л.А., Воробьев Д.А., Пирожкова Е.С., Цыберт А.В.</i> – Ферритовый вентиль на основе интегрированного в подложку волновода для устройств, работающих в Ka-диапазоне частот.....	38

Технология и материаловедение

<i>Парменов А.А., Дозорова Д.С., Вашин С.А., Смирнов В.А., Пашков А.Н., Белоконов Е.А.</i> – Исследование состава гальванического покрытия М6Ср15, применяемого в процессе пайки антенных устройств.....	46
<i>Вяхирев В.Б.</i> – Применение измерителя-анализатора Л2-109 для измерения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников.....	53
<i>Жабин Г.А., Будзинский Ю.А., Лябин Н.А., Скупневский Е.В., Архипов Д.Ю., Долгих К.О., Федотов В.В.</i> – Сравнительные характеристики термоэмиссионных катодов, изготовленных с применением наносекундного лазера на парах меди и фемтосекундного волоконного лазера.....	61
<i>Смирнов В.А., Потапов Ю.А., Коннов А.В.</i> – 55 лет плазменной технологии эффективных термокатодов для мощных СВЧ-приборов.....	67

Электрорадиотехнические приборы

<i>Иванов А.А., Розенталь Р.М., Вилков М.Н., Гинзбург Н.С.</i> – Генерация широкополосного шумоподобного излучения с малой неравномерностью спектра на основе спиральной ЛБВО с запаздывающей обратной связью.....	80
--	----

Краткие сообщения

<i>Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Спиричев И.И.</i> – Движение отрицательно заряженной частицы между двумя положительными зарядами.....	87
---	----

История

<i>Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.</i> – Все мы вышли из теоретического отдела.....	94
---	----

CONTENTS

Solid-state electronics

<i>Bogdanov S.A.</i> – Nonlinear distortions of amplifiers based on field effect transistors with different concentration profiles.....	6
<i>Bogdanov S.A., Karpov S.N., Lapin V.G., Lukashin V.M., Pashkovskii A.B., Rogachev I.A., Tereshkin E.V., Shcherbakov S.V., Bakarov A.K., Zhuravlev K.S.</i> – Millimeter-wave DA-DpHEMT.....	19
<i>Efimov A.S., Temnov A.M., Dudinov K.V., Martynova N.A., Trofimov A.A.</i> – A 10 and 20 W X-band power amplifier quasi-MMICs.....	32
<i>Demshevsky V.V., Pashkov A.N., Semenov A.S., Alexeev A.A., Nalogin A.G., Troitskaya L.A., Vorobyev D.A., Piroshkova E.S., Tsybert A.V.</i> – Ferrite isolator based on substrate integrated waveguide for devices, functioning in Ka-frequency range.....	38

Technology and material science

<i>Parmenov A.A., Dozorova D.S., Vashin S.A., Smirnov V.A., Pashkov A.N., Belokon' E.A.</i> – The study of the M6Cp15 composition galvanic coating used in the process of soldering antenna devices..	46
<i>Vyakhirev V.B.</i> – The use of J12-109 analyzer-meter for measuring the thermal resistance of microwave one port networks.....	53
<i>Zhabin G.A., Budzinsky Yu.A., Lyabin N.A., Skupnevsky E.V., Arkhipov D.Yu., Dolgih K.O., Fedotov V.V.</i> – Comparative characteristics of thermionic cathodes manufactured using a nanosecond copper vapor laser and a femtosecond fiber laser.....	61
<i>Smirnov V.A., Potapov Yu.A., Konnov A.V.</i> – 55 years of plasma technology of the efficient thermocathodes for high-power microwave devices.....	67

Electrovacuum devices

<i>Ivanov A.A., Rosental' R.M., Vilkov M.N., Ginzburg N.S.</i> – Generation of broadband noise-like radiation with a low spectrum irregularity based on helix TWTO with delayed feedback.....	80
---	----

News in brief

<i>Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A., Spirichev I.I.</i> – The motion of a negatively charged particle between two positive charges.....	87
---	----

History

<i>Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.</i> – We all come from the theoretical department.....	94
--	----

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.375.4

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМИ ПРОФИЛЯМИ

С. А. Богданов

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

Проведено теоретическое исследование нелинейных искажений в однокаскадных усилителях на основе полевых транзисторов (ПТ) с различными профилями легирования подзатворной области. Рассмотрено влияние передаточной характеристики ПТ на амплитуды интермодуляционных составляющих 3-го и 5-го порядков, амплитудные характеристики первых пяти гармоник, коэффициент нелинейных искажений, а также эффективный коэффициент усиления. С учетом ряда приближений показано, что ступенчатый профиль легирования обеспечивает повышенную линейность передаточной характеристики ПТ, что позволяет снизить уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка в каскадах усиления с общим истоком на величину около 30 дБ, существенно увеличивая их динамический диапазон. Кроме того, в ряде приложений это эквивалентно возможности повышения мощности усилителя в 15 раз.

КС: полевой транзистор, профиль легирования, линейность, передаточная характеристика, линеаризация, нелинейные искажения, гармоники, интермодуляция, усилитель, динамический диапазон

NONLINEAR DISTORTIONS OF AMPLIFIERS BASED ON FIELD EFFECT TRANSISTORS WITH DIFFERENT CONCENTRATION PROFILES

S. A. Bogdanov

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

A theoretical study of nonlinear distortions in single-stage amplifiers based on field-effect transistors (FETs) with different doping profiles of the under-the-gate area has been carried out. The influence of the FET transfer characteristic on the amplitudes of intermodulation components of the third and fifth orders, the amplitude characteristics of the first five harmonics, the coefficient of nonlinear distortions and the effective gain is considered. Taking into account a number of approximations it is shown that the stepped doping profile provides the increased linearity of the FET transfer characteristic which makes it possible to reduce the level of the third order intermodulation distortions in amplification stages with a common source by about 30 dB, significantly increasing their dynamic range. In addition, in a number of applications, this is equivalent to a 15-fold increase in amplifier power.

Keywords: field-effect transistor, doping profile, linearity, transfer characteristic, linearization, nonlinear distortions, harmonics, intermodulation, amplifier, dynamic range

1. ВВЕДЕНИЕ

При работе широкополосных приемных устройств в условиях сложной помеховой обстановки достоверность приема полезного сигнала во многом определяется их динамическим диапазоном.

В таких условиях приема от каждого элемента приемного тракта требуется очень хорошая линейность характеристик и низкий уровень вносимых фазовых шумов. Таким образом, помимо снижения шумовых свойств приемника актуальной задачей является повышение линейности приемного тракта.

При формировании и усилении полезного сигнала усилители мощности (УМ) служат причиной множества внутри- и внеполосных помех, которые искажают сигнал. Известно, что при подаче на вход нелинейного устройства, например транзисторного УМ, многотонального сигнала наряду с гармониками возникают продукты преобразования на комбинационных частотах. Такие составляющие называют интермодуляционными искажениями (ИМИ). ИМИ 3-го порядка ($IM3$) и ИМИ 5-го порядка ($IM5$), попадая в полосу пропускания УМ СВЧ, могут существенно ограничивать его динамический диапазон (ДД). ИМИ необходимо минимизировать.

Для уменьшения искажений, вносимых УМ, применяют различные методы, например линеаризуют его передаточную характеристику. С этой целью разрабатываются специальные звенья линеаризации, выбираются типы и классы работы активного элемента, его схема включения, реализуется выходная система фильтрации высших гармоник [1]. Широко применяются схемотехнические методы уменьшения нелинейных искажений, основанные на выделении и последующем вычитании ИМИ из усиленного сигнала, а также использующие предварительное искажение входного сигнала. Методы на основе предварительных искажений могут обеспечивать подавление $IM3$ на 10 дБ, использование однократного процесса на основе метода упреждения обычно может обеспечивать подавление $IM3$ на 20 дБ и более [2, 3]. Очевидно, что использование схемотехнических методов линеаризации приводит к повышению сложности и стоимости изделий, снижает их надежность.

Повысить линейность УМ можно также, проектируя их на основе транзисторов с повышенной линейностью передаточной характеристики. Публикации по линейным транзисторам и усилителям на их основе имели место в зарубежной печати [4–14]. В последние годы количество публикаций в этом направлении существенно сократилось, но, судя по техническим характеристикам промышленных УМ СВЧ ведущих зарубежных производителей, работы перешли в практическую плоскость и дали результат. У нас в стране основной научно-технический задел в этой области был получен в АО «НПП «Исток» им. Шокина» [15–22]. Разработан и изготовлен гомоструктурный (FET) GaAs-транзистор с линейной передаточной характеристикой. В ряде работ показано, что, несмотря на меньший коэффициент усиления, линейные GaAs FET позволили снизить уровень фазовых шумов усилителей и автогенераторов примерно на 10...15 дБ при собственных низкочастотных шумах, существенно превосходящих шумы обычного транзистора. Анализ результатов теоретических исследований указывает на возможность дополнительного снижения фазовых шумов автогенераторов на основе линейных GaAs FET на величину порядка 10 дБ при величине отстройки 10 кГц за счет уменьшения количества скрытых дефектов в структуре полевого транзистора (ПТ), что позволит таким автогенераторам выйти на уровень приборов на биполярных транзисторах [19]. Однако недостаточно исследованными остаются вопросы влияния на нелинейные параметры УМ СВЧ активных элементов, электрофизические свойства которых можно целенаправленно задавать на этапе их формирования.

Целью работы является теоретическое исследование нелинейных искажений каскадов усиления на основе ПТ с различными концентрационными профилями.

2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Нелинейное поведение усилителя описывается такими параметрами, как коэффициент нелинейных искажений, коэффициенты гармоник, точка 1-дБ компрессии, коэффициенты интермодуляционных искажений и др.

Существует множество способов математического описания нелинейных систем. Один из них – представление нелинейной характеристики устройства в виде полиномиальной функции.

Аналитическая оценка параметров и характеристик, описывающих нелинейные искажения, для усилителя с передаточной характеристикой $U_{out}(t) = f(U_{in}(t))$ осуществляется путем ее разложения в ряд Тейлора в рабочей точке U_A :

$$U_{out} = f(U_{in}) = f(U_A + u_g) = f(U_A) + \left. \frac{df}{dU_{in}} \right|_A u_g + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 f}{dU_{in}^2} \right|_A u_g^2 + \frac{1}{6} \left. \frac{d^3 f}{dU_{in}^3} \right|_A u_g^3 + \frac{1}{24} \left. \frac{d^4 f}{dU_{in}^4} \right|_A u_g^4 + \dots + \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n f}{dU_{in}^n} \right|_A u_g^n,$$

что для малосигнальных переменных принимает вид

$$u_{out} = a_1 u_g + a_2 u_g^2 + a_3 u_g^3 + \dots + a_n u_g^n, \quad (1)$$

где $a_n = \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n f}{dU_{in}^n} \right|_A$ – коэффициенты ряда Тейлора.

При усилении гармонического входного сигнала $u_g \cos(\omega t)$ из выражения (1) получим

$$\begin{aligned} u_{out} = \sum_{n=1 \dots \infty} a_n u_g^n \cos^n(\omega t) = & \left(\frac{a_2 u_g^2}{2} + \frac{3a_4 u_g^4}{8} + \frac{5a_6 u_g^6}{16} + \dots \right) + \\ & + \left(a_1 + \frac{3a_3 u_g^2}{4} + \frac{5a_5 u_g^4}{8} + \frac{35a_7 u_g^6}{64} + \dots \right) u_g \cos \omega t + \\ & + \left(\frac{a_2}{2} + \frac{a_4 u_g^2}{2} + \frac{15a_6 u_g^4}{32} + \dots \right) u_g^2 \cos 2\omega t + \\ & + \left(\frac{a_3}{4} + \frac{5a_5 u_g^2}{16} + \frac{21a_7 u_g^4}{64} + \dots \right) u_g^3 \cos 3\omega t + \\ & + \left(\frac{a_4}{8} + \frac{3a_6 u_g^2}{16} + \dots \right) u_g^4 \cos 4\omega t + \left(\frac{a_5}{16} + \frac{7a_7 u_g^2}{64} + \dots \right) u_g^5 \cos 5\omega t + \\ & + \dots \approx \sum_{n=1 \dots \infty} b_n u_g^n \cos n\omega t. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) видно, что амплитуды гармоник увеличиваются гораздо быстрее амплитуды основного колебания. В системах с полосовыми фильтрами, в полосы пропускания которых не попадают высшие гармоники, при гармоническом входном сигнале (однотональный режим) искажения формы сигнала вообще не возникают.

Мерой нелинейных искажений является коэффициент нелинейных искажений – он определяет отношение эффективных значений всех высших гармоник сигнала к эффективному значению суммарного сигнала

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{n=2... \infty} \frac{1}{2} (b_n u_g^n)^2}{\sum_{n=1... \infty} \frac{1}{2} (b_n u_g^n)^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2... \infty} k_n^2}{1 + \sum_{n=2... \infty} k_n^2}}, \quad (3)$$

где $k_n = (b_n/b_1)u_g^{n-1}$ – коэффициенты гармоник. При моделировании влияния профилей легирования подзатворной области ПТ на коэффициент нелинейных искажений будем использовать его оценку по семи первым гармоникам.

При двухтональном сигнале на входе усилителя $u_g(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$ из выражения (1) следует:

$$\begin{aligned} u_{out} = & \left(a_1 + \frac{9a_3 u_g^2}{4} + \frac{25a_5 u_g^4}{4} + \frac{1225a_7 u_g^6}{64} + \dots \right) u_g \cos \omega_1 t + \\ & + \left(a_1 + \frac{9a_3 u_g^2}{4} + \frac{25a_5 u_g^4}{4} + \frac{1225a_7 u_g^6}{64} + \dots \right) u_g \cos \omega_2 t + \\ & + \left(\frac{3a_3}{4} + \frac{25a_5 u_g^2}{8} + \frac{735a_7 u_g^4}{64} + \dots \right) u_g^3 \cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \\ & + \left(\frac{3a_3}{4} + \frac{25a_5 u_g^2}{8} + \frac{735a_7 u_g^4}{64} + \dots \right) u_g^3 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \\ & + \left(\frac{5a_5}{8} + \frac{245a_7 u_g^2}{64} + \dots \right) u_g^5 \cos(3\omega_1 - 2\omega_2)t + \\ & + \left(\frac{5a_5}{8} + \frac{245a_7 u_g^2}{64} + \dots \right) u_g^5 \cos(3\omega_2 - 2\omega_1)t + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) видно, что выходные составляющие с частотами $2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1, 3f_1 - 2f_2, 3f_2 - 2f_1$ попадают в полосу пропускания. Составляющие с частотами $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ называют интермодуляционными составляющими третьего порядка (*IM3*), а с частотами $3f_1 - 2f_2$ и $3f_2 - 2f_1$ – интермодуляционными составляющими пятого порядка (*IM5*).

Амплитуды интермодуляционных составляющих в соответствии с их порядком зависят от амплитуды входного сигнала. Так, мощность интермодуляционных составляющих 3-го порядка, как правило, увеличивается на 3 дБ при увеличении мощности входного сигнала на 1 дБ, а мощность интермодуляционных составляющих 5-го порядка – на 5 дБ соответственно. На практике интерес представляют доминирующие составляющие третьего *IM3* и пятого *IM5* порядков, тогда как *IM7* в большинстве случаев пренебрежимо малы.

Амплитуды полезного сигнала и интермодуляционных составляющих

$$u_{out} \approx a_1 u_g, \quad u_{IM3} \approx \frac{3a_3}{4} u_g^3, \quad u_{IM5} \approx \frac{5a_5}{8} u_g^5 \quad (5)$$

позволяют рассчитать коэффициенты интермодуляционных искажений $IM3$ и $IM5$ как отношение амплитуды полезного сигнала к амплитуде определенной интермодуляционной составляющей:

$$IM3 = \frac{u_{out}}{u_{IM3}} \approx \left| \frac{4a_1}{3a_3 u_g^2} \right|, \quad IM5 = \frac{u_{out}}{u_{IM5}} \approx \left| \frac{8a_1}{5a_5 u_g^4} \right|. \quad (6)$$

Чтобы характеризовать интермодуляционные составляющие величинами, не зависящими от u_g , определяют амплитуды, при которых коэффициенты интермодуляционных искажений теоретически принимают значение, равное единице. Для этого зависимости (6), справедливые при малых амплитудах, экстраполируют за пределы их области достоверности, получая точки перехвата по входу $IP3$ и по выходу OIP :

$$IP3: \quad IM3 \equiv 1 \Rightarrow u_{g,IP3} \approx \sqrt[4]{\frac{4a_1}{3a_3}}; \quad OIP3: \quad IM5 \equiv 1 \Rightarrow u_{g,OIP3} \approx \sqrt[4]{\frac{8a_1}{5a_5}}.$$

Точки перехвата позволяют рассчитывать амплитуды интермодуляционных составляющих и коэффициенты интермодуляционных искажений для любых входных и выходных амплитуд в квазилинейной области.

Нечетные коэффициенты a_n влияют на амплитуду полезного сигнала, поэтому при больших амплитудах входного гармонического сигнала коэффициент усиления перестает быть постоянным. Таким образом, из выражений (2) и (4) следует, что эффективный коэффициент усиления схемы зависит от величины входного сигнала и имеет для однотонового и двухтонового сигналов соответственно следующий вид:

$$G_{eff}(u_g) = a_1 + \frac{3a_3 u_g^2}{4} + \frac{5a_5 u_g^4}{8} + \frac{35a_7 u_g^6}{64} + \dots, \quad (7)$$

$$G_{eff}(u_g) = a_1 + \frac{9a_3 u_g^2}{4} + \frac{25a_5 u_g^4}{4} + \frac{1225a_7 u_g^6}{64} + \dots \quad (8)$$

Пределом, за которым начинается перегрузка усилителя, служит точка 1-дБ компрессии – P_{1dB} , она определяет амплитуду, при которой коэффициент усиления под действием начинающейся перегрузки становится на 1 дБ меньше коэффициента усиления в режиме малых сигналов.

Разложение передаточной характеристики усилителя в ряд Тейлора в ряде случаев затруднительно и приводит к громоздким выражениям для коэффициентов ряда Тейлора, поэтому в таких случаях целесообразно проводить численное моделирование, используя непосредственно передаточную характеристику устройства $U_{out}(t) = f(U_{in}(t))$. Для этого в качестве входного сигнала удобно использовать дискретные сигналы $U_{in}(t_i) = u_g \cos(\omega t_i)$ и $U_{in}(t_i) = u_g (\cos \omega_1 t_i + \cos \omega_2 t_i)$, $i = 1, 2 \dots N$, позволяющие после дискретного преобразования Фурье выходного сигнала $U_{out}(t_i) = f(U_{in}(t_i))$ и анализа частотного спектра оценить амплитуды гармонических и интермодуляционных составляющих. При этом, в соответствии с теоремой Котельникова, шаг дискретизации сигналов по времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ не должен превышать $\Delta t \leq 1/(2f_{max})$, где f_{max} определяет границу исследуемого частотного диапазона, включающего рассматриваемые n гармоник $f_{max} \geq 2n\pi/\omega_1$. Кроме того, шаг частоты Δf дискретного спектра должен быть кратен частотам гармоник и интермодуляционных составляющих, что осуществляется выбором количества точек дискретизации N из условия $N = 1/(\Delta t \cdot \Delta f)$.

Численно определенные амплитуды гармоник и интермодуляционных составляющих позволяют при помощи выражений (5) и (1) перейти к полиномиальной модели для использования в современных САПР при моделировании нелинейных эффектов в устройствах на основе ПТ с различными передаточными характеристиками.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ КАСКАДОВ УСИЛЕНИЯ

Нелинейные искажения входного сигнала УМ СВЧ в основном обусловлены нелинейными зависимостями от напряжения на затворе входной ёмкости, крутизны и выходного импеданса транзистора. В ряде экспериментальных работ [23–28] был определен относительный вклад указанных нелинейностей в общую нелинейность ПТ и было показано, что влияние нелинейности входной емкости менее существенно по сравнению с влиянием крутизны и выходного импеданса. В то же время [29] при хорошем согласовании выходного каскада с нагрузкой нелинейность выходного импеданса не оказывает существенного влияния на характеристики усилителя. В связи с этим рассмотрим влияние крутизны передаточной характеристики ПТ на нелинейные искажения усилителей на их основе.

Существенно влиять на линейность передаточной характеристики ПТ можно целенаправленно на этапе их формирования за счет рационального выбора концентрационного профиля в подзатворной области.

Рассмотрим каскад усиления с общим истоком, схема которого приведена на рис. 1. Источники напряжения $V1$ и $V2$ обеспечивают смещение в цепи затвора и питание каскада усиления; $C1$, $C2$ и $L1$, $L2$ – разделительные конденсаторы и блокировочные индуктивности соответственно. Резистор $R1$ номиналом 50 Ом обеспечивает согласование усилительного каскада с источником входного сигнала амплитудой U_g .

Пусть в каскаде усиления, реализованном по схеме с общим истоком (см. рис. 1), в качестве активного элемента выступает GaAs ПТ, профиль легирования которого будем варьировать. Рассмотрим четыре типичных профиля легирования: однородное легирование, линейный профиль, параболический профиль и ступенчатый профиль.

В первом приближении будем считать, что область насыщения дрейфовой скорости охватывает всю длину канала [30]. При этом ток насыщения транзистора будет изменяться прямо пропорционально изменению ширины проводящего канала. В рамках рассматриваемой модели изменение профиля легирования оказывает существенное влияние на передаточные характеристики ПТ $I(U)$, а в выражениях для передаточных характеристик напряжение сток-исток не фигурирует. Таким образом, амплитуду напряжения U_d на выходе каскада усиления (см. рис. 1) будем определять с помощью выражения $U_d = |I(U_A + U_g) - I(U_A)| \cdot Z_n$, исключая постоянную составляющую тока в рабочей точке $I(U_A)$, а импеданс нагрузки Z_n примем равным 50 Ом. В таблице приведены выражения для расчета передаточных характеристик $I(U)$ и порогового напряжения V_p ПТ для рассматриваемых профилей легирования [31].

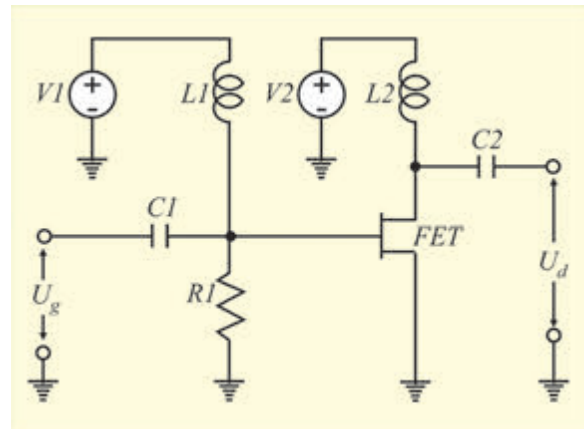


Рис. 1. Схема каскада усиления
с общим истоком

Передаточные характеристики и пороговое напряжение
для различных профилей легирования

1. Однородный профиль легирования: $N_D(x) = N_D \text{ при } 0 \leq x \leq a,$ $N_D(x) = 0 \text{ для } x > a$	$I = I_0 \left(1 - \sqrt{U/V_p} \right), \quad V_p = \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} N_D a^2$
2. Линейный профиль: $N_D(x) = N_D \cdot x \text{ при } 0 \leq x \leq a,$ $N_D(x) = 0 \text{ для } x > a$	$I = I_0 \left(1 - \sqrt[3]{(U/V_p)^2} \right), \quad V_p = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon_s} \frac{N_D}{3} a^3$
3. Параболический профиль: $N_D(x) = N_D \cdot x^2 \text{ при } 0 \leq x \leq a,$ $N_D(x) = 0 \text{ для } x > a$	$I = I_0 \left(1 - \sqrt[4]{(U/V_p)^3} \right), \quad V_p = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon_s} \frac{N_D}{4} a^4$
4. Ступенчатый профиль: $N_D(x) = \begin{cases} N_1, & x \leq d; \\ N_2, & d \leq x \leq a \end{cases}$	$I = I_0 \left[1 - \frac{\sqrt{1 + (\beta^2 - 1)U/V_p} - 1}{\beta - 1} \right], \quad \beta = a/d,$ $V_p = \frac{qN_2}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} \left[a^2 - \left(1 - \frac{N_1}{N_2} \right) d^2 \right]$

Моделирование нелинейных параметров каскадов усиления на основе ПТ с профилями легирования 1...4 (см. таблицу), таких, как амплитуды интермодуляционных составляющих третьего V_{IM3} и пятого V_{IM5} порядков, амплитуды гармоник со второй по пятую включительно V_{2GARM} , V_{3GARM} , V_{4GARM} и V_{5GARM} , коэффициент нелинейных искажений k , рассчитанный по семи гармоникам включительно, а также амплитудная характеристика основной гармоники и нормированный эффективный коэффициент усиления G_{eff}/a_1 , проведено для величин $I_0 = 1$ А, $V_p = -3$ В и напряжения смещения на затворе транзистора $U_A = V_p/2$. Значение коэффициента β в передаточной характеристике ПТ со ступенчатым профилем легирования принималось равным 1,2, что на практике обеспечивает достаточный компромисс между крутизной и линейностью передаточной характеристики, а также не представляет сложностей в формировании такого профиля легирования.

Передаточные характеристики ПТ с различными профилями легирования в координатах I/I_0 и U/V_p приведены на рис. 2, где также отмечена идеальная линейная передаточная характеристика. Для всех приведенных профилей легирования передаточные характеристики обла-

дают существенной нелинейностью, линейность возникает лишь при предельных значениях параметров, характеризующих эти распределения. Видно, что ПТ с неоднородно легированным каналом имеют передаточные характеристики с более высокой степенью линейности, чем при однородно легированном канале.

Семейство кривых эффективного коэффициента усиления, нормированного на малосигнальный коэффициент усиления в рабочей точке G_{eff}/a_1 , в зависимости от различных амплитуд однотонального сигнала на входе каскада усиления U_g для различных профилей легирования приведено на рис. 3.

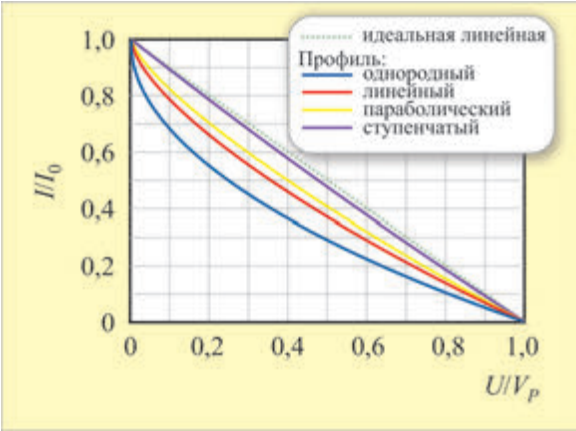


Рис. 2. Передаточные характеристики для различных профилей легирования

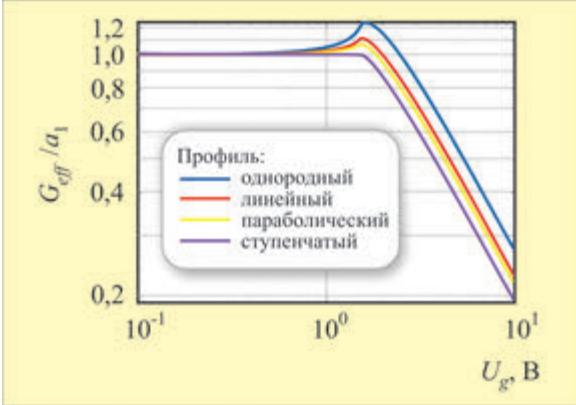


Рис. 3. Эффективный нормированный коэффициент усиления при различных амплитудах однотонального сигнала на входе каскада усиления

Амплитудные характеристики для основной гармоники при однотональном сигнале на входе каскадов усиления на ПТ с различными профилями легирования приведены на рис. 4.

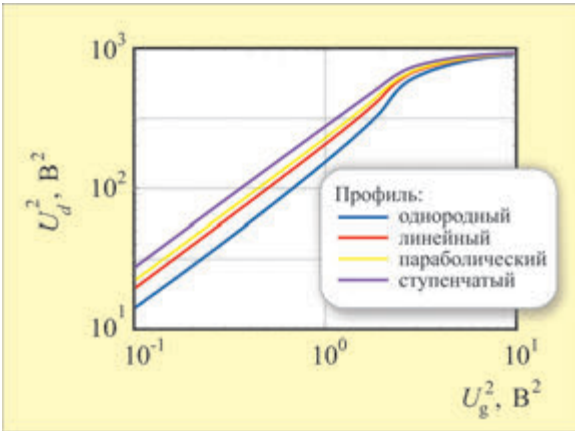


Рис. 4. Амплитудные характеристики основной гармоники при однотональном сигнале на входе каскада усиления

Сравнение гармоник и ИМИ для каскадов усиления на основе ПТ с различными профилями легирования проведено для случая одинаковой выходной мощности основного сигнала. Амплитудные характеристики для гармоник со второй по пятую (V_{2GARM} , V_{3GARM} , V_{4GARM} и V_{5GARM}) при одинаковых выходных мощностях основного тона, пропорциональных квадрату напряжения на стоке транзистора U_d^2 , приведены на рис. 5...8.

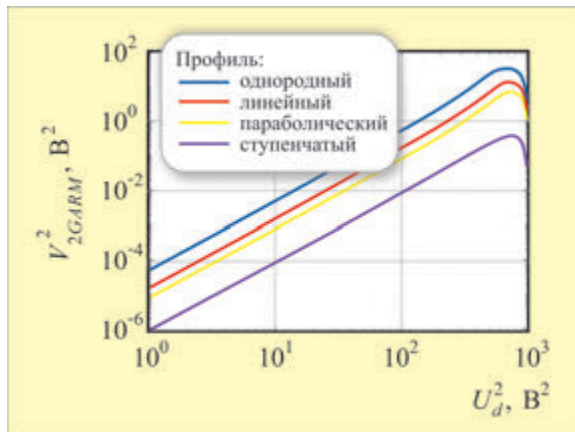


Рис. 5. Амплитудные характеристики второй гармоники при различных амплитудах основного сигнала на выходе каскада усиления

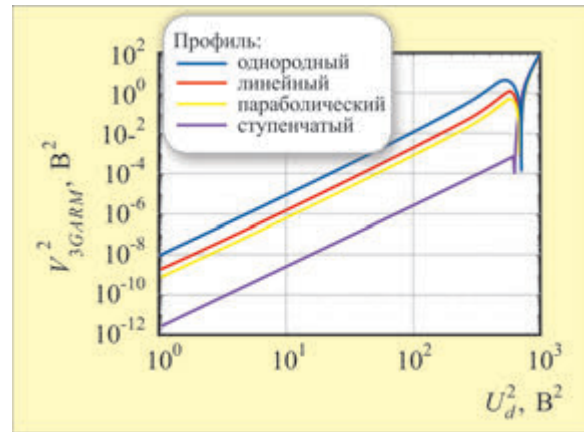


Рис. 6. Амплитудные характеристики третьей гармоники при различных амплитудах основного сигнала на выходе каскада усиления

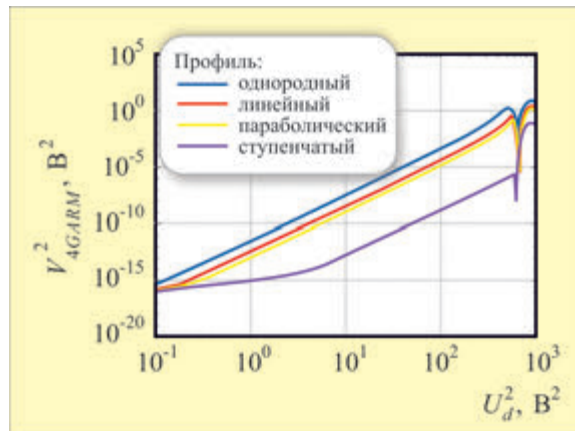


Рис. 7. Амплитудные характеристики четвертой гармоники при различных амплитудах основного сигнала на выходе каскада усиления

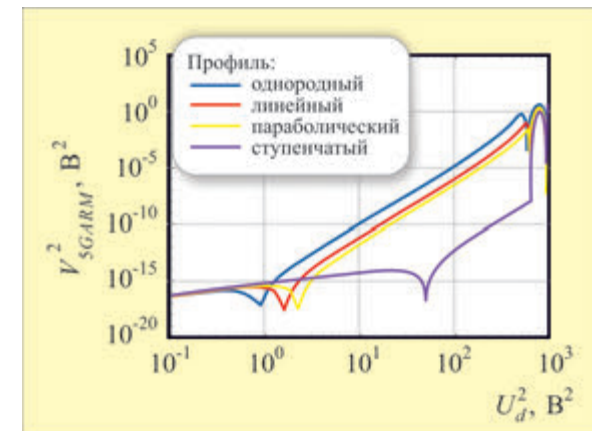


Рис. 8. Амплитудные характеристики пятой гармоники при различных амплитудах основного сигнала на выходе каскада усиления

На рис. 3 граница с эффективным нормированным коэффициентом усиления по уровню $G_{eff}/a_1 \approx 0,89$ ($10^{-1/20} \approx 0,89$) позволяет определить амплитуды гармонического сигнала U_g на входе усилительных каскадов, при которых коэффициент усиления под действием начинающейся перегрузки становится на 1 дБ меньше коэффициента усиления в режиме малых сигналов ($10^{-1/20} \approx 0,89$). Из рис. 3 видно, что, в отличие от каскада усиления на ПТ со ступенчатым профилем легирования, перегрузке остальных каскадов усиления предшествует приращение эффективного коэффициента усиления, что существенно увеличивает уровень нелинейных искажений при приближении к 1-дБ точке компрессии (см. рис. 5...8). Этот эффект особенно хорошо виден на рис. 9 в виде характерных экстремумов коэффициента нелинейных искажений k , рассчитанного с учетом семи гармоник.

Ступенчатый профиль легирования обеспечивает наименьший уровень гармонических искажений вблизи точки 1-дБ компрессии. Коэффициент нелинейных искажений в рассматриваемой рабочей точке $U_A = V_p/2$ у каскада усиления на основе ПТ со ступенчатым профилем в 7 раз, 4 раза и 3 раза меньше, чем у каскадов усиления на основе ПТ с однородным, линейным и параболическим профилями легирования соответственно.

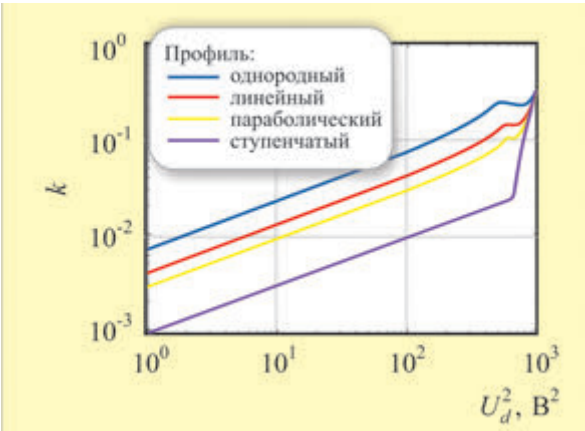


Рис. 9. Коэффициент нелинейных искажений

Амплитудные характеристики интермодуляционных составляющих третьего и пятого порядков, приведенные на рис. 10 и 11, демонстрируют существенное отличие в мощностях интермодуляционных составляющих в сравнении с каскадом усиления на ПТ с однородным легированием. Такое преимущество по ИМИ каскадов усиления на ПТ со ступенчатым профилем легирования может обеспечить им увеличение динамического диапазона на десятки децибел.

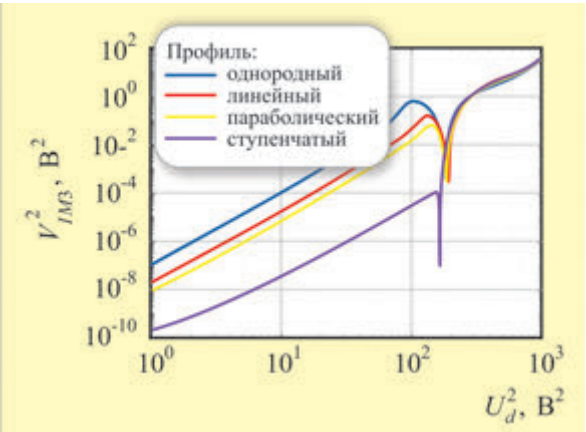


Рис. 10. Амплитудные характеристики интермодуляционных составляющих третьего порядка

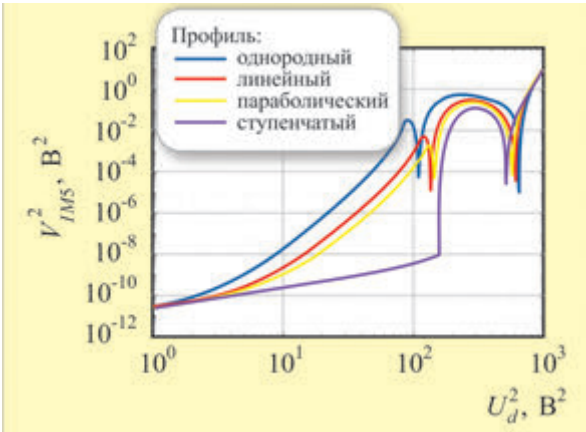


Рис. 11. Амплитудные характеристики интермодуляционных составляющих пятого порядка

Отношение квадратов амплитуд ИМС третьего порядка каскада усиления с однородным профилем легирования V_{IM31}^2 к V_{IM3m}^2 каскада усиления с линейным ($m = 2$), параболическим ($m = 3$) и ступенчатым ($m = 4$) профилями легирования при одинаковых амплитудах двухтонального сигнала на выходе U_d позволяет оценить увеличение динамического диапазона по ИМС третьего порядка относительно каскада усиления на основе ПТ с однородным профилем легирования (рис. 12).

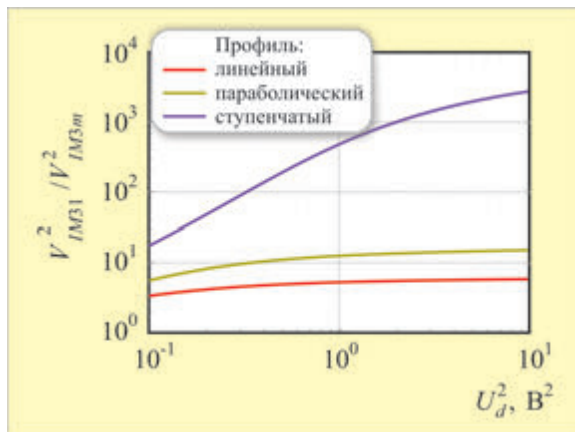


Рис. 12. Увеличение динамического диапазона по интермодуляционным составляющим третьего порядка относительно каскада усиления на основе ПТ с однородным профилем легирования

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически исследованы нелинейные искажения каскадов усиления на основе ПТ с различными концентрационными профилями.

Предложена методика оценки нелинейных искажений каскадов усиления на основе ПТ с различными концентрационными профилями легирования, позволяющая восстановить передаточную характеристику каскадов усиления вблизи рабочей точки путем определения коэффициентов её разложения в ряд Тейлора. Методика может быть использована при схемотехническом моделировании устройств на основе таких ПТ в современных САПР.

Продемонстрировано, что каскад усиления с общим истоком на основе ПТ со ступенчатым профилем легирования обеспечивает наименьший уровень гармонических и интермодуляционных искажений вблизи точки 1-дБ компрессии.

Установлено, что коэффициент нелинейных искажений каскадов усиления на основе ПТ со ступенчатым концентрационным профилем меньше в 7, 4 и 3 раза, чем у каскадов усиления на основе ПТ с однородным, линейным и параболическим концентрационными профилями соответственно.

С учетом ряда приближений показано, что ступенчатый профиль легирования обеспечивает повышенную линейность передаточной характеристики ПТ, что позволяет снизить уровень ИМИ 3-го порядка в каскадах усиления с общим истоком на величину около 30 дБ, существенно увеличивая их динамический диапазон. В ряде приложений это эквивалентно возможности повышения мощности усилителя в 15 раз. Следует отметить, что учет нелинейных зависимостей от напряжения на затворе входной ёмкости и выходного импеданса транзистора, несомненно, приведет к менее оптимистичным оценкам параметров нелинейных искажений рассмотренных каскадов усиления на основе ПТ с различными профилями легирования, которые будут изменяться в худшую сторону с увеличением рабочего диапазона частот. Тем не менее, существенное преимущество применения в усилителях ПТ со ступенчатым профилем легирования сохраняется, как минимум, до диапазона частот 3...6 ГГц [18, 31], обеспечивая снижение ИМС 3-го порядка на величину около 20 дБ, однако границы применения этого эффекта требуют проведения дополнительных исследований.

Полученные результаты позволяют предложить метод линеаризации передаточной характеристики усилителей, который заключается в их проектировании на основе транзисторов с повышенной линейностью передаточной характеристики, что достигается формированием в ПТ та-

кого профиля легирования, при котором глубина обеднения оказывается слабо меняющейся функцией напряжения на затворе. Одним из таких профилей легирования является ступенчатый профиль, рассмотренный в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grebennikov, A.** Linearity improvement techniques for wireless transmitters. Part 1 / A. Grebennikov // High Frequency Electronics. – May 2009. – P. 16 – 26.
2. **Kenington, P. B.** High linearity RF amplifier design / P. B. Kenington. – Norwood, MA: Artech House, 2000.
3. **Hickson, M. T.** High efficiency feedforward linearizers / M. T. Hickson, D. K. Paul, P. Gardner et al. // In Proc. 24th European Microwave Conference. – 1994. – Vol. 1. – P. 819 – 824.
4. **Chu, S. L. G.** A highly linear MESFET / S. L. G. Chu, J. Huang, W. Struble, G. Jackson, N. Pan, M. J. Schindler, Y. Tajima // IEEE MTT-S Digest. – 1991. – P. 725 – 728.
5. **Chu, S. L. G.** High linearity monolithic broadband pseudomorphic spike-doped MESFET amplifiers / S. L. G. Chu, J. C. Huang, A. Bertrand, M. J. Schindler, W. Struble, R. Binder, W. Hoke // GaAs IC Symp. Tech. Dig. – 1992. – P. 211 – 214.
6. **Ikalainen, P. K.** High dynamic range microwave FET / P. K. Ikalainen et al. // Electronics Letters. – May 23, 1991. – Vol. 27, No 11. – P. 945 – 946.
7. **Ikalainen, P. K.** Low-noise low DC power linear FET / P. K. Ikalainen, L. C. Witkowski, Y.-C. Kao // European Microwave Conference Proceedings. – 1992. – P. 570 – 575.
8. **Ikalainen, P. K.** Low-noise, low DC power linear amplifiers / P. K. Ikalainen, L. C. Witkowski, K. R. Varian // IEEE MTT-S Digest. – 1993. – Vol.1. – P. 357 – 360.
9. **Taniguchi, Y.** A C-band 25 watt linear power FET / Y. Taniguchi, Y. Hasegawa, Y. Aoki, J. Fukaya // IEEE MTT-S Digest. – 1990. – P. 981.
10. **Shanfield, S.** A high linearity high efficiency pseudomorphic HEMT / S. Shanfield, M. Schindler, L. Aucoin, A. Platzer, W. Hoke, P. Lyman, S. L. G. Chu, R. Binder // Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium 1992. Technical Digest 1992. 14th Annual IEEE. – 1992. – P. 207 – 210.
11. **Otobe, K.** Super low-distortion and high power hetero GaAs MESFETs with asymmetrical LDD structure / K. Otobe, K. Nakata, S. Nakajima // GaAs IC Symposium 2000. 22nd Annual. – 2000. – P. 67 – 70.
12. **Lin, Y.-C.** A δ -doped InGaP/InGaAs pHEMT with different doping profiles for device-linearity improvement / Y.-C. Lin, E. Y. Chang, H. Yamaguchi, W.-C. Wu & C.-Y. Chang // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – P. 1617 – 1625.
13. **Kazutaka Takagi.** High PAE and low intermodulation distortion performance of newly developed GaAs FETs using ion implantation process / Kazutaka Takagi, Hideki Kimura, Tomohito Ohmori, Takuji Yamamura // Microwave Conference 2009. APMC 2009. Asia Pacific. – 2009. – P. 1679 – 1682.
14. **Emam, M.** Experimental investigation of RF noise performance improvement in graded-channel MOSFETs / M. Emam, P. Sakalas, D. Vanhoenacker-Janvier, J. Raskin, T. C. Lim and F. Danneville // IEEE Transactions on Electron Devices. – July 2009. – Vol. 56, No 7. – P. 1516 – 1522.
15. **Богданов, Ю. М.** Полевой транзистор с низкой модуляционной чувствительностью для маломощных СВЧ-устройств / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 2. – С. 346 – 355.
16. **Богданов, Ю. М.** Зависимость низкочастотных флуктуаций входной емкости полевого транзистора от профиля легирования канала / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Микроэлектроника. – 1993. – № 2. – С. 15 – 19.
17. **Богданов, Ю. М.** Полевой транзистор с низкой чувствительностью для маломощных СВЧ-генераторов / Ю. М. Богданов, А. К. Балыко, А. Б. Пашковский и др. // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1993. – № 3. – С. 14 – 19.
18. **Богданов, С. А.** Полевые транзисторы с повышенным уровнем линейности / С. А. Богданов, Ю. М. Богданов, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, А. А. Маковецкая, С. И. Новиков, А. Б. Пашковский, В. В. Смирнов, К. С. Журавлёв // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь. – 2018. – С. 24 – 29.
19. **Богданов, С. А.** Новый метод снижения фазовых шумов генераторов на полевых транзисторах / С. А. Богданов, Ю. М. Богданов, Н. О. Викторова, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, С. И. Новиков, А. Б. Пашковский, В. В. Смирнов, К. С. Журавлёв // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь. – 2018. – С. 34 – 39.

20. **Лукашин, В. М.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, А. Б. Соколов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, № 17. – С. 84 – 89.
21. **Лукашин, В. М.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 684 – 692.
22. **Борисов, А. А.** Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-HEMT / А. А. Борисов, А. Б. Пашковский, В. М. Лукашин, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков, А. А. Маковецкая, К. С. Журавлев, А. И. Торопов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – № 1. – С. 65 – 69.
23. **Agarwal, K. K.** Low-noise low-distortion GaAs FET amplifiers for 6 GHz single side-band radio / K. K. Agarwal and Y. L. Kuo // 1978 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium Digest, Ottawa, ON, Canada. – 1978. – P. 393 – 395. – doi: 10.1109/MWSYM.1978.1123902.
24. **Schroeder, W. E.** A 2W, 4 GHz GaAs FET amplifier for radio relay applications / W. E. Schroeder and J. W. Ge-wartowski // 1978 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Ottawa, ON, Canada. – 1978. – P. 279 – 281. – doi: 10.1109/MWSYM.1978.1123863.
25. **Sechi, F. N.** Linearised class-B transistor amplifiers / F. N. Sechi // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – April 1976. – Vol. 11, No 2. – P. 264 – 270. – doi: 10.1109/JSSC.1976.1050713.
26. **Chi Sun Yu.** 2-GHz quasi-balanced-mode GaAs FET amplifier / Chi Sun Yu, Wing Shing Chan, Chung Wai Li, Wai Keung Lo, Shiu Hei Chan // Microwave and Optical Technology Letters. – 2005. – Vol. 46. – P. 573.
27. **N. Borges de Carvalho.** A comprehensive explanation of distortion sideband asymmetries / N. Borges de Carvalho, J. C. Pedro // Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions. – 2002. – Vol. 50, No 9. – P. 2090 – 2101.
28. **Strid, E. W. / E. W. Strid and T. C. Duder** // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 1978. – P. 135 – 137.
29. **Д. В. Ди Лоренцо.** Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
30. **Зи, С.** Физика полупроводниковых приборов. Кн 1. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
31. **Williams, R. E.** Graded channel FET's: improved linearity and noise figure / R. E. Williams and D. W. Shaw // IEEE Transactions on Electron Devices. – June 1978. – Vol. 25, No 6. – P. 600 – 605. – doi: 10.1109/T-ED.1978.19143.

Статья поступила 12 марта 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГРИГОРЬЕВ А. Д. **Микроволновая электроника:** Учебник для СПО / Григорьев А. Д., Иванов В. А., Молоковский С. И. – СПб.: Лань, 2021. – 496 с.

В учебнике с единых позиций рассматриваются физические основы вакуумной и твердотельной микроволновой электроники. Подробно изложены механизмы взаимодействия электромагнитного поля с заряженными частицами, законы их движения в различных средах. Рассматриваются основные типы и разновидности микроволновых приборов, их принцип действия, теория, характеристики и параметры, конструктивные особенности. Изложение сопровождается большим количеством иллюстраций.

Учебник предназначен для студентов учебных заведений, в которых изучаются электроника, радиотехника, автоматика, телемеханика, электронное приборостроение, вычислительная техника.

УДК 621.382.323.029.64

DA-DpHEMT МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

С. А. Богданов¹, С. Н. Карпов¹, В. Г. Лапин¹, В. М. Лукашин¹,
А. Б. Пашковский¹, И. А. Рогачёв¹, Е. В. Терёшкин¹,
С. В. Щербakov¹, А. К. Бакаров², К. С. Журавлев²

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

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

Представлены первые результаты исследований полевых транзисторов мм-диапазона длин волн с высокой подвижностью электронов на основе псевдоморфной AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктуры с In_{0,22}Ga_{0,78}As-каналом (DA-DpHEMT), в которой методом селективного донорно-акцепторного легирования слоев, образующих внешнее окружение канала, и спейсеров проведено формирование *p-i-n* потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в канале. Разработанная гетероструктура имеет рекордно высокие показатели подвижности электронов (5800 см²/(В·с)) и поверхностной плотности (4,7·10¹² см⁻²) двумерного электронного газа при температуре 300 К. Полевой транзистор с Т-образным затвором длиной 0,14 мкм на такой структуре демонстрирует максимальную удельную плотность тока стока 0,7 А/мм, крутизну порядка 250 мСм/мм, пробивное напряжение затвор – сток 23...31 В. По элементарной оценке, выходная удельная плотность мощности переменного сигнала составляет около 2 Вт/мм. Транзистор показывает максимальный стабильный коэффициент усиления более 15 дБ при 40 ГГц и более 10 дБ при 67 ГГц, максимальную частоту усиления по току 45 ГГц и максимальную частоту генерации 250 ГГц. При изменении частоты в диапазоне 25...55 ГГц максимальный стабильный коэффициент усиления практически постоянен. На частоте 40 ГГц он растет с увеличением расстояния затвор – сток.

КС: дополнительный потенциальный барьер, полевой транзистор, коэффициент усиления

MILLIMETER-WAVE DA-DpHEMT

S. A. Bogdanov¹, S. N. Karpov¹, V. G. Lapin¹, V. M. Lukashin¹,
A. B. Pashkovskii¹, I. A. Rogachev¹, E. V. Tereshkin¹,
S. V. Shcherbakov¹, A. K. Bakarov², K. S. Zhuravlev²

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

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk

The first results of mm-band field-effect transistors with high electron mobility based on a pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructure with an In_{0,22}Ga_{0,78}As quantum well with double-sided donor-acceptor channel doping (DA-DpHEMT) studies are presented. The developed heterostructure has a record high electron mobility of 5800 cm²/(V·s) and a surface density of 4.7·10¹² cm⁻² of a two-dimensional electron gas at a temperature of 300 K. A field-effect transistor with a T-shaped gate with a length of 0.14 microns on such a structure shows a specific drain current density of 0.7 A/mm, a transconductance of about 250 mSm/mm, and a gate-drain breakdown voltage in the range of 23...31 V. According to an elementary estimate, the output specific RF power density, is about 2 W/mm. The transistor demonstrates a maximum stable gain (MSG) of more than 15 dB at 40 GHz and more than 10 dB at 67 GHz, a maximum current gain frequency of 45 GHz, and a maximum generation frequency of 250 GHz. When the frequency changes in the range of 25...55 GHz, the MSG is almost constant. At 40 GHz, the MSG increases with increasing gate-drain distance.

Keywords: additional potential barrier, field-effect transistor, gain

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время 5G и следующий за ним активно разрабатываемый 6G стандарты связи являются будущим мобильных сетевых технологий. Они имеют уникальные характеристики, такие, как скорость передачи данных выше 1 Гбит/с, рабочие частоты в диапазоне от 3 до 300 ГГц, обеспечивают высокое качество видеосвязи, мультимедийное потоковое вещание высокого разрешения, HDTV и т. д., что делает эти технологии отличными от всех ныне существующих мобильных технологий. Высокочастотные полосы еще не одобрены организациями, разрабатывающими протоколы мобильной телефонии. Для 5G предлагается использовать диапазоны 24,25...27,5, 26,5...29,5, 27,5...28,35 и 37...40 ГГц. Для 6G характерные частоты вообще располагаются в районе 300 ГГц. Начавшаяся революция в коммуникационных системах способствовала разработке транзисторов и интегральных схем мм-диапазона. Это новое применение затруднено сложными условиями распространения мм-волн в атмосфере, а также жесткими ограничениями по размеру, стоимости и энергопотреблению устройств, что требует использования высокоомощных эффективных транзисторов.

Если комплексно рассматривать этот вопрос, то для решения всех этих проблем лучше всего подходят транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур группы полупроводников III...V с двумерным электронным газом (ДЭГ), ввиду их широкого диапазона рабочих частот, высокой выходной мощности, эффективности и линейности [1, 2].

Несомненно, в настоящее время локомотивом мощной СВЧ-электроники является нитрид галлия. Транзисторы на основе GaN-гетероструктур широко используются в производстве. Эти приборы могут работать при более высоких температурах, а также обладают более высокими рабочими напряжениями по сравнению с приборами, созданными на основе кремния или арсенида галлия. Кроме того, усилители на основе GaN выдерживают сигналы высокой мощности на входе при отсутствии дополнительной защиты.

Продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн также связано с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. НЕМТ на основе GaN являются неоспоримыми лидерами среди высокоомощных транзисторов в диапазоне от 3 см до нескольких миллиметров [3 – 6]. Главными преимуществами этих транзисторов являются высокая удельная мощность и высокое напряжение пробоя, а также сравнимые с GaAs-транзисторами показатели коэффициента усиления и коэффициента шума. Кроме того, бурный прогресс нитридгаллиевых приборов связан не только с достоинствами эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия, но и с огромным объемом затрачиваемых на их разработку средств и резко выросшим за последние годы уровнем полупроводниковых технологий.

GaN-гетероструктуры для НЕМТ выращиваются на подложках с несовпадающими параметрами решетки, что приводит к возникновению большого количества структурных дефектов даже на подложках из SiC. Это является одной из причин ухудшения параметров и надежности устройств. GaN-технология, несомненно, имеет заделы для роста, но в настоящее время из-за принципиальных ограничений GaN НЕМТ сравнимы с GaAs-транзисторами только на частотах порядка 150 ГГц [2]. В то же время GaAs-технология пока более отработанная, гибкая, и при этом GaAs-транзисторы дешевле [2, 7, 8].

Двумя основными гетероструктурами для использования в транзисторах мм-диапазона на GaAs-подложках являются псевдоморфные DpHEMT и метаморфные mHEMT. Ещё выше по

частоте удаётся подняться при использовании гетероструктур на подложках из фосфида индия. DpHEMT превосходят mHEMT и InP HEMT по удельной выходной мощности, но уступают по коэффициенту усиления и рабочей частоте [9 – 12].

Дополнительный интерес к арсенидгаллиевому направлению на высоких частотах подогревают и исследования в области донорно-акцепторного легирования [13], позволившие резко увеличить выходную мощность транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур и существенно продвинуться вверх по частотному диапазону [14 – 16]. В этих работах для продвижения DpHEMT в мм-диапазон предлагается использовать новый тип гетероструктур, со вспомогательными слоями (рис.1), легированными акцепторами, расположенными позади донорных дельта-слоев по обе стороны от InGaAs-канала (DA-DpHEMT). Сформированные таким образом области пространственного заряда создают высокие потенциальные барьеры (вплоть до 900 мЭв) вокруг канала транзистора, что увеличивает локализацию электронов и их дрейфовую скорость [16–19]. DA-DpHEMT показал более чем 1,7 Вт/мм удельной мощности на 10 ГГц [15]. Далее будет показано, что GaAs DA-DpHEMT могут быть крайне перспективными в мм- и субмм-диапазонах.

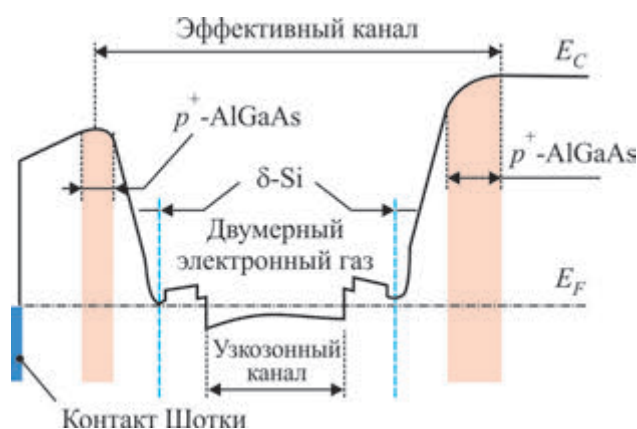


Рис. 1. Схематическое представление зонной диаграммы DA-DpHEMT-гетероструктуры. Показаны положения слоев с легированием донорами и акцепторами

2. ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ

Рассматриваемая AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктура была выращена с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs полуизолирующей подложке в RIBER Comast 21T Solid-Source MBE системе. Буфер гетероструктуры представляет собой 400-нм слой GaAs. (Al)GaAs слои растились при температуре 620 °C со скоростью 0,28 нм/с, In-GaAs-слой растился при температуре 500...520 °C со скоростью 0,24 нм/с. Рост дельта-слоев проводился при 530 °C. Барьеры вокруг слоя InGaAs состоят из короткопериодных $\text{AlAs}_k/\text{GaAs}_l$ -сверхрешеток, где k и l – количество монослоев: $k = 3$ и $l = 5$ для нижнего барьера и $k = 2$ и $l = 3$ для верхнего барьера. Порядок слоев для DA-DpHEMT с усреднёнными параметрами по сверхрешёткам представлен в табл. 1.

Таблица 1

Последовательность слоев гетероструктуры и степень легирования

№	Состав слоя	Концентрация примеси	Толщина, Å
1	Буфер	–	–
2	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	–	1000
3	Al _{0,25} Ga _{0,75} As; Be	2,55·10 ¹⁸ см ⁻³	150
4	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	–	36
5	GaAs	–	9
6	Дельта-Si (1)	6,0·10 ¹² см ⁻²	–
7	GaAs	–	15
8	Al _{0,43} Ga _{0,57} As	–	31
9	GaAs	–	9
10	In _{0,22} Ga _{0,78} As	–	100
11	GaAs	–	9
12	Al _{0,55} Ga _{0,45} As	–	23
13	GaAs	–	9
14	Дельта-Si (2)	9,5·10 ¹² см ⁻²	–
15	GaAs	–	15
16	Al _{0,33} Ga _{0,67} As	–	23
17	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	–	30
18	Al _{0,33} Ga _{0,67} As	–	23
19	Al _{0,25} Ga _{0,75} As; Be	4,83·10 ¹⁸ см ⁻³	80
20	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	–	200
Параметры проводящего канала гетероструктуры			
n_s (300 K)		4,73·10 ¹² см ⁻²	
μ (300 K)		5780 см ² /(В·с)	
n_s (77 K)		4,81·10 ¹² см ⁻²	
μ (77 K)		13540 см ² /(В·с)	

Структурные свойства и распределение примесных атомов для аналогичной гетероструктуры были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и масс-спектропии вторичных ионов в нашей предыдущей работе [20].

Расчеты зонной диаграммы структуры, волновых функций соответствующих энергетических уровней, плотности ДЭГ n для нулевого потенциала проводились путем решения самосогласованной системы уравнений Шредингера-Пуассона:

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m(x)} \frac{\partial}{\partial x} \psi_i(x) \right) + U(x) \psi_i(x) = E_i \psi_i(x), \\ \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon(x) \frac{\partial}{\partial x} \phi(x) \right) = -e (N_d(x) - N_a(x) - n(x)), \end{cases} \quad (1)$$

где $m(x)$, e – эффективная масса и заряд электронов в рассматриваемой гетероструктуре; $\psi_i(x)$ – волновая функция i -го уровня; E_i – собственные значения энергии волновой функции i -го уровня; $\phi(x)$ – потенциал в структуре; $U(x) = -e\phi(x) + E_c(x)$ – профиль потенциальной энергии структуры, учитывающий разрыв зон $E_c(x)$; $\epsilon(x)$ – диэлектрическая проницаемость структуры; $N_d(x)$, $N_a(x)$ – концентрации ионизированных доноров и акцепторов в структуре; $n(x, \phi)$ – концентрация носителей заряда (электронов) в структуре. Для решения системы использовался метод конечных разностей. На рис. 2 показано, что основной и первый возбужденный энергетические уровни расположены ниже уровня Ферми. Расчет показывает, что 98 % электронов расположены на этих уровнях, что подтверждает сильную локализацию электронов в канале.

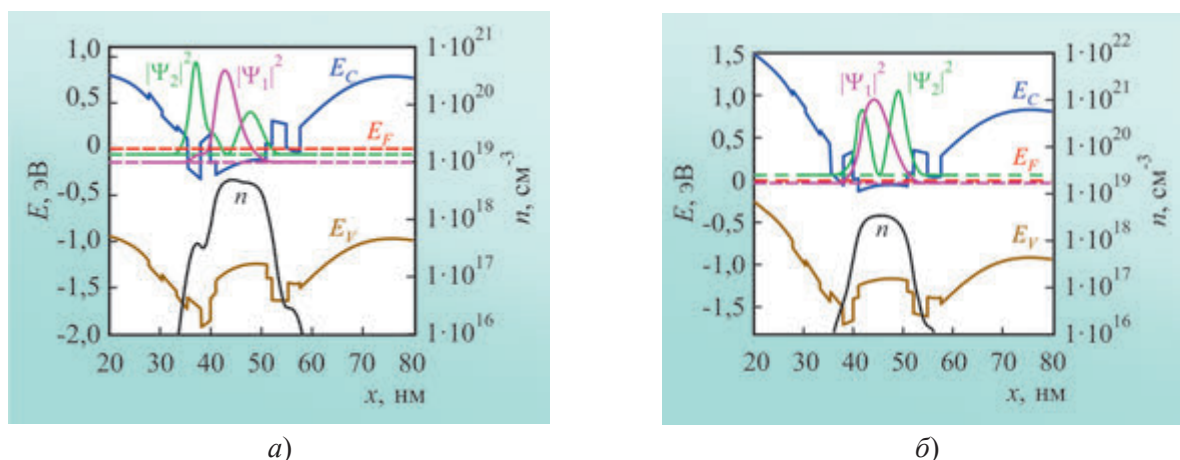


Рис. 2. Зонная диаграмма, волновые функции и концентрационный профиль разработанной структуры. Координата $x = 0$ соответствует координате затвора:
 а – напряжение на затворе 0, $E_1 = -0,147$ эВ, $E_2 = -0,059$ эВ; б – напряжение на затворе -2 В, $E_1 = -0,032$ эВ, $E_2 = 0,057$ эВ

Концентрация доноров и толщины спейсеров были выбраны для получения максимальной проводимости, пропорциональной произведению плотности и подвижности ДЭГ. Для улучшения характеристик DA-DpHEMT плотность и подвижность ДЭГ увеличивалась до $4,7/4,8 \cdot 10^{12}$ см⁻² и 5800/13500 см²/(В·с) при температурах 300/77 К соответственно.

Концентрация и профиль акцепторов были выбраны так, чтобы увеличить высоту и резкость потенциальных барьеров и подавить эффект перехода горячих электронов в барьеры AlGaAs. Измерения холловской подвижности и магнетосопротивления с помощью метода Ван-дер-Пау при индукции магнитного поля от 0 до 2 Тл при 77 К показали, что параллельная проводимость в барьерных слоях мала в DA-DpHEMT-гетероструктурах, что подтверждает сильную локализацию электронов в квантовой яме.

3. СТРУКТУРА ТРАНЗИСТОРА И СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Транзисторы были изготовлены с разными ширинами единичных «пальцев» затвора W_{fg} , разными расстояниями исток – затвор L_{sg} и затвор – сток L_{gd} и разным количеством пальцев с помощью стандартной технологии. Длина ножки Т-образного затвора была измерена с помощью сканирующей электронной микроскопии и составила порядка 0,14 мкм. Толщина подложки составляла 100 мкм. Заземление было проведено через металлизированные отверстия под бо-

ковыми площадками. Из-за малой площади омических контактов истока и стока, формируемых непосредственно к слою InGaAs-канала, их сопротивление составило $0,9 \dots 1,0 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$, что примерно в $1,5 \dots 2$ раза больше, чем у стандартных DpHEMT. Поверхность транзистора пассивировалась с помощью 100-нм пленки Si_3N_4 . Фотографии транзисторов с шириной единичного пальца затвора 70 мкм и 50-омными линиями для зондовых измерений и высокочастотных и статических характеристик транзистора показаны на рис. 3.

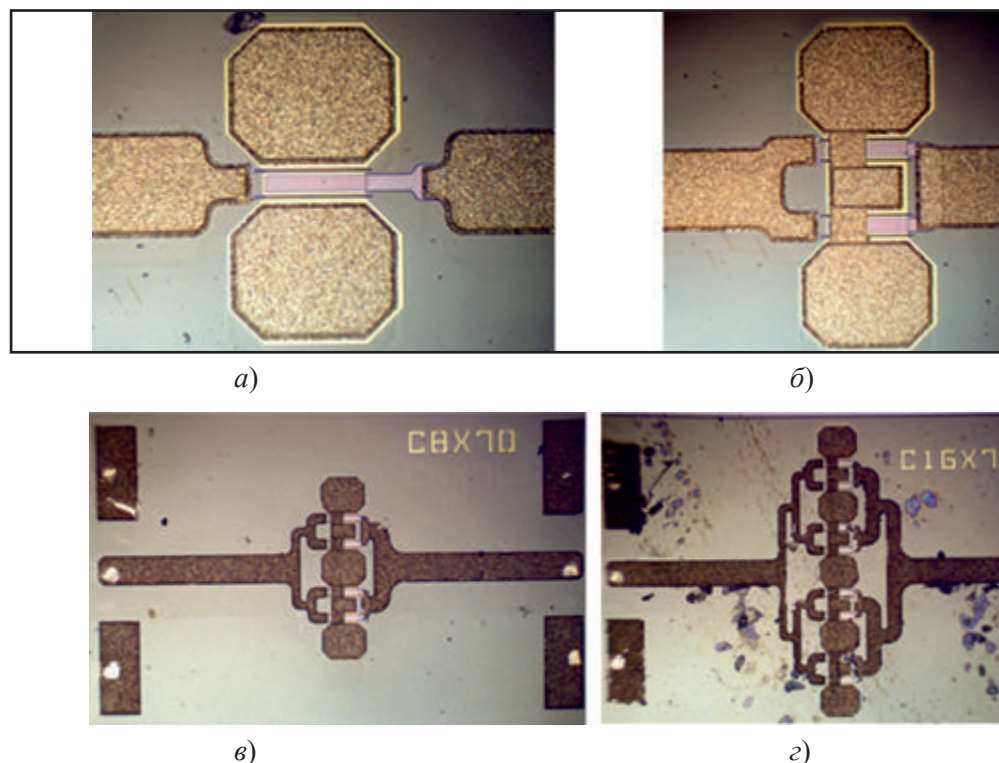


Рис. 3. Фотографии изготовленных транзисторов с шириной единичного пальца затвора 70 мкм: *а* – транзистор с 2-мя пальцами затвора; *б* – с 4-мя пальцами затвора; *в* – с 8-ю пальцами затвора; *г* – с 16-ю пальцами затвора (сгорел в ходе измерений, видны разрушения конструкции)

Ввиду большой толщины нелегированного подзатворного $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ -слоя (см. табл. 1), транзистор имеет большое значение напряжения отсечки и малую крутизну g_m (рис. 4). Это также объясняет практически линейное падение g_m с повышением напряжения на затворе, что типично для транзисторов с коротким затвором и большим расстоянием затвор – канал [21].

Плотность тока открытого транзистора составила 0,7 А/мм (см. рис. 4), а пробивное напряжение затвор – сток оказалось в диапазоне $V_B = 23 \dots 31 \text{ В}$ (рис. 5). На основе этих значений была рассчитана максимально возможная выходная СВЧ-мощность транзистора в соответствии с формулой:

$$P_{out} = 1/8 \cdot I_{ds} (V_B - V_S - V_p), \quad (2)$$

где $V_S = 2 \text{ В}$ и $V_p = 4,5 \text{ В}$ – напряжение насыщения и запирающее напряжение соответственно. Полученная P_{out} составила порядка $1,5 \dots 2,1 \text{ Вт/мм}$.

Прямые измерения выходной мощности в мм-диапазоне разработанного транзистора не проводились. Однако можно предположить, что для полевых транзисторов приведенная оцен-

ка верна до тех пор, пока их коэффициент усиления больше 10 дБ. Проводимые ранее оценки для транзисторов X-диапазона на подобных структурах оказывались в хорошем согласии с измеренным значением выходной мощности. Так, в транзисторе с Г-образным затвором длиной 0,3 мкм на частоте 10 ГГц были получены выходная удельная мощность $P_{out} = 1,7$ Вт/мм, суммарная мощность транзистора 1,4 Вт и коэффициент усиления по мощности более чем 10 дБ [15]. Оценка выходной удельной мощности для DA-DpHEMT, согласно статическим измерениям (максимальная плотность тока 0,6 А/мм, рабочее напряжение 12 В, пробивное напряжение 26...27 В), дала значение порядка 1,6...1,8 Вт/мм, что хорошо согласуется с измеренными значениями.

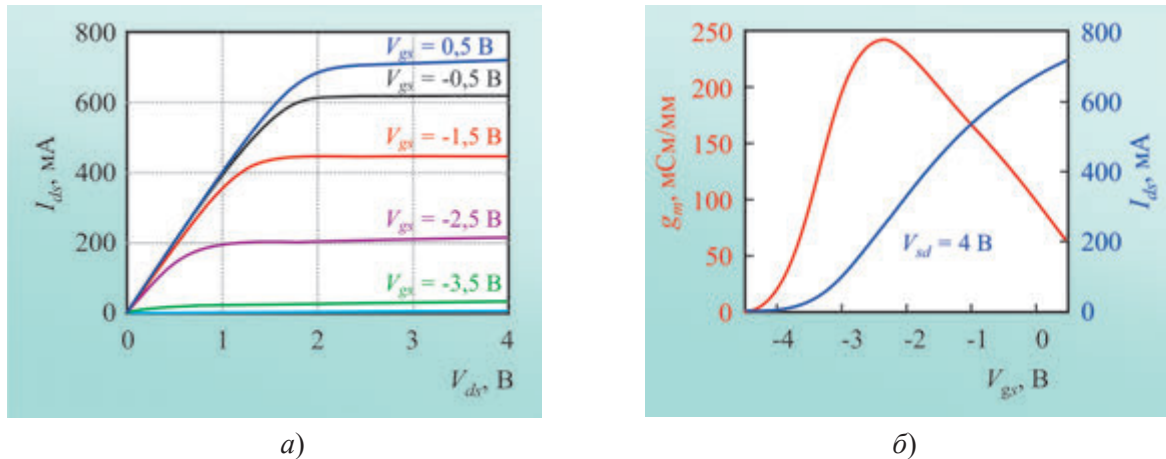


Рис. 4. Удельные усредненные характеристики DA-DpHEMT на постоянном токе:
а – ВАХ; б – передаточная характеристика и крутизна

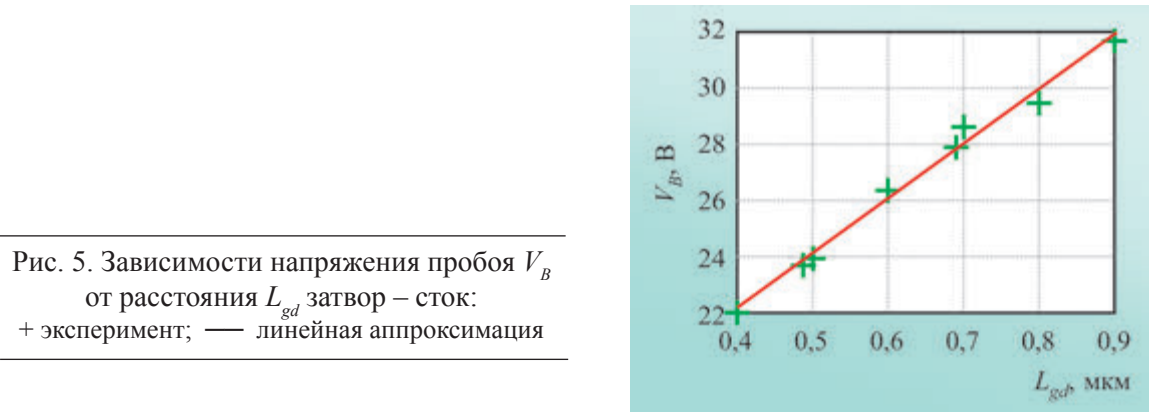


Рис. 5. Зависимости напряжения пробоя V_B от расстояния L_{gd} затвор – сток:
+ эксперимент; — линейная аппроксимация

4. СВЧ-ХАРАКТЕРИСТИКИ

Возможность улучшения частотных характеристик полевых транзисторов за счёт использования донорно-акцепторного легирования была исследована на транзисторах с Г-образным затвором длиной около 0,3 мкм, шириной единичного пальца 70 мкм при общей ширине затвора 0,8 мм и более [16]. Было показано, что донорно-акцепторное легирование увеличивает коэффициент усиления такого прибора на 3...4 дБ и при идеальном согласовании этот транзистор на частоте 40 ГГц будет иметь малосигнальный коэффициент усиления около 5 дБ. Можно

сделать простейшие оценки, основанные на том, что коэффициент усиления транзистора пропорционален квадрату его максимальной частоты усиления по току f_t и обратно пропорционален квадрату рабочей частоты. Уменьшение длины затвора с 0,3 до 0,14 мкм с учётом краевых эффектов должно увеличить f_t примерно в 2 раза, что соответствует росту коэффициента усиления на 6 дБ. Даже если учесть, что конструкция транзистора [16], за исключением малой ширины единичных пальцев затвора, была рассчитана на сантиметровый диапазон длин волн, длина его затвора была измерена с определённой погрешностью, а новая структура имеет очень высокую проводимость, то разрабатываемый прибор, изготовленный без технологических огрехов, на частоте 40 ГГц должен иметь коэффициент усиления 11...13 дБ. Однако СВЧ-измерения показали заметно отличающиеся от этой оценки результаты.

На рис. 6 показана зависимость максимального стабильного коэффициента усиления (MSG) транзистора, рассчитанного из измеренных S -параметров, от напряжения на затворе в конфигурации «транзистор с двумя и четырьмя одиночными секциями затвора».

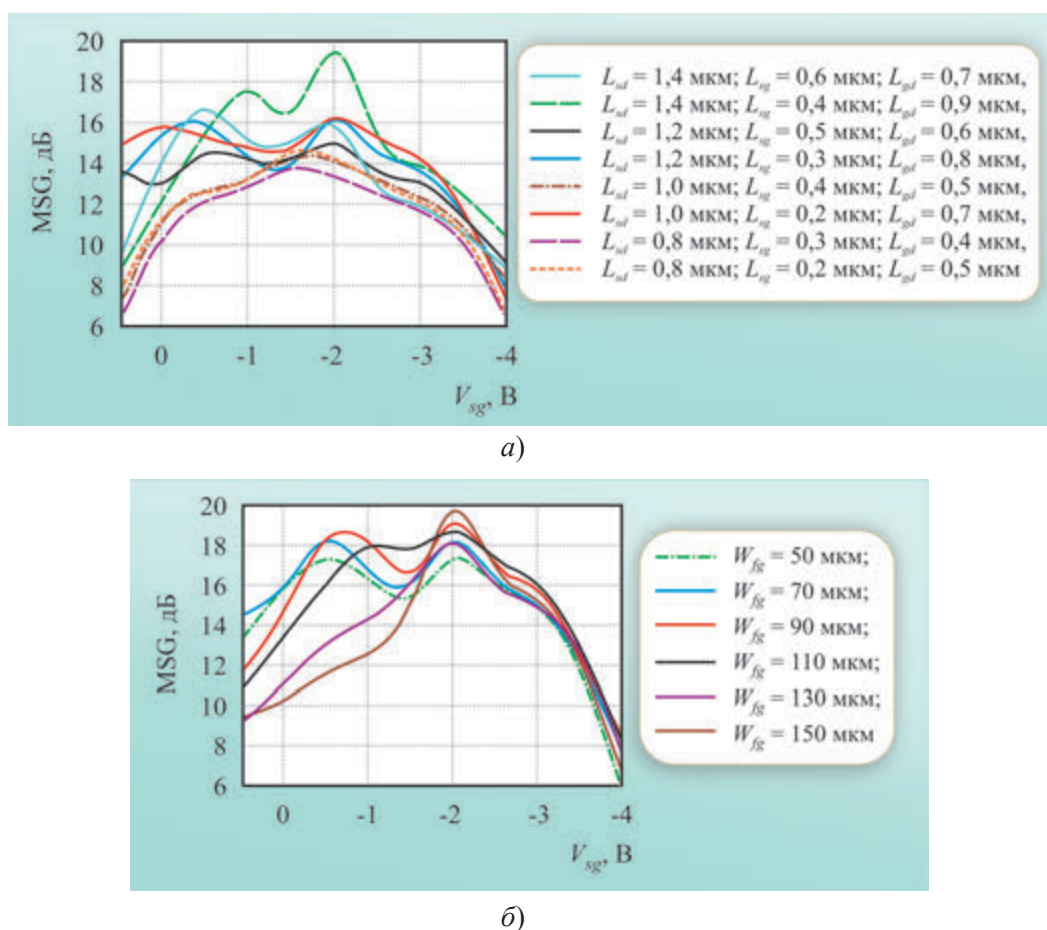


Рис. 6. Зависимости максимального стабильного коэффициента усиления транзистора на частоте 40 ГГц от напряжения на затворе:

a – для транзистора с 2-мя пальцами затвора ($V_{gd} = 4$ В, $W_{fg} = 50$ мкм); b – для транзистора с 4-мя пальцами затвора при разных ширинах единичного пальца ($V_{gd} = 4$ В, $L_{gd} = 0,7$ мкм)

Из рис. 6 видно, что на частоте 40 ГГц при $L_{gd} > 0,6$ мкм усиление транзисторов с разной шириной пальцев в широком диапазоне напряжений на затворе значительно больше 15 дБ, с мак-

симумом почти 20 дБ. Для устройств с шириной единичного пальца затвора 50 мкм усиление составило более 10 дБ на частоте 67 ГГц (рис. 7).

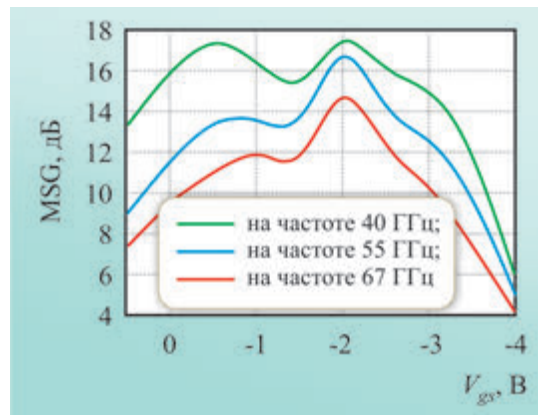


Рис. 7. Зависимости максимального стабильного коэффициента усиления от напряжения на затворе ($V_{gd} = 4$ В, $W_{fg} = 50$ мкм, $L_{gd} = 0,7$ мкм)

При таких больших значениях коэффициента усиления можно предположить, что расчет удельной выходной мощности справедлив, по крайней мере, до 50 ГГц.

Максимальная частота усиления по току f_t и максимальная частота генерации f_{max} для транзистора с шириной единичного пальца $W_G = 50$ мкм экстраполировались с помощью наклона минус 20 дБ/декада из $|h_{21}|^2$ и однонаправленного коэффициента усиления (расчет по нелинейной модели) соответственно, как показано на рис. 8.

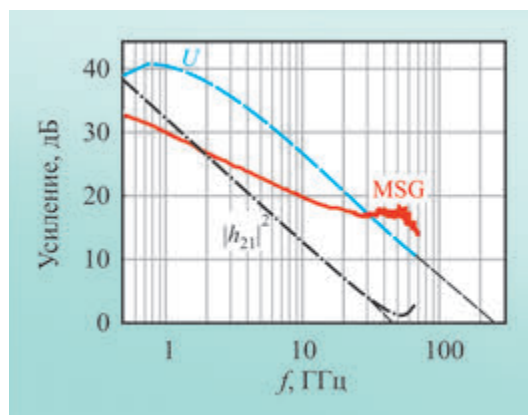


Рис. 8. Зависимости усиления транзистора с шириной единичного пальца 50 мкм от частоты ($V_{gd} = 4$ В, $L_{gd} = 0,7$ мкм)

Видно, что DA-DpHEMT имеют относительно малую $f_t = 45$ ГГц и очень высокую $f_{max} = 250$ ГГц. Вероятно, столь большая разница связана с сильным влиянием паразитных элементов на величину f_r , что в данном случае особенно существенно из-за большего расстояния между затвором и каналом и соответственно относительно малой величины крутизны g_m . Можно предположить, что величина максимальной частоты усиления по току, определяемая только временем пролета электронов под затвором, намного выше. В то же время сильная локализация электронов в квантовой яме в подзатворной области транзистора ведет к уменьшению выходной проводимости g_d , а следовательно, к увеличению f_{max} . Эти особенности DA-DpHEMT-структуры и объясняют та-

кую значительную разницу между значениями f_i и $f_{\max}$. Как отмечалось выше, транзисторы были изготовлены с разными расстояниями исток – затвор и затвор – сток. Расстояние исток – затвор слабо влияло на характеристики прибора, в то время как влияние расстояния затвор – сток оказалось значительным (см. рис. 6, а и 9).

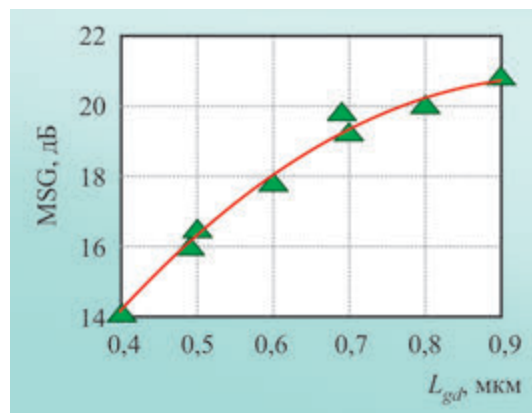


Рис. 9. Зависимость максимального стабильного коэффициента усиления транзистора на частоте 40 ГГц от расстояния затвор – сток ($V_{gd} = 4$ В)

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 2 приведены для сравнения СВЧ-характеристики разработанного транзистора и лучших транзисторов с похожей топологией и с близкой длиной затвора, сделанных по другим технологиям. Исследованный нами прибор имеет форму стандартной ячейки транзистора, применяемого в усилителях мощности, поэтому его характеристики сравниваются с подобными ячейками у аналогичных транзисторов. В табл. 2 не представлены рекордные характеристики устройств, полученных с гораздо более короткими затворами в [3, 4, 6]. Характеристики высокочастотных транзисторов в значительной степени зависят от нелокальной динамики электронов под субмикронным затвором. В свою очередь нелокальный разогрев электронов весьма сложен и зависит от многих факторов (краевых эффектов, поперечного пространственного переноса, подвижности электронов, пороговых полей, дрейфовой скорости насыщения в слоях гетероструктуры и т. д.). Тем самым, характеристики транзистора от длины затвора могут зависеть существенно нелинейным образом. Именно поэтому сравнивать транзисторные гетероструктуры можно только при близких длинах затвора. Попытки сравнения при большой разнице в длине затвора могут приводить к большим погрешностям даже для одного типа гетероструктур. Примером могут служить оценки, приведенные в предыдущем разделе. Работа транзистора также зависит от паразитных элементов, в большей степени определяемых его топологией [22]. Топология транзистора разрабатывается с учетом отведения тепла из активных областей устройства (это особенно важно для транзисторов с большой выходной мощностью), что в свою очередь влияет на нелокальную динамику электронов. По этим причинам характеристики мощных, массово производимых транзисторов ниже, чем результаты, полученные от устройств с короткими затворами, имеющими малую ширину и в результате обладающими почти идеальным теплоотводом.

Таблица 2

СВЧ-характеристики для различных технологий изготовления транзисторов

Технология	Длина затвора, нм	f_r , ГГц	f_{max} , ГГц	Усиление (f), дБ	Плотность мощности, мВт/мм	Ссылка
GaAs pHEMT	150	70 – 85	120	9 (40)	800	[23]
	135	100	180	25 (20)	640	[24]
GaAs mHEMT	125	150	250	24 (34)	30	[24]
InP HEMT	100	120	500	12,1 (94)	300	[25]
GaN/Si (мощный)	100	110	180	18 (40)	4000	[24]
GaN/SiC	150	104	205	14 (40)	2500	[5]
GaN/SiC (ВЧ)	140	90	220	5,5 (94)	1500	[26]
					2000	[27]
GaN/SiC	160	40	170	10 (40)	10500	[28]
GaN/SiC	100	94	212	7,5 (94)	8840	[29]
GaAs DA-DpHEMT	140	45	250	20 (40) 9,8 – 11,5 (94)*	1500 – 2000**	Эта работа

*Аппроксимация.

**Оценка.

Табл. 2 для DA-DpHEMT дает оценку усиления и удельной выходной мощности в мм-диапазоне до 94 ГГц. Эти оценки показывают хорошие перспективы для нового прибора. Видно, что разработанный транзистор превосходит стандартные GaAs DpHEMT по усилению и удельной мощности. Он также почти не уступает GaAs mHEMT и InP HEMT по усилению и при этом значительно превосходит их по удельной мощности. По удельной мощности разработанный транзистор уступает только нитридгаллиевым транзисторам, но значительно превосходит их по усилению. При этом также надо помнить, что GaN-транзисторы при достижении максимальной мощности теряют 5...6 дБ усиления [5], а в GaAs-транзисторах усиление падает на 2...3 дБ. Следует также отметить, что первые экспериментальные образцы DA-DpHEMT сравниваются с устройствами, изготовленными по уже отработанным технологиям.

Обращают на себя внимание две интересные и пока необъяснённые особенности разработанных транзисторов. Усиление прибора растёт с увеличением расстояния затвор – сток, а максимальное усиление оказывается почти постоянной величиной в диапазоне частот 25...55 ГГц. Возможно, это происходит из-за того, что на этих частотах происходит компенсация емкости обратной связи внутреннего транзистора из-за пролетных эффектов области затвор-сток.

Следует также отметить, что использованная гетероструктура $Al_{0,3}Ga_{0,7}As-In_{0,22}Ga_{0,78}As-Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ с донорно-акцепторным легированием хотя и демонстрирует очень высокие характеристики по проводимости в слабых полях, однако из-за относительно небольшой глубины квантовой ямы канала является, возможно, далеко не оптимальной, а близкую (возможно, несколько большую) удельную плотность тока при примерно таких же пробивных напряжениях, но заметно большем коэффициенте усиления [18, 19] можно получить на исследованных в [30] гетероструктурах $In_{0,2}Al_{0,8}As-In_{0,2}Ga_{0,8}As-In_{0,2}Al_{0,8}As$, имеющих такую же ширину запрещённой зоны в слое канала. Ещё дальше продвинуться вверх по частотному диапазону (до двух раз), по оценкам [19], можно,

используя структуры $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}-\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}-\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ с двусторонним относительно слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ -канала донорно-акцепторным легированием, однако за это придется расплачиваться падением пробивного напряжения из-за меньшей ширины запрещённой зоны в слое узкозонного $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ -канала.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые были изготовлены и исследованы новые DA-DpHEMT мм-диапазона длин волн. Гетероструктура AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с донорно-акцепторным легированием вокруг InGaAs-канала позволила увеличить концентрацию электронов, их локализацию и дрейфовую скорость. Транзистор с 0,14-мкм Т-образным затвором на такой структуре продемонстрировал максимальную удельную плотность тока стока порядка 0,7 А/мм, пробивное напряжение затвор – сток в диапазоне 23...31 В, что соответствует удельной выходной мощности порядка 2 Вт/мм, и MSG более 15 дБ на 40 ГГц и более чем 10 дБ на 67 ГГц, $f_t = 45$ ГГц, $f_{\max} = 250$ ГГц. Продemonстрировано, что DA-DpHEMT с длиной затвора 0,1...0,15 мкм может успешно работать в диапазоне длин волн вплоть до 3-мм. Результаты показывают, что донорно-акцепторное легирование является эффективным способом улучшения характеристик транзисторных гетероструктур, а транзисторы на этих гетероструктурах могут работать даже в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Wang, H.** Power amplifiers performance survey 2000-present / H. Wang. – [Online]. Available: <https://gems.ece.gatech.edu/PAsurvey.html>.
3. **Dasgupta, Nidhi, S.** N-polar GaN/AlN MIS-HEMT with $f_{\max}$ of 204 GHz for kaband applications / Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller, J. S. Speck and U. K. Mishra // IEEE Electron Device Lett. – Dec. 2011. – Vol. 32, No 12. – P. 1683 – 1685. – DOI: 10.1109/LED.2011.2168558.
4. **Romanczyk, B.** Demonstration of constant 8 W/mm power density at 10, 30 and 94 GHz in state-of-the-art millimeter-wave n polar GaN MISHEMTs / B. Romanczyk et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – Jan. 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 45 – 50. – DOI: 10.1109/TED.2017.2770087.
5. **Zhang, Y.** Millimeter-wave AlGaIn/GaN HEMTs with 43.6 % power-added-efficiency at 40 GHz fabricated by atomic layer etching gate recess / Y. Zhang et al. // IEEE Electron Device Lett. – May 2020. – Vol. 41, No 5. – P. 701 – 704. – DOI: 10.1109/LED.2020.2984663.
6. **Tang, Y.** Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with $f_t/f_{\max}$ of 454/444 GHz / Y. Tang et al. // IEEE Electron Device Lett. – Jun. 2015. – Vol. 36, No 6. – P. 549 – 551. – DOI: 10.1109/LED.2015.2421311.
7. **Alizadeh, A.** On design of wideband compact-size Ka/Q-band high-power amplifiers / A. Alizadeh, M. Frounchi and A. Medi // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – Jun. 2016. – Vol. 64, No 6. – P. 1831 – 1842. – DOI: 10.1109/TMTT.2016.2554578.
8. **Barabi, A.** A +27 dBm P_{sat} 27 dB gain W-band power amplifier in 0.1 μm GaAs / A. Barabi, N. Ross, A. Wolfman, O. Shaham and E. Socher // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. – Dec. 2018. – P. 1345 – 1347. – DOI: 10.1109/MWSYM.2018.8439854.
9. **Ajayan, J.** InP high electron mobility transistors for submillimetre wave and terahertz frequency applications: A review / J. Ajayan et al. // AEU – Int. J. Electron. Commun. – Sep. 2018. – Vol. 94. – P. 199 – 214. – DOI: 10.1016/j.aeu.2018.07.015.
10. **Mei, X.** First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process / X. Mei et al. // IEEE Electron Device Lett. – Apr. 2015. – Vol. 36, No 4. – P. 327 – 329. – DOI: 10.1109/LED.2015.2407193.
11. **John, L.** A 280 – 310 GHz InAlAs/InGaAs mHEMT power amplifier MMIC with 6.7–8.3 dBm output power / L. John et al. // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – Feb. 2019. – Vol. 29, No 2. – P. 143 – 145. – DOI: 10.1109/LMWC.2018.2885916.

12. **Foutz, B. E.** Transient electron transport in wurtzite GaN, InN and AlN / 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.
13. **Лукашин, В. М.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, А. Б. Соколов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
14. **Zhuravlev, K. S.** New heterostructures for higher power microwave DA-pHEMTs / K. S. Zhuravlev et al. // Advances in Microelectronics: Reviews. – 2019. – Vol. 2. – Barcelona, Spain: IFSA. – P. 251 – 288.
15. **Лукашин, В. М.** Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, А. А. Капралова // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 3. – С. 81 – 87.
16. **Борисов, А. А.** Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рHEMT транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, А. А. Маковецкая, В. И. Новоселец, А. Б. Пашковский, А. И. Торопов, Н. Д. Урсуляк, С. В. Щербаков // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.
17. **Протасов, Д. Ю.** Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рHEMT-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / Д. Ю. Протасов, Д. В. Гуляев, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Е. В. Ерофеев, К. С. Журавлев // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 6. – С. 77 – 84.
18. **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 ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 17. – С. 103 – 110.
19. **Пашковский, А. Б.** Нелокальная динамика электронов в транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / А. Б. Пашковский, А. С. Богданов, В. М. Лукашин, С. И. Новиков // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 3. – С. 210 – 225. – DOI: 10.31857/S0544126920030059.
20. **Gulyaev, D. V.** Influence of the additional p^+ doped layers on the properties of Al-GaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures for high power SHF transistors / D. V. Gulyaev et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – Mar. 2016. – Vol. 49, No 9. – Art. No 095108. – DOI: 10.1088/0022-3727/49/9/095108.
21. **Williams, R. E.** Graded channel FET's: improved linearity and noise figure / R. E. Williams and D. W. Shaw // IEEE Trans. Electron Devices. – Jun. 1978. – Vol. 25, No 6. – P. 600 – 605. – DOI: 10.1109/T-ED.1978.19143.
22. **Saemitsu, T.** InP and GaN high electron mobility transistors for millimeter-wave applications / T. Saemitsu // IEICE Electron. Express. – 2015. – Vol. 12, No 13. – Art. No 20152005. – DOI: 10.1587/elex.12.20152005.
23. UMS Foundry Brochure 2019–2020. Accessed: Nov. 21, 2020. [Online]. Available: https://www.ums-rf.com/wp-content/uploads/2019/10/2019-2020_Brochure_Foundry_Low-version.pdf.
24. OMMIC Catalog 2019 V2. Accessed: Nov. 21, 2020. [Online]. Available: https://www.ommic.com/wp-content/uploads/2019/09/OMMIC_Catalog-2019_V2.pdf.
25. **Yu, M.** W -band InP HEMT MMICs using finite-ground coplanar waveguide (FGCPW) design / M. Yu et al. // IEEE J. Solid-State Circuits. – Sep. 1999. – Vol. 34, No 9. – P. 1212 – 1218. – DOI: 10.1109/4.782078.
26. **Brown, A.** W -band GaN power amplifier MMICs / A. Brown, K. Brown, J. Chen, K. C. Hwang, N. Koliass and R. Scott // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Baltimore, MD, USA. – Dec. 2011. – P. 1 – 4. – DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972571.
27. **Margomenos, A.** GaN technology for E , W and G -band applications / A. Margomenos et al. // Proc. Compound Semiconductor Integr. Circuit Symp. (CSICs), La Jolla, CA, USA. – Oct. 2014. – P. 1 – 4. – DOI: 10.1109/CSICS.2014.6978559.
28. **Palacios, T.** High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka -band applications / T. Palacios et al. // IEEE Electron Device Lett. – Nov. 2005. – Vol. 26, No 11. – P. 781 – 783. – DOI: 10.1109/LED.2005.857701.
29. **Romanczyk, B.** W -band power performance of SiN-passivated n polar GaN deep recess HEMTs / B. Romanczyk et al. // IEEE Electron Device Lett. – Mar. 2020. – Vol. 41, No 3. – P. 349 – 352. – DOI: 10.1109/LED.2020.2967034.
30. **Василевский, И. С.** / И. С. Василевский, А. Н. Виниченко, Н. И. Каргин // 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения: тез. докл. 24.05.2017. – С. 28 – 29.

Статья поступила 10 марта 2021 г.

УДК 621.3.049.77

ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 10 И 20 Вт В X-ДИАПАЗОНЕ

А. С. Ефимов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов, Н. А. Мартынова, А. А. Трофимов

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

Рассмотрены результаты разработки двух гибридно-монокристаллических интегральных схем (ГМИС) однокаскадных усилителей мощности X-диапазона с выходной мощностью 10 и 20 Вт соответственно. Каждая из схем содержит: кристаллы GaN-транзисторов, согласующие платы (входная и выходная), изготовленные на полупроводниковом арсениде галлия, и поликорковую рамку, которые установлены на металлическое основание. ГМИС на транзисторах TGF2023-2-01 в диапазоне частот 8...12 ГГц имеет выходную мощность насыщения более 10 Вт при КПД свыше 34 %, а ГМИС на транзисторах TGF2023-2-02 – выходную мощность более 20 Вт при КПД более 35 % в полосе 9...12 ГГц.

КС: усилитель мощности, гибридно-монокристаллическая интегральная схема, X-диапазон, GaN HEMT, GaAs

A 10 AND 20 W X-BAND POWER AMPLIFIER QUASI-MMICs

A. S. Efimov, A. M. Temnov, K. V. Dudinov, N. A. Martynova, A. A. Trofimov

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

Two one-stage X-band power amplifier quasi-MMICs are reported in this paper. Each of the power amplifiers include GaN HEMT dice, matching networks (input and output) made on semi-insulating GaAs and polycor frame established on metal plate. The first power amplifier utilizes two TGF2023-2-01 and demonstrates more than 10 W output power with above 34 % PAE over 8...12 GHz band. The second power amplifier utilizes two TGF2023-2-02 to surpass 20 W output power with greater than 35 % PAE over 9...12 GHz band.

Keywords: power amplifier, quasi-MMIC, X-band, GaN HEMT, GaAs

1. ВВЕДЕНИЕ

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

Для мощных усилителей СВЧ используется технология GaAs pHEMT, однако технология GaN HEMT имеет неоспоримые преимущества по сравнению с GaAs- или Si-технологиями – высокая плотность мощности, высокие рабочие напряжения, повышенная теплопроводность подложки [1, 2].

В статье представлены результаты разработки двух однокаскадных балансных ГМИС СВЧ-усилителей на транзисторах TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02 с выходной мощностью 10 и 20 Вт соответственно.

2. РАЗРАБОТКА СХЕМ

Разработка УМ СВЧ с выходной мощностью более 10 Вт на GaAs-транзисторах требует применения транзисторов с общей шириной затвора более 12 мм. Эти транзисторы имеют большие габаритные размеры. Согласование с низкими входным и выходным сопротивлениями

транзистора в широкой полосе частот обычно не обходится без потерь в согласующих цепях, и эффективность такой схемы становится крайне низкой. Применение нитридгаллиевых СВЧ-транзисторов в этом случае является более предпочтительным и позволяет решить задачу по разработке ГМИС УМ X-диапазона с выходной мощностью более 10 Вт при КПД 35 % и полосой рабочих частот порядка 30 %.

Конструкция ГМИС СВЧ предполагает, что пассивная часть усилителя выполнена монолитно – входные и выходные согласующие цепи реализованы на кристаллах полупроводника (GaAs, Si). Активные элементы – кристаллы полевых СВЧ GaN-транзисторов. Каждый вывод транзистора соединяется с контактными площадками входной и выходной согласующих цепей золотыми проволоками. В данной работе пассивные монолитные платы согласующих цепей изготавливаются по технологии GaAs МИС СВЧ, что включает изготовление конденсаторов, резисторов, индуктивностей и сквозных отверстий. Подобная реализация согласующих цепей позволяет проектировать широкополосные согласующие цепи с многоконтурным согласованием, применяя сосредоточенные элементы, а также уменьшить габаритные размеры УМ.

Отечественные производители на данный момент выпускают мощные СВЧ GaN-транзисторы с рабочей частотой не более 6 ГГц в корпусированном исполнении, которые имеют большие габаритные размеры и непригодны для применения в предлагаемой гибридно-монокристалльной конструкции [3].

Транзисторы TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02 выполнены по технологии GaN с длиной затвора 0,25 мкм на подложке из SiC толщиной 100 мкм на фабрике Qorvo. Расчет выходных характеристик и требуемых нагрузок был произведен с целью достижения максимальной выходной мощности с помощью нелинейных моделей транзисторов [4]. Результаты расчета импеданса и выходных характеристик транзисторов на частоте 12 ГГц представлены на рис. 1 и в табл. 1. При этом выходная мощность транзисторов с шириной затвора 1,25 и 2,5 мм превышает 6 и 12 Вт соответственно при КПД более 50 %. Балансная структура суммирования мощностей двух идентичных транзисторов позволит реализовать УМ с выходной мощностью 10 и 20 Вт и обеспечит хорошее согласование по входу и выходу ГМИС.

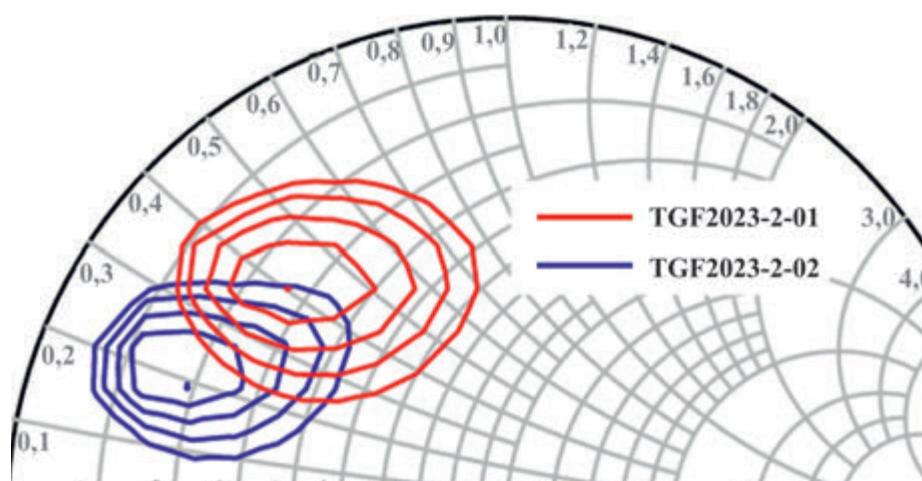


Рис. 1. Результаты расчета импеданса, обеспечивающего максимальную выходную мощность, и контуры выходной мощности стабилизированных транзисторов TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02 (шаг – 0,5 дБ, $F_0 = 12$ ГГц, $V_d = 30$ В, $V_g = -2,9$ В, $Z_0 = 50$ Ом)

Таблица 1

Результаты расчета Load Pull стабилизированных транзисторов
($F_0 = 12$ ГГц, $V_d = 30$ В, $V_g = -2,9$ В)

Транзистор	Ширина затвора, мм	Выходная мощность, дБ·мВт	КПД, %	Z_{IN} , Ом	Z_{LOAD} , Ом
TGF2023-2-01 ($P_{вх} = 28$ дБ·мВт)	1,25	37,9	56,6	$3 + j0,1$	$13,2 + j20$
TGF2023-2-02 ($P_{вх} = 33$ дБ·мВт)	2,5	40,9	52,2	$2,07 + j5,3$	$9,5 + j9,4$

Входная согласующая цепь преобразует 50 Ом к требуемому оптимальному импедансу источника (около 2 Ом). Двухконтурная цепь применена для достижения широкополосного согласования [5]. Кроме того, реализованы разделительные конденсаторы и цепь смещения. Выходная согласующая цепь преобразует Z_{load} к 50 Ом и обеспечивает подвод положительного питания.

Согласующие цепи изготовлены на основе технологического процесса МИС СВЧ на подложке GaAs, позволяющего создавать два типа конденсаторов (50 и 400 пФ/мм²), тонкопленочные NiCr-резисторы (40 Ом/□) и GaAs-резисторы (100 Ом/□) и сквозные металлизированные отверстия. На плате выходной согласующей цепи дополнительно увеличена толщина верхнего слоя металлизации с целью минимизации потерь и повышения надёжности.

Возможность варьировать номинал элементов цепей согласования позволяет применить идентичные кристаллы входной и выходной согласующих цепей.

Все кристаллы схемы компактно расположены внутри рамки 4,5 × 3 мм: входная согласующая цепь, тонкопленочные конденсаторы общим номиналом 100 пФ по цепи отрицательного питания, кристаллы транзисторов, выходная согласующая цепь, разделительные конденсаторы по выходу и тонкопленочные конденсаторы общим номиналом 100 пФ по цепи положительного питания.

Рамка, выполненная на подложке из поликора толщиной 500 мкм, включает контактные площадки питания, выводы СВЧ с волновым сопротивлением 50 Ом и мосты Ланге, имеет габаритные размеры 7,5×6 мм. Кристаллы и рамка монтируются на позолоченное металлическое основание размерами 7,5×12×0,6 мм. Фотографии внешнего вида рамок с окном, где расположены элементы схемы разработанных ГМИС СВЧ-усилителей мощности, представлены на рис. 2.

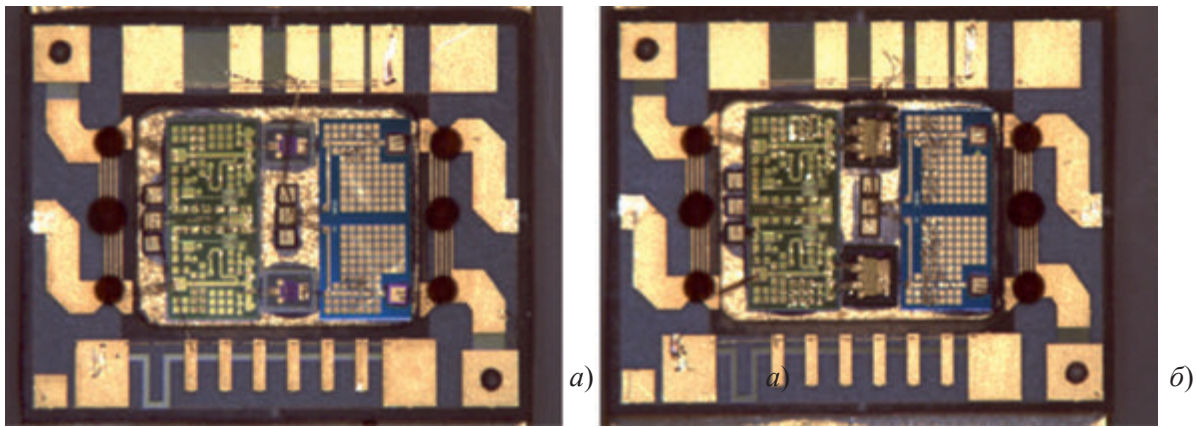


Рис. 2. Фотографии рамок с окном ГМИС СВЧ-усилителей мощности на транзисторах TGF2023-2-01 (а) и TGF2023-2-02 (б)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Выходные параметры измерялись при напряжениях +30 и –5 В в импульсном режиме с длительностью импульса 10 мкс и скважностью 10.

Малосигнальные параметры разработанных схем представлены на рис. 3. Обе схемы имеют хорошее согласование как по входу, так и по выходу. Коэффициент усиления превышает 10 дБ в схеме на транзисторах TGF2023-2-01 в диапазоне частот 8...12 ГГц, а в схеме на транзисторах TGF2023-2-02 в диапазоне 9...12 ГГц. Таким образом, по уровню коэффициента усиления 10 дБ первая схема имеет рабочую полосу 40 %, а вторая – 30 %.

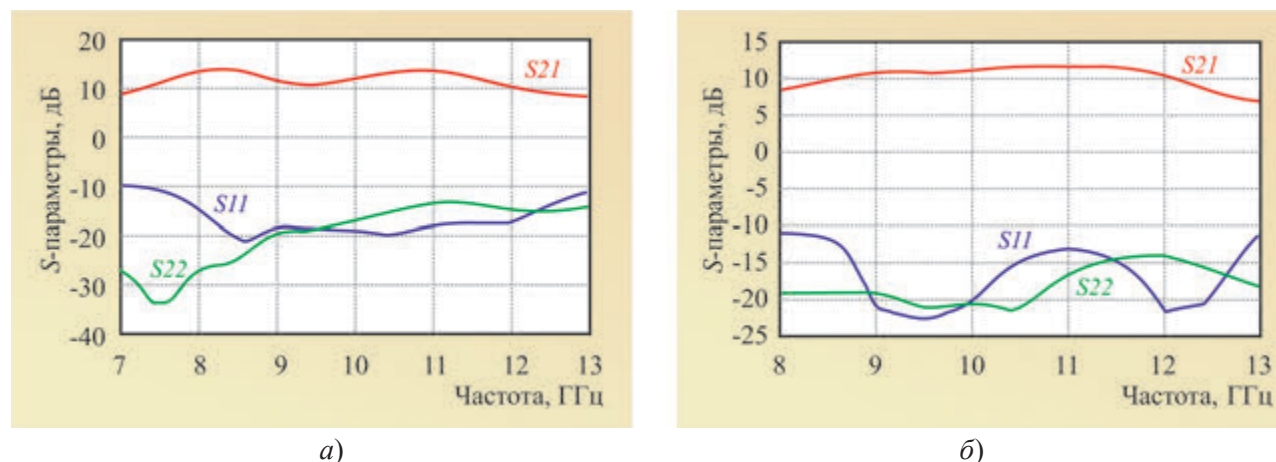


Рис. 3. Малосигнальные параметры ГМИС усилителей мощности на транзисторах TGF2023-2-01 (а) и TGF2023-2-02 (б)

Выходная мощность и КПД усилителя на транзисторах TGF2023-2-01 представлены на рис. 4, а. Уровень входной мощности – 1,5 Вт. Выходная мощность в диапазоне 8...12 ГГц составляет порядка 10 Вт при КПД порядка 35 %.

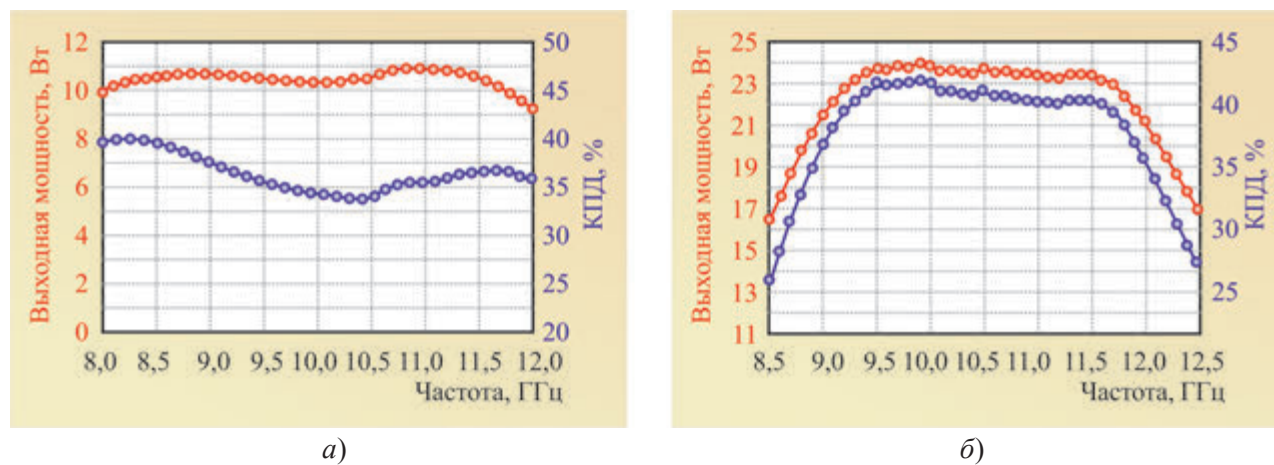


Рис. 4. Выходная мощность и КПД ГМИС усилителей мощности на транзисторах TGF2023-2-01 (а) и TGF2023-2-02 (б)

Выходная мощность и КПД усилителя на транзисторах TGF2023-2-02 представлены на рис. 4, б. Уровень входной мощности – 4 Вт. Выходная мощность в диапазоне 9...12 ГГц пре-

вышает 20 Вт при КПД более 35 %. Таким образом, выходная мощность превышает 4 Вт/мм в полосе частот 30 %.

Зависимости выходной мощности, КПД и коэффициента усиления от входной мощности на фиксированных частотах представлены на рис. 5. Как видно из графиков, выходная мощность насыщения усилителей превышает 10 и 20 Вт при КПД более 35 % на границах рабочих диапазонов. Параметры на всех частотах имеют плавные характеристики без признаков всплеска и нестабильности.

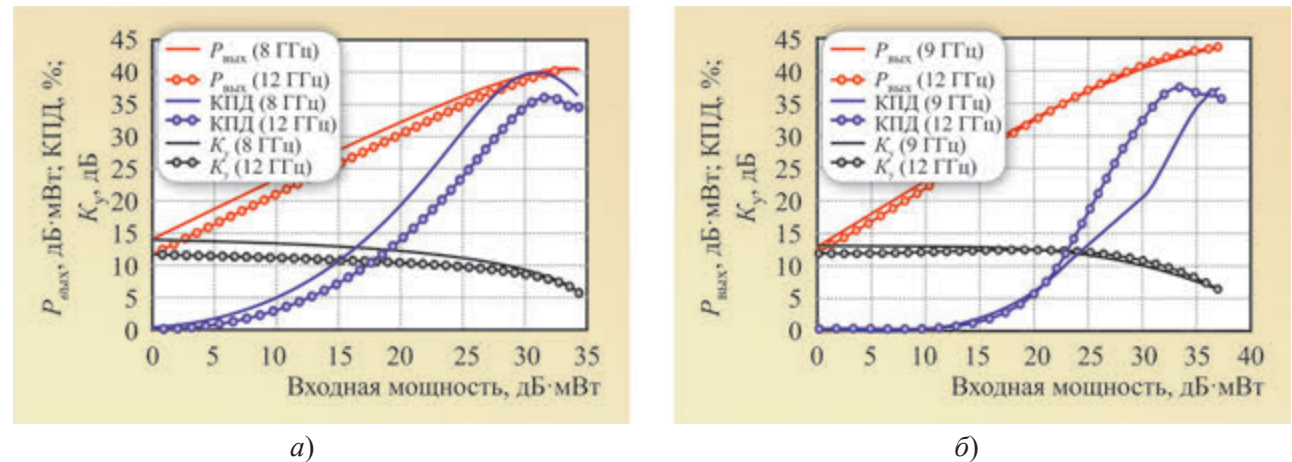


Рис. 5. Выходная мощность, коэффициент усиления и КПД в зависимости от входной мощности на разных частотах ГМИС усилителей мощности на транзисторах TGF2023-2-01 (а) и TGF2023-2-02 (б)

В табл. 2 представлены для сравнения полученные результаты и опубликованные данные о разработке усилителей мощности X-диапазона, реализованных в гибридно-монокристаллической и монокристаллической конструкциях. Схемы, результаты разработки которых представлены в данной статье, имеют сопоставимые габаритные размеры и электрические параметры, а полоса рабочих частот соответствует схемам в монокристаллическом исполнении. Достоинство разработанных ГМИС в том, что они не требуют дополнительных блокировочных конденсаторов по питанию.

Таблица 2

Сравнительная таблица с опубликованными ранее работами

Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБ·мВт	КПД, %	Габаритные размеры, мм	Напряжение стока, В	$K_{\text{у}}$ по мощности, дБ	Исполнение	Ссылка
8 – 12	40	34	7,5×6*	30	7	ГМИС	Данная работа
9 – 12	43	35	7,5×6*	30	7	ГМИС	Данная работа
9 – 10	43	35	5×5	40	9	ГМИС	[6]
8,4 – 9,8	48	36	6,42×4,56	30	8	ГМИС	[7]
8,2 – 10	38,3	38,5**	–	40	6	ГМИС	[8]
8,4 – 8,7	48	25,4**	8,39×5,18	48	4	ГМИС	[9]
9,5 – 11,5	42,6	25,6	5,5×3,8	35	27,9	ГМИС	[10]
7,5 – 12,5	43	18,9	5,5×3,9	28	18	МИС	[11]
8,8 – 10,8	45 – 46	38	4,5×4,6	28	17	МИС	[12]
9 – 10,5	37,8	38	3,9×2,4	17	12,5	ГМИС	[13–14]

* Размер без учета креплений под винты.

** Рассчитан из КПД по стоку.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты проектирования ГМИС однокаскадных УМ X-диапазона. Разработанные усилители выполнены по балансной схеме, с применением транзисторов TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02 для достижения 10 и 20 Вт соответственно. Входная и выходная согласующие цепи изготовлены монолитно на полуизолирующем арсениде галлия. Кристаллы транзисторов и согласующих цепей, тонкопленочные конденсаторы расположены в рамке размерами 4,5×3 мм, все необходимые соединения выполнены золотыми проволоками.

ГМИС УМ на транзисторах TGF2023-2-01 в диапазоне частот 8...12 ГГц имеет выходную мощность насыщения более 10 Вт при КПД свыше 34 %. Схема на транзисторах TGF2023-2-02 демонстрирует выходную мощность более 20 Вт при КПД более 35 % в полосе 9...12 ГГц.

Компактные размеры усилителей и хорошее согласование делают их пригодными для каскадирования и суммирования в модулях УМ СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Runton, D. W.** History of GaN: high-power RF gallium nitride (GaN) from infancy to manufacturable process and beyond / D. W. Runton, B. Trabert, J. B. Shealy and R. Vetry // IEEE Microwave Magazine. – May 2013. – Vol. 14, No 3. – P. 82 – 93. – doi: 10.1109/MMM.2013.2240853.
2. **Pengelly, R. S.** A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs / R. S. Pengelly, S. M. Wood, J. W. Milligan, S. T. Sheppard and W. L. Pribble // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – June 2012. – Vol. 60, No 6. – P. 1764 – 1783. – doi: 10.1109/TMTT.2012.2187535.
3. **Бельков, В.** Мощные СВЧ и переключающие транзисторы на основе нитрида галлия / В. Бельков, А. Цоцорин, И. Семейкин, М. Черных // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2020. – № 5 (196). – С. 78 – 81.
4. Modelithics Qorvo GaN Models v.20.4.4. – <https://www.modelithics.com/mvp/qorvo>.
5. **Ефимов, А. С.** Гибридно-монокристалльная интегральная схема усилителя Ku-диапазона с выходной мощностью 1 Вт / А. С. Ефимов, А. М. Темнов, К. В. Дудинов, Н. А. Мартынова, А. А. Трофимов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2019. – № 3 (542). – С. 105 – 111.
6. **Leckey, J. G.** A 25 W X-band GaN PA in SMT package / J. G. Leckey // 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference, Rome, Italy. – 2014. – P. 397 – 399. – doi: 10.1109/EuMIC.2014.6997876.
7. **Resca, D.** A miniature 70 W quasi-MMIC PA block suitable for highly integrated X-band pulsed SSPA schemes / D. Resca and F. Scappaviva // 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), London, UK. – 2016. – P. 225 – 228. – doi: 10.1109/EuMIC.2016.7777531.
8. **Sung & Kim, Dongsu & Yook, Jong & Kim, Sung & Lee, Won & Kim, Jun & Yook, Jong-Gwan.** An X-band RLC matched power amplifier using quasi-MMIC technology // Microwave and Optical Technology Letters. – 2015. – Vol. 57. – P. 2803 – 2807. – doi: 10.1002/mop.29449.
9. **Jeong, J.** Quasi-MMIC high power amplifier with silicon IPD matching network / J. Jeong, P. Kim, P. Pech, Y. Jeong and S. Lee // 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain. – 2018. – P. 340 – 343. – doi: 10.23919/EuMC.2018.8541724.
10. **Kamioka, J.** A low-cost 30-W class X-band GaN-on-Si MMIC power amplifier with a GaAs MMIC output matching circuit / J. Kamioka et al. // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Madrid. – 2018. – P. 93 – 96. – doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539903.
11. **Yu, G.** A X-band 20 W power amplifier MMIC with 50 % bandwidth using 6-inch GaN technology / G. Yu et al. // 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore. – 2019. – P. 408 – 410. – doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038830.
12. **Shin, D.** X-band GaN MMIC power amplifier for the SSPA of a SAR system / D. Shin, I. Yom and D. Kim // 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), Seoul, Korea (South). – 2017. – P. 93 – 95. – doi: 10.1109/RFIT.2017.8048093.
13. **Мякишев, Ю. Б.** Результаты разработки квазимонокристалльных усилителей мощности СВЧ на нитриде галлия / Ю. Б. Мякишев, В. И. Гуляев, В. В. Глазунов, Г. С. Зыкова, В. Н. Локонов, Ю. Н. Раков // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике. – Н. Новгород, 2011. – С. 60 – 64.
14. **Глазунов, В. В.** Двухкаскадный AlGaIn/GaN усилитель X-диапазона / В. В. Глазунов, В. И. Гуляев, Г. С. Зыкова, Ю. Б. Мякишев, В. П. Чалый // 20 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2010. – Т. 1. – С. 115 – 116.

Статья поступила 12 апреля 2021 г.

УДК 621.396.966.9

ФЕРРИТОВЫЙ ВЕНТИЛЬ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДА ДЛЯ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В *Ka*-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В. В. Демшиевский^{1,2}, А. Н. Пашков^{1,2}, А. С. Семенов¹,
А. А. Алексеев¹, А. Г. Налогин¹, Л. А. Троицкая²,
Д. А. Воробьев¹, Е. С. Пирожкова², А. В. Цыберт¹

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

²Филиал РТУ МИРЭА, г. Фрязино

Рассмотрены особенности разработки и изготовления ферритовых развязывающих приборов на основе интегрированных в подложку волноводов. Приведены и сопоставлены результаты электродинамического моделирования и экспериментальных измерений характеристик вентилей, работающих в *Ka*-диапазоне частот. Показана необходимость дальнейшей разработки отечественных ферритовых развязывающих приборов на основе интегрированных в подложку волноводов.

КС: ферритовые развязывающие приборы, ферритовые вентили, интегрированные в подложку волноводы, развязка, ферритовая подложка, микрополосковый переход

FERRITE ISOLATOR BASED ON SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE FOR DEVICES, FUNCTIONING IN *Ka*-FREQUENCY RANGE

V. V. Demshevsky^{1,2}, A. N. Pashkov^{1,2}, A. S. Semenov¹,
A. A. Alexeev¹, A. G. Nalagin¹, L. A. Troitskaya²,
D. A. Vorobyev¹, E. S. Piroshkova², A. V. Tsybert¹

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

²MIREA, Fryazino

The features of the development and manufacture of ferrite decoupling devices based on substrate integrated waveguides are considered. The results of electrodynamic modeling and experimental measurements of the characteristics of isolator operating in the *Ka*-frequency range are presented and compared. The necessity of further development of domestic ferrite decoupling devices based on the substrate integrated waveguides is shown.

Keywords: ferrite decoupling devices, ferrite isolators, substrate integrated waveguides, isolation, ferrite substrate, microstrip junction

1. ВВЕДЕНИЕ

После появления микрополосковых линий и до недавнего времени, за исключением классических волноводов, циркуляторы строились на основе открытых линий передачи, что давало несомненные плюсы в технологичности производства и большой выигрыш в массогабаритных параметрах. Но такие решения давали и свои недостатки в применении, например появление паразитных взаимосвязей по реактивному полю внутри СВЧ-модулей, что требовало вести поиск решений по устранению паразитных резонансов. Развитие технологий микроминиатюризации

устройств и появление новых типов СВЧ-линий передачи дало несомненный толчок в развитии СВЧ-техники и сформировало несколько новых направлений. Одним из таких направлений является разработка ферритовых развязывающих приборов (ФРП) на основе интегрированных в подложку волноводов (ИПВ).

ФРП на основе ИПВ являются легкими, тонкими, электрически герметичными СВЧ-структурами и имеют большие возможности интеграции с другими устройствами. В целом они сохраняют большую часть свойств классических прямоугольных волноводов, но не имеют возможности передавать сигнал на высоких мощностях.

В зарубежной литературе имеется ряд статей, посвященных этому направлению. Так, в работе [1] приведена топология Y -циркулятора на основе ИПВ, работающего в X -диапазоне и имеющего рабочую полосу частот 10,75 %. Потери при прохождении сигнала через циркулятор – не более 0,5 дБ. Аналогичная конструкция циркулятора, но работающего в диапазоне 54...56 ГГц с потерями не более 0,8 дБ, приведена в статье [2]. В работе [3] представлена разработка реконфигурируемого ферритового фильтра на основе Y -циркулятора, в котором использована технология ИПВ. Центральная частота – 6 ГГц, ширина рабочей полосы около – 29,2 % при развязке 15 дБ и прямых потерях 0,8 дБ. В работе [4] представлен компактный диплексер на основе ИПВ, который состоит из двух фильтров и циркулятора. Каналы диплексера имеют относительную ширину полосы 4 и 5 % при частотах 32 и 33 ГГц соответственно. Особенности циркулятора в том, что в нём используются индуктивные окна для увеличения пропускной способности. Также имеется ряд патентов [5–8], в которых описаны конструкции компактных Y -циркуляторов на основе ИПВ различных конфигураций с рабочей полосой 10...20 %.

Интерес к разработкам в этом направлении говорит о том, что изготовление ферритовых устройств в интегральном исполнении является целесообразным, более того, ФРП на основе ИПВ появились недавно, и их свойства исследованы на сегодняшний день недостаточно глубоко.

2. МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯТОРА

Y -циркулятор на основе ИПВ представляет собой три идентичных отрезка линии передачи, каждый из которых образован двумя рядами металлизированных отверстий диаметром d , расположенных в слое диэлектрика и разнесенных друг от друга на W_{SIW} . Отрезки соединяются между собой под углом 120 град через общие отверстия, тем самым образуя Y -образный бинарный делитель мощности. В центре делителя располагается ферритовая вставка, имеющая диаметр D_1 (рис. 1), D_2 – диаметр резонаторной области циркулятора.

Рис. 1. Общий вид Y -циркулятора на основе ИПВ



Основные характеристики ФРП зависят от свойств феррита и величины внешнего поля подмагничивания. Подбирая их параметры, можно регулировать достижимый уровень развязки, ширину рабочей полосы частот и центральную частоту.

В нашем случае, изменяя ширину ИПВ, мы определяем нижнюю частоту устройства, а выбирая соотношение D_1 к D_2 , получаем ширину рабочей полосы ФРП.

Проведем расчет и исследование топологии Y-циркулятора на основе ИПВ, а также сравнение экспериментальных результатов с теорией.

Параметры ИПВ рассчитаем по следующим формулам:

$$\lambda_{кр} = 2a, \quad (1)$$

$$\lambda_{кр} = 2a_{equ}, \quad (2)$$

$$a_{equ} = a / \sqrt{\epsilon_r}, \quad (3)$$

$$W_{SIW} = a_{equ} + 2d, \quad (4)$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны в прямоугольном волноводе; a_{equ} – размер широкой стенки волновода с учетом свойств диэлектрика; W_{SIW} – суммарная ширина ИПВ с отверстиями.

Будем изменять величину внешнего смещения магнитного поля внутри ферритовой вставки в пределах от 3000 до 450000 А/м, а также диаметры D_1 и D_2 , производя тем самым поиск наилучшего соотношения, добиваясь наибольшей ширины рабочей полосы частот и ориентируясь при этом на уровень развязки. Толщина диэлектрической подложки – 0,25 мм.

3. МАТЕРИАЛ ПОДЛОЖКИ

Основным элементом любого ФРП является ферритовый материал, за счёт которого удаётся достичь невзаимных свойств в заданном диапазоне частот.

Как правило, ФРП работают либо в «дорезонансном», либо в «зарезонансном» режиме вблизи естественного ферромагнитного резонанса (ФМР) ферритового материала, из которого они изготовлены. Положение ФМР определяется намагниченностью насыщения феррита $4\pi M_s$, внутренним полем анизотропии H_A (незначительно у всех ферритов, кроме ферритов с гексагональной структурой) и величиной внешнего магнитного поля H_0 . Так, для тонкой пластины, намагниченной нормально к её плоскости, собственная частота прецессии будет вычисляться по формуле [9]:

$$\omega_{пл} = \gamma(H_0 + H_A - 4\pi M_s), \quad (5)$$

где $\gamma = 2,8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение.

Из соотношения (5) видно, что если нам необходимо разработать ФРП в верхнем частотном диапазоне относительно естественного ФМР материала, то необходимо либо увеличивать внешнее магнитное поле H_0 за счёт увеличения габаритов магнитной системы, либо уменьшать величину намагниченности насыщения феррита.

Известно и то, что за счёт увеличения намагниченности насыщения удастся достичь большей широкополосности у приборов, поэтому при разработке ФРП миллиметрового диапазона длин волн необходимо выбирать ферритовые материалы с большим значением намагниченности насыщения ($4\pi M_s$) [10].

В качестве материала подложек для прибора 8-мм диапазона длин волн был выбран феррит со структурой типа шпинель, разработанный в АО «НПП «Исток» им. Шокина» – никель-цинковая

шпинель (НЦВ), обладающий большой намагниченностью насыщения. Электромагнитные параметры материала представлены в таблице.

Характеристики НЦВ

Наименование	Обозначение	Значение	Измеренное значение
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	12,3 – 13,7	13
Тангенс угла суммарных потерь	$\text{tg}(\delta)_{\Sigma}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Намагниченность насыщения, кА/м	M_s	380 ± 20	380
Плотность, г/см ³	ρ	5,1	5,1

4. БАЗОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Проведем анализ и сравнение результатов моделирования, разработки и исследования базовых электродинамических моделей Y-циркулятора и вентилья, а также изготовленного на их основе экспериментального образца вентилья на основе ИПВ.

Для подробного исследования и дальнейшей практической реализации была разработана электродинамическая модель Y-циркулятора, которая показана на рис. 2.

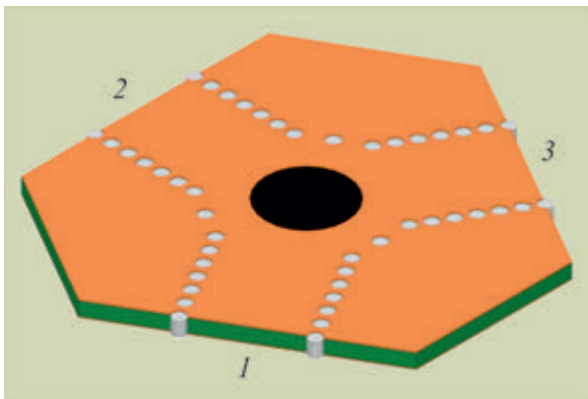


Рис. 2. Электродинамическая модель Y-циркулятора

В базовой электродинамической модели в качестве подложки используется материал НЦВ, имеющий толщину 0,25 мм. Результаты расчетов показали, что ширина рабочей полосы частот модели составляет 4,8 ГГц, что соответствует 15,6 % (рис. 3), прямые потери модели прибора – не более 0,5 дБ. Геометрические размеры: 10×8×0,25 мм. Результаты были получены при величине внешнего смещения магнитного поля 350 кА/м.

Изменяя диаметр ферритовой вставки (в нашем случае магнитов), можно проводить подстройку центральной частоты в пределах 4 ГГц. Ширина рабочего диапазона частот в среднем составляет 15 % (рис. 4).

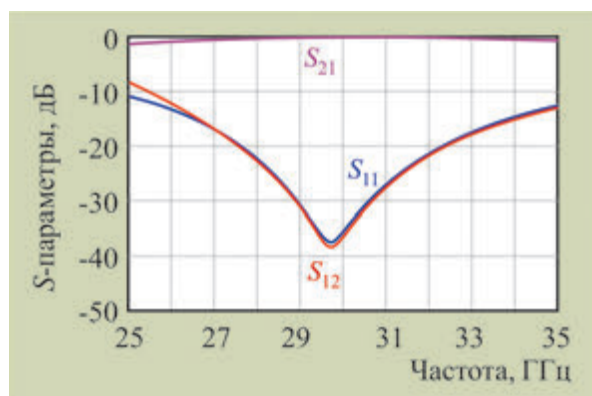


Рис. 3. Рассчитанные S -параметры базовой электродинамической модели циркулятора на основе ИПВ ($D_2 = 3$ мм, $D_1 = 1,7$ мм)

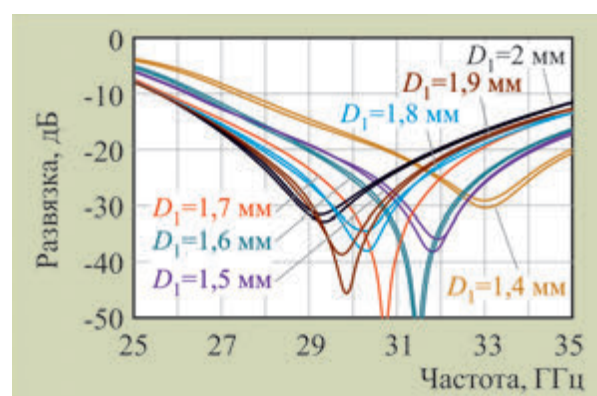


Рис. 4. Развязка S_{21} между плечами базовой электродинамической модели циркулятора при изменении объема ферритовой вставки

5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЯ Ka-ДИАПАЗОНА

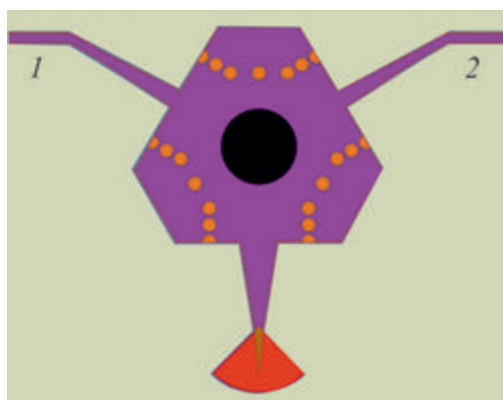


Рис. 5. Электродинамическая модель вентиля с переходами МПЛ-ИПВ

Была разработана электродинамическая модель вентиля на основе ИПВ, приведенная на рис. 5. Вентиль имеет три плеча, два из которых – это микрополосковые СВЧ-выводы, а третье плечо представляет собой микрополосковый вывод с танталовой радиопоглощающей нагрузкой.

Как правило, при разработке микрополосковых ферритовых вентилях используют нагрузку, резистивный слой которой выполнен из тантала с величиной поверхностного сопротивления R_s такой, чтобы электромагнитная волна, попав в нагрузку, полностью в ней затухала и при этом не возникали паразитные отражения от нагрузки. С одной стороны, чем меньше сопротивление нагрузки, тем более

плавно в ней поглощается СВЧ-энергия, но при этом необходимо увеличивать длину пути прохождения СВЧ-энергии для обеспечения требуемого уровня обратных потерь вентиля. Уменьшения габаритов планарной нагрузки вентиля можно достичь за счёт увеличения её сопротивления, но это в свою очередь приводит к увеличению собственного КСВН нагрузки за счёт увеличения разницы входных сопротивлений подводящих полосков и танталовой нагрузки. Поэтому необходимо учитывать, что чем больше величина R_s , тем больше рассогласованность нагрузки и диска циркуляции вентиля. В работе [11] была предложена конструкция нагрузки для вентиля, работающего в Ka-диапазоне частот. Нагрузка представляет собой сектор, выполненный из тонкого слоя тантала, с поверхностным сопротивлением 60 Ом/□.

Результаты исследования характеристик электродинамической модели вентиля приведены на рис. 6, 7. Из полученных графиков видно, что характер зависимости развязки от диаметра ферритовой вставки и величины внешнего магнитного смещения изменился, поэтому на границе рабочего диапазона частот присутствует два резонанса с небольшим ухудшением развязки в центре рабочей полосы. Из рис. 6 следует, что требуемый уровень развязки достигается при величине

внешнего смещения магнитного поля от 350 кА/м и более. Но начиная с 400 кА/м характер резонанса изменяется. Появляется ярко выраженный один минимум, который начинает ухудшаться с дальнейшим увеличением внешнего смещения магнитного поля H_0 . Немаловажную роль в этом играют переходы МПЛ-ИПВ, через которые на практике будет осуществляться подключение к исследуемому образцу вентиль. Добавление таких переходов способствует смещению рабочей полосы вверх по диапазону частот на 1 ГГц, что следует учитывать при практической реализации.

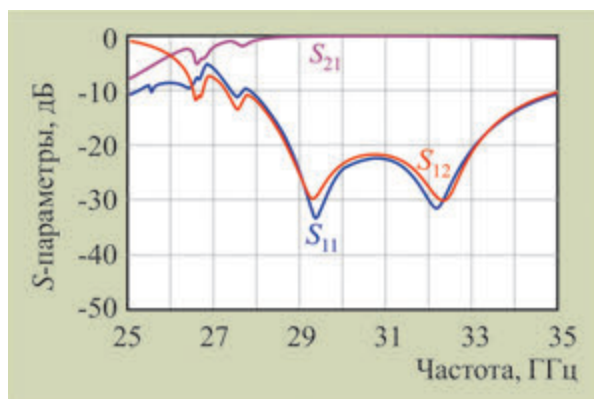


Рис. 6. Рассчитанные S -параметры электродинамической модели вентиль с переходами МПЛ-ИПВ на основе ИПВ ($M_s = 350$ кА/м, $D_2 = 3$ мм, $D_1 = 1,7$ мм)

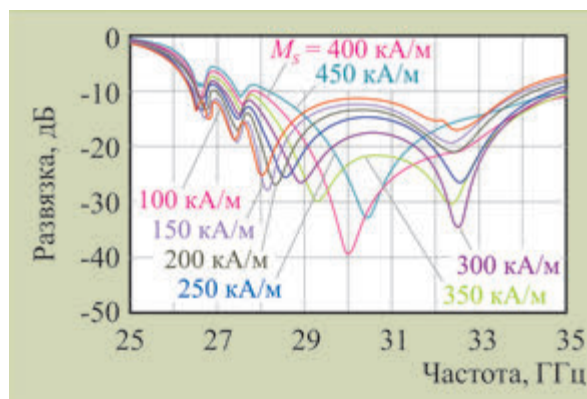


Рис. 7. Развязка S_{21} между плечами вентиль при изменении внешнего магнитного поля смещения ($D_2 = 3$ мм, $D_1 = 1,7$ мм)

6. МАКЕТ ВЕНТИЛЯ Ka-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ИПВ

На основе проведенных расчётов и электродинамического моделирования была разработана конструкция и изготовлен макет ферритового вентиль Ka-диапазона частот на основе ИПВ. На рис. 8 приведена фотография экспериментального образца вентиль на основе ИПВ.

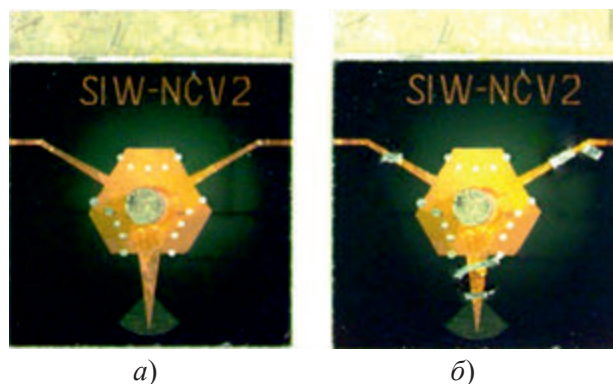


Рис. 8. Опытные образцы вентиль с переходами МПЛ-ИПВ:
а – без подстройки; б – с подстройкой

Экспериментальный образец был изготовлен на основе результатов, полученных в ходе электродинамического моделирования. Он состоит из ферритовой платы, напаянной на металлическое основание, и магнита $\varnothing 1,3 \times 2$ мм, который приклеивается к плате для создания необходимого поля подмагничивания. Вентиль имеет габаритные размеры $8 \times 12 \times 2,8$ мм.

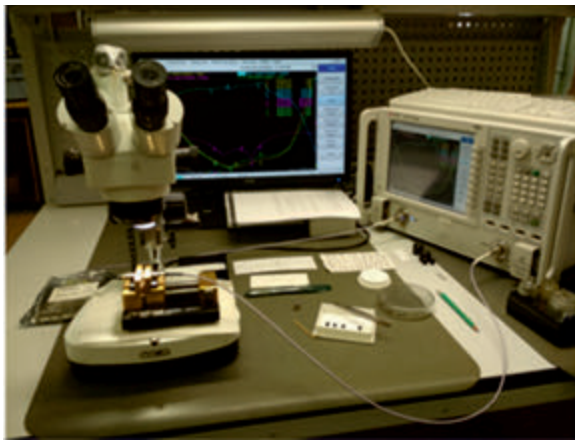


Рис. 9. Измерительный стенд

Характеристики опытного образца вентиля исследовали на стенде, состоящем из векторного анализатора цепей Agilent N5227A и подключающего устройства Anritsu 3680V (рис. 9).

Настройка вентиля осуществлялась при помощи как магнитной системы – за счет изменения размеров и положения магнита, так и подстроечных элементов, выполненных из фольги припоя ПОС-61.

На рис. 10 приведены окончательные результаты измерений. В рабочей полосе частот 1,5 ГГц (31,5...33 ГГц) вентиль имеет следующие электрические характеристики:

Прямые потери.....	не более 1,6 дБ
Обратные потери.....	не менее 20 дБ
КСВН (вх./вых.).....	не более 2

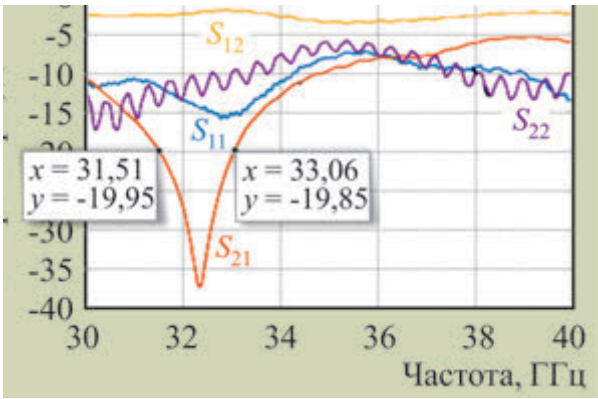


Рис. 10. Результаты экспериментальных измерений электрических характеристик вентиля на основе ИПВ

Полосы согласования входа и выхода смещены друг относительно друга по частоте, что объясняется условиями поглощения в нагрузке, расположенной в третьем плече вентиля.

Полученный практический результат в экспериментальном образце соответствует результату, полученному в электродинамической модели при внешнем магнитном смещении 450 кА/м, и имеет хорошее совпадение по уровню развязки и ширине рабочей полосы частот устройства (1,5 ГГц). Центральная частота в экспериментальном образце вентиля смещена на 1 ГГц вверх по сравнению с центральной частотой модели, что следует учитывать при дальнейших исследованиях и разработке ферритовых приборов на основе ИПВ.

7. ВЫВОДЫ

Особенностью проведенной работы явилось то, что в качестве материала подложки была использована никель-цинковая шпинель, обладающая большой намагниченностью насыщения, а ее использование открывает большие перспективы для дальнейших разработок ФРП в миллиметровом диапазоне длин волн. Впервые в России были проведены исследования и практическая реализация ферритовых развязывающих приборов на базе ИПВ. Разработанные элек-

троединамические модели и экспериментальный образец имеют хорошее совпадение по выходным характеристикам. Дальнейшая проработка топологии устройства в части переходов МПЛ-ИПВ с учетом проведенных измерений, технологии сверления и металлизации отверстий, а также рекомендаций для размещения поглощающей нагрузки и ее формы в совокупности приведет к лучшему результату на практике и позволит в итоге значительно увеличить полосу рабочих частот устройства и сделать ее близкой к расчетной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bouchra Rahali.** Substrate integrated waveguide power divider, circulator and coupler in 10 – 15 GHz band / Rahali Bouchra, Mohammed Feham // International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST). – 2012. – Vol. 4, No 1/2.
2. **Bouchra Rahali.** Design of *V*-band substrate integrated waveguide power divider, circulator and coupler / Rahali Bouchra, Mohammed Feham // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2014. – Vol. 4, No 1.
3. **Wenquan Che.** Miniaturized planar ferrite junction circulator in the form of substrate-integrated waveguide / Che Wenquan, Xiao Jing Ji, Edward K., Yung N. // Wiley Periodicals, Inc. – 2007.
4. **Junxia, He.** A novel compact *Ka*-band high-rejection diplexer based on substrate integrated waveguide / He Junxia, Gao Kuandong, Shao Zhenhai // International Conference Computational Problem-Solving (ICCP). – 2012.
5. **Patent CN 103972626A.** Triangular ferrite circulator with substrate integrated waveguide / Zhang Biao, Chen Liang, Qin Sen, Wang Xiaoguang, Deng Longjiang, Xie Jianliang.
6. **Patent CN 103077271A.** Method for determining parameters of 8mm substrate integrated waveguide circulator / Chen Liang, Fu Qiang, Wang Xiaoguang, Deng Longjiang, He Lu, Liang Difei.
7. **Patent CN 104505567A.** Substrate integrated waveguide circulator / Chen Liang, Zhu Shuai, Xie Haiyan, Wang Xiaoguang, Deng Longjiang.
8. **Patent CN 104078733A.** SIW circulator / Zhu Shuai, Chen Liang, Wang Xiaoguang, Deng Longjiang, Huang Chen, Luo Lijing, Chen Shuai.
9. **Semenov, A. S.** Development of microstrip ferrite decoupling devices for mm-wave range microwave equipment / A. S. Semenov, A. G. Nalogin, A. A. Alekseev // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol.1499.
10. **Абрамов, В. П.** Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах / В. П. Абрамов, В. А. Дмитриев, С. А. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с.
11. **Семенов, А. С.** Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры *Ka*-диапазона частот / А. С. Семенов, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 12 – 21.

Статья поступила 22 апреля 2021 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.357.74:621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ М6Ср15, ПРИМЕНЯЕМОГО В ПРОЦЕССЕ ПАЙКИ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ

А. А. Парменов, Д. С. Дозорова, С. А. Вашин,
В. А. Смирнов, А. Н. Пашков, Е. А. Белоконь

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

С целью снижения дефектов пайки исследованы образцы из низкоуглеродистой стали с гальваническим покрытием М6Ср15 после термической обработки в водороде методами рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного и металлографического анализов. Проведены исследования влияния времени выдержки при температуре 807...830 °С в процессе пайки антенных устройств на образование дефектов паяных соединений между деталями решеток и пластин.

КС: пайка в среде водорода, покрытие М6Ср15, антенные устройства

THE STUDY OF THE M6Cr15 COMPOSITION GALVANIC COATING USED IN THE PROCESS OF SOLDERING ANTENNA DEVICES

A. A. Parmenov, D. S. Dozorova, S. A. Vashin,
V. A. Smirnov, A. N. Pashkov, E. A. Belokon'

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

In order to reduce soldering defects samples from low-carbon steel with M6Cr15 galvanic coating after heat treatment in hydrogen by methods of X-ray phase, X-ray fluorescence and metallographic analyses were investigated. Research has been carried out on the influence of exposure time at the temperature of 807... 830 °C in the process of soldering antenna devices on the formation of defects in soldered joints between the parts of the arrays and plates.

Keywords: soldering in hydrogen, M6Cr15 coating, antenna devices

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе изготовления ЭВП СВЧ используется множество разных деталей, надежно соединенных между собой с помощью неразъемных соединений. Одним из наиболее распространенных методов получения неразъемных соединений ЭВП является пайка. Эта технологическая операция осуществляется за счет взаимодействия материалов спаиваемых деталей с жидким припоем, после чего происходит взаимная диффузия и растворение взаимодействующих компонентов. Наиболее быстрое растворение основного металла наблюдается при использовании припоев с легкоплавкой эвтектикой [1]. Одним из самых распространенных таких эвтектических припоев, применяемых в производстве ЭВП, является ПСр72 [2].

При изготовлении узлов сложной конфигурации и высокой точности отсутствует возможность применения стандартных припоев в виде проволоки или фольги. В таких исключительных случаях вместо припоя используется гальваническое покрытие М6Ср15, повторяющее процентное соотношение припоя ПСр72 [3]. Покрытие М6Ср15 (толщина слоя меди – 6 мкм, толщина слоя серебра – 15 мкм) хорошо зарекомендовало себя в производстве корпусных антенных устройств (АУ). Оно наносится на решетки АУ (сталь марки 08КП) и другие детали, которые спаиваются с пластинами (сталь марки 08КП), покрытыми другим гальваническим покрытием – Н6Ср3 (никель – 6 мкм, серебро – 3 мкм).

При анализе брака в ходе изготовления АУ выявлено, что наибольшее количество дефектов (до 50...60 %) приходится на непропаи между решетками и пластинами, которые в дальнейшем устраняются с применением дополнительной пайки дефектных мест легкоплавким припоем ПОСК 50-18 (ГОСТ21931-76) с помощью паяльной станции.

С целью уменьшения дефектных изделий АУ в данной работе исследовались режимы процесса пайки, а также металлургические процессы, происходящие в гальваническом покрытии М6Ср15.

2. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Исследование проводилось на четырех одинаковых образцах в виде пластин размерами 10×15×2 мм, изготовленных из одной решетки АУ с покрытием М6Ср15 (материал образцов – сталь марки 08КП). Процесс температурной обработки образцов происходил в водородных печах и полностью имитировал процесс пайки АУ. Температурный режим пайки включал температуру расплавления контрольного припоя (фольги ПСрМПд 68-27-5В толщиной 0,05 мм) и время выдержки от момента его расплавления (рис. 1.). Кроме того, учитывалась скорость нагрева и остывания АУ в рабочей камере водородной печи, которая не превышала 10...15 °С/мин.

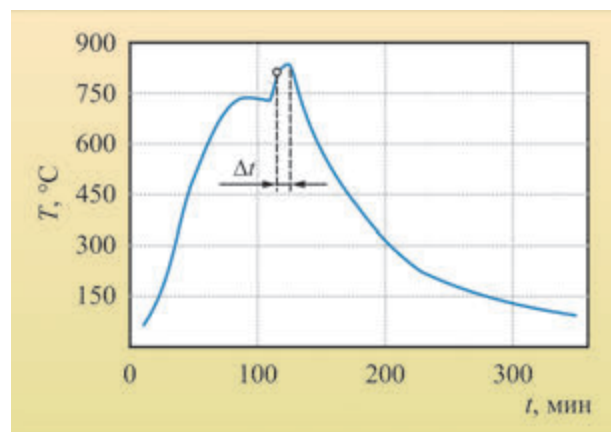


Рис. 1. График нагрева образцов в водородных печах:
 Δt – время выдержки в процессе пайки; o – температура расплавления контрольного припоя (807...810 °С)

Перед проведением исследований выбирались три режима процесса пайки. Режимы отличались разными интервалами времени выдержки при температуре термической обработки

(807...830 °С), превышающей температуру плавления контрольного припоя (807...810 °С). Образцы № 2, 3 и 4 подвергались термической обработке с временем выдержки после расплавления контрольного припоя 6, 10 и 12 мин соответственно в водородных печах «ОКБ 8085» мощностью 100 кВт совместно с реальными АУ.

3. РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественный фазовый анализ образцов с гальваническим покрытием М6Ср15 осуществлялся на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-8» с кобальтовым анодом. Использовался способ сканирования « θ - θ » с горизонтальным расположением столика образца на главной оси гониометра и применением сцинтилляционного детектора. Съемку рентгенограмм производили при радиусе гониометра 200 мм с шагом сканирования 0,01 град и скоростью 1 град/мин в непрерывном режиме. Для выполнения рентгенофазового анализа (РФА) использованы программа «Crystallographica Search-Match Version 3, 1, 0, 0 Copyright © 1996 – 2008, Oxford Cryosystems» и база данных эталонных рентгенограмм «ICDD PDF-2» (2014 г.). Для оценки содержания фаз использовалась программа качественного рентгеноструктурного анализа «Синус Тета». Оценку проводили путем наложения интенсивностей пиков, получаемых в ходе процесса исследования, на базовые эталонные рентгенограммы.

С помощью данного метода по пикам интенсивности дифрактограмм исследованных образцов (рис. 2) качественно было определено, что на поверхности образцов № 2...4 содержатся медь и серебро в разном процентном соотношении (табл. 1). Полученные данные РФА показывают, что после термической обработки в водородных печах медь растворилась (полностью или частично) в серебре. Материалы покрытий серебра и меди в полученных образцах имеют кубические структуры. В эталонном образце № 1 на поверхности наблюдается только серебро с кубической структурой, так как нанесенный на образец слой меди находится на подложке образца под 15-мкм слоем серебра. Из сравнения пиков дифрактограмм (см. рис. 2) обнаружено, что ориентация серебра после термической обработки покрытия (образцы № 2...4) отличается от исходной (образец № 1).

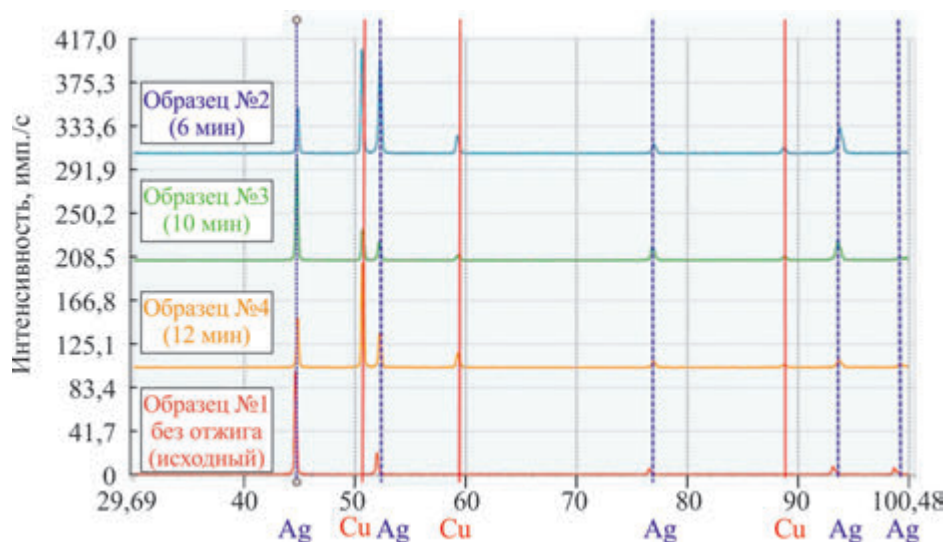


Рис. 2. Сравнение дифрактограмм РФА образцов

Таблица 1

Результаты рентгенофазового анализа образцов с покрытием М6Ср15

Номер образца	Время обработки, мин	Фаза			
		Cu		Ag	
		%	№ карточки рентгенограммы	%	№ карточки рентгенограммы
1	0	—	—	100	01-071-6549
2	6	83,24	01-070-3038	16,76	01-071-4612
3	10	26,52	00-004-0836	73,48	01-087-0719
4	12	83,12	01-071-4610	16,88	01-087-0719

4. РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью метода рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа проводилось определение качественного и количественного элементного состава в объёме исследуемых образцов. Процесс проводился на анализаторе «REAN» в режиме работы: напряжение – 40 кВ, ток – 200 мкА, время – 60 с. Анализатор работает под управлением программного обеспечения «ЕхАСТ» в среде операционной системы «WINDOWS». Оценка проводилась по максимальному набору импульсов (пиков) каждого образца, а концентрации обнаруженных веществ в процентном соотношении выбраны по среднему значению из полученных вариантов с помощью специальных математических описаний.

Рентгенофлуоресцентным методом качественно определили, что в объёме образцов № 1...4 обнаружены химические элементы: медь, серебро и железо (табл. 2). Наличие железа в исследуемых образцах обусловлено тем, что рентгенофлуоресцентный метод определил подложку материала, на которую нанесены исследуемые покрытия. По процентному соотношению пика железа можно косвенно судить об изменении толщины покрытия в исследуемых образцах. В образцах № 2 и 3 примерно равная толщина общего слоя покрытия М6Ср15, но разное в процентном соотношении количество меди и серебра. Очевидно, что в исследуемых образцах (№ 2...4) увеличение времени выдержки в процессе термической обработки влияет на перемещение нерастворенной меди от подложки в верхние слои покрытия, при этом количество серебра за счет его растворения может уменьшаться в верхних слоях покрытия. Кроме того, установлено, что количество меди и серебра в образцах № 2...4 разное после проведения термической обработки, что может косвенно говорить о неравномерности толщины слоя покрытия.

Таблица 2

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов с покрытием М6Ср15

Номер образца	Время обработки, мин	Химический элемент					
		Cu		Ag		Fe	
		%	Высота пика	%	Высота пика	%	Высота пика
1	0	16,07	5480	79,9	1520	4,03	1000
2	6	51,94	25800	35,3	1100	12,76	6350

Окончание табл. 2

Номер образца	Время обработки, мин	Химический элемент					
		Cu		Ag		Fe	
		%	Высота пика	%	Высота пика	%	Высота пика
3	10	45,21	20200	42,14	1350	12,65	5400
4	12	59,9	32200	24	850	16,1	9500

5. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ М6Ср15

Металлографическое исследование шлифов образцов с гальваническим покрытием проводили на оптическом микроскопе при общем увеличении $\times 500$ ($\times 50$ – увеличение окуляра микроскопа и $\times 10$ – увеличение объектива камеры) без применения травления (рис. 3). Из анализа изображения микроструктуры покрытия образца № 1 (без термической обработки) следует, что толщина слоя гальванического покрытия в нем неравномерная и составляет 11...17 мкм по всей исследуемой поверхности (рис. 3, а). Исследование микроструктуры образца № 4 после процесса пайки показывает (рис. 3, б) превышение общей толщины слоя покрытия М6Ср15 на 9 мкм (слой покрытия серебра и меди – 30 мкм). Кроме того, в структуре этого покрытия видны участки растворенной меди в серебре и остатки нерастворенной меди. Приведенные изображения доказывают, что соотношение меди и серебра в покрытии исследованных образцов решетки АУ отличается от эвтектического состава, с большим разбросом величины слоя гальванического покрытия (от 11 до 30 мкм).

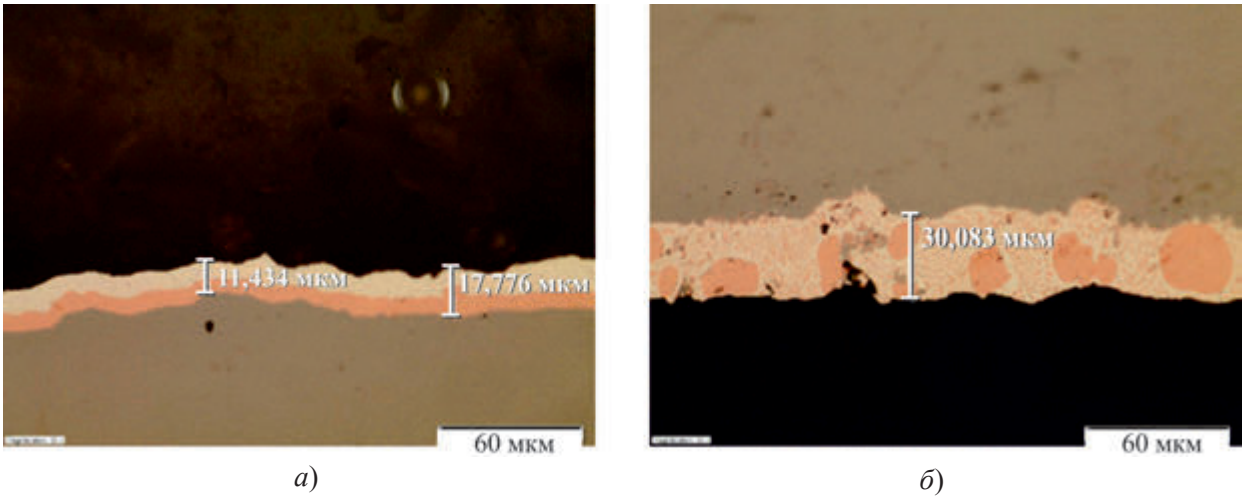
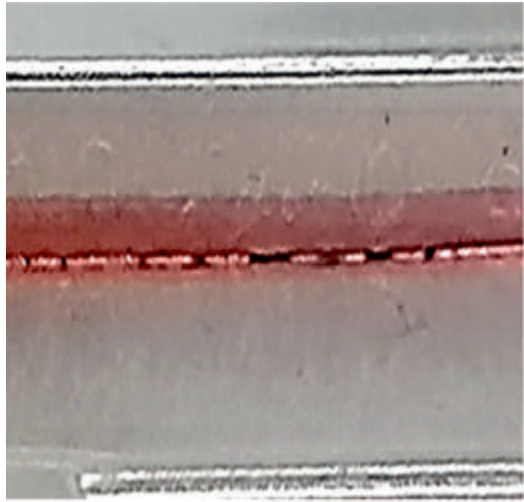


Рис. 3. Микроструктура образцов с покрытием:
а – до процесса пайки (образец № 1); б – после процесса пайки (образец № 4)

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПАЙКИ НА КАЧЕСТВО ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Исследование режимов пайки проводилось на реальных АУ с временами выдержки 6 мин и 12...13 мин. Режим нагрева соответствовал графику рис. 1 при температуре процесса 807...830 °С. Исследовались АУ в количестве восьми штук на каждый исследуемый режим. В результате выявили в четырех АУ дефекты паяных соединений между решетками и пластинами при времени выдержки 6 мин (рис. 4, а). В семи АУ при выдержке 12...13 мин дефектов паяных соединений между решетками и пластинами не обнаружено (рис. 4, б).



а)



б)

Рис. 4. Паяные соединения:

а – дефект в соединении между решеткой и пластиной;

б – дефекты в соединении отсутствуют

Следует отметить, что на качество процесса пайки АУ могут влиять различные факторы: режимы процесса пайки, масса прижимных грузов, износ резьбовых прижимных соединений оправки для пайки, соотношение слоев покрытий меди и серебра, величина отклонения плоскости покрытых решеток, качество монтажа и другие. В случаях массовых дефектов в паяных соединениях пластин и решеток АУ необходимо проводить дополнительный контроль микроструктуры с целью коррекции толщины слоев покрытий меди и серебра. Также требуется учитывать особенность нанесения гальванического покрытия, не позволяющую обеспечить равномерность его по всей площади покрываемых решеток АУ. Это условие создает дополнительные трудности в процессе корректировки толщины слоя гальванического покрытия М6Ср15.

Практически определено, что увеличение выдержки до 12...13 мин дает возможность получать более качественные паяные соединения между решетками и пластинами АУ за счет равномерного растекания припоя в процессе растворения меди в серебре [3]. Также увеличение времени выдержки до 12...13 мин в процессе пайки АУ обеспечивает снижение влияния неравномерного нанесения покрытия на решетки АУ, что позволяет снизить количество дефектов в паяных соединениях до 5 % в крупносерийном производстве.

7. ВЫВОДЫ

1. Рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный методы исследования показывают, что время выдержки 6...12 мин образцов после процесса пайки в значительной степени не влияет на фазовые превращения (растворимость меди в серебре) в покрытии М6Ср15.

2. Нерастворенная (оставшаяся) медь в покрытии М6Ср15 образцов решёток АУ перемещается от подложки в верхнюю часть покрытия в процессе термической обработки, при этом ориентация серебра, согласно РФА, меняется.

3. Увеличение времени выдержки АУ до 12...13 мин в процессе пайки уменьшило количество дефектов паяных соединений до 5 %.

4. Для уменьшения дефектов паяных соединений в процессе пайки АУ необходимо производить коррекцию толщины гальванических покрытий меди и серебра по поверхности решеток, при этом соотношение меди и серебра должно соответствовать эвтектическому составу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лашко, Н. Ф. Пайка металлов / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1967.
2. Есенберлин, Р. Е. Пайка металлов в печах с газовой средой / Р. Е. Есенберлин. – 2-е изд. – М.: Машингиз, ленинградский отдел, 1962.
3. Ковалевский, Р. Е. Конструирование и технология вакуумноплотных паяных соединений / Р. Е. Ковалевский, А. А. Чекмарев. – М.: Энергия, 1968.

Статья поступила 12 марта 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

БОРИСОВ А.А., БУРОБИН В.А. Обзор современных технологий гетероинтеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений A^3B^5 и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 256 с.

В центре внимания данного обзора – значительные достижения в области гетерогенной интеграции GaN и других многокомпонентных полупроводников на платформе Si КМОП. Такой подход становится основой нового класса высокотехнологичных многофункциональных микросхем, характеристики которых будут несравненно выше по сравнению с любыми существующими аналогами при значительном снижении себестоимости.

Наличие «интеллектуальных» ИС (микросистем и датчиков на кристалле) окажет огромное влияние на широкий спектр компонентов микро- и нанoeлектроники и приведет к новой технической революции.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ-АНАЛИЗАТОРА Л2-109 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЧ-ДВУХПОЛЮСНИКОВ

В. Б. Вяхирев

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

На примере лавинно-пролетных диодов в работе описано применение автоматизированного измерителя-анализатора тепловых характеристик Л2-109 для определения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников с малой тепловой инерцией. Показана возможность построения тепловых эквивалентных математических моделей изучаемых объектов. Предложена оригинальная экспресс-методика определения температурного коэффициента термочувствительного параметра.

КС: тепловые характеристики, термочувствительный параметр, лавинно-пролетный диод, структурная функция

THE USE OF Л2-109 ANALYZER-METER FOR MEASURING THE THERMAL RESISTANCE OF MICROWAVE ONE-PORT NETWORKS

V. B. Vyakhirev

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

Based on impact avalanche transit-time diodes the article describes the use of automated analyzer-meter of Л2-109 thermal characteristics to determine the thermal resistance of microwave one-port networks with a low thermal inertia. The possibility of designing thermal equivalent mathematical models of the objects under study is shown. An original express method for determining the temperature coefficient of a temperature-sensitive parameter is proposed.

Keywords: thermal characteristics, temperature-sensitive parameter, impact avalanche transit-time diode, structure function

1. ВВЕДЕНИЕ

Для многих электронных компонентов необходим технологический контроль тепловых характеристик. К сожалению, такой контроль организован не всегда. Причина такого положения чаще всего заключается в отсутствии подходящего измерительного оборудования. Особенно актуально это для многих СВЧ-приборов с малой тепловой инерцией, вызванной очень малыми размерами области, в которой выделяется тепло. Имеющееся на рынке измерительное оборудование, предназначенное для измерения тепловых характеристик, как правило, проектируется для более мощных силовых приборов, что затрудняет его использование для СВЧ-приборов.

В этой работе измерялись тепловые характеристики лавинно-пролетных диодов (ЛПД), при этом использовался автоматизированный измеритель-анализатор тепловых характеристик Л2-109 [1]. Наиболее важной особенностью Л2-109 является (согласно международному стандарту JESD51-14 [2]) возможность измерения переходных температурных зависимостей,

которые являются откликом на ступеньку мощности и из которых с помощью встроенных функций можно построить тепловую эквивалентную математическую модель. Эта модель позволяет, во-первых, прогнозировать температуры измеряемого объекта при любых режимах эксплуатации, а во-вторых, установить, какой вклад в суммарное тепловое сопротивление вносит каждый слой на пути теплового потока.

Для определения вклада в тепловое сопротивление отдельных частей прибора тепловую модель нужно представить в виде структурной (еще её называют кумулятивной) функции (СФ) [3, 4]. В некоторых случаях это позволяет увидеть «узкое место» для потока тепла и тем самым выявить причину брака.

Однако Л2-109 разработан для более мощных полупроводниковых приборов, поэтому при измерении возникли трудности. Дело в том, что минимальный интервал при измерении термочувствительного параметра (ТЧП) составляет 2 мкс, а тепловая постоянная времени частей ЛПД, в которых выделяется тепло, на порядок меньше. Используя измеритель в штатных режимах, можно было исследовать только тепловые процессы, протекающие в сравнительно массивных частях, таких, как корпус ЛПД и теплоотвод контактного устройства. Ниже будет показано, что эти измерения оказались полезны для определения температурного коэффициента величины ТЧП.

Для измерения тепловых характеристик малоинерционных частей ЛПД, примыкающих к области тепловыделения, был разработан специальный выносной модуль с быстродействующим устройством выборки-хранения (УВХ) и быстродействующим генератором дополнительного тока. Кроме того, программное обеспечение измерителя, позволяющее обращаться к внешним функциям пользователя, было дополнено функциями, обеспечивающими работу с новым модулем.

Для проведения измерений использовался измерительный стенд, состоящий из автоматизированного измерителя-анализатора тепловых характеристик Л2-109, программируемого блока питания PST-3202 и разработанного выносного модуля. В качестве ТЧП использовалось пробивное напряжение ЛПД при пропускании через него тока, близкого к рабочему. Используя программное обеспечение Л2-109, можно задавать любую последовательность импульсов нагрева, с самыми разными параметрами, и анализировать результаты как функциями, входящими в состав Л2-109, так и функциями из программ, написанных пользователем. Задание на измерение оформляется по определенным правилам в отдельном файле (формата Excel). Там же указываются параметры протокола, в который выводятся результаты. Результаты расчета пользовательскими функциями тоже могут быть выведены в протокол.

2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ БЕЗ ИМПУЛЬСОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОКА

Целью измерения без использования импульсов дополнительного тока было получение СФ, которая включает в себя массивные части измеряемого прибора и части контактного устройства, через которые отводилось тепло. Здесь прибор нагревался постоянным током в течение времени, превышающего тепловую постоянную времени корпуса, установленного в теплоотвод контактного устройства (обычно 5...10 с). Записывалась (через каждые 2 мкс) временная зависимость сигнала ТЧП. На рис. 1 приведена временная зависимость температуры после перевода величины ТЧП в температуру и нормирования к единичной мощности. По этой зависимости трудно судить о свойствах измеряемого прибора, но ее можно использовать для

создания СФ (рис. 2). Эта функция отображает взаимосвязь отдельных частей теплового сопротивления (горизонтальная шкала) с отдельными частями теплоёмкости (вертикальная шкала, логарифмический масштаб).

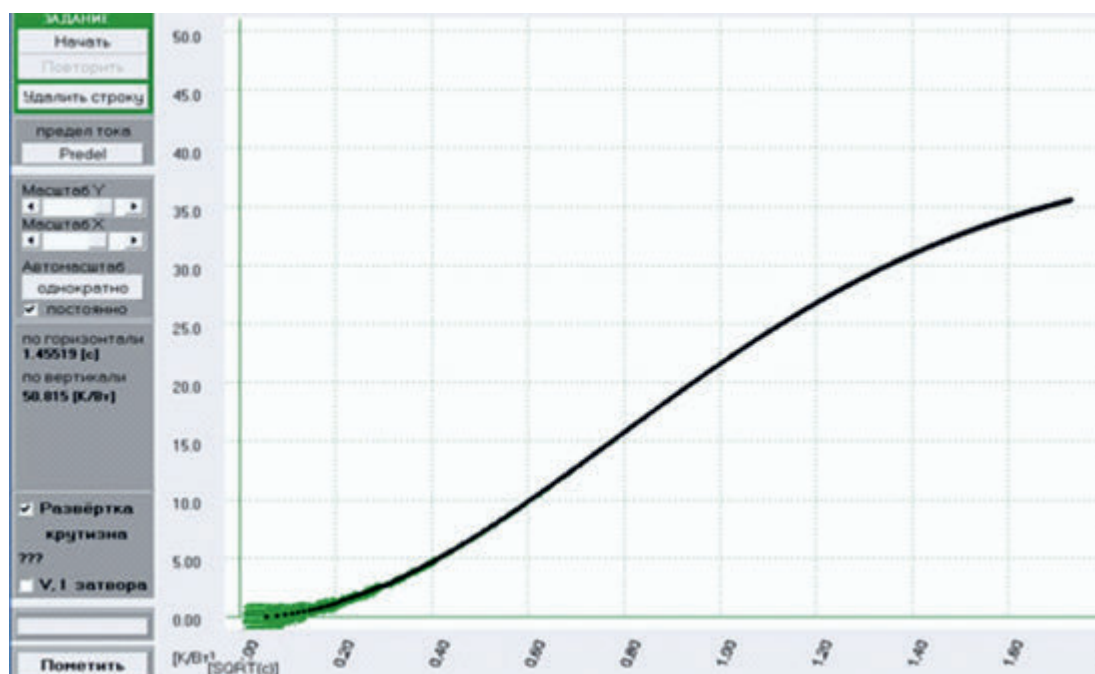


Рис. 1. Временная зависимость температуры (нормирована к единичной мощности) при нагреве. По горизонтали – квадратный корень времени

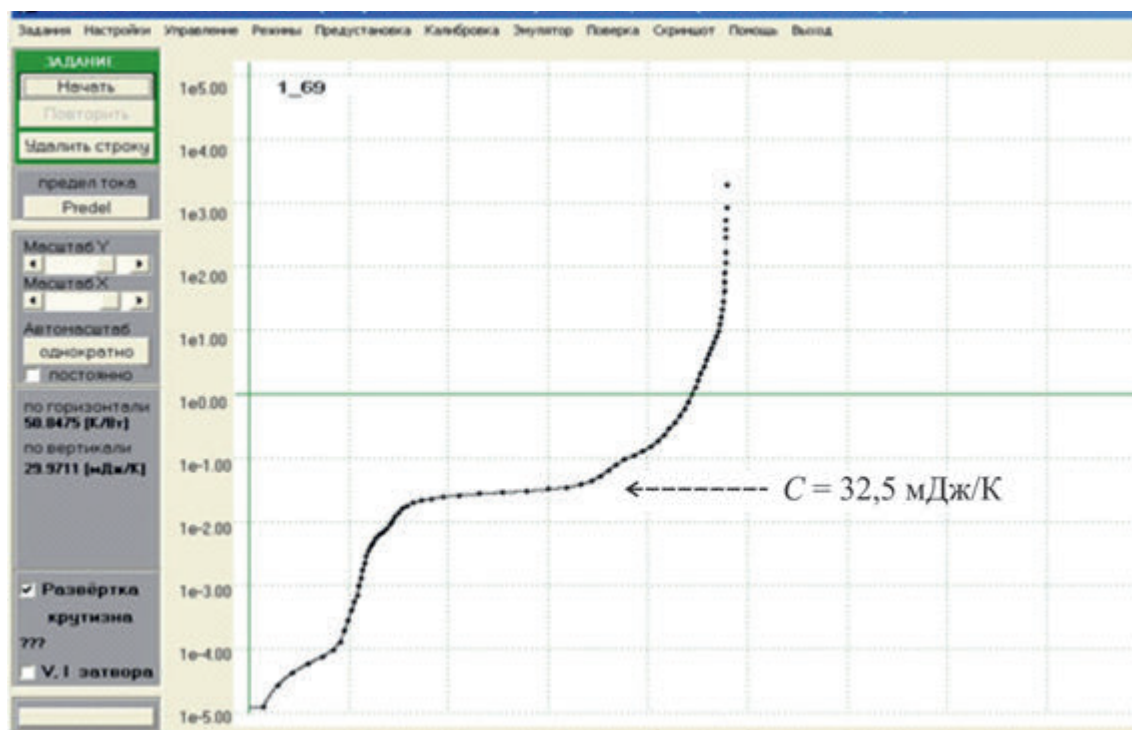


Рис. 2. СФ массивных частей ЛПД. Отмечен уровень, соответствующий суммарной теплоёмкости измеряемого прибора

На рис. 2 отмечен уровень, соответствующий суммарной теплоёмкости измеряемого прибора, которая включает в себя теплоемкость кристалла, припоя и корпуса. Для данной тепловой системы большой почти горизонтальный участок СФ (от 17 до 33 К/Вт) соответствует тепловому барьеру (сделанному специально) между корпусом ЛПД и теплоотводом. Это не означает, что суммарное тепловое сопротивление ЛПД равно 17 К/Вт, истинная СФ должна быть продлена влево и вниз, но в данном случае эти части СФ получить невозможно. Объясняется это тем, что из-за малой тепловой инерции значительное изменение температуры произошло еще до первого замера величины ТЧП.

СФ правее горизонтального участка определяется свойствами теплоотвода контактного устройства и не зависит от измеряемого прибора, но может сдвигаться в зависимости от температурного коэффициента величины ТЧП. Тем самым возникает возможность определения температурного коэффициента величины ТЧП путем сравнения СФ каждого измеряемого прибора с эталонной. Эталонную СФ можно получить измерением прибора с известным температурным коэффициентом. Такой способ существенно ускоряет процесс измерения по сравнению с традиционным [5], в котором необходимо контролировать внешнюю температуру с помощью термостата.

3. ИЗМЕРЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОКА И УСТРОЙСТВА ВЫБОРКИ-ХРАНЕНИЯ

Здесь прибор нагревался постоянным током, к которому периодически добавлялся дополнительный ток с длительностью импульса от 20 до 100 мкс и длительностью фронтов 5 нс. Время, необходимое для накопления достаточного количества данных, составляло 1...3 с. После окончания импульса дополнительного тока через заданную задержку производился захват (посредством ВВХ) сигнала, пропорционального ТЧП. Момент окончания импульса дополнительного тока и момент захвата сигнала синхронизированы, причем задержка между ними задавалась в файле задания с дискретностью 30 нс. Задавая разные значения задержки, можно получать разные точки временной зависимости сигнала ТЧП (принцип стробоскопа). Полученная зависимость также может быть использована для пересчета во временную зависимость температуры (рис. 3) и создания СФ аналогично тому, как это делалось выше. Теперь можно добавить к СФ массивных частей ЛПД недостающую часть (рис. 4). Здесь СФ, показанная на рис. 2 (черная линия), сдвигалась вправо до совмещения с СФ частей ЛПД, расположенных вблизи области тепловыделения (красная линия). Левый край обеих СФ ненадежен, так как из-за недостатка времени измеренных данных нет или их мало. Поэтому для оценки максимальной температуры, которая достигнута в самом конце импульса дополнительного тока, необходима экстраполяция к моменту выключения импульса. Это удобнее делать на зависимости температуры от времени. Экстраполяция возможна двумя путями. Во-первых, используя тепловую эквивалентную математическую модель, можно рассчитать временную зависимость (черная линия на рис. 3, результат – 153 К/Вт), во-вторых, продолжить прямую линию, соединяющую несколько экспериментальных точек, до момента выключения дополнительной мощности (красная линия, результат – 169 К/Вт). Второй вариант рекомендован в [5], так как соответствует теоретической модели распространения тепла от плоского источника в одном направлении. Кроме того, для реализации этого варианта требуется измерить всего две экспериментальные точки, что сокращает время измерения до нескольких секунд.

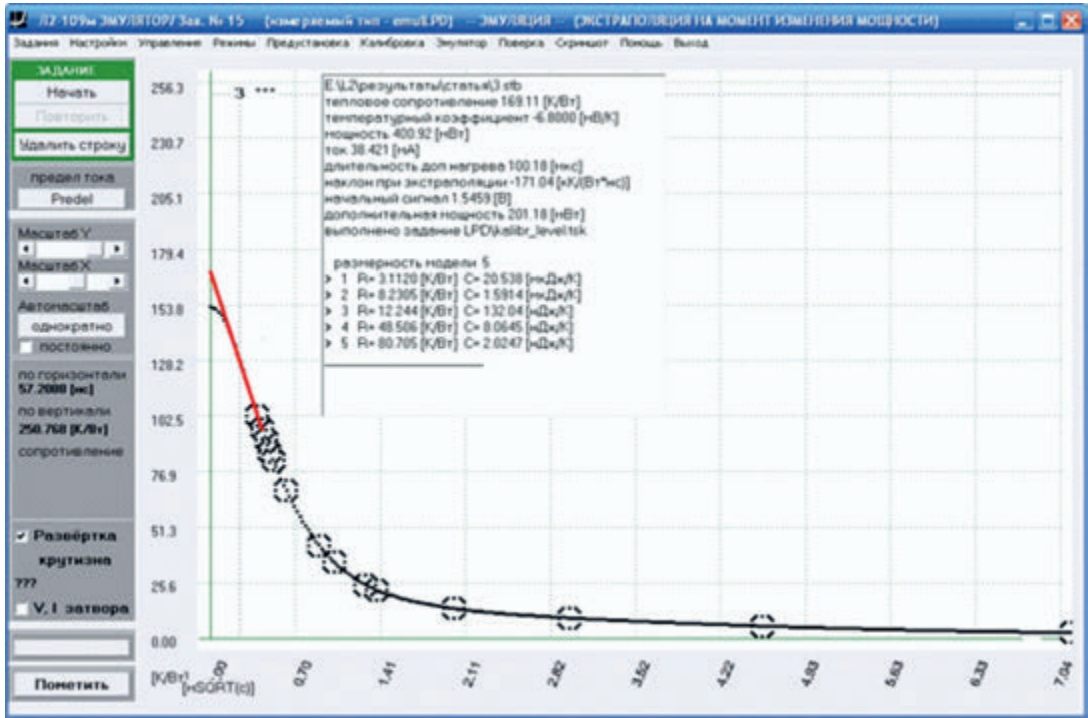


Рис. 3. Временная зависимость температуры (нормирована к единичной мощности импульса дополнительного тока) при остывании после окончания импульса дополнительного тока. По горизонтали – квадратный корень времени

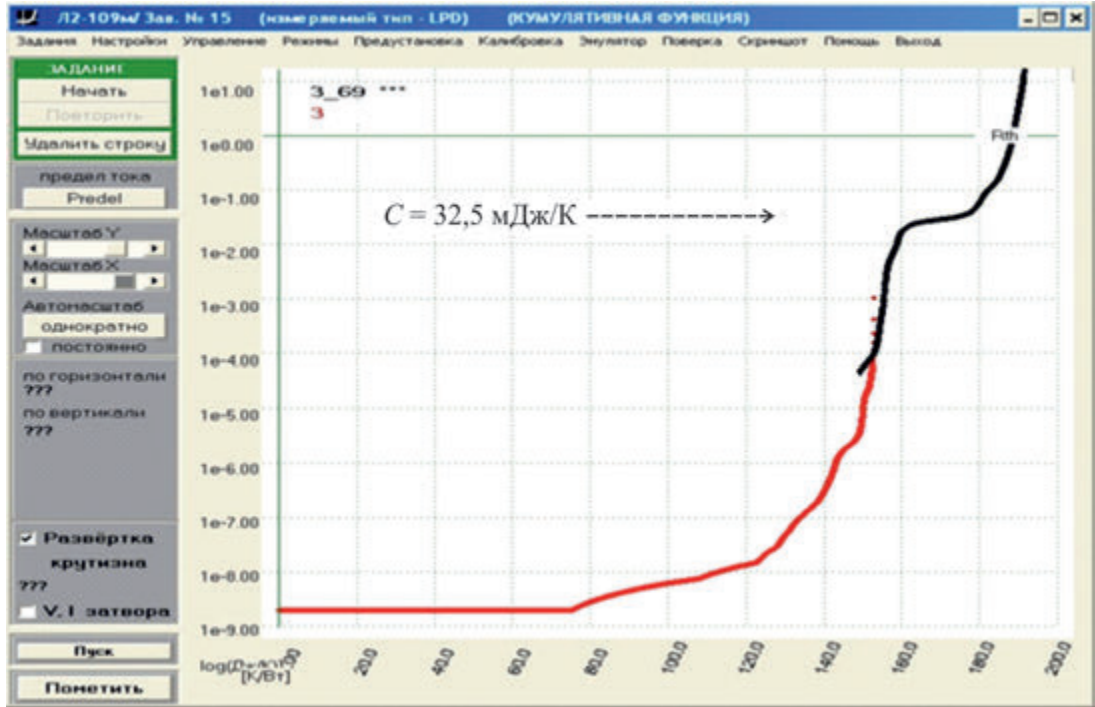


Рис. 4. СФ массивных частей ЛПД совмещена с СФ частей, расположенных вблизи области тепловыделения

Полученное тепловое сопротивление является полным, представляющим собой сумму тепловых сопротивлений всех частей измеряемого прибора. В большинстве случаев это самая важная и достаточная тепловая характеристика, однако при отработке технологии или при анализе брака полезно построение всей СФ, которая может указать «узкое» место при отводе тепла. На рис. 5 показаны СФ для нескольких ЛПД с разными тепловыми характеристиками. Обратите внимание, что СФ образца № 1 имеет повышенное тепловое сопротивление на участке, соответствующем теплоемкости 11 и 83 нДж/К, что отличает его от остальных образцов, у которых разница видна с самого начала. Скорее всего, образцы отличаются разной площадью контакта кристалла с теплоотводом, что отражается на распределении теплового потока во всех слоях кристалла. Кроме того, у образца № 1 имеются дополнительные препятствия для прохождения тепла, что приводит к большому суммарному тепловому сопротивлению, хотя начальный участок его СФ лучше, чем у образца № 2.

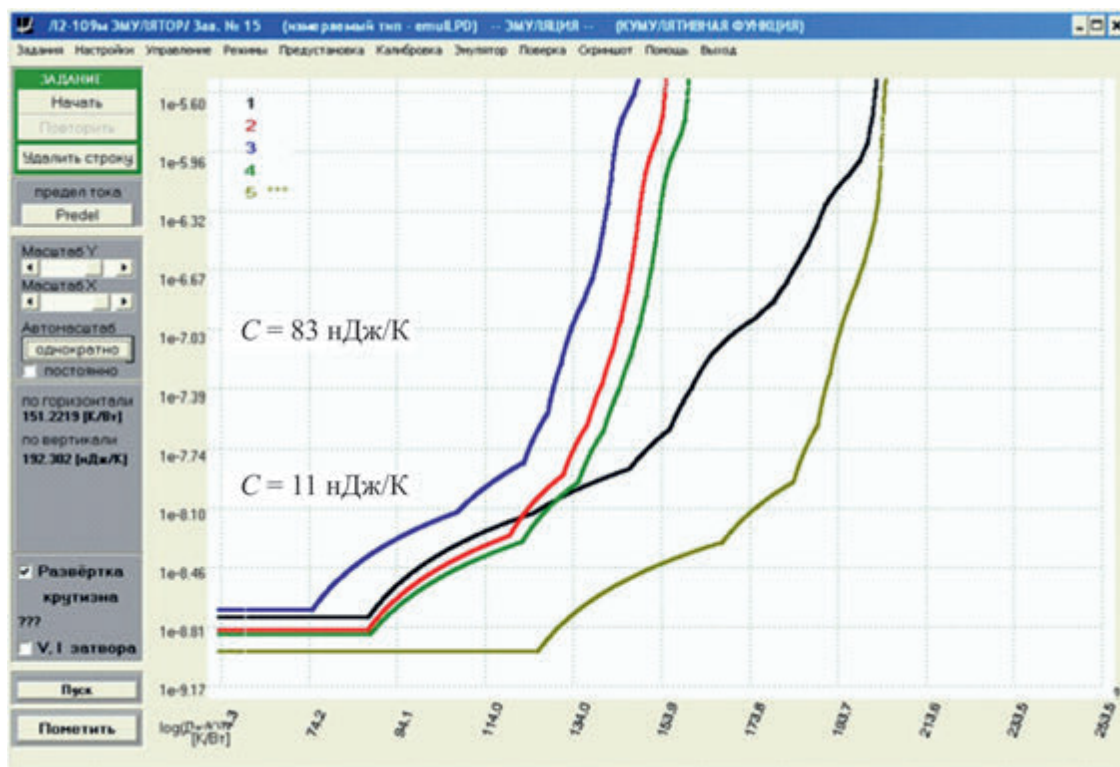


Рис. 5. Структурные функции нескольких ЛПД с разными тепловыми сопротивлениями

Для полного объяснения поведения СФ требуется хорошее знание конструкции измеряемого прибора. При этом надо учитывать, что коэффициент, связывающий величину ТЧП с температурой при малых временах, может меняться, так как кристалл нагрет неравномерно. Это не отменяет полезности СФ для качественного сравнения измеряемых приборов.

4. КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ВЫНОСНОГО МОДУЛЯ

Работа УВХ вносит некоторую погрешность при измерении величины ТЧП. Это связано с конечным временем переключения ключей и их паразитными емкостями. Однако эти погреш-

ности могут быть определены при установке специального эталона вместо измеряемого прибора. Эталон представляет собой схему, собранную из прецизионных резисторов и качественных конденсаторов. Через эталон проходят те же токи, что и через измеряемый ЛПД. Падение напряжения на эталоне измеряется вместо напряжения пробоя ЛПД. После окончания импульса дополнительного тока происходит изменение заряда конденсаторов, что вызывает изменение напряжения, подобно тому как это происходит в ЛПД при изменении температуры. Этот процесс, по своей динамике, похож на процесс измерения, но его можно теоретически рассчитать. Отклонение измеренной кривой от расчетной вызвано аппаратными погрешностями, которые могут быть определены и программно учтены. На рис. 6 показано сравнение временной зависимости сигнала с эталона с расчетной (идеальной) кривой до определения программных поправок. После проведения калибровки кривые совпадают.

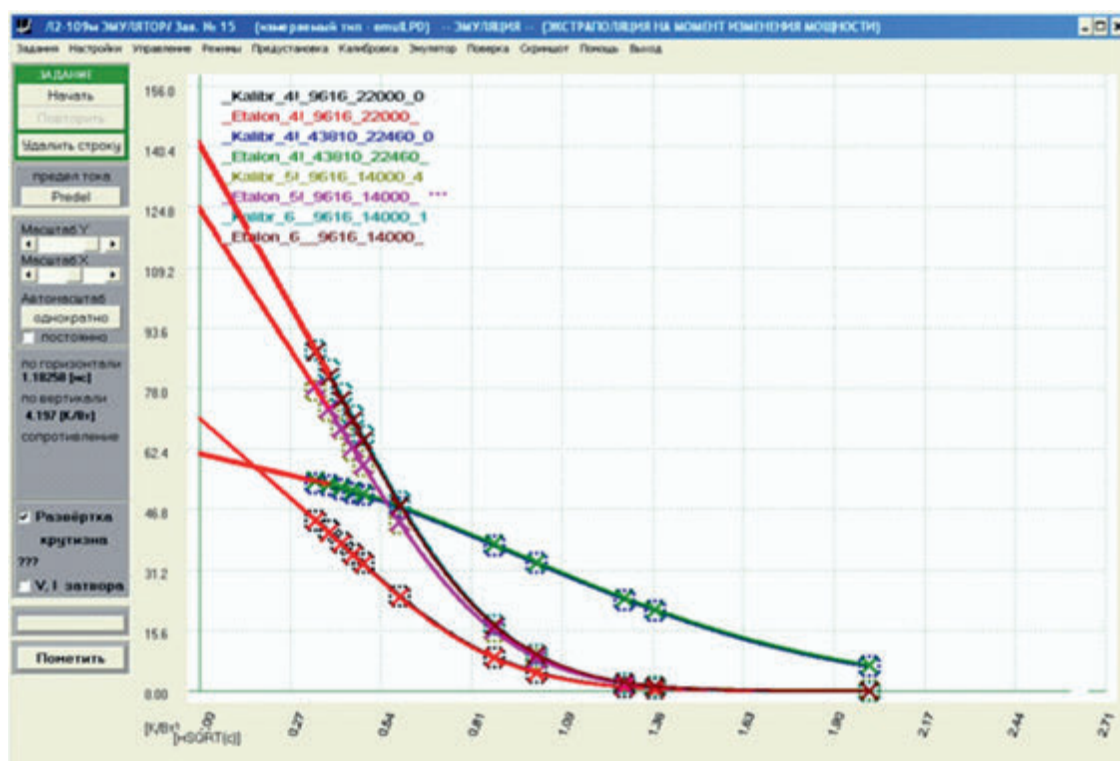


Рис. 6. Сравнение временной зависимости сигнала с эталона с расчетной (идеальной) кривой

5. ВЫВОДЫ

1. Измеритель-анализатор Л2-109 с дополнительным выносным модулем может быть использован как для измерения полного теплового сопротивления ЛПД, так и для анализа отдельных его частей.
2. Полученный опыт может быть распространен на другие СВЧ-двухполюсники с малыми областями тепловыделения, такие, например, как резисторы, диоды и полевые транзисторы (например, с затвором, соединенным с истоком).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Госстандарт РФ.** Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству RU.C.34.083.A № 56960 об утверждении типа средств измерений.
2. JEDEC JESD51-14 «Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path». – November 2010.
3. **Вяхирев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3.
4. **Вяхирев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов. Ч. 2 // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 8.
5. **ОСТ 11 0944-96.** Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления.

Статья поступила 25 марта 2021 г.

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

МАКАРЕНКО С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография.– СПб.: Научные технологии, 2020. – 204 с.

В монографии представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), а также формирования общих направлений повышения эффективности такого противодействия. Проведен анализ возможностей по обнаружению БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведок. Подробно исследованы преимущества и недостатки следующих основных способов и средств противодействия БПЛА: огневое поражение БПЛА артиллерийским и ракетным вооружением комплексов противовоздушной обороны; радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи БПЛА; функциональное поражение БПЛА сверхвысокочастотным электромагнитным излучением; поражение БПЛА лазерным излучением. Кроме того, рассмотрены другие, менее распространенные способы противодействия БПЛА.

Материалы работы предназначены для научных сотрудников, соискателей ученых степеней, военных и технических специалистов, занимающихся вопросами противодействия БПЛА.

Отдельные результаты, представленные в данной монографии, получены в рамках госбюджетной темы НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

УДК 621.385.73

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ И ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Г. А. Жабин¹, Ю. А. Будзинский¹, Н. А. Лябин¹,
Е. В. Скупневский², Д. Ю. Архипов¹, К. О. Долгих¹, В. В. Федотов¹

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

²НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», г. Зеленоград

Проведены экспериментальные исследования эмиссионных свойств и испытания на долговечность катодов, изготовленных лазером на парах меди и волоконным лазером. Показано, что применение прецизионной фемтосекундной импульсной лазерной микрообработки 50-мкм вольфрамрениевой фольги позволило изготовить молекулярно-напыленные катоды с субмикронной шероховатостью поверхности реза, минимальной зоной термического воздействия и без выплесков металла.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод, прецизионная микрообработка, лазер на парах меди, фемтосекундный волоконный лазер, лазерное технологическое оборудование, эмиссионные характеристики, долговечность

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THERMIONIC CATHODES MANUFACTURED USING A NANOSECOND COPPER VAPOR LASER AND A FEMTOSECOND FIBER LASER

G. A. Zhabin¹, Yu. A. Budzinsky¹, N. A. Lyabin¹,
E. V. Skupnevsky², D. Yu. Arkhipov¹, K. O. Dolgih¹, V. V. Fedotov¹

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

²SPC «Lasers and equipment TM», Zelenograd

Experimental studies of the emission properties and durability tests of cathodes made by a copper vapor laser and a fiber laser were carried out. It is shown that the use of precision femtosecond pulsed laser microprocessing of 50 microns of tungsten-rhenium foil made it possible to produce molecular-sputtered cathodes with a submicron roughness of the cut surface, a minimum zone of thermal impact and no metal splashes.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, precision microprocessing, copper vapor laser, femtosecond fiber laser, laser processing equipment, emission characteristics, durability

1. ВВЕДЕНИЕ

Авторами работы [1] показано, что применение автоматической лазерной технологической установки АЛТУ «Каравелла» с лазером на парах меди (ЛПМ), работающим на длине волны 510,6 нм с наносекундной длительностью импульсов, для изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК) из вольфрамрениевой фольги позволило увеличить жесткость и вибропрочность по сравнению с конструкцией из 50-мкм проволоки, изготовленной методом механообработки. ЛПМ обеспечивают прецизионную микрообработку любых металлических,

в частности, тугоплавких материалов из фольги толщиной 0,01...0,2 мм с шероховатостью поверхности реза 2...3 мкм и зоной термического воздействия 2...5 мкм [2, 3].

Однако микрообработка с применением ЛПМ не позволила изготовить МНОК с шириной керна менее 20...25 мкм и шероховатостью поверхности реза менее 1 мкм, что препятствует уменьшению рабочих зазоров в пролетном канале циклотронного защитного устройства (ЦЗУ).

Фемтосекундная лазерная микрообработка допускает использование сверхкоротких импульсов длительностью 10^{-13} ... 10^{-15} с при высокой мощности излучения, при этом происходит испарение материала с субмикронной зоной термического воздействия (ЗТВ) и без образования расплава [4, 5]. Поэтому качество лазерной микрообработки с использованием фемтосекундных импульсов значительно выше, чем с использованием наносекундных.

В данной работе для изготовления МНОК применялась созданная на предприятии ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» установка «МЛП1-Фемто» на основе твердотельного волоконного лазера (Yb:YAG) с фемтосекундной длительностью импульсов излучения и длиной волны $\lambda = (1030 \pm 5)$ нм. Оптимизация режимов микрообработки вольфрамовой фольги позволила изготовить экспериментальные катоды, эмиссионные характеристики которых сравнимы с катодами, изготовленными с применением ЛПМ.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изготовление из фольги катодов осуществлялось с использованием специальной координатной системы, обеспечивающей автоматическое перемещение фемтосекундного лазерного луча по заданной программе на чертеж в плоскости координат X – Y и фокусировку светового пятна в направлении оси Z . Точность позиционирования координатной системы и обработки составляла ± 5 мкм. Диапазон изменения скорости 0...1000 мм/с.

Исследование поверхности катодов проводилось на электронном микроскопе «Nirox KH-8700», Япония. На рис. 1 для сравнения представлены фрагменты конструкций катодов с подогревателем в форме меандра и керном, изготовленных лазерной резкой в виде цельной детали из фольги ВР-27 ВП с применением ЛПМ (а) и фемтосекундного лазера (б).

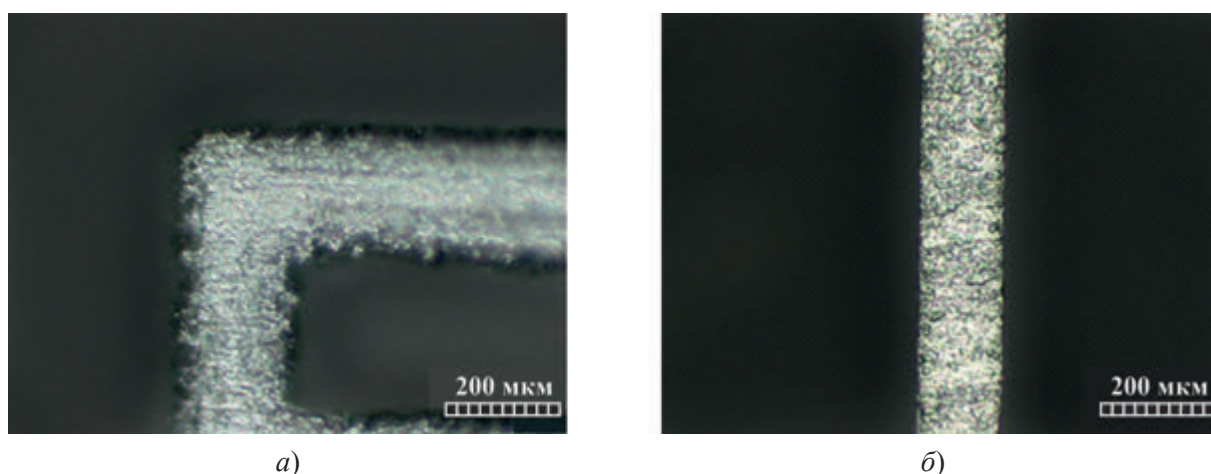


Рис. 1. Изображения фрагментов катодов, изготовленных из фольги ВР-27 ВП. $\times 1500$:

а – фрагмент меандра с применением ЛПМ; б – фрагмент керна с применением фемтосекундного лазера

Видно, что на поверхности катода, изготовленного ЛПМ, вдоль лазерного реза имеются выплески металла (см. рис. 1, *а*).

С целью уменьшения ширины керна до 20...25 мкм, шероховатости поверхности реза, ЗТВ и грата проводились экспериментальные исследования с фемтосекундным лазером по определению оптимальных режимов прецизионной микрообработки. Оптимизация проводилась по энергии в импульсе лазерного излучения, скорости обработки и числу проходов лазерного луча.

После оптимизации параметров лазерной микрообработки, на химически очищенные и отожженные в водороде керны катодов наносили пленку иридия толщиной 0,25 мкм, на которую впоследствии осаждалось ионно-плазменным методом в среде аргона и CO_2 эмиссионное покрытие $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ толщиной 1 мкм. Катоды устанавливали в ЦЗУ с расстоянием катод – анод 100 мкм. Эмиссионные свойства МНОК исследовали на стенде термоэмиссионной тренировки ЦЗУ по стандартной методике [6, 7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отработку технологических режимов фемтосекундным лазером проводили при средней мощности излучения 0,5...6 Вт. В качестве фокусирующего элемента использовался объектив F-theta с фокусным расстоянием 70 мм для получения обрабатываемого пятна излучения диаметром 15 мкм. При этом скорость микрообработки изменялась до 1000 мм/с и число проходов – от 1 до 300, энергия в импульсе – от 40 до 400 мкДж. Частота следования импульсов была постоянной и составляла $25 \cdot 10^3$ Гц [8].

На рис. 2 показаны изображения катодов, изготовленных из проволоки механообработкой (*а*) и из фольги с применением ЛПМ (*б*) и фемтосекундного волоконного лазера (*в*). Конструкция катода с шириной керна 50 мкм, изготовленного на АЛТУ «Каравелла» и изображенного на рис.2, *б*, для эффективной работы в ЦЗУ потребовала уменьшения ширины керна механическим способом до 18...20 мкм, с применением прецизионных оправок.

Шероховатость поверхности лазерного реза при использовании фемтосекундного лазера составила менее 1 мкм и отсутствовали выплески металла (см. рис. 1, *б* и рис. 2, *в*), что свело к минимуму последующую химическую обработку катодов. Данная лазерная технология позволяет изготовить до 50 заготовок катодов из одной металлической пластины в течение 30 мин.

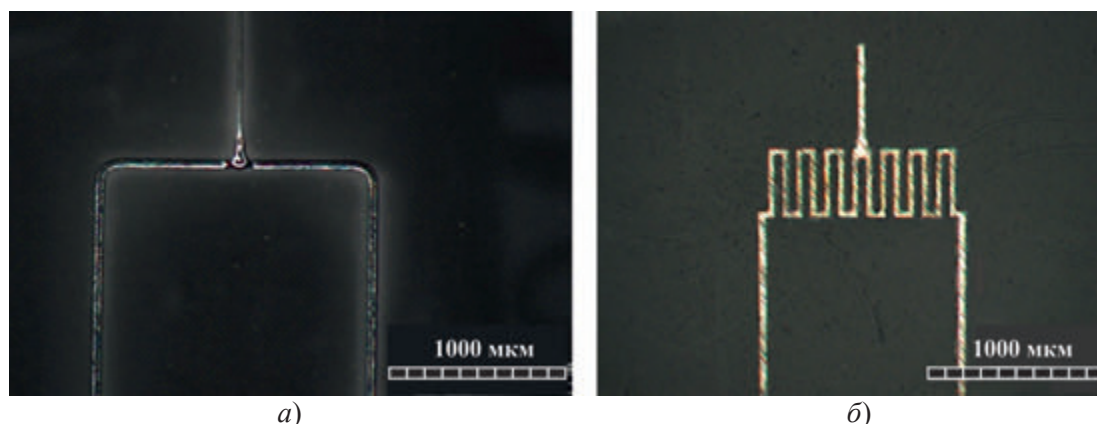


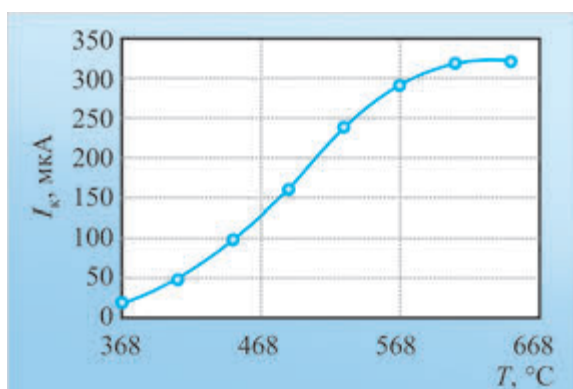
Рис. 2. Изображения МНОК, изготовленных механическим способом из 50 мкм проволоки ВР-27 ВП (*а*), а также с применением ЛПМ (*б*) или фемтосекундного лазера (*в*) из 50-мкм вольфрамрениевой фольги. $\times 100...150$ (см. также с. 64)



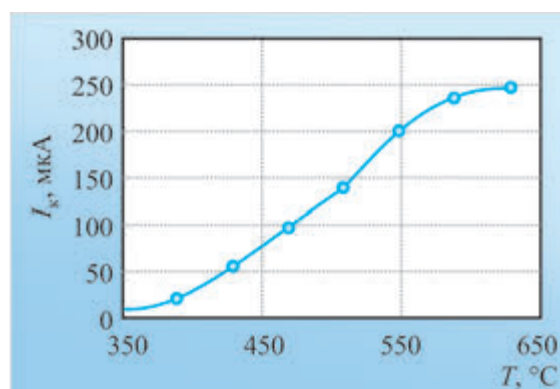
в)

Рис. 2. Изображения МНОК, изготовленных механическим способом из 50 мкм проволоки ВР-27 ВП (а), а также с применением ЛПМ (б) или фемтосекундного лазера (в) из 50-мкм вольфрамениевой фольги. $\times 100 \dots 150$ (окончание)

На рис. 3 представлены накаливающие характеристики МНОК в макетах ЦЗУ, изготовленных с применением ЛПМ в виде цельной конструкции и с приваренным к подогревателю керном, после 500 ч работы. Напряжение на аноде составляло 10 В (рис. 3, а), 14 В (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. Накаливающие характеристики МНОК, изготовленных ЛПМ:
а – в виде цельной конструкции; б – с приваренным керном

В настоящее время в экспериментальных приборах ЦЗУ применяется МНОК, подогреватель которого изготовлен из фольги ВР-27 ВП в виде меандра с применением ЛПМ. Керн из проволоки ВР-20 приваривается к подогревателю и подвергается плющению до толщины 18...20 мкм. Катоды данной конструкции испытаны на вибростенде на внешние воздействующие факторы с применением синусоидальных колебаний в диапазоне вибраций 10...2500 Гц и ускорением до 10g в течение 5 ч. После испытаний механическая прочность и эмиссионные свойства МНОК не ухудшились.

На рис. 4 показан график испытаний на долговечность МНОК, изготовленного ЛПМ из вольфрамениевой фольги в виде цельной конструкции (см. рис. 2, б).

В макете ЦЗУ на данный момент наработка МНОК составила 2000 ч при плотности тока 2,6 А/см². Ухудшение эмиссии незначительное – 10 мкА.

На рис. 5 показана эмиссионная характеристика МНОК (см. рис. 2, в), изготовленного с применением фемтосекундного лазера, после 270 ч работы при напряжении на аноде 15 В. В настоящее время наработка катода в макете ЦЗУ составляет 500 ч.

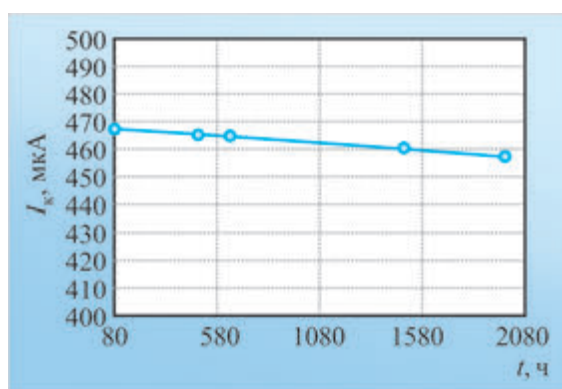


Рис. 4. Испытания на долговечность МНОК, изготовленного ЛПМ из фольги в виде цельной конструкции

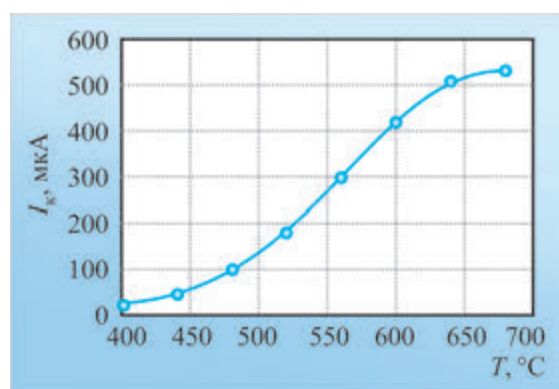


Рис. 5. Накальная характеристика МНОК, изготовленного с применением фемтосекундного лазера после наработки 270 ч

Анализ эмиссионных характеристик МНОК, изготовленных механическим способом, с применением наносекундного ЛПМ и фемтосекундного волоконного лазера, показал, что эмиссионные свойства катодов практически не отличаются [1, 6–8].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования МНОК, изготовленных из вольфрамениевой фольги, проведенные в настоящей работе и в [1, 8], показали, что прецизионная микрообработка импульсным лазерным излучением ЛПМ и волоконным лазером перспективны для применения в ЦЗУ.

Волоконный лазер с фемтосекундной длительностью импульсов излучения по сравнению с наносекундным ЛПМ и механическим способом изготовления МНОК имеет ряд преимуществ: высокую производительность, субмикронные ЗТВ и шероховатость поверхности реза, возможность уменьшения ширины керна до 18...20 мкм, отсутствие трещин и расслоений металла, исключение операции химической обработки катодов от выплесков металла.

Получены положительные результаты испытаний на вибропрочность и долговечность. Достигнута наработка МНОК 2000 ч без ухудшения эмиссионных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жабин, Г. А.** Применение лазера на парах меди в изготовлении молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Д. Ю. Архипов, В. С. Парамонов, В. В. Федотов, К. О. Долгих // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 4 (547). – С. 90 – 97.
2. **Григорьянц, А. Г.** Лазерная прецизионная микрообработка материалов / А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 416 с.
3. **Лябин, Н. А.** Прецизионная микрообработка материалов ИЭТ на автоматизированных лазерных технологических установках «Каравелла» / Н. А. Лябин, В. С. Парамонов, Г. М. Парамонова и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 12 – 20.
4. Лазеры и аппаратура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.laserapr.ru/lasery-i-apparatura/165> (дата обращения 30.03.2021).
5. **Малов, А. Н.** Сравнительные характеристики применения импульсно-периодического CO_2 -, волоконного наносекундного и фемтосекундного лазеров для изготовления микроотверстий / А. Н. Малов, А. М. Оришич, А. В. Достовалов, А. Г. Кузнецов, С. А. Бабин // Прикладная фотоника. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 166 – 182.

6. **Жабин, Г. А.** Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темиряева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.

7. **Жабин, Г. А.** Влияние режимов осаждения молекулярно-напыленных покрытий на микроструктуру и эмиссионные свойства оксидных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, М. П. Темиряева // Прикладная физика. – 2019. – № 5. – С. 54 – 59.

8. **Жабин, Г. А.** Возможности применения фемтосекундного волоконного лазера в изготовлении термоэмиссионных катодов / Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Е. В. Скупневский, Д. Ю. Архипов, К. О. Долгих // Прикладная физика. – 2021. – № 2. – С. 45 – 52.

Статья поступила 1 апреля 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГРИГОРЬЕВ А. Д. **Терагерцовая электроника.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 308 с.

В книге рассматриваются свойства электромагнитных колебаний и волн терагерцового диапазона, особенности их взаимодействия с веществом и причины образования так называемого «терагерцового провала». Изложены принципы действия, элементы теории, конструкции и параметры источников и детекторов терагерцового излучения, основанных как на квантовых эффектах, так и на процессах транспорта носителей заряда в различных средах. Рассматриваются лазеры терагерцового диапазона, источники и детекторы, основанные на фотопроводимости; полупроводниковые, сверхпроводящие и вакуумные источники и детекторы. Подробно описаны проблемы продвижения «классических» микроволновых электровакуумных приборов в терагерцовый диапазон.

Автор надеется, что книга будет полезна разработчикам приборов и аппаратуры терагерцового и микроволнового диапазонов, аспирантам и студентам, изучающим микроволновую электронику, а также ученым и инженерам, использующим терагерцовое излучение в своей деятельности.

УДК 621.385.002:621.37/.39.002.2

55 ЛЕТ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОКАТОДОВ ДЛЯ МОЩНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ

В. А. Смирнов, Ю. А. Потапов, А. В. Коннов

АО «НПП «Торий», г. Москва

Технология плазменного напыления металлооксидных (МОК) и металлопористых катодов (МПК) для мощных вакуумных приборов сверхвысоких частот (СВЧ) отличается высокой производительностью, простотой и дешевизной. При этом существенно сокращается технологический цикл, исключаются все вспомогательные материалы, что обеспечивает высокую воспроизводимость эмиссионных свойств катодов и расширяет диапазон типоразмеров изготавливаемых эмиттеров. Мощные и высоковольтные вакуумные СВЧ-приборы с такими катодами имеют повышенную на 1-2 порядка устойчивость к пробоям и искрениям, а эмиссионная долговечность в приборах достигает для МОК 100 000 ч со средней плотностью тока эмиссии до 5 А/см² и для МПК более 20 000 ч с плотностями эмиссии в импульсном режиме более 30 А/см².

КС: плазмотрон, плазменное напыление катодов, металлооксидный катод, металлопористый катод, плотность тока эмиссии, работа выхода, вакуумные приборы СВЧ

55 YEARS OF PLASMA TECHNOLOGY OF THE EFFICIENT THERMOCATHODES FOR HIGH-POWER MICROWAVE DEVICES

V. A. Smirnov, Yu. A. Potapov, A. V. Konnov

JSC «SPC «Toriy», Moscow

The technology of plasma sputtering of metal-oxide cathodes (MOC) and metal-porous cathodes (MPC) for high-power vacuum devices of microwave frequencies is characterized by high performance, simplicity and low cost. At the same time, the technological cycle is significantly reduced, all auxiliary materials are excluded, which ensures high reproducibility of the emission properties of the cathodes and expands the range of standard sizes of the manufactured emitters. High-power and high-voltage vacuum microwave devices with such cathodes have an increased resistance to breakdowns and sparks by 1-2 orders of magnitude, and the emission durability in devices for MOC reaches 100,000 h with average emission current densities up to 5 A/cm², and for MPC – more than 20,000 h with emission densities in the pulse mode of more than 30 A/cm².

Keywords: plasma generator, plasma sputtering of cathodes, metal-oxide cathode, metal-porous cathode, emission current density, work function, microwave vacuum devices

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанное в АО «НПП «Исток» в 1964 – 1967 годах технологическое оборудование для плазменного нанесения покрытий из порошков: плазмотрон, дозатор и полуавтомат – позволило специалистам АО «НПП «Торий» создать плазменную технологию формирования эмиссионных покрытий оксидных (ОК) и металлопористых катодов (МПК) [1, 2]. В дальнейшем для серийного выпуска катодов это оборудование было усовершенствовано. Повышены термомеханическая стойкость и срок службы плазмотрона (рис.1) при циклическом включении мощности за счет введения керамических втулок и эластичных прокладок [3].

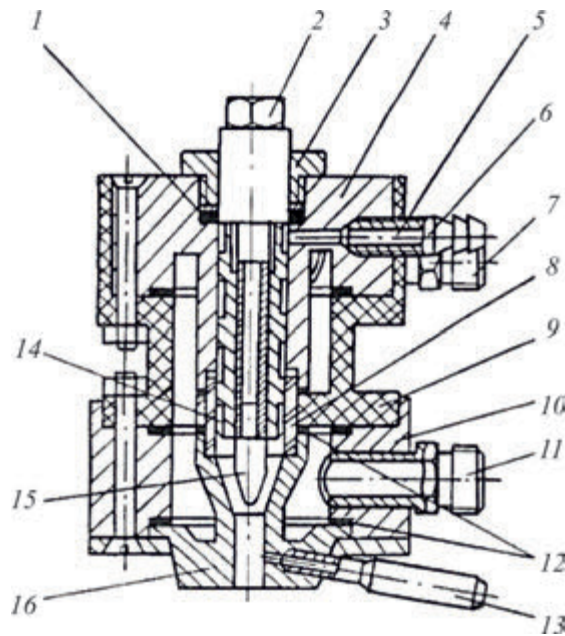


Рис. 1. Конструкция дугового плазмоторона:

1 – прокладка; 2 – цанговый патрон; 3 – гайка; 4 – корпус катодного блока; 5 – канал ввода плазмообразующего газа (аргона); 6 – штуцер; 7 – штуцер ввода охлаждающей воды; 8 – керамическая втулка; 9 – изолятор; 10 – корпус анодного блока; 11 – штуцер выхода воды; 12 – уплотнение; 13 – штуцер ввода порошка; 14 – винтовая канавка; 15 – вольфрамовый электрод; 16 – анод (сопло)

Для обеспечения надежной работы плазмоторона его катод закреплен в цанговом патроне, который вводится по скользящей посадке в корпус катодного блока. Такая конструкция обеспечивает легкую замену электродов и возможность регулировки расстояния катод – анод. В противоточном дозаторе (рис. 2) на пути струи транспортирующего газа 11 установлен экран 2 для разрушения конгломератов частиц порошка 4 наносимого материала, что улучшает однородность структуры покрытия [4].

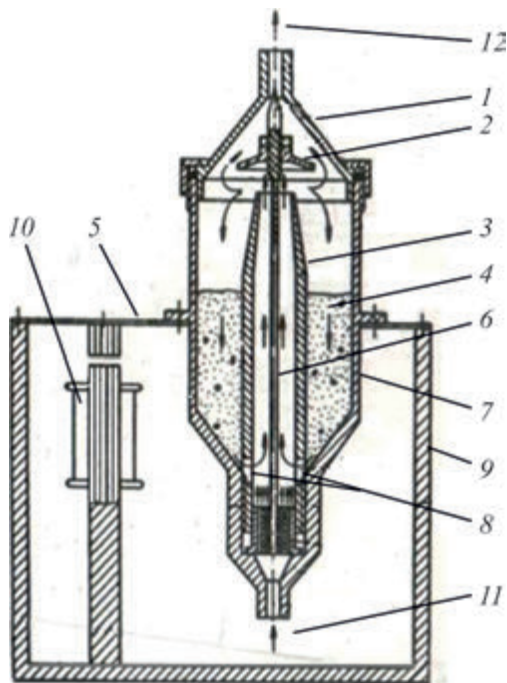


Рис. 2. Дозатор:

1 – крышка; 2 – экран; 3 – трубка (внутренняя емкость); 4 – порошок; 5 – упругая вибрирующая пластина; 6 – инъекционная игла; 7 – корпус; 8 – отверстия для поступления порошка; 9 – стойка; 10 – электромагнит; 11 – входящий поток газа; 12 – выходящая газопорошковая смесь

Разработанные полуавтоматы (более четырех видов) имели герметичную звукоизолированную камеру (камеры) (рис. 3, 4) с расположенными в ней механизмами перемещения кернов катодов, плазмоторном и дозатором [5].

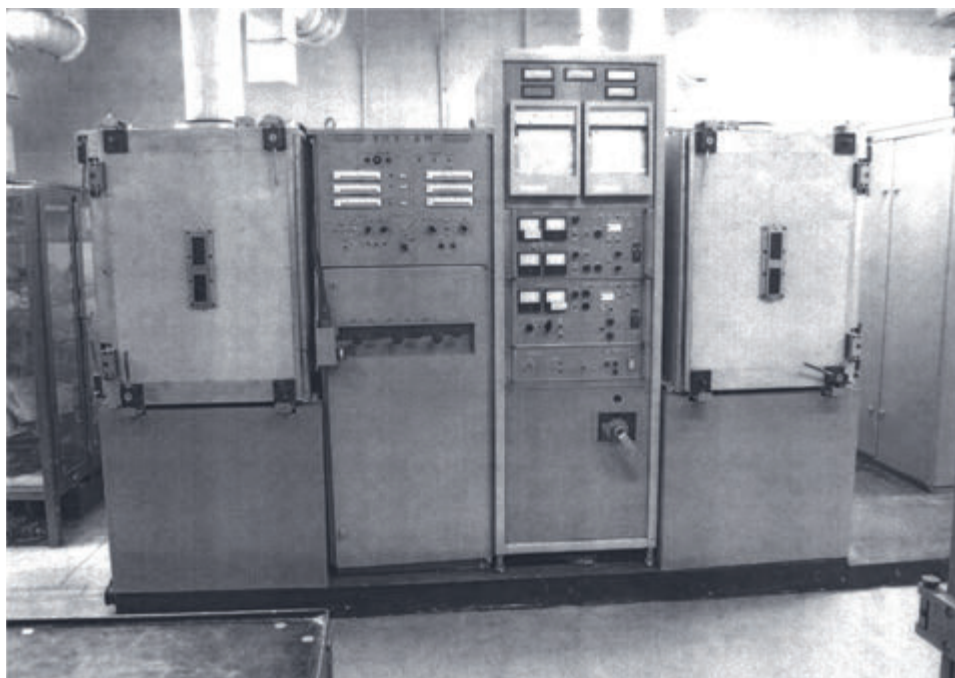


Рис. 3. Общий вид двухкамерной установки плазменного напыления катодов различной геометрии (АО «НПП «Торий»)

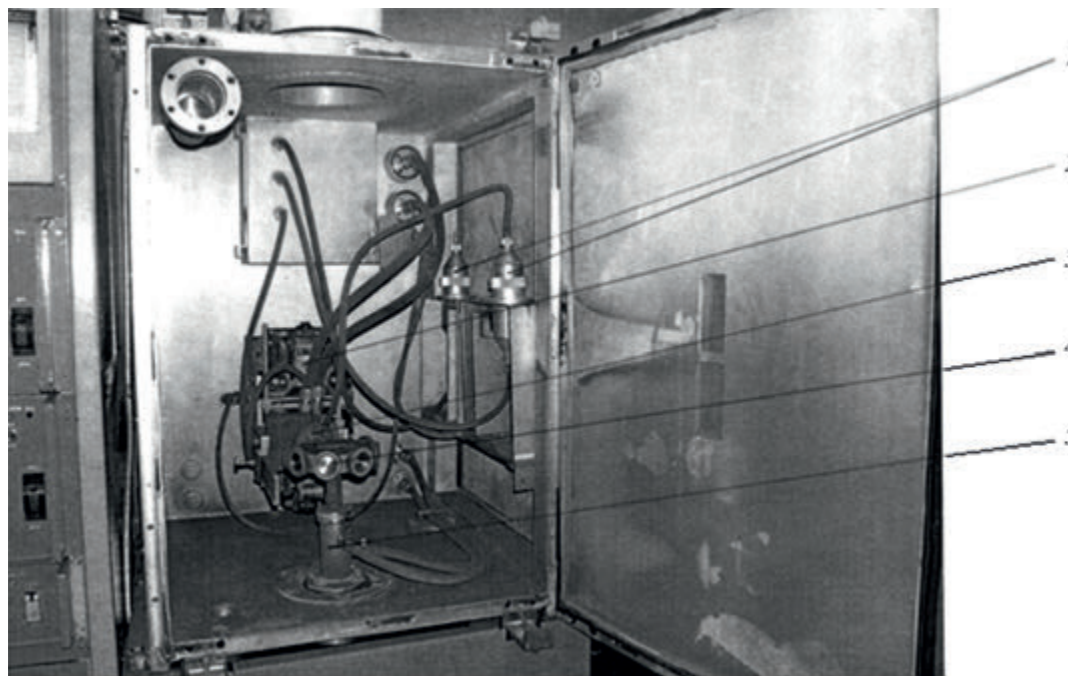


Рис. 4. Камера плазменного напыления с вращающимся держателем восьми кернов катодов:
1 – два дозатора для подачи порошка в плазмотрон; 2 – механизм перемещения катодов;
3 – плазмотрон; 4 – оснастка для покрытия катодов; 5 – механизм вращения катодов

Пульт управления позволяет регулировать движение кернов катодов, мощность плазмотрона, расходы транспортирующего и плазмообразующего газов, расход порошка.

2. ОКСИДНЫЕ КАТОДЫ

Технологический цикл производства ОК значительно сократился за счет исключения операций приготовления суспензий. Порошок тройного карбоната $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ состава 47:43:10 моль (%) и размером частиц $2\ldots 5$ мкм напыляется непосредственно на kern катода, при этом плотность покрытия составляет $4,2\ldots 4,6$ г/см³ благодаря частичному разложению карбонатов в окислы. На рис. 5 показана послойная схема частицы после прохождения в плазменной струе с температурой $(10\ldots 15)\cdot 10^3$ °С.

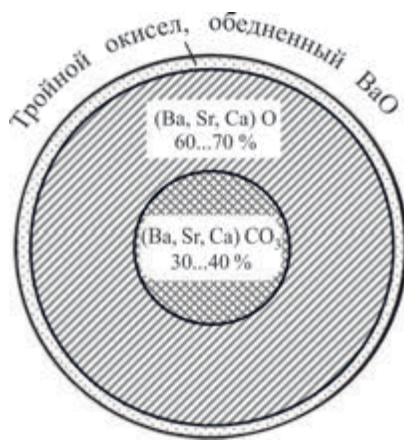


Рис. 5. Послойная схема частицы порошка после 100 мкс пребывания в плазменной струе

Поверхностный оплавленный слой частицы толщиной в несколько нанометров, как показал послойный анализ [6], состоит из $(\text{CaSr})\text{O}$, что обеспечивает устойчивость покрытия к гидратации. Это, однако, не снижает эмиссионных свойств катода, поскольку последующие операции прокали его в вакуумном приборе приводят к выравниванию состава за счет диффузионных процессов и роста кристаллов окислов. Более

распространенный вид ОК, применяемый в мощных СВЧ-приборах, – опрессованный синтерированный катод [7] (он же металлооксидный катод (МОК)). У него толщина эмиссионного слоя составляет (70 ± 5) мкм с содержанием эмиссионного вещества $12\ldots 14$ мг/см² в никелевом синтер-слое.

Газоотделение у этих катодов существенно меньше, чем у традиционных однотипных катодов (с одинаковым содержанием эмиссионного вещества) (рис. 6), так как нет органической составляющей, и карбонат частично разложен.

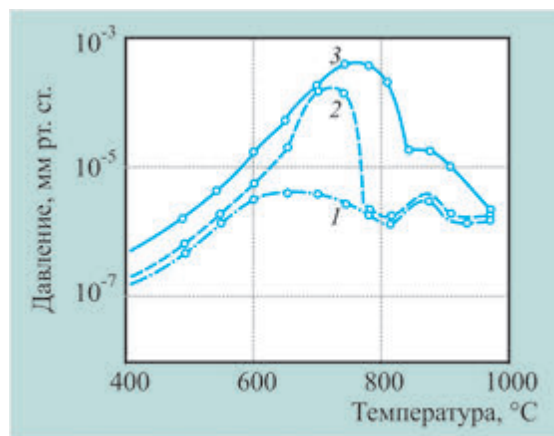


Рис. 6. Сравнительное газоотделение МОК в процессе откачки:

1 – kern катода; 2 – катод, изготовленный по плазменной технологии; 3 – катод, изготовленный по традиционной технологии методом пульверизации

По этой же причине скорость испарения [8] (рис. 7) меньше в $2\ldots 4$ раза, что позволило существенно улучшить рабочие характеристики мощных приборов. Особенно наглядны изменения в производстве генераторов мощных импульсов (ГМИ), эмитирующая поверхность которых достигает 1000 см² и более, а рабочее напряжение – до 70 кВ и выше.

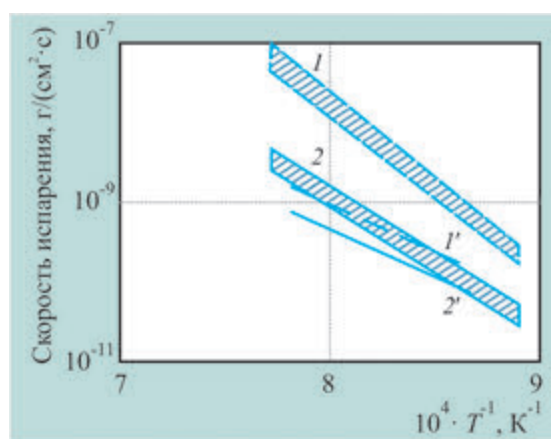


Рис. 7. Зависимости скорости испарения эмиссионного вещества (по ВаО) от температуры катода:

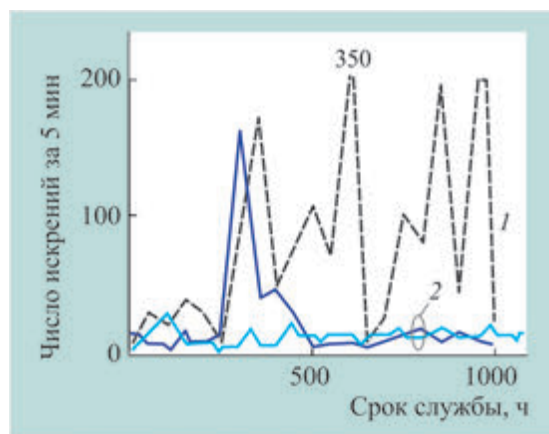
1 и 1' – с карбонатным покрытием; 2 и 2' – покрытие нанесено плазменным методом;
1 и 2 – после обезгаживания и активации; 1' и 2' – после тренировки в течение 200 ч

Если катодный блок с обычными катодами приходилось предварительно прокалывать в отдельной камере, а затем, при пониженном накале, чтобы избежать гидратации эмиссионного вещества, переносить по воздуху в прибор, то для катодов, изготовленных по плазменной технологии, этого не требовалось.

Как видно из рис. 8, электропрочность ГМИ значительно возросла, что характеризуется уменьшением числа пробоев на 1-2 порядка.

Рис. 8. Изменение электрической прочности ГМИ-18А во время срока службы:

1 – с катодами, покрытыми карбонатами;
2 – с катодами, полученными плазменным напылением



Этот факт сыграл решающую роль по внедрению МОК в серийное производство ГМИ, ЛБВ, магнетронов и клистронов. Общий вид образцов МОК представлен на рис 9.

Благодаря высокой плотности эмиссионного вещества и уменьшению толщины слоя эмиттера, удалось повысить электропроводность, теплопроводность и однородность структуры МОК [9]. Для приборов О-типа, как следует из рис. 10, стало возможным увеличение плотности тока в импульсном режиме в 1,5...2 раза, особенно при длинных импульсах (до 1 мс).



Рис. 9. Образцы металлооксидных катодов

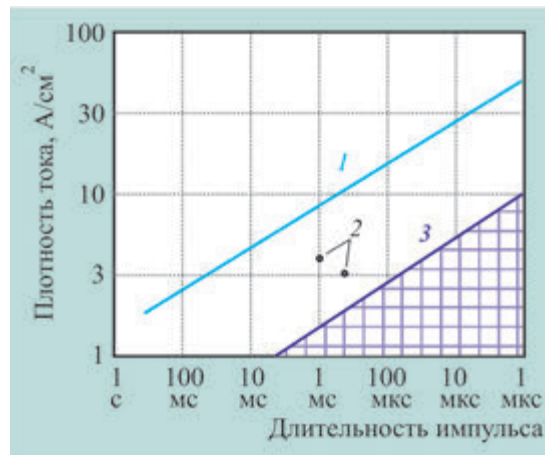


Рис. 10. Плотность тока МОК, изготовленных методом плазменного напыления:

1 – экспериментальные приборы; 2 – серийно выпускаемые приборы; 3 – данные из литературных источников по традиционно изготавливаемым катодам



Рис. 11. Форма импульса тока в магнетроне:
1 – МПК; 2 – МОК

В приборах М-типа мощность обратной электронной бомбардировки на катод удалось поднять до 5 Вт/см^2 . Надо также отметить выигрышное применение МОК (по сравнению с МПК) в импульсном микросекундном режиме для уменьшения переднего фронта импульса (рис. 11) за счет высокого коэффициента вторичной электронной эмиссии ($\sigma = 3 \dots 3,5$) [10], т. к. $I_{\text{вт}} = I_{\text{пер}} (\sigma - 1)$, где $I_{\text{пер}}$ – импульсный ток термоэмиссии с катода, $I_{\text{вт}}$ – импульсный ток вторичной эмиссии с катода.

Эмиссионные свойства МОК можно характеризовать эмпирическим уравнением для работы выхода (эВ): $\phi = 1,4 + (5 \pm 1) \cdot 10^{-4} (T - 800)$ в интервале рабочих температур $T = 1020 \dots 1120 \text{ К}$. При длительной эксплу-

атации (более 10 000 ч) рекомендуемые значения по плотности тока: в непрерывном режиме – до $0,5 \text{ А/см}^2$, в импульсном режиме – до 5 А/см^2 при скважности не менее 1000. Вакуум в приборах должен быть не хуже $2 \cdot 10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$, причем остаточные газы должны на 90 % состоять из водорода, что обычно гарантируется при откачке турбомолекулярным насосом.

Поскольку в указанном диапазоне температур испарение эмиссионного вещества происходит конгруэнтно [11], эмиссионная долговечность катода очень высока, достигает, например, для ЛБВ более 100 000 ч, для ГМИ и клистронов более 10 000 ч и ограничивается, как показал анализ, в основном потерей формоустойчивости катодного узла при термических циклах включения/выключения катода и натеканием прибора.

3. МЕТАЛЛОПОРИСТЫЕ КАТОДЫ

Технологический цикл изготовления МПК плазменным методом существенно сократился по сравнению с традиционной технологией Леви. Исключены операции прессования и спекания

вольфрамовых штабиков, пропитка их медью с последующим ее выпариванием. Исключены и другие вспомогательные материалы: бензин, парафин. Вольфрамовые матрицы [8] толщиной 0,5...0,6 мм формируются непосредственно на молибденовом керне катода заданной формы. Частицы вольфрама ускоряются в плазменной струе до 1...2 км/с, оплаиваются с поверхности и при ударе о подложку прочно привариваются к ней и между собой [8, 12]. Поры в такой матрице имеют форму щелей, ширина которых существенно меньше размера частиц. Поэтому коэффициент газопроницаемости такой матрицы по воздуху $K_g = Vh/(\tau\Delta pS)$ (где V – объем газа, прошедший через матрицу, см³; h – толщина матрицы, см; τ – время, с; Δp – разность давления по обе стороны матрицы, атм; S – площадь матрицы, см²) резко снизился до $(2,5...2,6) \cdot 10^{-4}$ см²/(с·атм) по сравнению с традиционной структурой $(1,2...1,6) \cdot 10^{-2}$ см²/(с·атм), а запас эмиссионного вещества $3\text{BaO} \cdot 0,5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ в ней составляет 4,5...5 % (масс.) Важно, что эта структура в дальнейшем при нагревании катода в приборе не имеет усадки.

Стоит отметить, что исходный порошок вольфрама марки ВЧДК фракции «А» подвергался операции окисления-восстановления [13, 14] с целью уменьшения количества мелких частиц, которые в плазменной струе могут полностью расплавляться и образовывать замкнутые поры в матрице.

На рис. 12 приведены фотографии частиц, а на рис. 13 их ломограммные распределения по размерам с указанием моды (наиболее вероятного) и среднестатистического размера [15, 16]. Видно существенное уменьшение мелкой фракции порошка после операции окисления-восстановления и дальнейшее незначительное отличие гранулометрического состава после прохождения его в плазменной струе.

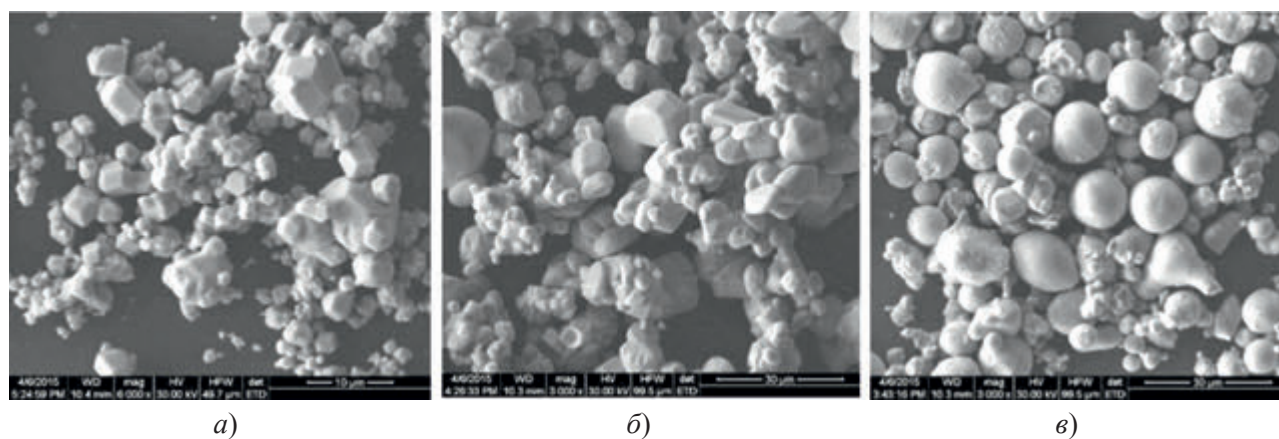


Рис. 12. Фотографии частиц вольфрамового порошка (разрешение – 30 мкм):

а – исходный порошок; б – после операции окисления-восстановления;
в – после прохождения через плазменную струю

Щелевая структура пор (рис. 14) снижает бесполезный кнудсеновский поток I испаряющихся атомов бария, в то время как их миграционный поток 2 на эмитирующую поверхность возрастает из-за увеличения периметра пор [12, 30, 31].

Указанные структурные особенности таких матриц приводят к уменьшению скорости испарения бариевой компоненты (рис.15) в 4...5 раз по сравнению с лучшими известными композиционными образцами [17] и повышению однородности эмиссии по поверхности катода.

Появляется возможность снижения температуры катода на 40...50 °С до 1050...1100 °С, при этом электропрочность приборов (уменьшение числа пробоев) возрастает на порядок.

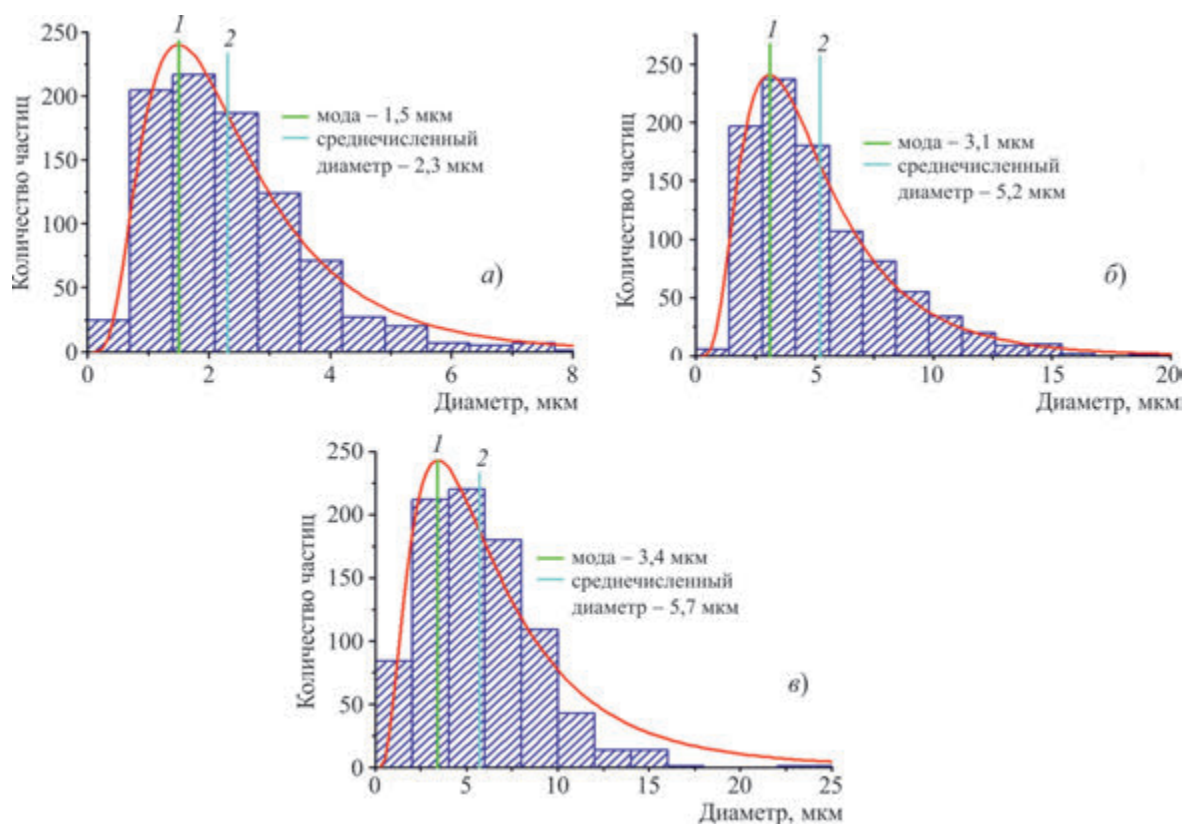


Рис. 13. Распределения частиц вольфрамового порошка по размерам:

а – исходный порошок; б – после операции окисления-восстановления;

в – после прохождения через плазменную струю

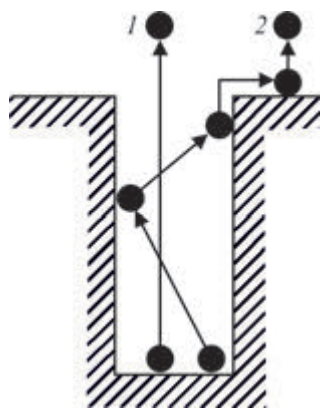


Рис. 14. Схема миграции и испарения атомов Ва из поры матрицы МПК:

1 – кнудсеновский поток;
2 – миграционный поток

Наиболее привлекательным использованием плазменной технологии в серийном производстве МПК оказалось в приборах М-типа [12] из-за своей простоты и значительной экономии вольфрамового порошка. На рис. 16 показаны схемы конструкций катодов для приборов О- и М-типа.

Другим важным примером применения такой технологии является изготовление катодов конической формы для гиротронов, т. к. покрытие не имеет усадки, не растрескивается и обладает высокой однородностью эмиссии, что важно для сохранения высокого КПД приборов [18]. На рис. 17 показано азимутальное изменение плотности тока кольцевого катода диаметром 90 мм в виде усеченного конуса, на поверхности которого находится эмитирующий пояс шириной 5 мм и диаметром 80 мм. Для сравнения представлено распределение тока с гексаборидлантанового (LaB_6) катода, также используемого в гиротронах.

Как следует из рис. 17, неоднородность эмиссии МПК не превышает $\pm 5\%$, а для LaB_6 -катада она составляет $\pm 23\%$ от среднего значения тока. Благодаря этому качеству и более низкой рабочей температуре, МПК были использованы в нескольких типах мощных (до 1 МВт) гиротронов, работающих на частоте 110...170 ГГц с КПД 35...40% [19]. На рис. 18 показаны фотография катодного узла гиротрона и схема катода.

Рис. 15. Зависимость скорости испарения бариевой компоненты от температуры МПК:
1 – ММ (W + Os); 2 – СММ (W + Os/Os); 3 –
плазменный катод после 7500 ч работы при 1380 К

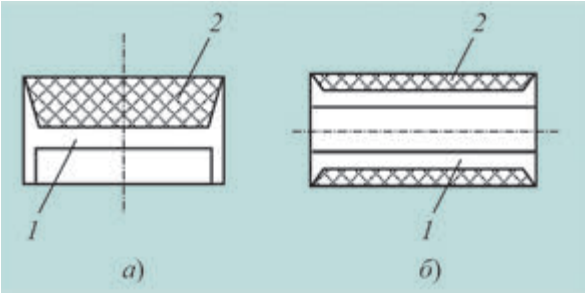
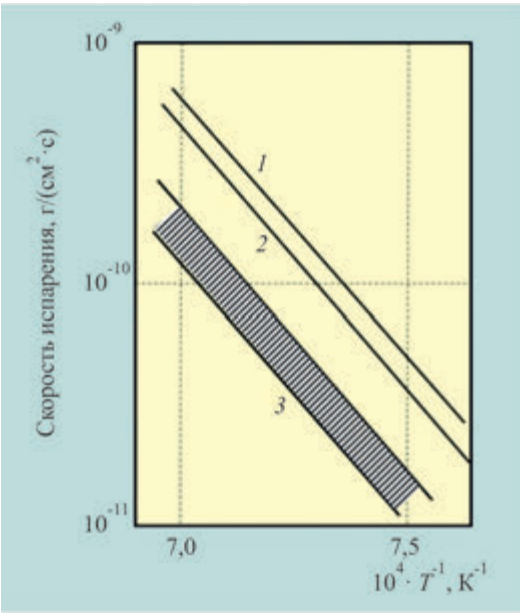
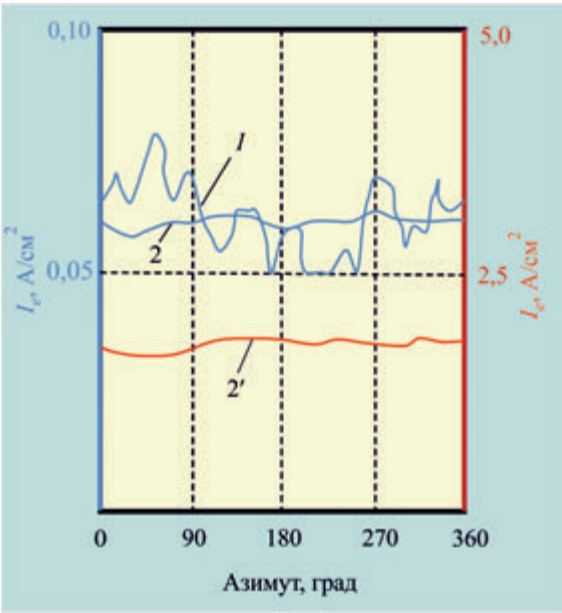


Рис. 16. Схемы торцевого (а) и цилиндрического (б) катодов:
1 – молибденовый сердечник; 2 – пористая вольфрамовая матрица,
пропитанная алюминатом бария-кальция

Рис. 17. Азимутальное распределение плотности тока для LaB_6 (1) и плазменных металлопористых ($\text{W}-3\text{BaO}$, $\text{SCaOAl}_2\text{O}_3$) (2 и 2') катодов гиротронов, имеющих рабочие температуры:
1 – 1500 К; 2 – 1230 К; 2' – 1300 К



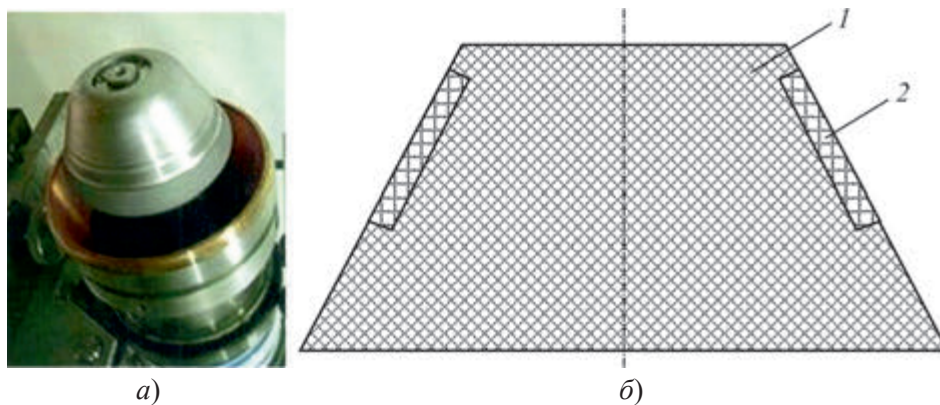


Рис.18. Катодный узел МПК гиротрона (а) и схема его эмиттера (б):

1 – kern катода; 2 – эмиссионная поверхность

Интересно отметить использование плазменной технологии при изготовлении крупногабаритных эмиттеров [20, 23] для многолучевых клистронов и сильноточных катодов на несколько килоампер. На рис. 19 показано фото катодного узла многолучевого клистрона КИУ-40 [22] с диаметром каждого эмиттера 30 мм и крупногабаритный катод диаметром 200 мм на ток 3...5 кА для физических экспериментов [24].

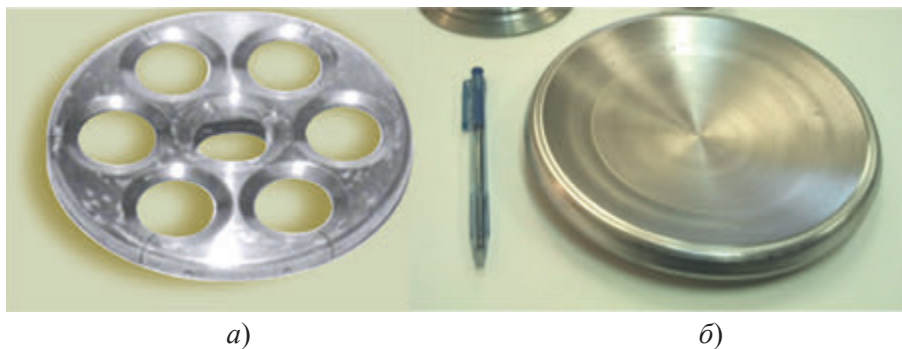


Рис. 19. Многолучевой катод с плазменным МПК (диаметр луча – 30 мм) (а) и крупногабаритный катод диаметром 200 мм на ток 3...5 кА (б)

Разработана также серия катодных узлов для ускорителей досмотровой техники, дефектоскопии и многофункциональных станций электронной обработки [25]. Катодные узлы обеспечивают электропрочность и виброустойчивость аппаратуры в условиях высоких напряжений и механических нагрузок.

Создан вариант технологии катодов с двухслойной матрицей [26, 29], когда на обычный МПК наносится матрица плазменным методом толщиной 50...100 мкм. Нижняя пористая матрица обеспечивает большой запас эмиссионного вещества, а верхняя – меньшую скорость его испарения и высокую однородность эмиссии по поверхности катода. Такие катоды позволили увеличить срок службы многолучевых клистронов на порядок при отборе плотности тока до 20 А/см² в импульсном квазинепрерывном режиме и обеспечили отбор тока до 30 А/см² в непрерывном режиме для СВЧ-приборов миллиметрового диапазона.

Эмиссионные свойства плазменно-напыленных катодов в интервале температур 1200...1400 К можно представить эмпирическим уравнением для работы выхода (эВ): $\phi = 1,95 + (5 \pm 1) \cdot 10^{-4}(T - 1300)$, где T – температура, К.

Технически рекомендуемый отбор тока для приборов О-типа – до 20 А/см² в непрерывном и до 30 А/см² в импульсном режиме. Для приборов М-типа допускается мощность обратной электронной бомбардировки катода до 10 Вт/см². К настоящему времени получена апробация эмиссионной долговечности МПК в серийно выпускаемых приборах. Например, в мощном 5...6-МВт многолучевом клистроне КИУ-40 при плотности тока 4...5 А/см², длительности импульса 140...250 мкс и частоте следования импульсов 50 Гц получена долговечность в динамическом режиме более 20 000 ч. Эксплуатация приборов продолжается.

Известны также наработки более 5000 ч мощных (более 1 МВт) гиротронов.

4. ФОРСИРОВАННЫЕ РЕЖИМЫ ОТБОРА ТОКА

Поскольку в МОК и МПК, изготовленных плазменным методом, скорость испарения эмиссионного вещества меньше из-за более плотной структуры эмиттеров, возможно кратковременное повышение рабочей температуры катодов для отбора больших плотностей тока, на порядок превышающих значения при работе в обычных режимах. В работах [27, 28] показано, что для МОК при 900...950 °С и МПК при 1200...1250 °С возможен гарантированный отбор тока соответственно до 100...150 и до 300 А/см² в импульсном микросекундном режиме в течение не менее 300 ч. Это позволит разрабатывать приборы с ограниченной долговечностью, но с большей удельной нагрузкой, меньшими габаритами и массой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плазменная технология МОК и МПК отличается высокой производительностью, простотой и дешевизной, существенно сокращает технологический цикл, исключая при этом все вспомогательные материалы, что обеспечивает высокую воспроизводимость эмиссионных свойств катодов, расширяет диапазон типоразмеров изготавливаемых эмиттеров.

СВЧ-приборы О- и М-типа (особенно мощные и высоковольтные) с такими катодами имеют повышенную на 1-2 порядка устойчивость к пробоям и искрениям, а эмиссионная долговечность в приборах достигает для МОК 100 000 ч и для МПК более 20 000 ч.

В дальнейшем применение плазменной технологии перспективно при изготовлении МОК и МПК для приборов, где требуется высокая плотность тока (30 А/см² и более), например в СВЧ-приборах миллиметрового диапазона, и для высоковольтных сверхмощных вакуумных устройств с крупногабаритными эмиттерами (площадью 100...1000 см² и более) на токи 1...10 кА и более.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А. с. № 190493 СССР.** Способ нанесения эмиссионных покрытий на керны катодов электровакуумных приборов / В. В. Андреев, В. Н. Ильин, Ю. В. Куликов, А. Г. Родкин, В. А. Смирнов. – Приоритет 29.06.1965.
2. **Ким, А. Н.** Плазменный метод нанесения тонких плотных покрытий из окислов щелочно-земельных металлов на керны катодов / А. Н. Ким, Ю. В. Куликов, А. Г. Родкин, В. А. Смирнов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 4. – С. 129 – 132.
3. **А. с. № 1094570 СССР.** Электродуговой плазмотрон / Ю. А. Потапов, В. Н. Вигдорович, В. А. Смирнов. – Приоритет 26.01.1982.
4. **А. с. № 1284262 СССР.** Питатель для подачи порошка в плазмотрон / Ю. А. Потапов, В. Н. Вигдорович, В. А. Смирнов. – Приоритет 26.06.1984.
5. **Зубов, Л. Н.** Нанесение покрытий катодов плазменным методом / Л. Н. Зубов, Ю. А. Потапов, В. А. Смирнов, В. Л. Шугаев // Электронная промышленность. – 1977. – № 1. – С. 102.

6. **Смирнов, В. А.** Скорость испарения оксидных катодов, покрытых плазменным методом / В. А. Смирнов, Н. Д. Калинина, Л. Н. Зубов, Ю. А. Потапов, Г. Б. Румянцев // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1973. – Вып. 11. – С. 67 – 71.
7. **Зубов, Л. Н.** Технология покрытия губчатых оксидных катодов плазменным методом / Л. Н. Зубов, Ю. А. Потапов, В. А. Смирнов // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1969. – Вып. 12. – С. 128 – 133.
8. **Смирнов, В. А.** Катоды со специальными характеристиками для сверхмощных электровакуумных приборов / В. А. Смирнов // *Материалы VIII-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2001. – С. 208 – 211.
9. **Киселев, А. Б.** Электрические и технические свойства покрытий оксидных катодов / А. Б. Киселев, В. А. Смирнов // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1966. – Вып. 5. – С. 150 – 153.
10. **Смирнов, В. А.** Источники электронов с установленной эмиссией / В. А. Смирнов, Ю. С. Судаков // *Материалы VIII-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2001. – С. 204 – 208.
11. **Смирнов, В. А.** Исследование испарения компонентов оксидного катода во время его длительной работы // В. А. Смирнов // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1987. – Вып. 1 (395). – С. 36 – 40.
12. **Смирнов, В. А.** Высокоэффективные металлопористые (импрегнированные) катоды для электровакуумных приборов / В. А. Смирнов // *Материалы X-й юбилейной научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2003. – С. 436 – 442.
13. **Зеликман, А. Н.** *Металлургия редких металлов* / А. Н. Зеликман. – М.: Металлургия, 1980. – 328 с.
14. **Крылов, А. В.** Влияние процессов окисления-восстановления вольфрамового порошка на изменение его гранулометрического состава и структуры металлопористых катодов / А. В. Крылов, В. А. Смирнов // *Материалы VIII-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2001. – С. 203 – 204.
15. **Smirnov, V. A.** Metal-porous cathodes with gap pore structure / V. A. Smirnov, P. I. Akimov, V. Yu. Alexandrov, V. V. Ivanov, G. V. Melnichuk, Yu. A. Potapov, V. G. Chudin, E. P. Sheshin // *11th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*. 2016. Seoul. Korea. – P. 121 – 124.
16. **Смирнов, В. А.** Исследование металлопористых катодов со щелевой структурой пор / В. А. Смирнов, П. И. Акимов, В. Ю. Александров, В. В. Иванов, Ю. А. Потапов, В. Г. Чудин, Е. П. Шешин // *Материалы XXIII-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2016. – С. 278.
17. **Shroff Par, A. M.** Les cathodes impregnees / A. M. Shroff Par, P. Palluel // *Revue Technique Thomson-GSF*. – 1982. – Vol. 14, No 3. – P. 584 – 655.
18. **Патент № 2101797 РФ.** Катод для giro- и релятивистских СВЧ-приборов / В. А. Смирнов, В. Н. Ильин, Н. И. Зайцев, В. Е. Мясников, Ю. А. Потапов, Ю. С. Судаков. – 10.01.1998; Бюл. № 1.
19. **Andronov, A. V.** Metal-porous cathodes – effective sources of electron emission for high-power gyrotrones / A. V. Andronov, V. N. Il'in, V. A. Khmara, A. A. Luchin, O. I. Lucsha, S. P. Makarova, O. Yu. Maslennikov, S. V. Roborero, V. A. Smirnov, G. G. Sominsky // *1st International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*. 1996. Eindhoven, Netherlands. July 1–4. – P. 213.
20. **Smirnov, V. A.** Plasma spraying metal-porous cathodes for high-power microwave devices / V. A. Smirnov, P. I. Akimov, G. V. Melnichuk, V. G. Chudin, A. P. Nikitin, I. A. Freydovich, Yu. A. Potapov, Yu. S. Sudakov, A. B. Bogoslovskaya // *14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2013)*. 2013. Paris, France. 21 – 23 May. – P. 70.
21. **Артюх, И. Г.** Термокатоде для электровакуумных приборов / И. Г. Артюх, М. В. Калинин, Б. Х. Кацнельсон, А. А. Лучин, О. Ю. Масленников, В. А. Смирнов, О. В. Иванов // *Зарубежная радиоэлектротехника*. – 1998. – № 5. – С. 72.
22. **Дроздов, С. С.** Многолучевой источник электронов для мощных электровакуумных приборов / С. С. Дроздов, О. Ю. Масленников, В. А. Смирнов, Ю. С. Судаков // *Материалы XI-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2004. – С. 312 – 316.
23. **Yakovlev, V. P.** 100 MW electron gun for a 34,3 Ghz magnicon / V. P. Yakovlev, O. A. Nezhevenko, M. A. La Pointe, J. L. Hirshfield, M. A. Butazova, G. I. Kuznetsov // *Particle Accelerator Conference Proceedings*. 2001. – P. 1041.
24. **Корнюхин, А. А.** Сильноточный источник электронов для ускорителя-инжектора / А. А. Корнюхин, А. В. Крылов, Г. И. Кузнецов, Н. В. Логачев, О. Ю. Масленников, Ю. А. Потапов, В. А. Смирнов, Ю. С. Судаков // *Материалы XV-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника»*. 2008. Сочи. – С. 191 – 195.
25. **Смирнов, В. А.** Источники электронов для ускорителей / В. А. Смирнов, П. И. Акимов, В. В. Антонов, Д. А. Гладышев, А. В. Грызлов, Ю. А. Потапов, В. Н. Сигалаев, А. С. Симонов, Ю. С. Судаков, В. Г. Чудин // *Материалы V-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. 2016. Санкт-Петербург. – Т. 1. – С. 120.

26. **Патент на полезную модель № 171957 РФ.** Металлопористый резервуарный катод / В. А. Смирнов, П. И. Акимов, В. Ю. Александров, Е. П. Шешин, Г. В. Мельничук, В. Г. Чудин, Ю. А. Потапов, А. П. Никитин, В. В. Иванов. – 09.09.2016.
27. **Масленников, О. Ю.** Исследование эмиссии оксидных катодов в форсированных режимах / О. Ю. Масленников, В. А. Смирнов // Материалы XVI-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2009. – С. 308 – 310.
28. **Акимов, П. И.** Ресурсные испытания металлопористых катодов в форсированных режимах / П. И. Акимов, К. В. Кузьмич, О. Ю. Масленников, В. А. Смирнов, А. О. Омельченко, В. Г. Чудин // Материалы I-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2012. Санкт-Петербург. – С. 88 – 91.
29. **Смирнов, В. А.** Плазменнонапыленные металлопористые катоды с многослойной структурой эмиттера для электровакуумных приборов / В. А. Смирнов, Ю. А. Потапов, Ю. С. Судаков, В. Г. Чудин // Материалы III-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2014. Санкт-Петербург. – С. 52 – 55.
30. **Смирнов, В. А.** Щелевые металлопористые катоды / В. А. Смирнов, П. И. Акимов, В. В. Иванов, Е. П. Шешин, В. Ю. Александров, Ю. А. Потапов // Материалы VI-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2017. Санкт-Петербург. – С. 96.
31. **Kudryashov, A. V.** Metal porous catodes with gap pore structure / A. V. Kudryashov, P. I. Akimov, V. A. Smirnov, E. P. Sheshin, V. Y. Alexandrov, V. V. Ivanov, Y. A. Potapov, M. Vorobyev, I. Frolov, V. P. Sakharov // Proceedings of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2017). 2017. 24 – 26 April. London, UK. Poster session 1. ID280.

Статья поступила 7 апреля 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГАВРИЛОВ К. Ю. Моделирование и обработка радиолокационных сигналов в Matlab: Учебное пособие / Гаврилов К. Ю., Каменский И. В., Кирдяшкин В. В., Линников О. Н.; Под ред. Гаврилова К. Ю. – М.: Радиотехника, 2020. – 264 с.

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи» в качестве учебного пособия для обучающихся по образовательным программам высшего образования уровня специалист по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Рассмотрены методы моделирования радиоэлектронных сигналов при отражении от сложных целей, принципы моделирования аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов, включающие формирование двумерной матрицы цифровых отсчетов, методы согласованной фильтрации, обнаружения и обработки сигналов в импульсно-доплеровских радиолокационных системах.

Показаны примеры обработки наиболее распространенных видов радиолокационных сигналов – импульсных, с линейной частотной модуляцией и фазо-кодоманипулированных сигналов. Приведены программы моделирования и обработки сигналов в среде Matlab.

Для студентов, аспирантов и инженеров, изучающих и использующих теорию радиолокации и методы моделирования и обработки радиолокационных сигналов. Будет полезно научным работникам и разработчикам радиолокационных систем.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632

ГЕНЕРАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМОПОДОБНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАЛОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНОЙ ЛБВО С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А. А. Иванов¹, Р. М. Розенталь², М. Н. Вилков², Н. С. Гинзбург²

¹АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород

²ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН», г. Нижний Новгород

В рамках нестационарной распределенной модели лампы бегущей волны с запаздывающей обратной связью получены решения, соответствующие генерации «сплошного» шумоподобного спектра излучения. Проведены исследования экспериментального макета спиральной ЛБВО С-диапазона и получены широкополосные режимы генерации с интегральной мощностью до 2 Вт.

КС: лампа бегущей волны, запаздывающая обратная связь, шумоподобное излучение

GENERATION OF BROADBAND NOISE-LIKE RADIATION WITH A LOW SPECTRUM IRREGULARITY BASED ON HELIX TWTO WITH DELAYED FEEDBACK

A. A. Ivanov¹, R. M. Rosental'², M. N. Vilkov², N. S. Ginzburg²

¹JSC «RPE «Salut», Nizhny Novgorod

²FSBSI «FRC Institute of Applied Physics Russian Academy of «Science», Nizhny Novgorod

In the framework of a nonstationary distributed model of a travelling wave tube with delayed feedback, the solutions were obtained corresponding to generation of a «continuous» noise-like radiation spectrum. The experimental prototype of the C-band helix TWTO was investigated and broadband generation modes with an integrated power of up to 2W were obtained.

Keywords: travelling wave tube, delayed feedback, noise-like radiation

1. ВВЕДЕНИЕ

Генерация широкополосного шумоподобного СВЧ-излучения представляет интерес для целого ряда приложений. Прежде всего можно выделить применение в локационных системах [1–3]. На сегодняшний день на основе шумоподобных сигналов созданы образцы радиолокационных станций [4], локаторов локализации подземных трубопроводов [5] и живых организмов [6], систем неразрушающего контроля [7]. Обсуждаются перспективы использования такого излучения для задач томографии [8, 9], контроля качества пищевой продукции [10], спектроскопических приложений [11, 12]. Привлекательным является и построение каналов связи повышенной защищенности, основанных на использовании широкополосного излучения с хаотической динамикой [13, 14].

Одним из распространенных методов генерации хаотических сигналов является использование усилителей с запаздывающей обратной связью [15]. При этом впервые подобные генераторы были реализованы на основе ЛБВО [16, 17]. Первые исследования показали, что спектр хаотического излучения характеризуется значительной неравномерностью, обусловленной наличием достаточно высокочастотных собственных мод кольцевого резонатора, формируемого петлей обратной связи.

Для улучшения равномерности спектра в ИРЭ РАН было предложено включать в цепь обратной связи ЛБВ нелинейный элемент, обеспечивающий нелинейный амплитудно-зависимый сдвиг фазы сигнала (т.н. нелинейная флуктуирующая задержка) [18–20]. Это приводило к случайному сдвигу собственных частот кольцевого резонатора и размыванию соответствующих спектральных линий. Такие системы, где в качестве нелинейного элемента выступала вторая ЛБВ, работающая в сильно нелинейном режиме, получили название «шумотрон» [21–25].

При этом в ходе исследований также были обнаружены режимы, в которых шумоподобные сигналы с малой изрезанностью спектра наблюдались и в ЛБВ, в цепь обратной связи которой включался, по сути, единственный элемент (кроме направленного ответвителя) – регулируемый аттенуатор¹.

Очевидно, подобные режимы работы представляют значительный интерес, в силу заметного упрощения конструкции хаотического генератора (использование единственного усилителя, вместо комбинации двух усилителей).

Ниже будет показано существование режимов хаотической генерации с малой неравномерностью спектра в рамках нестационарной распределенной модели ЛБВ с линейной цепью обратной связи. Выводы теории подтверждены результатами экспериментальных исследований спиральной ЛБВ С-диапазона.

2. НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ЛБВ

В приближении малого изменения скорости частиц процесс усиления в ЛБВО может быть описан известной системой уравнений [26, 27]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial a}{\partial \xi} + \frac{\partial a}{\partial \tau} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0, \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} &= \operatorname{Re}(ae^{i\theta}),\end{aligned}\tag{1}$$

где a – нормированная амплитуда действующего поля; $\xi = \omega Cz/v_0$ и $\tau = \omega C(t - z/v_0)(1 - v_0/v_{gr})^{-1}$ – нормированные координата и время; ω – частота синхронизма; v_0, v_{gr} – поступательная скорость электронов и групповая скорость волны; $C = \sqrt[3]{eI_0 K / (2mv_0^2)}$ – параметр усиления Пирса; I_0 – ток электронного пучка; K – сопротивление связи; θ – фаза электронов относительной синхронной волны; m, e – масса и заряд электрона. В предположении, что на входе в пространство взаимо-

¹К сожалению, результаты данных исследований не были опубликованы в открытых источниках. В этой связи авторы выражают глубокую признательность д.ф.-м.н., профессору А. И. Панасу за раскрытие неизвестных ранее моментов истории шумотрона.

действия электронный поток не имеет начальной модуляции по плотности и скорости частиц, граничные условия для уравнений движения в (1) имеют вид

$$\theta|_{\zeta=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \Delta, \quad (2)$$

где Δ – нормированная расстройка синхронизма.

Рассмотрим динамику генератора, состоящего из усилителя и линии задержки с коэффициентом обратной связи S (рис. 1). В этом случае уравнения (1) следует дополнить граничным условием для амплитуды поля:

$$a(\zeta = 0, \tau) = S \cdot a(\zeta = L, \tau - T), \quad (3)$$

где T – нормированное время задержки сигнала; L – нормированная длина области усиления.

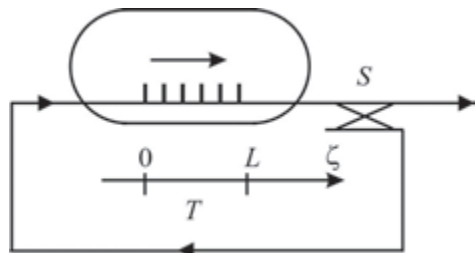


Рис. 1. Модель генератора на основе ЛБВО с запаздывающей обратной связью

Выберем для проведения моделирования нормированную длину системы $L = 5$, при которой коэффициент усиления в линейном режиме составляет около 28 дБ, а в режиме насыщения – порядка 25 дБ. Величину времени запаздывания T выберем равной 20. Известно, что в такой модели при увеличении величины обратной связи сначала происходит самовозбуждение на частоте одной из продольных мод кольцевого резонатора, затем стационарные колебания сменяются режимом периодической автомодуляции (рис. 2, а) [28].

При дальнейшем увеличении коэффициента передачи происходит хаотизация колебаний, однако сохраняется большая неравномерность спектра, который фактически представляет собой набор изолированных линий с шумовым пьедесталом (рис. 2, б).

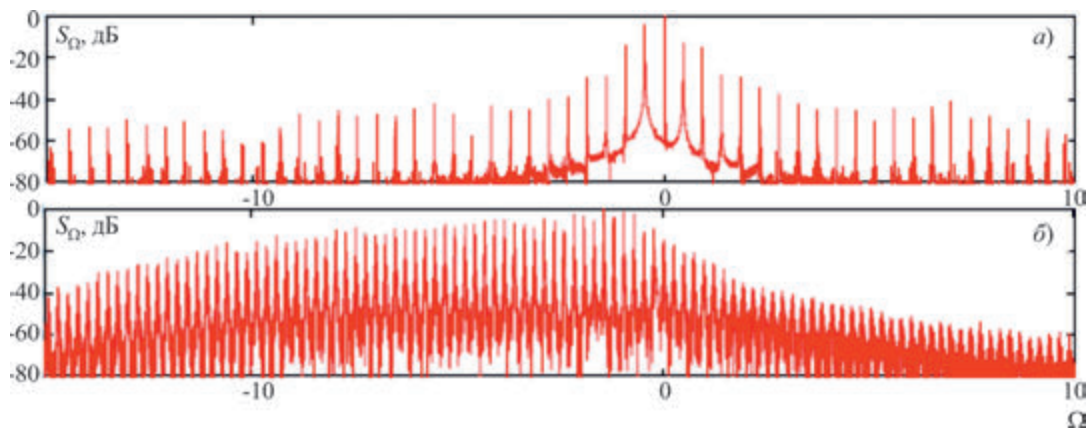


Рис. 2. Спектр излучения в модели ЛБВ при $L = 5$, $T = 20$:
а – $S = -12$ дБ; б – $S = -3$ дБ

Как было указано выше, генерация сигналов со сплошным спектром возможна в шумотроне, представляющем собой ЛБВ, в цепь обратной связи которой включен нелинейный элемент, обладающий сильной зависимостью фазового набега от амплитуды падающей волны. При этом в качестве такого элемента используется ЛБВ, отстроенная от режима оптимального усиления. В работе [29] было показано, что модель двух связанных ЛБВ на основе уравнений (1) позволяет получить решения, соответствующие сплошному спектру генерации.

В ходе исследований было выдвинуто предположение, что функции усилителя и нелинейного элемента можно совместить при использовании ЛБВ с увеличенным значением параметра усиления Пирса. Это позволит увеличить коэффициент усиления, сохранив сильную зависимость набега фазы от входной амплитуды. Моделирование системы уравнений (1) с граничными условиями (2), (3) подтвердило правильность такого предположения. При увеличении параметра Пирса и соответствующем увеличении нормированной длины до значения $L = 20$, по мере увеличения глубины обратной связи спектр излучения сначала носил линейчатый характер (рис. 3, а). Однако при значении $S \approx -10$ дБ происходил достаточно резкий переход к практически сплошному спектру (рис. 3, б). Заметим, что, по аналогии с реальными ЛБВ, на входе ЛБВ вводились дополнительные поглощения на уровне -50 дБ, предотвращающие самовозбуждение из-за численных шумов.

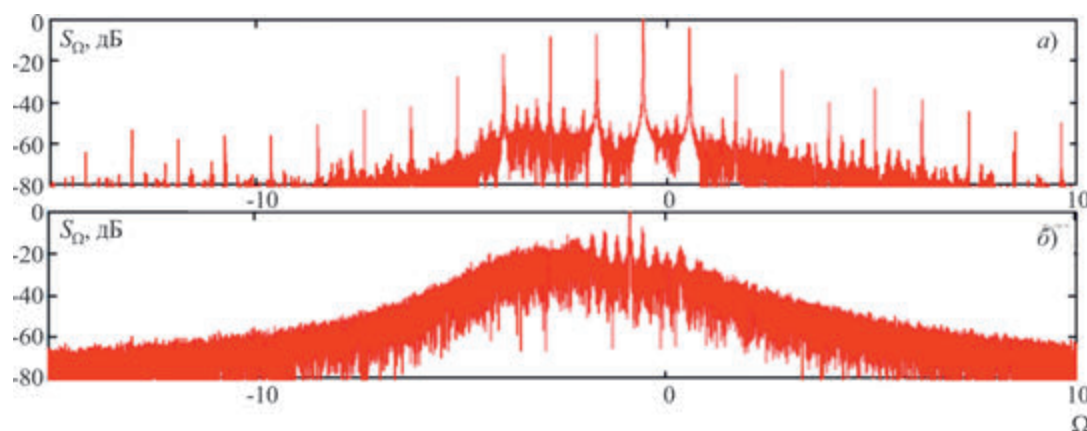


Рис. 3. Спектр излучения в модели ЛБВ при значениях $L = 20$, $T = 5$:
а – $S = -50$ дБ; б – $S = -10$ дБ

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ

Для исследований был выбран макет спиральной ЛБВО С-диапазона, имеющей достаточно высокое сопротивление связи замедляющей системы ($K \approx 40$ Ом). Коэффициент усиления в линейном режиме составлял $35 \dots 40$ дБ, выходная мощность – порядка $10 \dots 15$ Вт. В нормированных переменных длина пространства взаимодействия L составила 20. Для получения нестационарных режимов генерации часть выходного сигнала ответвлялась и через регулируемый аттенюатор подавалась на вход лампы (рис. 4). Расчетная величина времени обратной связи T при этом составила 5. Мощность выходного излучения измерялась калориметрической нагрузкой. Спектр излучения регистрировался спектром-анализатором с шириной полосы 40 ГГц.

В области величин обратной связи $S \leq -20$ дБ в системе устанавливались режимы периодической и хаотической автомодуляции с линейчатым спектром (рис. 5, а). Однако при дальнейшем увеличении обратной связи наблюдалась перестройка системы в режим генерации со сплошным спектром (рис. 5, б). Неравномерность спектра при этом уменьшалась со значений порядка $50 \dots 60$ дБ до $10 \dots 20$ дБ. Интересно отметить, что в последнем случае ширина спектра на уровне -10 дБ составила около двух октав (см. рис. 5, б). Интегральная мощность выходного излучения, регистрируемая калориметрической нагрузкой, достигала 2 Вт.

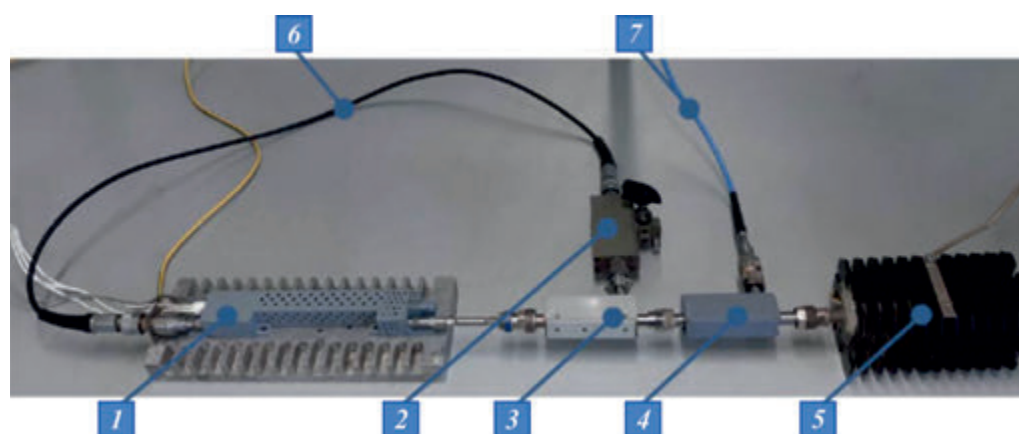


Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда:

1 – спиральная ЛБВ с радиатором охлаждения; 2 – регулируемый аттенюатор (0...–30 дБ); 3 – направленный ответвитель (–3 дБ); 4 – направленный ответвитель (–20 дБ); 5 – калориметрическая нагрузка; 6 – линия обратной связи; 7 – измерительная линия

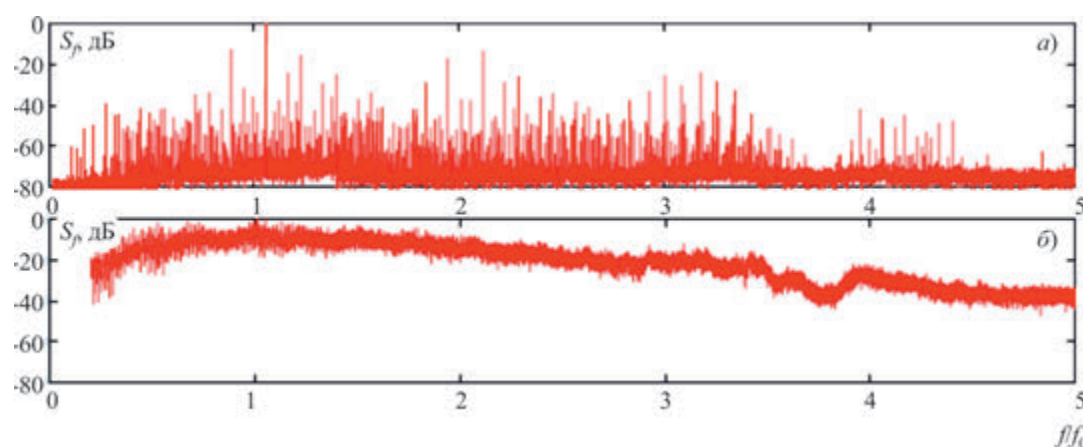


Рис. 5. Экспериментально измеренный спектр излучения ЛБВ:

а – $S = -30$ дБ; б – $S = -6$ дБ

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания генераторов шумоподобного излучения со сплошным спектром на базе единичной ЛБВ с запаздывающей обратной связью. Учитывая универсальный характер системы уравнений (1), можно предположить, что аналогичные режимы могут быть получены и в более высокочастотных диапазонах. Это, очевидно, открывает новые перспективы исследований, учитывая, что в настоящее время созданы ЛБВ с рабочими частотами более 1 ТГц [30, 31].

Работа выполнена в рамках государственного задания (договор № 0035-2019-0001) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-08-00955.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Залогин, Н. Н.** Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов / Н. Н. Залогин, В. В. Калинин, А. В. Скарня // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2011. – Т. 3, № 1. – С. 3 – 17.

2. **Bell, D. C.** Theoretical aspects of radar imaging using stochastic waveforms / D. C. Bell, R. M. Narayanan // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2001. – Vol. 49, No 2. – P. 394 – 400.
3. **Sun, H.** Ultra-wideband technology and random signal radar: an ideal combination / H. Sun, Y. Lu, G. Liu // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2003. – Vol. 18, No 11. – P. 3 – 7.
4. **Быстров, Р. П.** Экспериментальные исследования макетов шумовой РЛС / Р. П. Быстров, Е. В. Ващенко, В. Е. Кузьмичев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – № 5. – С. 35 – 42.
5. **Li, J.** Locating underground pipe using wideband chaotic ground penetrating radar / J. Li, T. Guo, H. Leung, H. Xu, L. Liu, B. Wang, Y. Liu // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 2913.
6. **Xu, H.** Life-detection radar based on wideband chaotic signal / H. Xu, Y. Li, L. Li, J. Zhang, H. Han, L. Liu, B. Wang // The Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 2019, Iss. 19. – P. 6322 – 6326.
7. **Navagato, M. D.** Microwave imaging of multilayered structures using ultrawideband noise signals / M. D. Navagato, R. M. Narayanan // NDT and E International. – 2019. – Vol. 104. – P. 19 – 33.
8. **Shin, H. J.** Ultrawideband noise radar tomography: principles, simulation, and experimental validation / H. J. Shin, R. M. Narayanan, M. A. Asmuth, M. Rangaswamy // International Journal of Microwave Science and Technology. – 2016. – ID: 5787895.
9. **Isogawa, T.** Tomographic imaging using photonicallly generated low-coherence terahertz noise sources / T. Isogawa, T. Kumashiro, H.-J. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, K. Iwatsuki, T. Nagatsuma // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2012. – Vol. 2, No 5. – P. 485 – 492.
10. **Takehara, D.** Dual-polarization imaging with real-time capability using a terahertz noise source for food inspection / D. Takehara, M. Endo, T. Ishibashi et al. // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, Japan. – 2018. – P. 1 – 2.
11. **Song, H.-J.** Subterahertz noise signal generation using a photodetector and wave-length-sliced optical noise signals for spectroscopic measurements / H.-J. Song, N. Shimizu, T. Furuta, A. Wakatsuki, T. Nagatsuma // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 93. – Art. No 241113.
12. **Sobakinskaya, E.** High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-Tc superconductors / E. Sobakinskaya, V. L. Vaks, N. Kinev, M. Ji, M. Y. Li, H. B. Wang, V. P. Koshelets // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Vol. 50. – Art. No 035305.
13. **Kaddoum, G.** Wireless chaos-based communication systems: a comprehensive survey / G. Kaddoum // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2621 – 2648.
14. **Дмитриев, А. С.** Сверх- и гиперширокополосная относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов / А. С. Дмитриев, Т. И. Мохсени, К. М. Сьерра-Теран // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Т. 26, № 4. – С. 59 – 74.
15. **Дмитриев, А. С.** Генерация хаоса / Под общ. ред. А. С. Дмитриева. – М.: Техносфера, 2012. – 424 с.
16. **Котырев, Е. А.** Спектральные особенности устойчивой генерации колебаний в генераторах с запаздывающей обратной связью в мягком режиме / Е. А. Котырев, Л. Е. Плисс // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. – 1961. – № 1. – С. 24 – 38.
17. **Кислов, В. Я.** Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием / В. Я. Кислов, Н. Н. Залогин, Е. А. Мясин // Радиотехника и электроника. – 1979. – Т. 24, № 6. – С. 1118 – 1130.
18. **А. с. 1053711 СССР.** Генератор сверхвысокочастотных шумовых колебаний / Е. А. Мясин, В. Я. Кислов, Е. В. Богданов. – Заявка 0984513 от 08.06.1983; приоритет 22.06.1967.
19. **А. с. 1125735 СССР.** Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний / Е. А. Мясин, В. Я. Кислов, Е. В. Богданов. – Заявка 3523601 от 23.07.984; приоритет 22.06.1967.
20. **Кислов, В. Я.** О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью / В. Я. Кислов, Е. А. Мясин, Н. Н. Залогин // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, № 10. – С. 2160 – 2168.
21. **Кислов, В. Я.** Динамический хаос и его использование в радиоэлектронике для генерирования, приема и обработки колебаний и информации / В. Я. Кислов // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38, № 10. – С. 1783 – 1815.

22. **Анисимова, Ю. А.** Шумотрон / Ю. В. Анисимова, Г. М. Воронцов, Н. Н. Залогин, В. Я. Кислов, Е. А. Мясин // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 19 – 25.
23. **Залогин, Н. Н.** Как начиналась шумовая тематика в ИРЭ / Н. Н. Залогин // Радиотехника. – 2005. – № 3. – С. 5 – 12.
24. **Дмитриев, А. С.** Генераторы хаоса: от вакуумных приборов до наносхем / А. С. Дмитриев, Е. П. Ефремова, А. Ю. Никишов, А. И. Панас // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2009. – Т. 1, № 1 – 2. – С. 6 – 22.
25. **Мясин, Е. А.** Исследования генерации СВЧ-шума в ИРЭ АН СССР 1962 – 1967 годов – начало нового научного направления: лекция / Е. А. Мясин // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 22, № 1. – С. 104 – 122.
26. **Гинзбург, Н. С.** Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ / Н. С. Гинзбург, С. П. Кузнецов, Т. Н. Федосеева // Изв. вузов. Радиопизика. – 1978. – Т. 21, № 7. – С. 1037 – 1052.
27. **Трубецков, Д. И.** Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1 / Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с.
28. **Рыскин, Н. М.** Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью / Н. М. Рыскин // Изв. вузов. Радиопизика. – 2004. – Т. 47, № 2. – С. 129 – 142.
29. **Иванов, А. А.** Возможности создания широкополосных хаотических генераторов на основе семейства импульсных ЛБВ *W*-диапазона / А. А. Иванов, М. С. Нагорнюк, А. Е. Смирнов, М. Н. Вилков, Н. С. Гинзбург, Р. М. Розенталь // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2020. – Т. 84, № 2. – С. 238 – 242.
30. **Богомолова, Е. А.** ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления / Е. А. Богомолова, А. В. Галдецкий, Г. В. Рувинский, И. Г. Солдатенко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 66 – 83.
31. **Paoloni, C.** Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century / C. Paoloni, D. Gamzina, R. Letizia, Y. Zheng, N. C. Luhmann Jr. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2020. – P. 1 – 37.

*Статья поступила 29 марта 2021 г.,
после переработки 10 апреля 2021 г.*

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53

ДВИЖЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ ЗАРЯДАМИ

А. К. Балыко¹, Е. В. Терешкин¹, И. А. Балыко¹, И. И. Спиричев²

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

²МВТУ им. Н. Баумана

Получены уравнения ускоренного движения отрицательно заряженной частицы в поле двух зарядов противоположного знака. Показана возможность использования подобной физической модели при создании электронных приборов.

КС: электрическое поле, ускоренное движение заряда, излучение электромагнитных волн, электронный прибор

THE MOTION OF A NEGATIVELY CHARGED PARTICLE BETWEEN TWO POSITIVE CHARGES

A. K. Balyko¹, E. V. Tereshkin¹, I. A. Balyko¹, I. I. Spirichev²

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

²Bauman MSTU

The equations of accelerated motion of a negatively charged particle in the field of two charges of the opposite sign are obtained. The possibility of using such a physical model for creating electronic devices is shown.

Keywords: electric field, charge accelerated motion, emission of electromagnetic waves, electronic device

В работах [1, 2] получены уравнения колебательного движения электрона вдоль силовых линий кулоновского поля одного положительного заряда и исследовано колебательное движение электрона. В настоящей работе более подробно рассмотрена более математическая модель ускоренного движения электрического заряда в электрическом поле двух положительных зарядов.

Если две положительно заряженные частицы, например протоны, покоятся, а отрицательно заряженная частица, например электрон, вносится в их электрическое поле с нулевой скоростью на некотором расстоянии x_0 от линии, соединяющей две положительно заряженные частицы (рис. 1), то, согласно закону Кулона, на электрон будет действовать результирующая сила в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей положительные заряды. Электрон начнет двигаться прямолинейно и ускоренно вдоль этого направления. Как и при любом ускоренном движении, скорость его будет нарастать и достигнет максимальной величины на линии, соединяющей положительные заряды. Поскольку в этой точке горизонтальная составляющая силы Кулона исчезает, то ускорение также обратится в нуль. После пролета электрона между

положительными зарядами результирующая сила электрического взаимодействия (сила Кулона) станет уже тормозящей и электрон начнет замедлять свое движение вплоть до нулевой скорости в точке, симметричной относительно начальной точки движения. Далее процесс перемещения электрона повторяется, но уже в обратном направлении. В идеальном случае электрон должен колебаться между двумя протонами, то есть представлять собой в некотором смысле электрический маятник [3]. А поскольку движение электрона ускоренное, то он должен еще и излучать электромагнитные волны, то есть быть источником периодических электромагнитных колебаний. В известной литературе, в частности в очень полезном задачнике [4], не удалось найти сведений о постановке и решении приведенной выше задачи. Между тем в этой, на первый взгляд, простой физической задаче движения электрона между двумя положительными зарядами содержится много интересных моментов.

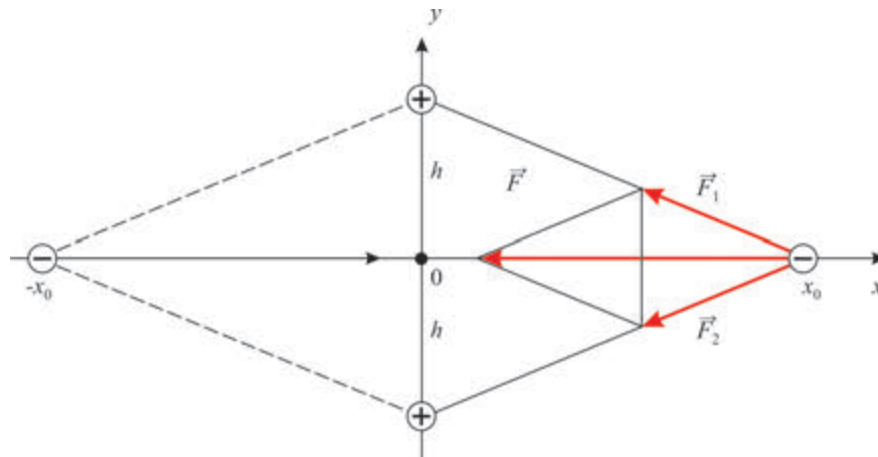


Рис. 1. Схема движения отрицательного заряда

Во-первых, необходимо найти общее дифференциальное уравнение этого непрерывного периодического процесса и общее решение этого физически очевидного периодического движения электрона между двумя зарядами, такое, например, как уравнение физического маятника [3]. Что-то похожее имеет место при рассмотрении радиального периодического движения электрона в работе [1].

Во-вторых, рассматриваемое движение электрона ускоренное, но не равноускоренное, что представляется новым в подобных задачах физического характера. Так, широко известное в квантовой механике движение электрона по окружности вокруг протона, рассматриваемое в классической модели атома водорода, является всего лишь простейшим движением с постоянной скоростью и постоянным ускорением. В рассматриваемой задаче скорость и ускорение электрона не постоянные величины, а зависят от времени.

Ускоренное движение электрона (заряженной частицы), как известно, порождает электромагнитное поле, при этом далеко не все очевидно с направлением распространения электромагнитного поля при периодическом как радиальном, так и круговом движении электрона. В [4] рассматривается только общая задача ускоренного движения заряда, без конкретизации ее для периодического движения заряда.

Рассмотрим математическую модель движения отрицательного заряда между двумя положительными (см. рис. 1), при этом, поскольку скорость электрона может быть сравнимой со скоростью света, будем учитывать релятивистские эффекты.

Уравнение движения электрона (второй закон Ньютона) имеет вид: $d_p/d_t = -F$, где p – импульс электрона; F – результирующая сила Кулона. В развернутом виде имеем

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) = - \frac{2 \cdot r_0 \cdot c^2 \cdot x}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где x – расстояние от электрона до соединяющей положительные заряды линии; $u = dx/dt$ – скорость электрона; h – расстояние от положительно заряженной частицы до линии движения электрона; $r_0 = e^2/4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 \cdot m$ – классический радиус электрона; m и e – масса покоя и заряд электрона; c – скорость света в вакууме; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Полагая $\eta = x/h$ и дифференцируя левую часть (1), получаем выражение для ускорения электрона:

$$a = \frac{du}{dt} = \frac{2 \cdot r_0 \cdot c^2}{h^2} \cdot \frac{\eta \cdot \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{(1 + \eta^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2)$$

Ускорение зависит от двух переменных: u и η . Выразим u через η .

Поскольку для произвольной функции $Q(x(t))$ справедливо равенство $dQ/dt = (dQ/dx) \cdot (dx/dt) = u \cdot (dQ/dx)$, то уравнение (1) преобразуется к виду

$$u \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) = - \frac{2 \cdot r_0 \cdot c^2 \cdot \eta}{h^2 \cdot (1 + \eta^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

После интегрирования этого уравнения получаем формулу

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{2}{n \cdot (1 + \eta^2)^{\frac{1}{2}}} + C. \quad (4)$$

Постоянную C найдем из начальных условий: $t = 0$, $u = 0$, $\eta = \eta_0 = x_0/h$.

$$C = 1 - \frac{2}{n \cdot (1 + \eta_0^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

Подставим полученное значение C в (4) и преобразуем уравнение к виду

$$1 - \frac{u^2}{c^2} = \left[1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \eta_0^2}} + \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} \right]^{-2}. \quad (5)$$

Полагая, что $\alpha_0 = \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \eta_0^2}}}$, получаем:

$$\frac{u}{c} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_0 \cdot n}{2} \right)^2 \cdot \frac{1 + \eta^2}{\left(\sqrt{1 + \eta^2} + \alpha_0 \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\frac{a}{a_0} = \frac{\eta}{\left(\sqrt{1 + \eta^2} + \alpha_0 \right)^3}, \quad (7)$$

где $a_0 = (c^2/r_0) (\alpha_0/n)$.

Формулы (6) и (7) дают аналитические выражения для относительных величин скорости и ускорения движения электрона между двумя положительными зарядами. Зависимости (6) и (7) приведены на рис. 2.

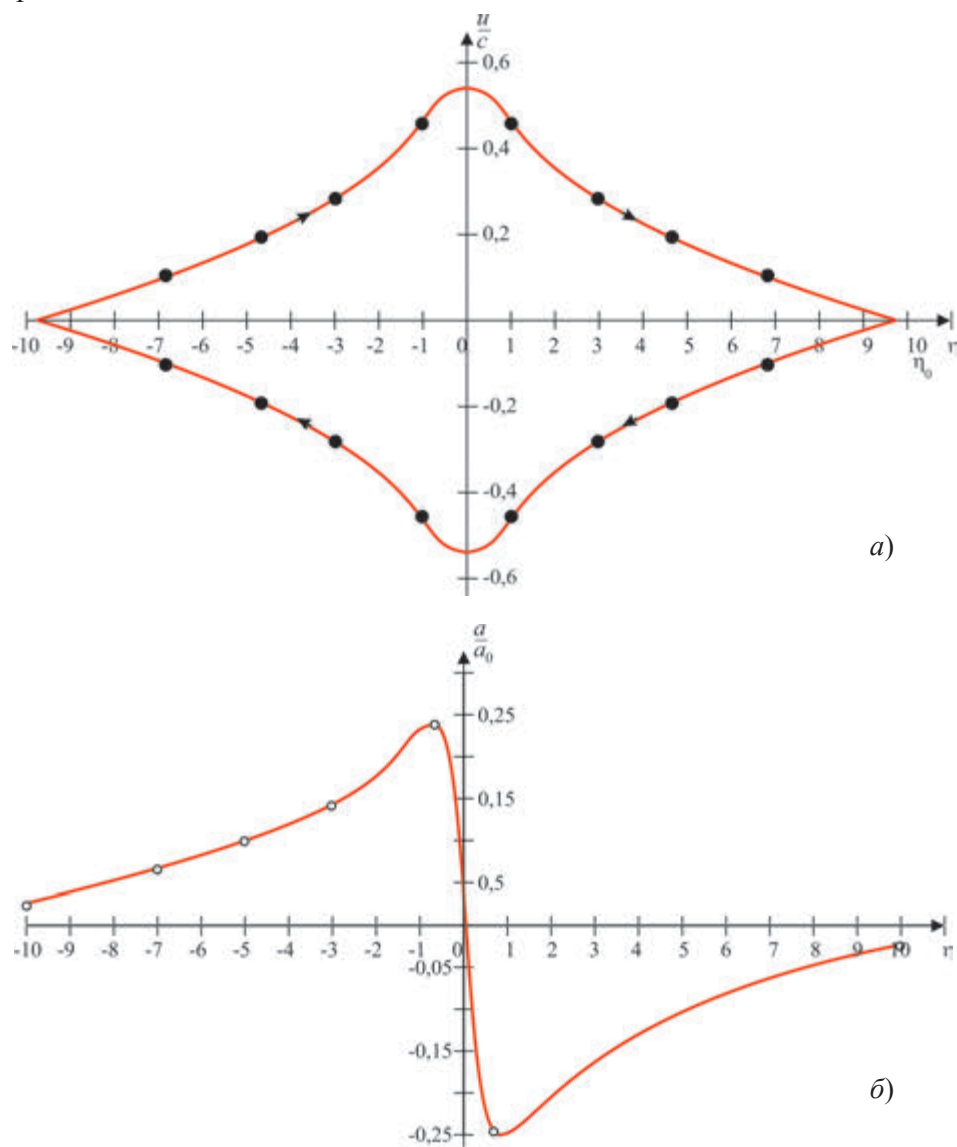


Рис. 2. Зависимости относительной скорости заряда u/c (а) и относительного ускорения заряда a/a_0 (б) от расстояния $\eta = x/h$

Представляет интерес оценить максимальную величину ускорения, например, для случая $n = 10$, $\eta_0 = 10$. Величина $a_0 = \alpha_0 c^2 / (nr_0) = 0,02 \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ [м}^2/\text{с}^2] / 2,818 \cdot 10^{-15} \text{ [м]} \approx 6,4 \cdot 10^{29} \text{ м/с}^2$. Это очень большая величина по сравнению с ускорением свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Однако в микромире масштабы совсем другие, чем в макромире. В частности, в квантовой механике центростремительное ускорение электрона на первой боровской орбите в планетарной модели атома водорода составляет: $u^2/R_1 = (c^2/r_0) \cdot (r_0/R_1)^2 = 3,2 \cdot 10^{31} \text{ [м}^2/\text{с}^2] \cdot (2,818 \cdot 10^{-15} \text{ [м]} / 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ [м]})^2 = 2,85 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2$. Это также огромное ускорение, однако, вот уже на протяжении века ученые этому не удивляются.

В начале данной работы было сказано, что имеются трудности в определении общего решения уравнения колебательного движения электрона между двумя положительными зарядами. Попробуем найти такое решение. Для простоты рассмотрим уравнение движения без релятивистских эффектов, считая, что скорость электрона может быть любой, в том числе и большей скорости света, как известно, этот предел скорости тела был установлен Эйнштейном в специальной теории относительности.

Уравнение движения (1) при условии $u \ll c$ и $x \gg h$ примет вид

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{m \cdot r_0 \cdot c^2}{x^2}. \quad (8)$$

Поскольку $u = dx/dt$, то запишем уравнение (8) в виде

$$m \cdot u \cdot \frac{du}{dx} = - \frac{m \cdot r_0 \cdot c^2}{x^2}. \quad (9)$$

После интегрирования получим

$$m \cdot \frac{u^2}{2} = -m \cdot r_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right). \quad (10)$$

Поскольку $u = \frac{dx}{dt} = -c \cdot \sqrt{2 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right)}$, то $\int \frac{x \cdot dx}{\sqrt{x \cdot (x_0 - x)}} = -c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r_0}{x_0}} \cdot t - C$.

В левой части уравнения – табличный интеграл [5]. Константу интегрирования $C = \pi/2$ находим из начальных условий: $t = 0$, $x = x_0$, $u = 0$.

Полагая $y = x/x_0 = \eta/\eta_0$, получим решение уравнения

$$\sqrt{y \cdot (1 - y)} + \frac{1}{2} \cdot \left[\arcsin(1 - 2 \cdot y) + \frac{\pi}{2} \right] = \omega \cdot t, \quad (11)$$

где

$$\omega = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r_0}{h^3 \cdot \eta_0^3}}. \quad (12)$$

Период T движения электрона складывается из четырех четвертей: при $t = 0$ $x = x_0$ ($y = 1$), при $t = T/4$ $y = 0$, при $t = T/2$ $y = -1$, при $t = 3 \cdot T/4$ $y = 0$ и при $t = T$ $y = 1$.

Из (12) видно, что период T связан с расстоянием $x_0 = h \cdot \eta_0$ законом Кеплера:

$$\omega^2 \cdot x_0^3 = 2 \cdot r_0 \cdot c^2. \quad (13)$$

Выражение (13) такое же, как и при вращательном движении электрона, но в правой части появился множитель 2, что требует дополнительного исследования.

Таким образом, закон, полученный Кеплером при рассмотрении кругового движения планет вокруг Солнца, перенесенный затем Резерфордом и Бором на планетарную модель атома, характеризует центральное поле любого происхождения (гравитационного, электрического), в котором сила, действующая между двумя телами, изменяется обратно пропорционально расстоянию между этими телами, при этом сила может иметь любое направление (радиальное и перпендикулярное ему).

Для рассматриваемой модели особенно важно, что уравнение движения (11) при $0 < t < T/4$ можно записать в виде

$$y(t) = \sin^2(\omega \cdot t - \sqrt{y \cdot (1-y)}). \quad (14)$$

Функции такого типа относятся к квазипериодическим. Они требуют дополнительного изучения.

Из формулы (13) можно определить оценочные значения для периода и частоты колебаний электрона между двумя положительными зарядами: $T = 10^{-15}$ с, $f = 10^{15}$ Гц.

Известно, что при ускоренном движении заряженная частица излучает электромагнитное поле. Электрическое поле в трехмерном пространстве определяется двумя составляющими: $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t)$, где

$$\vec{E}_1 = \frac{e \cdot (1 - \beta^2) \cdot \left(\vec{n} - \frac{\vec{u}}{c} \right)}{\left(1 - \frac{\vec{n} \cdot \vec{u}}{c} \right) \cdot R^2},$$

$$\vec{E}_2 = \frac{e \cdot \vec{n} \times \left(\vec{n} - \frac{\vec{u}}{c} \right) \times \vec{a}}{c^2 \cdot \left(1 - \frac{\vec{n} \cdot \vec{u}}{c} \right)^3 \cdot R}.$$

Из рис. 1 следует, что в первую четверть периода скорость u и ускорение a направлены в противоположном направлении оси x , то есть $\vec{u} = -|\vec{u}|$, $\vec{a} = -|\vec{a}|$, во-вторую четверть периода $\vec{u} = -|\vec{u}|$, $\vec{a} = |\vec{a}|$, в третью четверть периода $\vec{u} = |\vec{u}|$, $\vec{a} = |\vec{a}|$, в четвертую четверть периода $\vec{u} = |\vec{u}|$, $\vec{a} = -|\vec{a}|$. Таким образом, в первую и четвертую четверти периода электрическое поле $\vec{E}_2$ имеет противоположные направления, то есть электромагнитное поле в первую четверть отрывается от ускоренно движущегося электрона, а в четвертую четверть поле как бы возвращается из пространства в электрон, тем самым, за период движения электрон не теряет своей полной энергии и поэтому может колебаться между двумя положительными зарядами бесконечно долго.

В принципе описанное выше движение электрона может послужить основой для создания нового электронного прибора, если, например, вместо двух положительных зарядов взять положительно заряженное кольцо, а вместо одного электрона – много (пучок) электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балыко, А. К. Колебательное движение электрона в кулоновском поле / А. К. Балыко, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 3. – С. 119 – 127.
2. Балыко, А. К. Колебательное движение электрона в кулоновском поле двух положительных зарядов / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3. – С. 110 – 112.
3. Балыко, И. А. Движение физического и электрического маятника в поле центральных сил / И. А. Балыко, Е. В. Терешкин, С. М. Дерябкина, А. К. Балыко, И. И. Спиричев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2. – С. 91 – 95.
4. Батыгин, В. В. Сборник задач по электродинамике / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин. – М.: Наука, 1970.
5. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт. – М.: Наука, 1966.

Статья поступила 26 апреля 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

МАКАРЕНКО С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография.– СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.

В монографии представлены описательные и формальные модели системы связи специального назначения, функционирующей в условиях дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Данные модели учитывают современное состояние и тенденции развития технологий связи, средств вооружения и способов их применения. В качестве дестабилизирующих воздействий рассмотрены воздействия на систему связи со стороны средств физического (огневого) поражения, средств радиоэлектронного подавления, средств функционального поражения электромагнитным излучением и способов информационно-технического воздействия. В качестве средств разведки рассмотрены средства радио- и радиотехнической, оптико-электронной, компьютерной разведок. Отличительной особенностью разработанных формальных моделей является формализация процесса взаимодействия системы связи, системы дестабилизирующего воздействия и системы разведки в виде информационного конфликта.

Материалы работы предназначены для научных сотрудников, соискателей ученых степеней, военных и технических специалистов, занимающихся вопросами исследования устойчивости, живучести и помехозащищенности систем специальной связи.

ИСТОРИЯ

УДК 9

ВСЕ МЫ ВЫШЛИ ИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОТДЕЛА

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин

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

Т. А. Балыко, учитель истории

Общеобразовательная средняя школа № 16, г. Щелково

WE ALL COME FROM THE THEORETICAL DEPARTMENT

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin

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

T. A. Balyko, history teacher

Comprehensive secondary school № 16, Shchelkovo

13 июля 2021 года исполняется 115 лет со дня рождения доктора технических наук Владимира Сергеевича Лукошкова. Он родился в г. Сестрорецке Петербургской губернии в семье служащего из мещан. Большую часть своей жизни В. С. Лукошков проработал в НИИ-160, где создал и руководил теоретическим отделом № 110. О научной и производственной деятельности ученого мы уже рассказывали в предыдущих публикациях. Настоящая статья посвящена шести сотрудникам «Истока», докторам и кандидатам технических наук, работа которых на «Истоке» начиналась в теоретическом отделе в период активного творчества В. С. Лукошкова, о чем они всегда упоминали, рассказывая о своей жизни.

АЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ ТАГЕР



А. С. Тагер

1 января 1996 г. перестало биться сердце выдающегося ученого в области электроники СВЧ, лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора А. С. Тагера. Почти полвека ученый жил и работал во Фрязино, прославляя наш город своими научными достижениями. Для многих отечественных и зарубежных ученых г. Фрязино стал известен как город, в котором творил А. С. Тагер. Учитывая огромный вклад ученого в мировую науку, ПОСТАНОВЛЯЮ внести имя Александра Семеновича Тагера в Книгу почетных граждан г. Фрязино.

(Из постановления Главы города Фрязино В. П. Савченко, доктора физико-математических наук, лауреата Государственной премии Российской Федерации.)

Авторитет среди ученых Александр Семенович Тагер завоевал своим глубоким пониманием проблем, находящихся на стыке науки и техники, ясным физическим мышлением, поразительным трудолюбием и доброжелательностью к своим маститым коллегам и молодым сотрудникам.

А. С. Тагер родился 14 декабря 1926 г. в Киеве в семье военнослужащего. До начала Великой Отечественной войны семья жила в Ленинграде. В 1940 году в боях с белофиннами, совершив подвиг, погиб его отец, начальник политотдела дивизии полковник С. А. Тагер. В 1941 году 14-летний Саша был принят в Ленинградское нахимовское училище, но учиться в нем не пришлось – семья эвакуировалась в г. Каменск-Уральский. После окончания средней школы Александр поступил на металлургический факультет Уральского индустриального института. После снятия блокады он, как один из лучших студентов, был направлен в Ленинградский горный институт. Учеба в нем хотя и давалась легко, но не приносила ему удовлетворения. Как рассказывал А. С. Тагер, все-таки окончательный его выбор профессии определила популярная брошюра Матвея Петровича Бронштейна «Атомы, электроны и ядра», которую он прочитал еще в восьмом классе. Физика многих явлений, увлекательно рассказанная выдающимся советским ученым и популяризатором науки, настолько потрясла подростка, что навсегда стала предметом его надежд и стремлений*.

Увлекаемый стремлением юности, А. С. Тагер вскоре перевелся в Ленинградский политехнический институт (ЛПИ), где была возможность получить специальность физика. В стенах этого института прошло становление Александра Семеновича как научного работника. Его преподавателями в ЛПИ были Б. П. Константинов, П. И. Лукирский, А. Н. Добрецов, Я. И. Френкель (руководитель его дипломного проекта), ставшие впоследствии академиками.

В 1950 году после окончания института А. С. Тагера распределили во Фрязино. Здесь на «Истоке» он работал до конца своей жизни.

Молодой специалист с первых дней работы в теоретическом отделе окунулся в кипучую научную атмосферу бурно развивающегося научно-исследовательского института № 160. Начальник отдела В. С. Лукошков обратил внимание на талантливого инженера и помог ему определиться во множестве проблем, стоявших перед теоретиками предприятия. В 1952 году А. С. Тагер публикует свою первую научную работу в Трудах научно-исследовательского института: «Расчет спиральной линии замедления с учетом опорной диэлектрической трубки».

Уже в ней раскрылись все составляющие творческого дара Александра Семеновича, которые впоследствии неоднократно отмечали многие отечественные ученые: понимание физики природных явлений, четкая постановка физико-математических задач, безупречное владение сложнейшим математическим аппаратом, ясное изложение полученных теоретических результатов, поиск возможностей для сравнения их с экспериментом, наконец, простота и красота русского научного языка, позволяющая с интересом читать его статьи всем, от профессора до не искушенного науками студента.

В последующие годы (1952 – 1957 гг.) областью интересов А. С. Тагера становятся шумовые свойства ламп бегущей волны (ЛБВ). Как и в первой работе, предметом его исследований является несоответствие между теоретическими и экспериментальными характеристиками приборов, в данном случае между расчетной и измеренной величинами коэффициента шума ЛБВ: расчетная величина была существенно выше экспериментальной. Анализ этого несоответствия приводит Александра Семеновича к гипотезе, что расхождение между коэффициентами шума вызвано тем, что в теоретических работах не учитывается точечный характер флюктуаций электронов пространственным зарядом у катода ЛБВ. Используя работу американца Пирса и других зарубежных ученых, он формулирует более общий подход, в котором, во-первых, рассматривается не одномерная, а трехмерная задача, во-вторых, заряд электрона предполагается не точечным и, в третьих, учитывается возбуждение в пучке электронов высших типов волн

*М. П. Бронштейн был зятем Корнея Ивановича Чуковского. Рассказывая о необыкновенной памяти зятя, маститый писатель шутил, что если исчезнет история цивилизации, то Матвей Петрович воспроизведет ее в полном объеме. М. П. Бронштейн был расстрелян в 1938 году в возрасте 30 лет.

пространственного заряда. Эти предпосылки позволяют ему построить общую теорию шумов ЛБВ и показать, что в сантиметровом диапазоне длин волн пространственный заряд у катода играет существенную роль в механизме депрессии (подавления) первичных флюктуаций заряда.

Наряду с теоретическим анализом, А. С. Тагер с сотрудниками провел экспериментальное исследование зависимости шумовых характеристик ЛБВ от параметров и электрического режима электронной пушки. Оригинальные результаты по теории шумов ЛБВ вошли в его кандидатскую диссертацию «Исследование шумов в электронных потоках ламп с бегущей волной на сверхвысоких частотах», выполненную под руководством доктора физико-математических наук, профессора С. Д. Гвоздовера, которую Александр Семенович успешно защитил в 1955 году. Сегодня его кандидатская диссертация в библиотеке «Истока» затерта до дыр пальцами ее читавших.

Любопытно, что в 80-е годы, когда А. С. Тагер уже был всемирно известным ученым-теоретиком, редакция стенной газеты отдела № 110 «Резонанс» обратилась к нему с вопросом: «Кем бы он хотел стать, если бы не был теоретиком?», на что Александр Семенович без колебаний ответил: «Экспериментатором».

Работы А. С. Тагера, выполненные по теории шумов электровакуумных приборов СВЧ, позволили ему выдвинуться в число талантливых молодых ученых, найти признание у крупнейших светил этой отрасли науки. В 1956 году 30-летнему ученому было доверено представлять нашу страну на международной конференции в Париже по электронике.

В этот период А. С. Тагер уже возглавлял уникальную лабораторию в теоретическом отделе предприятия. Сотрудники лаборатории Александра Семеновича, увлеченные новыми идеями, работали много, не считаясь со временем. Сейчас эту лабораторию с полным правом можно назвать кузницей научных кадров «Истока». Из ее стен, помимо основателей отдела 110 В. С. Лукошкова и М. Б. Цейтлина, вышли доктора наук А. Д. Гладун, В. В. Кулиш (академик АН Украины), В. Г. Лейман, А. Б. Пашковский, А. С. Победоносцев (лауреат Государственной премии СССР), Р. А. Силин, В. А. Солнцев, А. С. Тагер (лауреат Ленинской премии) и кандидаты наук Я. Я. Акментыньш, А. К. Балыко (лауреат премии Ленинского комсомола), А. В. Белицкий, И. Ш. Белуга, В. Г. Бороденко, И. К. Викулов, А. И. Гипсман, А. И. Деомидов (ветеран Великой Отечественной войны), Ф. М. Исмагилов, Е. И. Исмагилова, В. П. Кирюшин (ветеран Великой Отечественной войны), Ю. А. Колосов, В. М. Красноперкин, А. И. Мельников (лауреат Ленинской премии), Г. Г. Моносов, В. С. Морозов, А. А. Негирев (лауреат Государственной премии СССР), Э. В. Погорелова, Г. И. Рукман, Г. А. Самородова, Г. С. Самохин, Л. А. Троицкая, А. Д. Ходневич, С. А. Ходневич.

Ключевым моментом в научной деятельности А. С. Тагера стал переход в 50-е годы к прозорливо увиденному им актуальному направлению – полупроводниковой электронике СВЧ. К пионерным работам этого периода А. С. Тагер относил, прежде всего, разработку высказанной им идеи создания твердотельного лазера на циклотронном резонансе и исследование параметрических процессов в широкополосных волноведущих системах.

В 1959 году молодые сотрудники «Истока» А. С. Тагер (32 года), А. И. Мельников (25 лет), А. М. Цебиев (23 года) и дипломник МФТИ Г. П. Кобельков (21 год) открыли явление генерации и усиления колебаний сверхвысокой частоты при лавинной ионизации в полупроводниках, которое было обнаружено в США лишь спустя 5 лет. Это открытие положило начало новой области в науке и технике СВЧ и дало жизнь многочисленному семейству приборов – лавинно-пролетным диодам (ЛПД), до настоящего времени применяемым в технике СВЧ. Этот цикл

работ А. С. Тагера, включающий его докторскую диссертацию, более 50 статей, 20 изобретений и монографию «Лавинно-пролетные диоды и их применение» (совместно с В. М. Вальд-Перловым), в 1978 году был отмечен высшей наградой – Ленинской премией (совместно с К. Ю. Пожелой, А. И. Мельниковым и В. М. Вальд-Перловым).

Между этими двумя десятилетиями – годы напряженного труда. Александр Семенович работал по 12...14 часов ежедневно: подготовка и защита докторской диссертации; руководство двумя лабораториями и научное руководство отделением; 200 научных статей, научно-технических отчетов и изобретений; многочисленные выступления на мировых, всесоюзных и отраслевых конференциях, семинарах, симпозиумах; разработка сложнейших физических и математических моделей приборов СВЧ, экспериментальные исследования и теоретическое осмысление полученных результатов. Творчество ученого обогащалось сотрудничеством с видными учеными «Истока»: Героями Социалистического Труда академиком Н. Д. Девятковым и С. И. Ребровым, докторами наук Б. Ч. Дюбуа, С. С. Зыриным, В. Г. Калиной, А. Н. Королевым, Г. А. Крысовым, Э. А. Гельвичем, М. Б. Голантом, И. В. Лебедевым, В. И. Новосельцем, А. С. Победоносцевым, Ю. Д. Самородовым, В. П. Сазоновым, Р. А. Силиным и кандидатами технических наук А. М. Алексеенко, И. М. Блейвасом, В. Г. Бравинским, И. И. Бродуленко, В. И. Гуртовым, С. А. Зайцевым, З. Ф. Каплуном, В. Г. Кармазиным, А. И. Мельниковым, А. А. Негиревым, К. Г. Ноздриной, О. И. Обрезаном, В. А. Париловым, С. А. Перегоновым, Л. А. Ривлиным, Г. В. Ровенским, Э. Н. Рыжиком, В. С. Савельевым, В. Я. Эфросом и многими другими. При жизни А. С. Тагера на «Истоке» работало более 400 докторов и кандидатов наук и практически каждый из них хоть однажды обращался за советом к Александру Семеновичу.

Руководство и научное сообщество предприятия не всегда однозначно относились к новаторским предложениям А. С. Тагера. В ряде случаев ему необходимо было обладать мужеством, чтобы отстаивать свои новые идеи, жизненность которых могло подтвердить лишь время.

Помимо моральных, А. С. Тагеру пришлось выдержать нелегкие физические испытания. В 1972 году в Харькове при переходе улицы на него и его родственников был совершен наезд легковой автомашины, в результате чего погибла сестра и сам он лишь чудом остался в живых. Собранный буквально по частям, он, преодолев огромные трудности, пролежав почти два года на больничной койке в ЦИТО, возвратился в строй, во многом благодаря стараниям своей супруги Татьяны Николаевны Тагер, и с огромным интересом взялся за развитие нового направления в теоретическом отделе «Истока».

В 46 лет ему удалось под силу создать дружный коллектив молодых ученых и инженеров, найти новые области для применения своего огромного таланта, изыскать оригинальные решения сложных и актуальных проблем, воодушевлять энтузиазмом своих молодых сотрудников. В этом коллективе произошло становление целой плеяды «истоковцев»: докторов наук В. И. Волостникова, А. А. Кальфы, А. Б. Пашковского, В. Б. Сулимова, кандидатов наук А. К. Балыко, Л. В. Манченко, Я. Б. Мартынова, С. М. Овечкина, Э. В. Погореловой, С. Б. Пореша, высокопрофессиональных специалистов в области электроники Е. И. Голанта, Б. А. Головки, Н. А. Гусельникова, талантливых инженеров И. В. Беляевой, Н. А. Брагиной, Е. В. Бувайлик, В. И. Варгузова, О. Т. Козловцевой, С. Н. Коноплянникова, А. В. Климовой, В. В. Малова, В. В. Сеницына, Н. И. Юсуповой и других.

К наиболее существенным работам А. С. Тагера этого периода относятся: впервые обнаруженное СВЧ-излучение, испускаемое кристаллами антимонида индия и теллура; разработка адекватных моделей и методов расчета взаимодействия электромагнитных полей с электронно-дырочной плазмой в кристаллах на частотах, сравнимых с характерными частотами плазмы;

исследование влияния эффекта «всплеска» скорости электронов на характеристики ЛПД, инжекционно-пролетных диодов, диодов Ганна, полевых транзисторов (ПТШ); исследование в широком диапазоне частот (100...200 ГГц) динамических и шумовых характеристик ПТШ в зависимости от свойств материала, параметров структуры, профиля распределения примеси и топологии транзистора и т. п.

Идеи, высказанные в работах Александра Семеновича, позволили создать новый класс приборов – гетероструктурные ЛПД, а позднее, в 1980 году, полевые транзисторы на гетероструктуре с селективным легированием (совместно с А. А. Кальфой), которые были также предложены одновременно и независимо с ними учеными США и Японии.

Последние годы А. С. Тагер активно работал в области исследования высокотемпературных сверхпроводников (совместно с Н. А. Гусельниковым, А. К. Балыко, В. И. Васильевым) и, особенно продуктивно, в развиваемом им направлении электроники СВЧ – наноэлектронике, где им совместно с А. Б. Пашковским, Е. И. Голантом, Н. А. Гусельниковым и В. П. Снегиревым был запатентован и исследован новый класс резонансно-туннельных приборов, работающих в терагерцовом диапазоне частот.

Вокруг талантливого ученого всегда группировалась молодежь. Для многих молодых людей Александр Семенович, по существу, открыл путь в науку. Он с большим интересом преподавал в Московском физико-техническом институте (МФТИ), был активным научным руководителем аспирантуры «Истока», был оппонентом на защитах 50 кандидатских и 10 докторских диссертаций, в том числе у таких известных ученых, как В. Е. Любченко, М. Г. Ливенштейн, Г. В. Касаткин, Г. Е. Чайка, В. С. Прохоров. Многие аспиранты, соискатели и сотрудники «Истока», при поддержке и личном участии Александра Семеновича в их научном росте, стали известными учеными в разрабатывающих и технологических подразделениях предприятия. Это доктора технических наук, заслуженные изобретатели России В. А. Иовдальский и А. М. Темнов, кандидаты технических наук Ю. М. Богданов, В. Е. Земляков, Д. А. Ковтунов, П. М. Мелешкевич, В. Ю. Мякинков, В. А. Пчелин, В. П. Снегирев, А. С. Федоров и многие другие.

А. С. Тагер был неизменным членом нескольких диссертационных и ученых советов, председателем секций научно-технических советов, сопредседателем Московского отделения НТО им. А. С. Попова. Он всегда был уважаемым участником научных конференций и семинаров.

Несмотря на величие в научном мире, Александр Семенович оставался простым в общении с людьми. С ним можно было спорить, как с равным, на любую тему. Он интересовался всем происходящим вокруг, имел на все свой оригинальный глубокий и пророческий взгляд. Любил классическую музыку, отдавая предпочтение произведениям Вивальди. В поэзии восхищался творениями Александра Пушкина, Давида Самойлова. Крайне негативно относился к профессиональному спорту, считая, что проблемы допинга – это результат коммерциализации спорта.

А. С. Тагер был не только выдающимся ученым, но и истинным патриотом отечества. Его признавали ученые во всем мире, он имел широкий круг знакомств за границей, последние годы ездил за рубеж и, конечно же, имел не одно предложение остаться работать в другой стране. Но он оставался верен своей родине, где жили его родители, близкие и друзья, родине, ради блага которой он трудился, не жалея сил, до последних дней своей жизни. За несколько дней до кончины он обсуждал с сотрудниками планы на предстоящий год, его мысли были в будущем. В этом движении вперед к неразгаданным тайнам природы и застала его смерть...

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ БАЦЕВ

Владимир Иванович Бацев родился 28 июля 1915 года в деревне Труновка Смоленской губернии. Его отец работал учителем средней школы, мать вела хозяйство и воспитывала троих детей.

Детство Володи прошло в суровое время лихолетья. Сначала революция, затем гражданская война, разруха, голод. Тем не менее, школьный учитель Иван Михайлович сделал все, чтобы его дети получили образование. Володя в школе учился очень хорошо, подавал большие надежды, особенно любил математику и физику.

Детство было тяжелое, а юность оказалась еще тяжелее. В возрасте 15 лет у него заболела нога, со временем болезнь не проходила. Родители обратились к врачам и стали усиленно лечить мальчика, но существенного улучшения не происходило, и врачи посоветовали сменить климат и переехать на юг. В 1931 году семья уезжает в Крым и приобретает дом в Евпатории. Лечение было очень длительным и многострадальным. Среднюю школу он окончил только в 1936 году, отстав от своих одноклассников на четыре года. Во время болезни Володя при поддержке родителей продолжал осваивать школьные предметы и повышать свои знания. В 1936 г. он поступил на механико-математический факультет МГУ.



В. И. Бацев

В канун Великой Отечественной войны Владимир окончил университет и получил диплом математика-механика с правом преподавать эти дисциплины в школе. В это время его старшая сестра Елена уже несколько лет работала на фрязинском заводе «Радиолампа». Живя в Москве, она испытывала большие неудобства. Несколько раз порывалась перейти работать в Москву, но дирекция «Радиоламп» соглашалась отпустить ее с тем условием, что она найдет себе достойную замену. По окончании МГУ Владимира распределили в Читу, но он решил за трудоустройством обратиться на завод «Радиолампа». Выпускник МГУ руководству завода понравился, и вскоре Владимир стал работать инженером на заводе «Радиолампа».

Фронт быстро приближался. В октябре 1941 г. началась эвакуация завода «Радиолампа». Владимир Иванович попал в группу специалистов, направленных в Уфу на завод № 643, где с марта 1942 г. он был назначен сначала заведующим инструментальным хозяйством, а затем начальником цеха осветительных ламп. Он оставался в Уфе до конца войны. Здесь же встретил прибывшую с Украины и распределенную к нему в цех Тамару Михайловну Малютину и надолго связал с нею свою жизнь. В Уфе родился их первенец Павел, который позже много лет проработает на «Истоке», продвигая новое направление электроники – СВЧ-нагрев.

В 1946 г. Владимир Иванович вернулся во Фрязино, около года работал в Московском лесотехническом институте, а с августа 1947 г. был принят на «Исток» в радиофизическую лабораторию, затем возглавил лабораторию в теоретическом отделе. Вот как об этом периоде вспоминал начальник отдела 110 В. С. Лукошков.

Лаборатория 114 (начальник В. И. Бацев) быстро укреплялась кадрами и оснащалась сначала арифмометрами, а затем трофейными клавишными настольными вычислительными машинами. Система экзаменов на повышение разряда по программе, разработанной В. И. Ба-

цевым, стимулировала рост квалификации работниц-вычислительниц. В отдельных случаях их квалификация поднималась до уровня техников. Лаборатория 112 была создана в отделе в 1949 году по предложению главного инженера института А. А. Сорокина как лаборатория для экспериментальной проверки результатов теоретических исследований. Первым начальником этой лаборатории стал В. И. Бацев. Укреплению этой лаборатории кадрами и оборудованием значительно способствовало выполнение темы «Дельта»... На эту тему были мобилизованы все иностранные специалисты отдела, а также переброшены иностранные специалисты из других отделов. Из советских специалистов над этой темой работали Бацев и Лукошков. ...В самый разгар работы тема «Дельта» была закрыта, а иностранных специалистов начали отправлять обратно в Германию. По теме «Дельта» написано несколько отчётов и статей. В. С. Лукошковым совместно с В. И. Бацевым написан отчет «Разработка методов стабилизации частоты магнетронных генераторов» (1950 г.). С 1946 года организуется аспирантура при нашем институте. Из отдела 110 поступили в аспирантуру Годгельф (1946 г.), Иванов (1947 г.), Цейтлин (1948 г.), Шубин (1949 г.) и Бацев (1949 г.).

Начало 50-х годов оказалось очень плодотворным для Владимира Ивановича. Во-первых, в 1950 г. в семье Бацевых родился второй сын, Сергей, а в 1952 г. – третий сын, Андрей, который по настоящее время работает на «Истоке» в НПК-2. Во-вторых, в сборнике «Труды научно-исследовательского института 160» появились первые публикации В. И. Бацева: «Резонаторный анализатор спектра» (1951. – Вып. 2. – С. 62 – 69), «Индикатор ухода частоты генератора СВЧ» (1952. – Вып. 2. – С. 24 – 31) и «Графоаналитический метод расчета линий передачи и полых резонаторов техники СВЧ» (1954. – Вып. 2. – С. 2 – 22). Последний метод оказался весьма полезным для практических задач. Если на начальном этапе электромагнитные поля рисовались вручную, что увеличивало трудоемкость, то после появления ЭВМ и вычерчивания эквипотенциальных линий на графопостроителе возможности метода очень расширились. Даже спустя 20 лет лауреат Ленинской премии А. И. Мельников применял его метод для расчета параметров коаксиальных ГШ ЛПД, используя результаты расчета на ЭВМ, выполненные С. А. Дубровиной.

В 1953 г. приказом директора из отдела 110 в отдел 200 были переведены пять специалистов с относительно большим стажем, в их числе и В. И. Бацев. О создании отдела 200 рассказал в своем интервью С. И. Ребров, генеральный директор «Истока» с 1962 по 1988 гг.

Нашему институту в начале 50-х годов был передан важнейший госзаказ на пальчиковые усилительные лампы (ПУЛ) серии «Анод». До того эту задачу пытался решить МЭЛЗ, но работа провалилась. Да и у нас поначалу воспроизводимость ламп была никудышней, а они требовались для системы управления первой советской «летающей крепости». Захаров и Гольцов создали в институте отдел 200 по ПУЛам и назначили начальником Н. В. Черепнина. Этот отдел численностью 900 человек был создан за одни сутки – так исполнялись в то время распоряжения руководства НИИ. Н. В. Черепнину с сотрудниками удалось получить необходимую надежность и долговечность первых отечественных ПУЛ и начать их производство в требуемых количествах. В какой-то момент производство этих ламп было основным для нашего института.

В. И. Бацев, занимавшийся теоретическими вопросами надежности электронных приборов, был переведен в отдел 200 на должность начальника лаборатории. Возглавляя лабораторию, Владимир Иванович непосредственно на производственном опыте прочувствовал важность вопросов повышения надежности ИЭТ, без которых невозможно получить высоких параметров

изделий. Решение этих задач стало основным в производственной деятельности В. И. Бацева, в том числе и во главе вновь созданного отдела.

Отдел надежности № 310 был образован в 50-х годах для изучения и решения одной из составляющих проблемы надежности – проблемы обеспечения стойкости разрабатываемых приборов к внешним механическим и климатическим воздействиям. Первым начальником отдела с момента его образования и до 1982 г. был кандидат технических наук В. И. Бацев – видный специалист и организатор создания материально-технической, научно-методической и нормативной базы для испытаний изделий электронной техники на предприятии.

В отделе надежности сформировалось несколько основных направлений научно-технической и производственной деятельности. Одно из них – исследование надежности с помощью статистических методов – было создано непосредственно самим Владимиром Ивановичем. Основной задачей этого направления являлось создание научно-методической и информационно-справочной базы, необходимой для расчета надежности ИЭТ. Начало практического применения статистических теорий к обобщению результатов испытаний на предприятии было положено В. И. Бацевым и получило дальнейшее развитие с приходом из теоретического отдела в отдел надежности В. В. Сапрынского. С 1977 г. направлением статистических исследований руководил В. В. Сапрынский.

Основательная университетская подготовка в различных областях математики позволяла Владимиру Ивановичу ставить перед сотрудниками понятные и разрешимые задачи, что благоприятно влияло на творческую атмосферу в дружном коллективе отдела надежности.

С 1982 г. В. И. Бацев переходит на должность старшего научного сотрудника отдела, а с 1992 уходит на заслуженный отдых.

За безупречную деятельность по повышению обороноспособности страны и на благо советского народа Владимир Иванович награжден медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина» (1970), медалью «За трудовую доблесть» (1971), орденом «Знак Почета» (1976), медалью «Ветеран труда» (1984), бронзовой медалью ВДНХ СССР (1980), другими знаками отличия, Почетными грамотами и благодарностями. Его имя навечно занесено в книгу «Летопись трудовой славы «Истока».

На протяжении многих лет В. И. Бацев входил в редакционную коллегию научно-технического сборника «Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ».

Большое внимание Владимир Иванович уделял подрастающему поколению. Он стоял у истоков создания «истоковского» втуза, преподавая в нем с сентября 1962 года и до конца своей жизни. Студенты с особой теплотой отмечали его уникальный педагогический дар – сложные вопросы математики и теории надежности преподносить понятно и доходчиво.

20 сентября 1995 г. он вернулся после очередной лекции в филиале МИРЭА, а 21 сентября его жизнь оборвалась.

Владимир Иванович Бацев оставил для потомков большое научно-техническое наследие и самую добрую память о себе.

АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ПОБЕДОНОСЦЕВ

Александр Сергеевич Победоносцев родился 4 сентября 1930 года в г. Саратове в семье учителей. В шестилетнем возрасте он лишился родителей, рос и воспитывался в семье сестры матери. По окончании средней школы в 1948 поступил на физический факультет Саратовского



А. С. Победоносцев

государственного университета, а на 4-м курсе был переведен в Ленинградский государственный университет, где по специальности «Электронная физика» в те годы срочно готовили кадры для электронной промышленности.

После окончания университета в 1953 году А. С. Победоносцев был распределен в НИИ-160, который бурно развивался и был на острие научного прогресса. Здесь работали Н. Д. Девятков, С. А. Зусмановский, В. С. Лукошков, Б. М. Царев, В. Ф. Коваленко, В. И. Бацев, А. С. Тагер и многие другие ученые, известные сегодня научному миру.

Волею судьбы Александр Сергеевич оказался в теоретическом отделе, руководимом В. С. Лукошковым. Первые его работы были выполнены совместно с А. С. Тагером, которого А. С. Победоносцев до конца жизни считал своим учителем в области электроники. Оба ученых начинали в 1955 году работы по созданию источников колебаний в миллиметровом диапа-

зоне длин волн. В этих исследованиях ими были рассмотрены специфические свойства вакуумных генераторов миллиметрового диапазона длин волн: так называемый «клинотронный» эффект в лампах обратной волны (ЛОВ), а также работа приборов О- и М-типа в близкритическом режиме. Если А. С. Тагер больше склонялся к фундаментальным исследованиям, то А. С. Победоносцев искал приложения своим идеям в конкретных изделиях. И в этом смысле его теоретические работы, оказавшие заметное влияние на практику, носят непревзойденный характер. Ни один теоретик на «Истоке», а может быть, и в стране не может сравниться с Александром Сергеевичем по количеству внедренных теоретических разработок в конкретные изделия, число которых у него превышает 100.

В 1956 году группа ученых, в том числе и А. С. Победоносцев, предлагает новое изобретение, защищенное авторским свидетельством, – «Многорядная замедляющая система для широкополосных миллиметровых и субмиллиметровых приборов», где впервые высказывается идея использования в электровакуумных приборах (ЭВП) нескольких электронных пучков, что впоследствии стало началом целого направления в электронике СВЧ – многолучевых приборов.

В дальнейшем А. С. Победоносцевым и кандидатом технических наук В. Г. Бороденко теоретически было обосновано, что переход к многолучевым конструкциям позволяет не только увеличить мощность, но и более чем в 2 раза расширить полосу частот усилительного клистрона по сравнению с однолучевым. Позже эта идея была подтверждена экспериментально С. В. Королевым, первопроходцем многолучевого направления в электронике.

Развитие данного направления нашло отражение в многочисленных изделиях электронной техники (ИЭТ), выполненных разработчиками «Истока» и других предприятий России, а впоследствии и в зарубежных странах.

Большой заслугой Александра Сергеевича является организация массового проектирования СВЧ-приборов сначала на нашем предприятии, а затем и в стране. Поворотным этапом в этом направлении стали работы мозговой группы: А. С. Победоносцев, В. Г. Бороденко, Н. Я. Малькова-Хаимова. В 1966 году ими был выполнен анализ гибридных приборов О-типа. Это была первая работа, посвященная нелинейному анализу твистронов и клистронов с распределенным взаимодействием. Им удалось выяснить особенности механизма работы этих

ламп и оценить предельные значения КПД, а также зависимости КПД от различных параметров приборов. Они первыми пришли к выводу, что расчет гибридных приборов, состоящих, в отличие от клистронов и ЛБВ, из разнородных секций, невозможен без единого математического описания. И такое описание ими было разработано. Полученные результаты подтвердили возможность достижения в этих приборах высоких КПД при достаточно широкой полосе частот. В зарубежной литературе аналогичные работы в то время отсутствовали.

Интерес к унификации методов расчета различных приборов определился давно, однако разработка действительно универсальных программ анализа, синтеза и оптимизации электровакуумных приборов СВЧ стала возможной лишь благодаря включению в эту сферу научного интеллекта Александра Сергеевича. Его работы послужили толчком к последующему созданию универсальных программ, позволяющих рассчитывать практически все приборы О-типа, в том числе и многосекционные СВЧ-приборы, многолучевые клистроны, работающие на основном и высшем видах колебаний резонатора, мощные многолучевые ЛБВ и усилительные цепочки на их основе. Стремление к универсальности определило еще одно направление творческой деятельности А. С. Победоносцева. Им изначально были высказаны идеи разработки и использования мощных методов оптимизации и синтеза ЭВП СВЧ. Существенно, что он стал не только инициатором развития этого важного направления, но и направил свои усилия на достижение конкретных результатов. В частности, использование разработанных на основе этих идей методов позволило увеличить КПД в клистронах, что явилось ключевым фактором в применении этих приборов в оборонной технике и народном хозяйстве. Отметим также, что под руководством Александра Сергеевича В. А. Морозовой и В. С. Морозовым был выполнен большой цикл работ по созданию методики проектирования ЭВП, малочувствительных к разбросам конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

Значительный вклад А. С. Победоносцев внес в разработку методов совместной оптимизации ЭВП и их источников питания.

Его теоретические работы стали основой кандидатской (1964 г.), а затем докторской (1990 г.) диссертаций, успешно защищенных им в «истоковском» диссертационном совете.

К выдающимся достоинствам А. С. Победоносцева следует отнести его неиссякаемую работоспособность. Им самостоятельно и в соавторстве опубликовано более 200 научных трудов (статьи, технические отчеты), получено 20 авторских свидетельств. Своими новаторскими идеями он постоянно делился с разработчиками, считая совместную работу с ними одним общим делом. Своим честным отношением к работе, граничащим с фанатизмом, Александр Сергеевич заслужил уважение не только среди сотрудников теоретического отдела и других подразделений, но и среди дирекции предприятия. К его словам прислушивались, ему доверяли. Александр Сергеевич никогда не стремился к внешнему успеху, но успех теоретического отдела, его научный авторитет в глазах научной общественности, разработчиков и дирекции, без сомнения, во многом его заслуга.

Отдел, которым более четверти века руководил А. С. Победоносцев, по праву считался одним из лучших на предприятии. Ему было по плечу решение любых сколь угодно сложных задач. В нем удалось собрать много выдающихся теоретиков. Здесь работали такие известные в стране специалисты, как лауреат Ленинской премии, доктор технических наук Д. М. Петров, от которого А. С. Победоносцев принял лабораторию и отдел, кандидаты технических наук В. Г. Бороденко, А. Н. Варнавский, А. П. Пителин, В. Б. Хомич, К. А. Ведяшкина, В. М. Лямзин, И. И. Голеницкий, Т. П. Кущевская, М. И. Захаров, инженеры В. С. Шатилов, В. А. Морозова,

Л. А. Сапрынская, Л. Н. Марычева, В. М. Ипполитов, А. С. Красильников, В. Г. Чубуков, С. В. Опарин и многие другие. Из этого отдела вышел и нынешний начальник теоретического отделения 10 кандидат физико-математических наук А. В. Галдецкий.

А. С. Победоносцев много сил отдавал воспитанию научных кадров. Под его руководством были выполнены семь кандидатских диссертаций. Он являлся членом диссертационного совета «Истока» и активно сотрудничал с аспирантурой предприятия. Его знали, ценили и уважали не только ученые предприятия, ему присылали докторские и кандидатские диссертации на оппонирование со всей России.

Талантливый и творчески одаренный человек, Александр Сергеевич широко известен не только как ученый. Он серьезно, можно сказать, профессионально занимался спортивной подводной охотой (вместе с А. А. Негиревым, Л. Е. Гуревичем, композитором народным артистом СССР В. Я. Шаинским) и занимал призовые места в чемпионатах СССР.

Несмотря на широкую известность и занимаемую должность, он оставался простым в общении с людьми. С ним можно было обсуждать любую тему. Он живо интересовался всем происходящим вокруг, имел на все свой оригинальный глубокий взгляд. Широта его интересов – от глубокого понимания искусства до тонкостей экологии, от философского осмысления современной действительности до стихов русских поэтов.

За высокие показатели в работе А. С. Победоносцев в советский период был награжден медалью «За трудовую доблесть» и знаком «Почетный радист СССР». Ему было присвоено звание лауреата Государственной премии СССР. В 2004 г. Александр Сергеевич был награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством II степени».

А. С. Победоносцев трагически погиб 5 августа 2005 года. Память об Александре Сергеевиче Победоносцеве остается в наших сердцах, а его честное отношение к науке, предприятию и отделению 10 всегда будет служить замечательным примером для нас и наших потомков.



На рыбалке. Июль 2000 г.



С композитором В. Я. Шаинским

АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ НЕГИРЕВ

Александр Андреевич Негирев родился 10 сентября 1930 года. Выдающийся разработчик приборов СВЧ, начальник лаборатории, ведущий научный сотрудник НПК-17, лауреат Государственной премии СССР, кандидат технических наук.

Его юбилейная дата практически совпала с юбилеем А. С. Победоносцева, его однокурсника, близкого друга, соратника. Вместе они учились сначала в Саратовском, а затем в Ленинградском государственных университетах. Вместе пришли на предприятие в 1953 году и поселились в общежитии на улице Центральной.

Из воспоминаний об этом времени их соседа Р. А. Силина:

Приезд двух молодых специалистов внес свежую струю в нашу холостяцкую жизнь. По вечерам оба Саши любили посидеть на кухне, поспорить и... поиграть на баяне. От их игры становилось как-то веселее на душе. По утрам мы вместе бегали через картофельное поле, которое начиналось прямо от проходной предприятия (домов на улицах Ленина и Вокзальная тогда еще не было), и купались в озере Большом. О физической силе Саши Негирева в молодежной среде рассказывались просто невероятные истории. Все мы работали в теоретическом отделе в лаборатории А. С. Тагера. Перед А. Негиревым, начальником, была поставлена задача – обобщить метод Флетчера, чтобы применить его для расчета различных типов замедляющих систем. Он заметно продвинулся в этом вопросе, однако не успел завершить исследования – продолжать его работу поручили мне. Дело в том, что в знаменательном 1955 году его вместе с А. С. Тагером и другими теоретиками направили в отдел 170, где под руководством М. Б. Голанта разворачивались работы по созданию электровакуумных приборов в миллиметровом диапазоне длин волн. Некоторые теоретики позже вернулись в свой отдел, а Александр Андреевич так и остался в отделе 170, всей душой проникшись к этому чрезвычайно интересному и, как оказалось, плодотворному для него направлению электроники СВЧ.

Из воспоминаний В. С. Лукошкова:

Следует также упомянуть о большой работе при участии Я. Я. Акменьтыньша по критике теории электроники пролетного двухконтурного клистрона, предложенной Ю. А. Кацманом, что частично отражено в научно-техническом отчете «О компенсации металлических стенками электрического поля, созданного пространственным зарядом внутри полости» (Я. Я. Акменьтыньш, А. А. Негирев, В. С. Лукошков. – 1954. – 38 с.).

Уже первые исследования, проведенные А. А. Негиревым, показали, что за его глубокими теоретическими знаниями кроется и феноменальное умение воплотить теоретические результаты в «железки» – уникальные конструкции конкретных приборов и устройств. Начиная новые работы в области миллиметровых длин волн, сотрудникам самим приходилось изобретать все узлы приборов для этого диапазона. Первые изобретения А. А. Негирева охватили практически все направления в разработке и конструировании ЭВП. Вот лишь некоторые из них: прибор для генерации или усиления колебаний в мм-диапазоне; способ фокусировки электронного луча в ЛБВ и ЛОВ; новая конструкция электродов приборов; широкополосный согласованный переход



А. А. Негирев

между штыревой замедляющей системой и волноводом; конструкция вывода энергии; способ предохранения от повреждений и загрязнений конструкций приборов; устройство крепления ЛОВ и другие.

Столь широкий охват научных и технических направлений в электронике оказался под силу лишь такому незаурядному человеку, каким является Александр Андреевич. В этом фактически и состоит отличительная черта его, как разработчика. Вокруг А. А. Негирева сложился коллектив первоклассных ученых, конструкторов, разработчиков: В. С. Савельев, Т. Б. Реброва, Л. А. Лункина, В. В. Немцев, А. С. Федоров и другие.

Его с блеском защищенная диссертация была посвящена созданию широкополосных генераторов типа ЛОВ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн и являлась, пожалуй, первой научной работой, выполненной в этом направлении не только в СССР, но и в мире.

В дальнейшем, следуя по пути миниатюризации приборов, А. А. Негирев с сотрудниками своей лаборатории создал целый ряд уникальных приборов О-типа, существенно превосходящих по своим параметрам лучшие изделия, разработанные за рубежом. Основой такому мощному прогрессу послужило создание в процессе работы плоской электронной пушки с малым эмиссионным пятном и большой плотностью тока, изготовление замедляющих систем с малым шагом, большой точностью, малыми потерями, хорошим теплоотводом и малым газовым выделением, а также разработка добротной метрики и изящных теоретических методов анализа.

Новые приборы требовали новых подходов к их созданию. Поэтому практически каждый узел этих уникальных приборов защищен А. А. Негиревым авторскими свидетельствами на изобретения. Широко известны его изобретения способа изготовления вторично-электронных эмиттеров (динодов) жалюзного типа; способа изготовления оконечного поглотителя; окна вывода энергии приборов миллиметрового диапазона длин волн и другие.

Особенно внимательно относился Александр Андреевич к разработке катодов для миниатюрных приборов, видя в них залог качественной работы прибора. При его непосредственном участии были изобретены новые виды прямонакального высокоэмиссионного узла, пропитанного торцевого катода, металлосплавного катодно-подогревательного узла и т. п.

С середины 70-х годов Александр Андреевич параллельно с традиционными приборами начинает работы по созданию полупроводниковых генераторов миллиметрового диапазона длин волн. Соединив усилия разработчиков своей лаборатории А. С. Федорова и В. А. Ледова, технологов В. П. Снегирева и А. А. Лезина, теоретиков С. И. Варгузова, С. М. Овечкина и Е. И. Голанта, ему в короткие сроки удастся создать уникальную конструкцию генератора на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) с варакторной перестройкой частоты до 40 % и высокой линейностью перестроечной характеристики.

Пионерные работы А. А. Негирева всегда находили поддержку со стороны руководителей предприятия и подразделения. Заботливо относились к этим незаурядным работам крупного ученого и разработчика начальники НПК-17 А. Г. Михальченков, В. А. Мальцев, В. Ю. Мякинков и генеральный директор «Истока» А. Н. Королев. Его уважали разработчики и руководители других подразделений нашего предприятия и других предприятий страны.

Предметом научного интереса А. А. Негирева являлось не только создание новых приборов О-типа: ЛОВ, ЛБВ и других в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, но и поиск путей использования их в радиоэлектронной аппаратуре. Им были предложены или усовершенствованы автодинный радиоспектрометр миллиметрового диапазона, радиолокаци-

онный индикатор заданной дальности, способ непрерывного управления фазой сигнала, приемно-передающее устройство автодинного типа и др.

С большим вниманием и заботой А. А. Негирев относился к молодежи. Он искусно владел методологией научного поиска. Задачи, которые начальник лаборатории ставил перед молодым сотрудником, будоражили ум, заставляли искать новые решения, идти вперед к неизведанному. А. А. Негирев сам работал по 12 ч в сутки и вдохновлял на такую же самоотдачу молодежь.

Внешне немногословный Александр Андреевич преобращается на научных семинарах, заседаниях НТС, ученых советах, предварительных защитах диссертаций. Его вопросы соискателям были всегда конкретны, выступления доброжелательны, предложения эффективны.

В начале тысячелетия резко возрос интерес к приборам, разработанным А. А. Негиревым, со стороны различных отечественных и зарубежных предприятий и фирм гражданской продукции. Его изделия находили широкий спрос в Германии, Швейцарии, США, Японии и других развитых странах, а продажа их приносила и продолжает приносить немалый доход «Истоку».

Александр Андреевич был отличным семьянином. Среди интересов А. А. Негирева были рыбалка, подводная охота (вместе с А. С. Победоносцевым и В. Я. Шаинским), традиционные спортивные дисциплины.

А. А. Негирев ушел из жизни на 87-м году жизни.

БОРИС НИКОЛАЕВИЧ ШВЕЦОВ

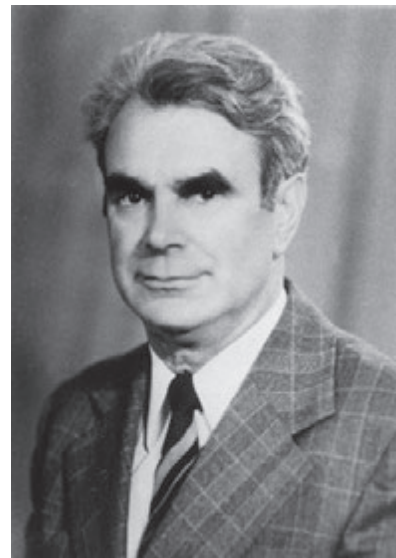
Б. Н. Швецов родился 26 июня 1917 года в городе Горьком. Закончил Горьковский индустриальный институт. Начиная работать на одном из «номерных» горьковских предприятий, там же закончил аспирантуру.

Кандидатскую диссертацию по антенной технике защищал в Москве в ЦНИИ-108. Его уникальная работа была отмечена многими специалистами, в том числе и начальником теоретического отдела НИИ-160 В. С. Лукошковым, который в те годы активно набирал молодых сотрудников в свой отдел. В 1952 году Борис Николаевич был принят на работу в теоретический отдел на должность начальника лаборатории по измерительной технике СВЧ. Из воспоминаний В. С. Лукошкова:

С приходом в 1952 году в лабораторию 112 кандидата технических наук Б. Н. Швецова (1953 г. – начальник лаборатории) началось развитие нового большого цикла работ по метрике шумов электронных приборов СВЧ. Основные его достижения

в этой новой области относятся к периоду после 1953 года. До этого периода отмечу выполненную и опубликованную нами совместную работу «Изучение распределения электромагнитного поля полостей на моделях методом зонда с высокой подводкой» (А. С. Бондарев, В. С. Лукошков, Б. Н. Швецов // Труды НИИ МПСС. – 1954. – Вып. 3. – С. 3 – 15).

Первые работы в этом новом направлении проводились Б. Н. Швецовым совместно с сотрудниками отдела 170 и горьковского НИРФИ в обеспечение измерениями шумов первых в СССР ЛБВ, разработанных В. А. Афанасьевым. Уже тогда остро возникла необходимость в создании на «Истоке» отдельного метрического подразделения. Лаборатория Б. Н. Швецова сна-



Б. Н. Швецов

чала была переведена из теоретического отдела в отдел 120, затем – в сектор 50, потом – в лабораторию 514 НПК-5, а десять лет назад – в НПК-6.

Созданная Б. Н. Швецовым в НПК-5 лаборатория шумовых измерений насчитывала 25 человек. Ее талантливыми сотрудниками было проведено более 50 инициативных работ, была установлена связь со многими организациями и при содействии МЭП СССР были начаты работы шумового направления во многих институтах и предприятиях страны: в ВНИИФТРИ (научный поселок Менделеево, вблизи Зеленограда) – по созданию общесоюзных шумовых эталонов и системы их поверки; КНИИРИТ (г. Каунас, Литовская ССР) – по разработке измерительного приёмника для контроля коэффициента шума; «номерном» предприятии в г. Полтава (Украинская ССР) – по выпуску аппаратуры для измерения шумов; МРТИ (г. Минск) – по измерителям флуктуаций генераторов; ГНИПИ (г. Горький); НПО «Орион» (г. Киев); «номерных» предприятиях г. Саратова.

Б. Н. Швецов имел звание почётный радист СССР, его фотография многократно украшала Аллею и Доску почёта «Истока».

Борис Николаевич пользовался большим авторитетом среди сотрудников. Он был музыкально одарённым человеком и «заводилой» на всех общественных мероприятиях.

**Отрывок из книги «Незабываемые годы»
(Очерки истории НПК-6 за 65 лет)***

Группа шумовых измерений была создана в октябре 1952 года в теоретическом отделе 110. Позже она была переведена в отдел 120, в сектор 50, преобразована в лабораторию 514 и затем в НПК-5. Целью создания группы было обеспечение различных видов измерений шумовых параметров ЭВП СВЧ, разрабатываемых и выпускаемых предприятием, не обеспеченных промышленной аппаратурой. Инициатором создания и многолетним руководителем лаборатории был Борис Николаевич Швецов.

Для получения устойчивых и надежных результатов при измерении чувствительности в качестве калибровочных «эталонов» оказались необходимы СВЧ шумовые генераторы (ГШ) с известной спектральной плотностью мощности шума (СПМШ). Работа по созданию ГШ была начата на предприятии в 1952 – 1953 гг. совместно с Горьковским институтом физико-технических исследований (ГИФТИ) с участием специалистов «Истока» Швецова Б. Н., Сидоровой А. А., Афанасьева В. А., Тагера А. С. и других. За изобретение широкодиапазонного измерителя СПМШ Б. Н. Швецов и К. И. Алмазов-Долженко получили авторское свидетельство.

В 1961 – 1963 гг. Б. Н. Швецовым, В. А. Пузановым, Э. Ф. Долич и другими совместно с ВНИИФТРИ Комитета стандартов (КС СССР) была предложена вторичная мера СПМШ на газоразрядных лампах, что обеспечило единство измерений в МЭП СССР и организациях заказчика. В дальнейшем, в связи с особой важностью вопроса эталонирования СПМШ не только для нашего предприятия, но и в общегосударственном масштабе, МЭП СССР по инициативе «Истока» (Б. Н. Швецов, К. И. Алмазов-Долженко, В. А. Пузанов, В. Е. Согрешилина, Н. Ф. Кузнецова и др.) поставил перед КС СССР задачу создания Государственного эталона шумового радиоизлучения в СВЧ-диапазоне и соответствующей поверочной схемы. В результате совместно проведенной ими ОКР «Газон» в 1971 году впервые в СССР был создан первичный Государственный эталон единицы СПМШ в диапазоне частот 1,0...37,5 ГГц. Эта работа обеспечила единство шумовых измерений СПМШ ГШ (ГОСТ 8.037–73, ГОСТ 8.086–73). В эти же годы активно велась работа по международному сличению эталонов СПМШ. Установка

*М.: Научный мир», 2011.

«Газон» получила в 1966 г. золотую медаль ВДНХ, а заместитель главного конструктора Б. Н. Швецов был награжден серебряной медалью ВДНХ.

На пике этого превосходства «Истока» в отечественной метрике шумов на предприятии был создан метрологический отдел 210. Измерение СПМШ рабочих ГШ проводилось уже в этом отделе А. Н. Мельгуновым, В. А. Пузановым, Н. Ф. Кузнецовой, О. Б. Тришкиной.

Одновременно с ГШ на «Истоке» разрабатывались высокочувствительные компараторы шумовых сигналов, необходимые для градуировки ГШ и для измерений коэффициента шума усилителей. Высокая чувствительность созданных измерителей позволила в 1960–1962 гг. впервые в Советском Союзе измерить уровень шума газовых разрядников (работы Паршина Ф. С.). Первый специализированный отечественный измеритель коэффициента шума (ИКШ) был разработан в 1958 г. в ГНИПИ (г. Горький). С целью совершенствования ИКШ и придания ему качеств, необходимых для контроля непосредственно приборов электронной техники СВЧ, разрабатываемых на «Истоке», в 1960 г. был предложен метод линейной шкалы (авторы Б. Н. Швецов и В. С. Аблязов), защищенный авторским свидетельством на изобретение. Разработанные на основе этого метода измерительные приемники ИП-3, ИП-5 в количестве более 180 штук использовались на предприятиях «Исток», полтавском заводе «Знамя», саратовском номерном заводе, ЦНИИА, каунасском КНИИРИТ. В 2001 г. на «Истоке» был разработан малогабаритный трехканальный измерительный приемник ИПМ-1 (разработчики К. И. Алмазов-Долженко, С. В. Пантыкин, Ю. П. Виноградов), основанный также на методе линейной шкалы, позволяющий в процессе измерений одновременно контролировать калибровку, что повышало удобство и увеличивало точность измерений.

Более полувека, начиная с 60-х годов, на «Истоке» проводятся исследования шумовых параметров ЭВП и полупроводниковых приборов, где используются как теоретические, так и экспериментальные работы Б. Н. Швецова, А. И. Мельникова, К. И. Алмазова-Долженко, С. В. Пантыкина, А. С. Жерновенкова, Ю. К. Першина, А. К. Балыко, В. И. Васильева и других.

С начала 70-х годов интенсивно развивались работы по созданию аппаратуры для измерения чувствительности фотоприемников с выходной частотой, лежащей в диапазоне СВЧ, при этом широко используются для обработки сигналов метод линейной шкалы, разработанные приемники для измерения шумов и установка для измерения параметров фотоприемников при импульсных сигналах, защищенная авторским свидетельством (авторы Б. Н. Швецов, К. И. Алмазов-Долженко, Б. Н. Бондаренко).

Важным направлением работы лаборатории шумовых измерений начиная с 60-х годов, возникшим в связи с разработкой генераторов СВЧ и повышением требований к ним, явилось создание аппаратуры для измерения флуктуаций сигналов генераторов и гетеродинных шумов. В 1965 г. Б. Н. Швецовым, В. Н. Ештокиным, А. М. Касумовым, Г. Н. Ефимовым были разработаны методика и комплект измерителей флуктуаций серии ИФ-1, перекрывающий весь диапазон СВЧ. Измерители имели чувствительность на 15...20 дБ выше, чем выпускаемые промышленностью измерители СК-3.

Существенную роль при аттестации измерителей флуктуаций играет метод калибровки с помощью ферритового микромодулятора профессора В. Г. Калины. На основании этого метода Б. Н. Швецовым, А. С. Бажановым, Л. С. Золотаревой были проведены уникальные разработки измерителей флуктуаций для широкодиапазонных генераторов СВЧ.

В 1986 г. был разработан автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс для снятия характеристик электромагнитной совместимости (ЭМС). Работы проводились

совместно НПК-5 (Б. Н. Швецов, А. С. Бажанов, Л. С. Золотарева), отделом 350 и Воронежским государственным университетом. Разработанная ими аппаратура получила высокую оценку на ВДНХ СССР.

Б. Н. Швецовыми, В. В. Пуховым был предложен и защищен авторским свидетельством метод, а позднее изготовлена и сверхточная аппаратура для измерения флуктуаций сигналов генераторов, усилителей и смесителей, работающих в импульсном режиме, которые нашли широкое применение на «Истоке» и в других организациях страны.

Под руководством Бориса Николаевича на «Истоке» в начале 70-х годов были проведены первые работы по применению вычислительной техники для повышения точности шумовых измерений с применением ЭВМ «Наири». В дальнейшем в НПК-5 были разработаны более совершенные автоматизированные установки для панорамных измерений коэффициента шума и коэффициента усиления усилителей СВЧ и приемных модулей (М. М. Степанков, В. Д. Семенович, С. И. Веденеева, Ю. П. Карпенко). В 1973 году Б. И. Олейнером на основе ЭВМ «Электроника 100» была создана система автоматической настройки СВЧ-усилителя по режиму питания на оптимальные значения коэффициента шума и коэффициента усиления. Эта работа явилась одной из первых в СССР в области автоматизации измерений. В 1982 г. ЭВМ была применена для быстрого определения времени готовности твердотельных усилителей СВЧ по коэффициенту шума. В составе измерительного комплекса для снятия характеристик ЭМС в 1981 году Б. Н. Швецовым и А. С. Бажановым была применена ЭВМ ТЗ-16, что ускорило измерения и повысило их качество. В 1987 г. на базе ЭВМ «Электроника 100» был создан универсальный автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) и специализированный измерительный приемник (АИП). В зависимости от введенной программы, комплекс мог проводить измерения различных параметров электронных приборов СВЧ. Система обработки сигналов не только проводила необходимые измерительные операции, но и вычисляла дисперсию, то есть оценивала качество измерений.

Установка для измерения флуктуационной чувствительности приемных модулей миллиметрового диапазона длин волн была создана в 1988 году на основе ЭВМ ТЗ-29 (авторы Б. Н. Швецов, К. И. Алмазов-Долженко, С. В. Пантыкин, В. Е. Паняев).

В работах по определению чувствительности электронных приборов СВЧ активное участие принимали В. Е. Согрешилина, В. А. Кузнецов, Г. И. Славнова, Н. Н. Иосилевич, В. П. Виноградова, Н. В. Хромов, Н. Ивлиев, В. М. Карнацкий, А. В. Медведева, Е. В. Майоров, Т. А. Смирнова, Е. В. Царьков, В. В. Чернов, А. В. Бугаев, В. Н. Заболоцкий, Е. Н. Журавлёв, Г. Н. Фролов, П. П. Таланов, Т. Бекренёва, П. П. Рябцев, Н. Т. Мясников, М. И. Фрумкина, А. А. Кулаков, В. Н. Глуценко, Л. В. Логинова, С. Н. Кротенко, Л. И. Трубицына, И. Д. Симонов, В. И. Симонова, Л. П. Приходько, Г. В. Богатова, О. П. Горбунова, Ю. И. Степанов, А. А. Карт, С. Чугуй и другие.

КОНСТАНТИН ИВАНОВИЧ АЛМАЗОВ-ДОЛЖЕНКО

К. И. Алмазов-Долженко – известный ученый в области измерительной техники и метрологии, изобретатель, в его активе более 100 научных публикаций и целый ряд учебно-методических пособий. Он автор широко известных книг «Коэффициент шума и его измерение на СВЧ», «Техническая электродинамика и устройства СВЧ» (совместно с А. Н. Королевым), которые сразу же после издания стали настольными у ученых, преподавателей, аспирантов и студентов.

Константин Иванович родился 8 апреля 1931 года в Харькове. В 1953 году окончил радиофизический факультет Киевского политехнического института, распределился во Фрязино и с этого года непрерывно в течение 53-х лет работал на головном предприятии электроники СВЧ. С 2006 года он перешел на работу штатным преподавателем филиала МИРЭА при НПП «Исток».

Первые работы молодого специалиста теоретического отдела № 110 были посвящены созданию методов измерения чувствительности малошумящих приемных устройств, которые в те годы начали активно разрабатывать на предприятии. Ему впервые удалось сформулировать необходимые условия высокочастотного согласования при измерении коэффициента шума СВЧ-усилителей, а также выявить и устранить причины существенного искажения формы частотной зависимости мощности шума у некоторых типов приборов СВЧ.

Комплекс работ, выполненных ученым, лег в основу кандидатской диссертации, которую К. И. Алмазов-Долженко успешно защитил в 1964 году.

Последующие его работы в основном продолжались в избранной им области в лаборатории Б. Н. Швецова, где он исследовал погрешности измерения коэффициента шума в устройствах, работающих в нестандартных условиях; предложил устройство для контроля автоматических измерителей коэффициентов шума; разработал методы расчета параметров узлов измерителей коэффициента шума; исследовал новый метод измерения коэффициента усиления с помощью двух генераторов шума. Он принимал участие в разработке и исследовании газоразрядных и полупроводниковых генераторов шума и т. д. Со временем круг его научных интересов расширился. Существенных результатов ученый достиг в обобщении методов измерения электронных приборов, развитии методов и создании аппаратуры для исследования параметров чувствительности усилительных и приемных устройств СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов. Теоретические и экспериментальные работы К. И. Алмазова-Долженко нашли широкое практическое применение. Под его руководством создано большое количество измерительных установок для подразделений «Истока» и других предприятий, включая зарубежные (Китай и Индия).

10 книг, изданных К. И. Алмазовым-Долженко, свидетельствуют о незаурядном таланте автора в области научной публицистики, доступной широкому кругу ученых, студентов и аспирантов. Определенную роль в умении просто и понятно рассказать о сложных процессах и явлениях метрики электронных приборов СВЧ сыграло то обстоятельство, что Константин Иванович с 1979 года преподавал в «истоковском» филиале Московского института радиотехники, электроники и автоматики. Он, по оценке директора филиала, считается одним из лучших преподавателей института. Пятнадцать лет назад по инициативе Константина Ивановича и по договоренности между начальником НПК-6 П. И. Бойко и директором филиала МИРЭА Н. В. Абакумовой была установлена тесная учебно-производственная связь между этими подразделениями «Истока», согласно которой, лекции, практические и лабораторные занятия по специальным предметам К. И. Алмазов-Долженко проводил со студентами в рабочих помещениях НПК-6. Такая форма



К. И. Алмазов-Долженко

занятий повышала наглядность преподавания, давала возможность практически продемонстрировать устройства СВЧ, о которых шла речь в лекциях. Обучение преподносилось на примерах проводимых в НПК разработок и оставляло более значимый след в знаниях студентов. В связи с переездом НПК в новое помещение, «Базовая лаборатория МИРЭА при НПК-6» пока потеряла свое новаторское начинание.

Как и всякий талантливый человек, Константин Иванович наделен многими уникальными качествами. Первое качество – постоянное стремление к творческой работе в различных направлениях человеческой деятельности. Второе качество – юмор, без которого жизнь Константина Ивановича просто немыслима. На выпускных вечерах студентов он часто читал свои рассказы, как правило, из жизни студентов и преподавателей, наполненные этим чувством. Отдельные рассказы публиковались в местной печати. Сотрудники старшего поколения, конечно, помнят доклад, который сделал Константин Иванович в клубе «Факел» в День юмора 1 апреля 1983 года. Доклад был посвящён посещению г. Фрязино Остапом Бендером, известным героем немеркнущих с годами произведений «Золотой телёнок» и «Двенадцать стульев». Третье его качество – безграничная скромность. Именно она не позволила Константину Ивановичу долгое время публиковать два его фундаментальных труда «Лица друзей» и «О товарищах по работе», написанных блестящим языком, с тонким юмором и зачастую в стихотворной форме. Когда спрашиваешь у К. И. Алмазова-Долженко о секрете его активного долголетия, он отвечает, что, во-первых, это постоянное общение с неунывающим племенем студентов, а во-вторых, занятия, по мере возможности, спортом.

Константин Иванович: «А главное, у меня была любимая жена и друг Раиса Филипповна, которая 65 лет не давала мне стареть».

Сотрудники «Истока», преподаватели и студенты филиала МИРЭА от всей души поздравляют Константина Ивановича с большим Юбилеем, желают ему крепкого здоровья, долголетия, успехов во всех его делах и счастья в жизни!

На международной выставке

Весть об очередной интернациональной выставке в Москве прибыла к нам на электричке: её привёз Семен Пантыкин. К службам информации соответствующие сигналы пока ещё шли через руководящие инстанции.

– Борис Николаевич! Нам с Константином Ивановичем завтра обязательно нужно съездить в Москву!

– Почему непременно вдвоём?

– Ну, как же: он «голова», а я – «язык»!

– Ну, думаю, как бы не оплошать с этой миссией «головы»!

Начальство у нас «с пониманием», быстро соглашается.

И вот уже десятки флажтоков на Красной Пресне приветствуют прибытие двух учёных из города Фрязино. Впрочем, о существовании этого города никто не узнает даже после нашего отъезда. Давно уже мы ездим, представляясь преподавателями колледжа, если возникает такой вопрос. Это произносится с выражением лица, как бы говорящим: «Ну, что возмёшь со студентов?! Конечно, лентяя, конечно, это всё скучно! И сюда мы приехали просто так, «по собственному настроению мыслей», «для души», оторвавшись на минутку от серых повседневных преподавательских дел!»

«Загнивающие» (любимое выражение Семёна Васильевича), как всегда, поражают блеском, миганием, разнообразием нового. Названия фирм и стран, как в калейдоскопе. Писать надписи по-русски фирмы уже совершенно разленились, но по-английски понимают все; вот тут-то наш «язык» (Семен Васильевич) и выступает на самый первый план. «Язык» не простой, он, к тому же, ещё растёт из хорошего тела.

Не успеваешь оглянуться, как у «преподавателей колледжа» на руках уже три десятка проспектов, сборные каталоги, и всё это в сувенирной сумке с портретом хозяина фирмы. По отношению ко мне Семён Васильевич строит беседу таким образом, как будто бы я по крайней мере второе, после академика Котельникова, светило советской радиоэлектроники! Я стою чуть-чуть в стороне, с важным видом киваю головой и временами произношу небезызвестную фразу: «Да, уж!»

В конце концов нам выдают ещё по шариковой ручке с надписью «Панамерикан» и с почтением провожают далеко за пределы своего сектора. «О кэй! Гуд бай!», и мы, покинув «Хьюлет Паккард», уже втираемся в доверие фирм «Бальзерс» и «Кэйэлементрик». Однажды дело дошло до приглашения к рауту, т. е. бесплатно пили «Пепси-колу», сидя в креслах и обмениваясь значительными эмоциональными возгласами по незначительным поводам. И это, о боже, с японцами! И несмотря на все строгие инструкции! Но всё обошлось благополучно. Очередная пачка офсетной бумаги высшего качества перешла в наши руки и осела в недрах «Истока». Удивлённые японцы долго ещё обсуждали со своими красивыми стендистками, кто же это их посетил и почему они не сумели вывести ни одной советской государственной тайны?

Побывать на выставке с Семёном Васильевичем Пантыкиным – это крайне интересно и поучительно!

К. И. Алмазов-Долженко

Статья поступила 12 апреля 2021 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Радиоэлектронная борьба. Тезаурус / Под ред. Созинова П. А. – М.: Радиотехника, 2020. – 456 с.

Уникальный толковый словарь, охватывающий обширную информацию о новейших научных достижениях, технологических и технических разработках, информационных технологиях в области радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и являющийся неотъемлемой частью научной серии книг «Принятие решений в управлении». В нем впервые приводятся термины, определения, понятия, раскрывающие сущность и содержание РЭБ, информационной войны в современных условиях, даются сведения о дезорганизации управления войсками и оружием противника, о комплексе мероприятий снижения заметности, радиоэлектронной защите и противодействии техническим средствам разведки иностранных государств, отражающие вопросы проектирования и создания средств и систем РЭБ, радиоэлектронных систем, использующих, наряду с радиоканалами передачи, приема, обработки, формирования сигналов, современные достижения в оптоэлектронике, гидроакустике, радиофотонике и акустике. Издание является практическим шагом по формированию единого подхода к терминологии в области радиоэлектронной борьбы и методологии выбора принимаемых решений.

Для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в области проектирования и применения средств и систем радиоэлектронной борьбы, создания и эксплуатации систем управления средствами вооружения и военной техникой.

**ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ
НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»**

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

2. Статья должна содержать:

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

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

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

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

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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

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 1.6.2021 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 14,0
Уч.-изд. л. 14,5
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
11 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
в каталоге агентства «Роспечать»



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2021, вып. 2(549), с. 114