



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (560)

2023



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(560)

2023

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н. А.А. Борисов

Редакционная коллегия:

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

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

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2023 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(560)

2023

Founded in 1950

Editor-in-chief

D.T.Sc. A.A. Borisov

Editorial staff:

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

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

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

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

<i>Мартынов Я.Б., Синкевич В.Ф.</i> – Лавинно-инжекционная неустойчивость и лавинный пробой в широкозонных гетероструктурных полевых транзисторах.....	6
<i>Гнусарев А.В., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А., Акафьева Н.А.</i> – Миниатюрные двухзазорные фотонно-кристаллические резонаторы с фрактальными резонансными элементами, выполненными на печатной плате.....	19
<i>Богданов С.А., Карпов С.Н., Пашковский А.Б., Котекин Р.А., Абдулов М.М.</i> – Всплеск дрейфовой скорости электронов в двухканальных гетероструктурах с дополнительными цифровыми потенциальными барьерами.....	28
<i>Иовдальский В.А., Ключев С.Б.</i> – Улучшение электрических характеристик симметричной щелевой линии.....	38
<i>Коломин В.М., Филиппов И.В., Карасёв Н.С., Рыбкин В.Н., Смирнова А.А., Иовдальский В.А.</i> – Улучшение характеристик фильтров на основе диэлектрических резонаторов из материала БМТ.....	48

Технология и материаловедение

<i>Дубкова А.С., Пухов Д.В., Гудкова Н.Б., Рябов В.Н., Ильюшина Н.Д., Кольцов В.Б.</i> – Оптимизация технологии формирования контактного слоя кремния <i>p</i> -типа для <i>p-i-n</i> -диодов.....	53
<i>Головкин П.А.</i> – О технологических особенностях получения качественных полос и лент из немагнитного сплава вакуумной плавки НММц 38-2В.....	58
<i>Бабкова Н.И., Бессонов Д.А., Горшкова Е.В., Соляник В.А., Шестеркин В.И.</i> – Применение лазерной абляции для обеспечения вакуумно-плотного паяного соединения окна из пиролитического нитрида бора в СВЧ-выводе энергии.....	66
<i>Васильев В.И., Дьяконова О.А., Денисюк Р.Н.</i> – Исследование отражательных свойств радиопоглощающего материала с киральным слоем.....	74

Производственно-технический опыт

<i>Самков В.В., Баранов С.Е., Баринов А.П., Ежов М.А., Свиридов В.А., Федоров В.Н., Евсеев А.В.</i> – Вопросы мониторинга высоковольтных устройств измерительных стендов.....	82
---	----

История

<i>Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.</i> – «Исток» указал нам дорогу по жизни.....	86
--	----

Тематический указатель.....	90
------------------------------------	----

Алфавитный указатель.....	93
----------------------------------	----

CONTENTS

Solid-state electronics

<i>Martynov Ya.B., Sinkevich V.F.</i> – Avalanche-injection instability and avalanche breakdown in wide-bandgap heterostructure field-effect transistors.....	6
<i>Gnusarev A.V., Miroshnichenko A.Yu., Tsarev V.A., Akafyeva N.A.</i> – Miniature two-gap photonic crystal resonators with fractal resonant elements made on a printed circuit board.....	19
<i>Bogdanov S.A., Karpov S.N., Pashkovsky A.B., Kotekin R.A., Abdulov M.M.</i> – Electron drift velocity overshoot in two-channel heterostructures with additional digital potential barriers.....	28
<i>Iovdalskiy V.A., Klyuev S.B.</i> – Improving the electrical characteristics of a symmetrical slot line.....	38
<i>Kolomin V.M., Philippov I.V., Karasev N.S., Rybkin V.N., Smirnova A.A., Iovdalskiy V.A.</i> – Improving the characteristics of filters based on dielectric resonators made of BMT materials.....	48

Technology and material science

<i>Dubkova A.S., Pukhov D.V., Gudkova N.B., Ryabov V.N., Ilyushina N.D., Koltsov V.B.</i> – Optimization of the formation technology of p -type silicon contact layer for p - i - n diodes.....	53
<i>Golovkin P.A.</i> – On technological features of obtaining quality strips and tapes from non-magnetic alloy vacuum melting Ni–Cu(38%)–Mg(2%) of the monel type.....	58
<i>Babkova N.I., Bessonov D.A., Gorshkova E.V., Solyanik V.A., Shesterkin V.I.</i> – The application of laser ablation to ensure vacuum-tight soldered connection of a window made of pyrolytic boron nitride in microwave energy output.....	66
<i>Vasilyev V.I., Dyakonova O.A., Denisyuk R.N.</i> – Investigation of reflective properties of radio-absorbing material with a chiral layer.....	74

Production and technical experience

<i>Samkov V.V., Baranov S.E., Barinov A.P., Ezhov M.A., Sviridov V.A., Fedorov V.N., Evseev A.V.</i> – Issues of monitoring high-voltage devices of measurement stands.....	82
---	----

History

<i>Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.</i> – «Istok» showed us the road of life.....	86
---	----

Subject index	90
----------------------------	----

Alphabetical index	93
---------------------------------	----



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.323

ЛАВИННО-ИНЖЕКЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ В ШИРОКОЗОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Я. Б. Мартынов¹, В. Ф. Синкевич²

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

²АО «НПП «Пульсар», г. Москва

Представлены результаты моделирования лавинно-инжекционной неустойчивости и лавинного пробоя в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах на основе нитрида галлия. Показано, что даже в случае отсутствия разогрева полупроводниковой решетки транзистора и при любом потенциале затвора максимальное напряжение исток-сток ограничено началом развития лавинно-инжекционной неустойчивости. Определены области напряжений, где существенную роль играет обычный лавинный пробой.

КС: гетероструктурный транзистор, лавинная инжекция, широкозонный полупроводник

AVALANCHE-INJECTION INSTABILITY AND AVALANCHE BREAKDOWN IN WIDE-BANDGAP HETEROSTRUCTURE FIELD-EFFECT TRANSISTORS

Ya. B. Martynov¹, V. F. Sinkevich²

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

²JSC «RPE «Pulsar», Moscow

The results of modeling the avalanche-injection instability and avalanche breakdown in high-power field-effect transistors based on gallium nitride heterostructures are presented. It is shown that even in the absence of heating the semiconductor lattice of the transistor and at any gate potential, the maximum source-drain voltage is limited by the onset of avalanche-injection instability. Transistor bias regions are determined where the usual avalanche breakdown plays a significant role.

Key words: heterostructure transistor, avalanche injection, wide-bandgap semiconductor

1. ВВЕДЕНИЕ

Термин «лавинная инжекция» впервые был введен Ганном в 1956 году [1, 2] для описания явления, возникающего при протекании тока в структуре, состоящей из двух хорошо проводящих электрический ток электродов, между которыми помещено некое не очень хорошо проводящее электрический ток вещество. Оказывается, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) такой структуры имеет S-образный вид, а резкое падение напряжения на образце вызвано тем, что область, в которой до начала переключения было мало носителей тока, заполняется носителями,



инжектируемыми в нее из области ударной ионизации, находящейся у одного из контактов. Эта инжекция, с другой стороны, способствует увеличению инжекции носителей тока из противоположного контакта – что и дало Ганну повод назвать это явление лавинной инжекцией (ЛИ). Поперечное распределение плотности тока в структуре с *S*-образной ВАХ оказывается неустойчивым – образуются шнуры с высокой плотностью тока, где и происходит разрушение кристаллической решетки диода. С тех пор «пробой» подобного типа наблюдался и исследовался в диодных структурах во множестве других работ [3–15]. Это явление предлагалось использовать для быстрого переключения цепи, контролируемой током, из высоковольтного в низковольтное состояние, для чего были предложены так называемые лавинно-инжекционные диоды (ЛИД) [3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13]. ЛИД имели 3...5-слойную структуру (n^+i-n^+ , $p^+n-p^+n^+$, $p^+n^+i-p^+n^+$) и время переключения менее 10 нс для диода длиной 100 мкм [3]. Были построены аналитические модели ЛИД и лавинно-инжекционных транзисторов (ЛИТ) разной степени строгости [5, 6, 9–11, 14, 15].

Оказалось, что явление лавинной инжекции можно применить для описания процессов, первоначально известных под другими названиями, происходящих в сильных электрических полях в разных полупроводниковых приборах. Например, было замечено, что использование мощных биполярных транзисторов (БТ) часто ограничивается явлением, называемым вторичным пробоем, признаком которого является резкое снижение напряжения на приборе с одновременным внутренним шнурованием тока. Впервые на это явление указали Торнтон и Симмонс [16], и с тех пор оно широко изучалось при исследовании мощных полупроводниковых приборов [17–19]. Позже оказалось, что именно ЛИ ответственна за разрушительный вторичный пробой во всех типах БТ [11, 20–23]. Качественная интерпретация происходящего была дана в [11] с использованием ЛИ. Однако адекватное количественное совпадение теории и эксперимента удалось получить только на основе численной модели [22, 23].

Выяснилось, что ЛИ в БТ имеет огромное практическое значение и интересные физические особенности. Например, было показано, что ЛИ ответственна за очень эффективное и очень быстрое переключение, происходящее в кремниевых биполярных лавинно-инжекционных транзисторах [24–26].

В мощных полевых транзисторах наблюдался ряд необычных эффектов, приводящих к резкому росту тока и изломам на вольт-амперных характеристиках этих приборов. В разных работах эти явления получили разные названия: паразитный биполярный эффект [27, 28] или кинк-эффект [29–34]. Однако последовательность событий, с помощью которой объясняются подобные эффекты, определенная в результате численного моделирования транзисторов [29, 35], характерна для лавинной инжекции. Для разных типов полевых транзисторов с затвором Шоттки типичной является необычная зависимость пробивного напряжения исток-сток от потенциала затвора. Если предположить, что пробой происходит между электродами с наибольшей разностью потенциалов – затвором и стоком – в результате появления лавины из-за обычной ударной ионизации, то по мере перекрытия транзистора отрицательным потенциалом затвора разность потенциалов между истоком и стоком, при которой происходит пробой, должна уменьшаться, поскольку пробивное напряжение затвор-сток должно оставаться постоянным. На практике, однако, типичной является обратная зависимость [36]. Такое поведение было объяснено с помощью лавинной инжекции дырок вначале экспериментально [37, 38], а затем подтверждено детальным численным моделированием [39, 40].

Таким образом, резкое нарастание тока, связанное с ЛИ, носит довольно общий характер. ЛИ наблюдалась в диодах как со структурой $n-i-n$ и $p-i-p$ [6], так и с $p-i-n$ -структурой [10], а также

в транзисторах разных типов: в GaAs полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ) [27, 28], МОП-транзисторах [29], транзисторах с высокой подвижностью (HEMT) [30], гетероструктурных полевых транзисторах (HFET) [33, 34], БТ [18]. В последнее время появились и получили широкое распространение транзисторы с высокой подвижностью на широкозонных материалах – AlGaN–GaN HEMT's. В этих транзисторах наблюдение эффектов, предположительно связанных с ЛИ, встречается крайне редко [41]. Означает ли это, что в AlGaN–GaN HEMT's лавинная инжекция по каким-то причинам подавлена и связанная с ней неустойчивость не развивается, или появление ЛИ сдвигается в труднодоступную для наблюдений область напряжений на транзисторе? В настоящей работе для ответа на этот вопрос проведено численное моделирование AlGaN–GaN HEMT с помощью квазигидродинамической системы уравнений [42].

2. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Параметры моделируемой транзисторной структуры представлены на рис.1, где слой $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ толщиной в 2 нм с концентрацией доноров $N_d = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ моделирует пьезоэффект, создающий поверхностную электронную плотность $n_s \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

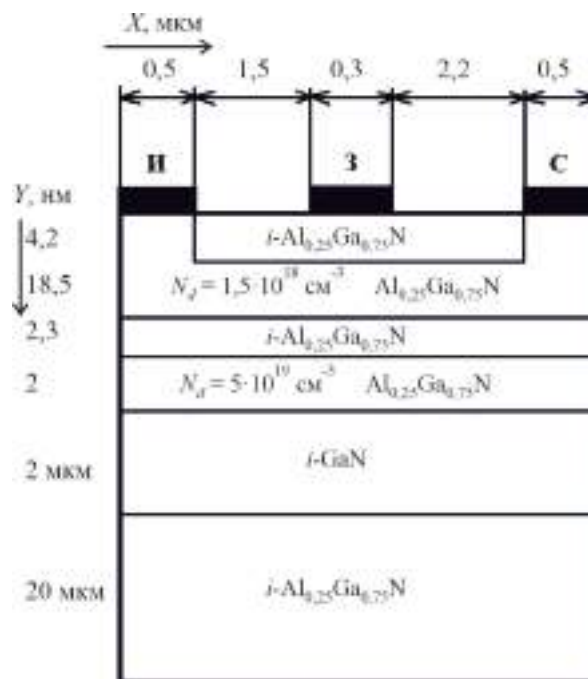


Рис. 1. Поперечное сечение моделируемого AlGaN–GaN HEMT. Двухнанометровый слой $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ с $N_d = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ моделирует пьезоэффект, создающий поверхностную электронную плотность $n_s \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Кинетические коэффициенты для электронов, содержащиеся в модели [42], определялись следующим образом. Вначале методом Монте-Карло [43] находились зависимости дрейфовой скорости V и средней полной энергии электронов ϵ от величины однородного и постоянного электрического поля E для заданного дискретного набора концентраций донорной примеси. Полученные зависимости аппроксимировались с помощью следующих аналитических выражений. Для дрейфовой скорости электронов:

$$V(E) = \mu E \frac{1 + \frac{V_s}{\mu E_{кр}} \left(\frac{E}{E_{кр}} \right)^m}{\left[1 + \left(\frac{E}{E_{кр}} \right)^n \right] \left[1 + \left(\frac{E}{E_{крс}} \right)^{nc} \right]} + V_{s0} \frac{\left(\frac{E}{E_{кр2}} \right)^{m2} \left(\frac{E}{E_{крс}} \right)^{nc}}{\left[1 + \left(\frac{E}{E_{кр2}} \right)^{n2} \right] \left[1 + \left(\frac{E}{E_{крс}} \right)^{nc} \right]} \quad (1)$$

было 11 подгоночных параметров ($\mu, V_{s0}, V_s, E_{кр}, E_{кр2}, E_{крс}, m, m2, n, nc, n2$). Связь средней полной энергии электронов ε и величины однородного и постоянного электрического поля E задавалась в виде зависимости

$$E(\varepsilon) = \left\{ \frac{E_{01} \sqrt{\frac{\varepsilon - \varepsilon_{01}}{\varepsilon_{k1}}} + E_{02} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{01}}{\varepsilon_{k3}} \right)^{m2} \times \begin{cases} 1, & \varepsilon < \varepsilon_{k4} \\ \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{01}}{\varepsilon_{k4}} \right)^{m3}, & \varepsilon > \varepsilon_{k4} \end{cases}}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{k2}} \right)^{nc} \right] \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{k3}} \right)^{n2} \right]} \right\}, \quad (2)$$

содержащей также 11 подгоночных параметров ($E_{01}, E_{02}, \varepsilon_{01}, \varepsilon_{k1}, \varepsilon_{k2}, \varepsilon_{k4}, \varepsilon_{k3}, nc, n2, m2, m3$). Получены таблицы, определяющие зависимость каждого из 22 подгоночных коэффициентов от концентрации примесей. Параметры материалов, использованные для вычисления $V(E)$ и $E(\varepsilon)$ методом Монте-Карло, приведены в таблице. Величины подгоночных коэффициентов при концентрациях, а также параметров материалов при молярных долях, не содержащихся в таблицах, определялись с помощью линейной интерполяции.

Параметр	GaN	Литература	AlN	Литература
Постоянная решетки, А	3,189	[44]	4,044	[45]
Низкочастотная диэлектрическая постоянная	9,5	[44]	8,5	[44]
Высокочастотная диэлектрическая постоянная	5,35	[44]	4,77	[44]
Ширина запрещенной зоны, эВ	3,4	[47]	6,2	[44]
Электронное сродство, эВ	4,1	[44]	1,9	[44]
Скорость звука, см/с	$6,56 \cdot 10^5$	[48]	$9,06 \cdot 10^5$	[46]
Плотность, г/см ³	6,095	[47]	3,23	[49]
Эффективная масса в Γ -долине, в ед. m_0	0,2	[53]	0,48	[46]
Эффективная масса в L -долине, в ед. m_0	0,6	[50]	1	[46]
Эффективная масса в X -долине, в ед. m_0	0,6	—	1	[46]
Акустический деформационный потенциал, эВ	10,1	[45]	9,5	[46]
Энергия оптического фонона, эВ	0,092	[48]	0,0992	[46]
Энергия междолинного фонона, эВ	0,0243	[52]	0,0757549	[49]
Зазор Γ - L , эВ	2	[51]	0,7	[46]
Зазор Γ - X , эВ	3,3	[51]	1	[46]

Для зависимости дрейфовой скорости дырок V_h от электрического поля E использовалось следующее выражение:

$$V_h(E) = \frac{\mu_h E}{\left[b_0 + \frac{E}{E_{\text{кр}}} \right]}, \quad (3)$$

где $b_0 = 0,5 \left(1 + \sqrt{\frac{N_d + N_a}{N_0}} \right)$, $E_{\text{кр}} = V_s / \mu_h$, $\mu_h = 200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для GaN и $\mu_h = 14 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для AlN;

$V_s = 2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ для GaN и $V_s = 10^7 \text{ см/с}$ для AlN [44]; N_d и N_a – концентрации донорной и акцепторной примесей; $N_0 = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Зависимости коэффициентов ударной ионизации от электрического поля имели вид:

$$\alpha_z = b_z e^{-\frac{E_{bz}}{E(\epsilon_z)}}, \quad z = n, h, \quad (4)$$

значения коэффициентов b_z и E_{bz} выбирались согласно [54]. Подстановка (2) в (1), (4) задает используемые в модели [42] зависимости $V(\epsilon)$, $\alpha_n(\epsilon)$. Зависимость времени релаксации по энергии электронов $\tau_n(\epsilon)$ от средней энергии электронного газа получалась после подстановки (2) в выражение

$$q\mu E^2 = (\epsilon - \epsilon_0) / \tau_n(\epsilon), \quad (5)$$

где q – абсолютная величина заряда электрона; μ – подвижность электронов. Время релаксации по энергии для дырок τ_h считалось независящим от средней энергии газа дырок ϵ_h и равным 1 пс. Из (3) и выражения, аналогичного (5), для дырок находилась зависимость средней полной энергии дырок от величины однородного и постоянного электрического поля E , аналогичная (2). $E(\epsilon_h)$ использовалась для определения зависимостей $V_h(\epsilon_h)$, $\alpha_h(\epsilon_h)$. Зависимости коэффициентов ударной ионизации и значения коэффициентов в формуле (4) полагались одинаковыми для GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сформированные в результате развития лавинной инжекции ВАХ обычного GaAs полевого транзистора с затвором Шоттки имеют S-образный вид, показанный на рис. 2. С другой стороны, гетеротранзистор AlGaIn–GaIn, как правило, имеет рабочее напряжение стока $U_{\text{и.с}}$ в диапазоне 25...50 В. Это значит, что при подаче высокочастотной мощности максимальное напряжение стока на транзисторе достигает 50...100 В. Однако на рассчитанных ВАХ AlGaIn–GaIn HEMT со структурой, показанной на рис. 1, в диапазоне $U_{\text{и.с}} = 0 \dots 100 \text{ В}$ S-образные участки отсутствуют (рис. 3). А появление заметных токов стока при больших отрицательных потенциалах затвора ($U_{\text{з.и}} \leq 20 \text{ В}$) не связано с лавинным умножением носителей тока и возникает потому, что все более положительный потенциал стока постепенно разгибает потенциальный барьер для электронов, создаваемый затвором (рис. 4).

Для того чтобы понять, при каких напряжениях начинается лавинный пробой промежутка затвор-сток AlGaIn–GaIn HEMT со структурой рис. 1, была рассчитана обратная ВАХ диода затвор-сток при «оторванном» истоке (ток истока задавался равным нулю) (рис. 5). Резкий рост лавинного тока начинается при напряжении $U_{\text{з.с}} = -220 \text{ В}$. Поэтому появление эффектов, связанных с ударной ионизацией, следует ожидать при напряжениях на стоке более 100 В.

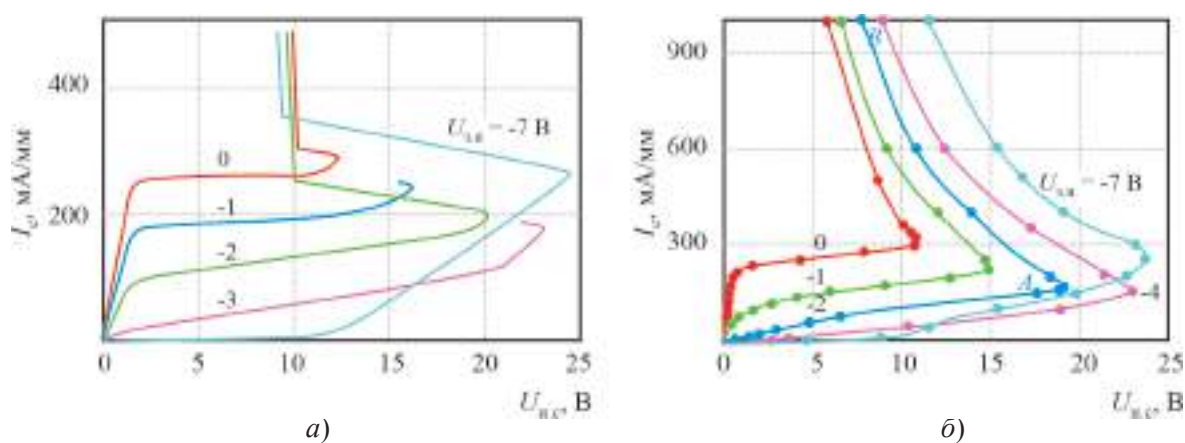


Рис. 2. Измеренные с помощью 20-нс импульсов (а) и рассчитанные [40] (б) S-образные ВАХ GaAs ПТШ, формирующиеся в результате развития лавинной инжекции

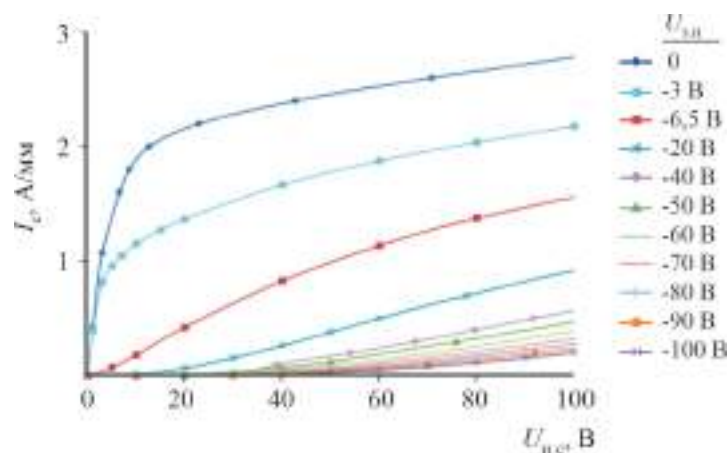


Рис. 3. Рассчитанные в диапазоне $U_{дс} = 0 \dots 100$ В ВАХ AlGaIn-GaN HEMT со структурой, приведенной на рис. 1

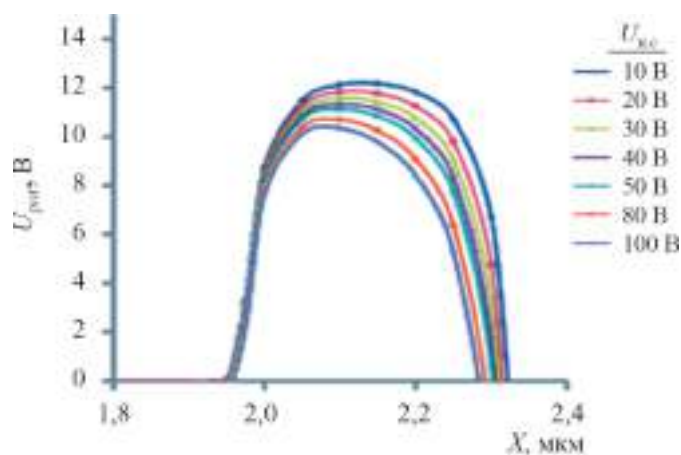


Рис. 4. Рассчитанная форма потенциального барьера, создаваемого затвором в канале AlGaIn-GaN HEMT при разных потенциалах стока. Потенциал построен вдоль канала в области с максимальной электронной плотностью, $Y = 26$ нм ($U_{з.и} = -20$ В)

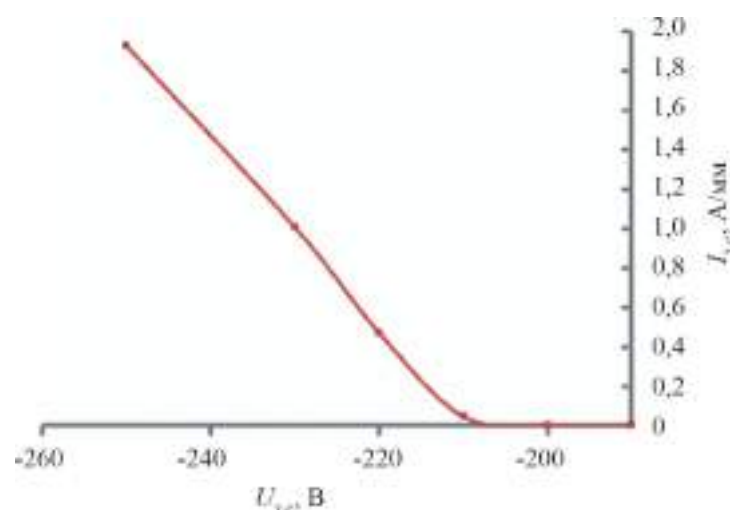


Рис. 5. Обратная ВАХ диодного промежутка затвор-сток при «оторванном» истоке

На рис. 6 приведены ВАХ того же AlGaIn–GaIn HEMT, которые были рассчитаны без каких-либо искусственных внешних ограничений сверху на стокое напряжение. Видно, что для любого потенциала затвора напряжение исток-сток имеет максимальное значение, при котором в результате лавинной инжекции дырок в подложку транзистора ВАХ прибора становится либо *S*-образной, либо начинаются незатухающие колебания, при которых напряжение исток-сток изменяется в пределах пунктирных линий, показанных на рисунке. Максимально возможная разность потенциалов затвор-сток, ограниченная лавинной инжекцией $U_{\text{лин}}$, растет с увеличением абсолютной величины отрицательного потенциала затвора (рис. 7). В диапазоне напряжений $-60 \text{ В} < U_{\text{з.и}} < 0$ наклон ВАХ транзистора определяют два физических эффекта: явление разгибания потенциального барьера затвора увеличивающимся потенциалом стока и лавинная инжекция. При $U_{\text{з.и}} \leq -60 \text{ В}$ начинает пробиваться промежуток затвор-сток. В этом диапазоне напряжений затвора наклон ВАХ определяется при малых потенциалах стока разгибанием потенциального барьера затвора, затем происходит лавинный пробой промежутка затвор-сток и крутизна ВАХ резко возрастает (при этом появляется значительный ток затвора). Лавинный ток постепенно насыщается из-за известного влияния объемного заряда лавины [55]. Дальнейшее увеличение тока стока может быть обеспечено лишь лавинной инжекцией, но в этих условиях (при заданном постоянном токе стока и лавинном пробое затвора) возникают незатухающие колебания потенциала стока. Напряжения, при которых происходит начало таких колебаний, и отложены на рис. 7. Они продолжают кривую $U_{\text{лин}}$ при $U_{\text{з.и}} \leq -60 \text{ В}$.

Как видно из рис. 7, напряжение лавинного пробоя затвор-сток не является постоянным, а растет с ростом потенциала затвора. Принято считать, что $U_{b,d}$ не должно зависеть от потенциала затвора, поскольку этот пробой связан с размером обедненной области в промежутке затвор-сток, зависящим в первом приближении только от разности потенциалов $U_{\text{з.с}}$. Однако, как показывает анализ полученных численных решений, если разность потенциалов между истоком и стоком увеличивается при постоянной $U_{\text{з.с}}$, то увеличивается и размер обедненной области в канале (рис. 8, 9). Величина последней зависит не только от $U_{\text{з.с}}$, но и от величины всплеска скорости электронов, увеличивающейся с ростом тока исток-сток. Таким образом, даже при $U_{\text{з.с}} = \text{const}$, но растущих $U_{\text{и.с}}$ и I_c увеличивается размер области с сильным электрическим полем и, следовательно, пробивное напряжение промежутка затвор-сток $U_{b,d}$.

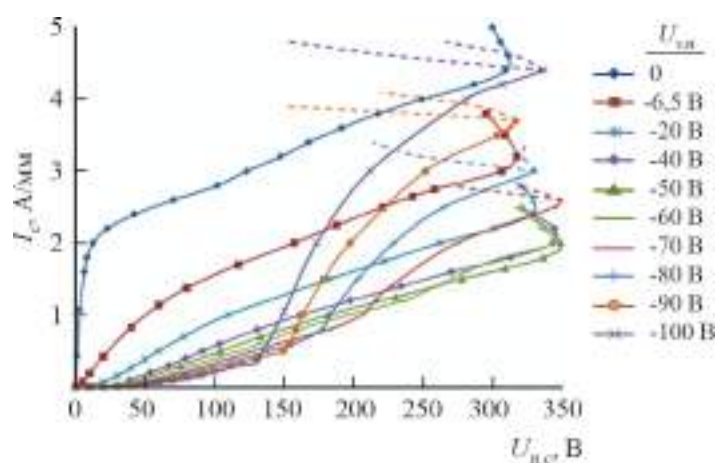


Рис. 6. Полные ВАХ AlGaIn-GaN HEMT со структурой рис. 1

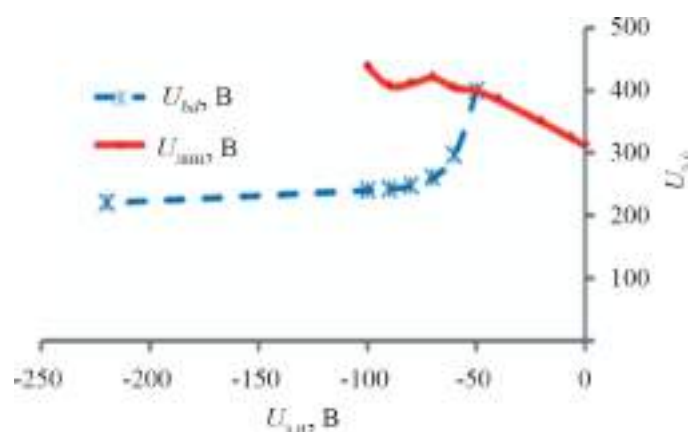


Рис. 7. Максимально возможная разность потенциалов затвор-сток, ограниченная лавинной инжекцией $U_{\text{лин}}$ и напряжением лавинного пробоя промежутка затвор-сток $U_{b,dp}$ от потенциала затвора

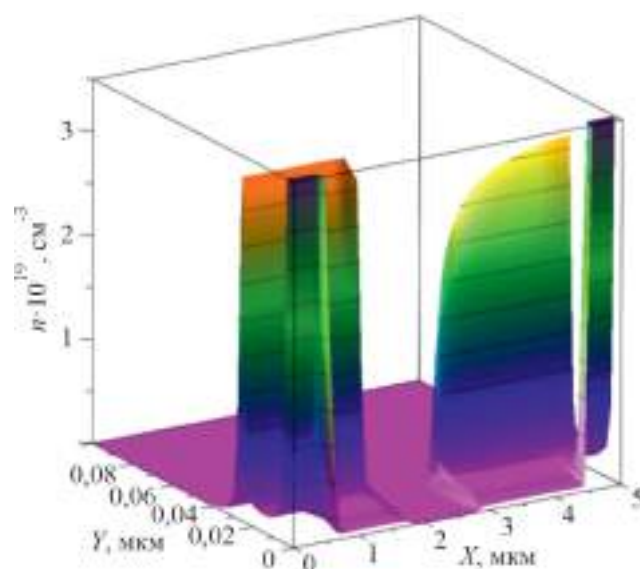


Рис. 8. Концентрация электронов n в сечении AlGaIn-GaN HEMT. Все электроды расположены в плоскости $Y=0$. Исток – вдоль координаты X от 0 до 0,5 мкм, затвор – от 2 до 2,3 мкм, сток – от 4,5 до 5 мкм

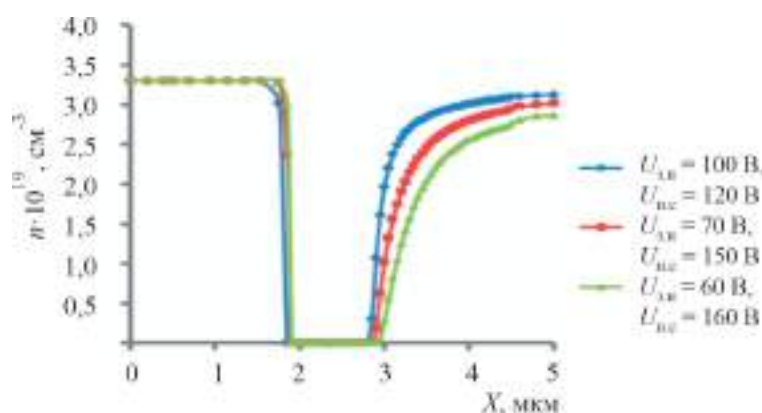


Рис. 9. Максимальная концентрация электронов в канале AlGaIn-GaN HEMT при разных потенциалах стока и одинаковой разности потенциалов затвор-сток, $U_{з.с} = -220$ В. $Y = 26$ нм

Оценим также величину мощности, которую можно получить от исследуемого транзистора. Для этого используем рассчитанные ВАХ этого транзистора (см. рис. 6) и обычные формулы для мощности P и КПД η в режиме A :

$$P = \frac{1}{8} (I_{\max} - I_{\text{ут}})(U_{\max} - U_{\kappa}), \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{(I_{\max} - I_{\text{ут}})(U_{\max} - U_{\kappa})}{(I_{\max} + I_{\text{ут}})(U_{\max} + U_{\kappa})}, \quad (7)$$

где $I_{\max}$, U_{κ} – точка пересечения нагрузочной линии и ВАХ $I_{\text{с}}(U_{\text{з.и}}, U_{\text{и.с}})$ при $U_{\text{з.и}} = 0$, а $I_{\text{ут}}$, $U_{\max}$ – точка пересечения нагрузочной линии и ВАХ $I_{\text{с}}(U_{\text{з.и}}, U_{\text{и.с}})$ при некотором значении $U_{\text{з.и}}$. Точки $I_{\max}$, U_{κ} и $I_{\text{ут}}$, $U_{\max}$ варьируются. При этом интересно отметить следующие закономерности.

Зафиксируем вначале точку $I_{\max}$, U_{κ} , а также напряжение $U_{\text{з.и}} = -100$ В и будем менять точку $I_{\text{ут}}$, $U_{\max}$, увеличивая напряжение стока. Как видно из рис. 10, в этих условиях рост ВЧ-мощности, отдаваемой транзистором, ограничен началом лавинного пробоя – зависимость $P(U_{\max})$ имеет максимум при $U_{\max} \sim 130$ В (в этой точке происходит резкое нарастание тока стока, см. рис. 6). Если теперь менять параметр $I_{\max}$, U_{κ} , увеличивая $I_{\max}$, то величина этого максимума будет расти от $P \sim 2,5$ Вт/мм при $I_{\max} = 0,43$ А/мм, достигая почти 25 Вт/мм при $I_{\max} \sim 2$ А/мм (сопутствующая эффективность $\eta \sim 25\%$), и, как и следовало ожидать, начинает падать ($P \sim 23$ Вт/мм при $I_{\max} = 2,4$ А/мм), когда точка $I_{\max}$, U_{κ} уходит далеко за перегиб ВАХ $I_{\text{с}}(U_{\text{з.и}}, U_{\text{и.с}})$ при $U_{\text{з.и}} = 0$. Сопутствующая эффективность прибора при этом слегка растет от $\eta \sim 25\%$ при небольших токах ($I_{\max} = 0,43$ А/мм) и мощности $P \sim 2,5$ Вт/мм до $\eta \sim 33\%$ при $I_{\max} = 1,8$ А/мм и $P \sim 23$ Вт/мм, а затем падает до $\eta \sim 18\%$ при $I_{\max} = 2,4$ А/мм и $P \sim 23$ Вт/мм.

В зависимости эффективности исследуемого транзистора при изменении точки $U_{\text{з.и}} = -100$ В, $I_{\text{ут}}$, $U_{\max}$ также имеется максимум, который не совпадает с максимумом мощности (рис. 10, б). Этот максимум эффективности особенно велик в области небольших токов $I_{\max}$ ($\eta \sim 45\%$, сопутствующая мощность $P \sim 1,5$ Вт/мм, $I_{\max} = 0,43$ А/мм) и неуклонно падает с ростом $I_{\max}$ до $\eta \sim 18\%$ при $I_{\max} = 2,4$ А/мм (сопутствующая мощность $P \sim 23$ Вт/мм).

Отметим также, что для тех токов $I_{\max}$, для которых $\eta > 30\%$, рост эффективности с ростом $U_{\max}$ ограничен током утечки $I_{\text{ут}}$, вызванным упоминавшимся ранее явлением разгибания барьера

затвора растущим потенциалом стока. Действительно, максимум эффективности наблюдается при тех $U_{\max}$ ($\sim 30 \dots 70$ В), при которых появляется значительный ток утечки стока $I_{\text{ут}}$ (см. рис. 10, б и рис. 6).

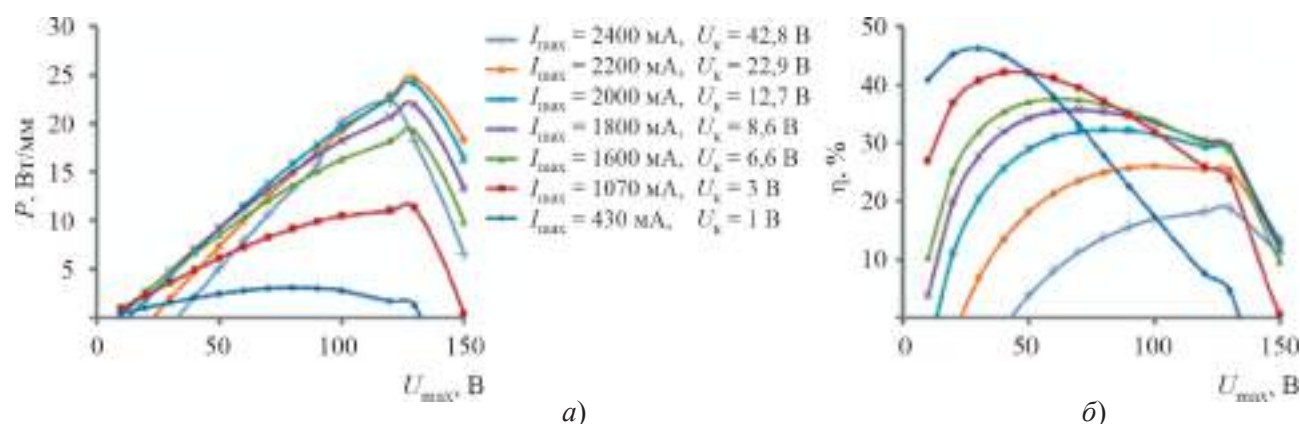


Рис. 10. Отдаваемая AlGaIn–GaIn NEMT ВЧ-мощность (а) и КПД (б) при меняющейся точке ($U_{\text{з.и}} = -100$ В, $I_{\text{ут}}$, $U_{\max}$) и различных фиксированных точках ($U_{\text{з.и}} = 0$, $I_{\max}$, U_k)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты качественно подтверждают сделанное авторами [41] предположение о том, что S-образная характеристика исследуемой ими транзисторной структуры обусловлена развитием лавинно-инжекционной неустойчивости, все характерные признаки которой наблюдаются при численном моделировании. Это – лавинная инжекция дырок из области сильного поля у стока в подложку, дрейф этих дырок к истоку и их накопление возле этого электрода со стороны подложки (рис. 11, а), понижение существующего в этой области потенциального барьера для электронов и возникающая из-за этого дополнительная инжекция электронов из канала в подложку (рис. 11, б). Все эти явления приводят к появлению S-образности на ВАХ транзистора (см. рис. 6).

Таким образом, на поставленный во введении вопрос о возможности наблюдения лавинно-инжекционной неустойчивости в AlGaIn–GaIn NEMT численное моделирование дает следующий ответ. Из-за большой ширины запрещенной зоны полупроводников лавинно-инжекционная неустойчивость развивается при больших (в нашем случае ~ 300 В) напряжениях исток-сток и больших токах стока. Поэтому наблюдать эту неустойчивость трудно, так как в этой области напряжений и токов в транзисторе выделяется большое количество тепла и прибор выходит из строя. Для того чтобы в реальном приборе получить ВАХ, аналогичные рассчитанным (см. рис. 6), необходимо проводить измерения в импульсном режиме с достаточно короткими, порядка десятков наносекунд, импульсами.

В то же время AlGaIn–GaIn NEMT присущи и другие особенности, характерные для полевых транзисторов других типов. Например, рост напряжения в начале развития лавинно-инжекционной неустойчивости с увеличением отрицательного потенциала затвора (см. рис. 7) или явление разгибания барьера затвора положительным потенциалом стока (см. рис. 4). Найдено, что напряжение лавинного пробоя затвор-сток не является постоянным, а растет с ростом потенциала затвора. Это связано с тем, что растущая разность потенциалов между истоком и стоком, при постоянной $U_{\text{з.и}}$, увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов, что увеличивает размер обедненной области в канале, созданной отрицательным потенциалом затвора (см. рис. 8, 9).

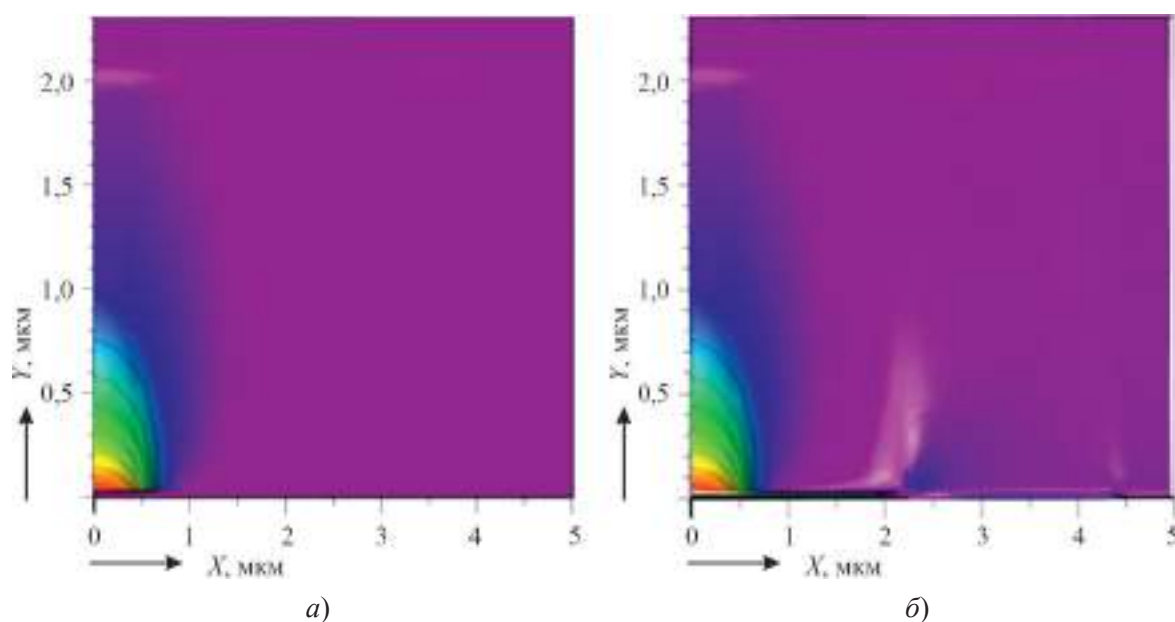


Рис. 11. Линии постоянной плотности дырок (а) и электронов (б) в сечении AlGaIn–GaN HEMT получены в области ВАХ, соответствующей развитой лавинной инжекции, при $U_{3H} = 0$, $I_c = 5$ А/мм. Красный цвет соответствует высокой, фиолетовый – низкой плотностям. Второй максимум электронной плотности при $X \sim 2,3$ мкм – это домен сильного поля в канале транзистора у стокового края затвора

С помощью рассчитанных ВАХ транзистора и простых формул (6), (7) сделана оценка ВЧ-мощности и эффективности этого прибора. Показано, что от AlGaIn–GaN HEMT с конструкцией, приведенной на рис.1, можно получить мощность $P \sim 1,5$ Вт/мм с эффективностью $\eta \sim 45\%$; $P \sim 7,5$ Вт/мм с $\eta \sim 40\%$ и $P \sim 25$ Вт/мм с $\eta \sim 25\%$. Падение эффективности с ростом ВЧ-мощности обусловлено большими утечками, связанными с явлением разгибания барьера затвора растущим потенциалом стока.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gunn, J. B.** / J. B. Gunn // Proc. Phys. Soc. – 1956. – В-69.
2. **Gunn, J. B.** Progress in semiconductors. Vol. 2 / J. B. Gunn; ed. A. F. Gibson. – London, 1957. – P. 213.
3. **Gibson, A. F.** Avalanche injection diodes / A. F. Gibson and J. R. Morgan // Solid-State Electron. – 1960. – Vol. 1, No 1. – P. 54 – 69.
4. **Hogarth, C. A.** A method of making negative-resistance two-state switching diodes / C. A. Hogarth // Solid-State Electron. – 1960. – Vol. 1. – P. 70 – 74.
5. **Steele, M. C.** Avalanche breakdown double injection induced negative resistance in semiconductors / M. C. Steele, K. Ando and M. A. Lampert // J. Phys. Soc. Jap. Nov. – 1962. – Vol. 17, No 11. – P. 1729 – 1736.
6. **Szedon, J. R.** The static and dynamic properties of the avalanche injection diode / J. R. Szedon and A. G. Jordan // Solid-State Electron. – 1963. – No 6. – P. 631 – 643.
7. **Rindner, W.** The BNR diode, a current controlled negative-resistance device / W. Rindner and A. P. Schmid // IEEE Trans. on Electron Devices. – April 1964. – Vol. ED-11. – P. 136 – 147.
8. **Eastman, L. F.** A current-controlled negative-resistance effect in indium antimonide / L. F. Eastman // IEEE Trans. on Electron Devices. – January 1966. – Vol. ED-13, No 1. – P. 117 – 121.

9. **Hoefflinger, B.** High-frequency oscillations of $p^{++}-n^{+}-n-n^{++}$ avalanche diodes below the transit-time cutoff / B. Hoefflinger // IEEE Trans. on Electron Devices. – January 1966. – Vol. ED-13, No 1. – P. 151 – 158.
10. **Mizushima, Y.** Properties of avalanche injection and its application to fast pulse generation and switching / Y. Mizushima and Y. Okamoto // IEEE Trans. on Electron Devices. – Mar. 1967. – Vol. ED-14. – P. 146 – 157.
11. **Hower, P. L.** Avalanche injection and second breakdown in transistors / P. L. Hower and V. G. K. Reddi // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1970. – Vol. ED-17, No 4. – P. 320 – 335.
12. **Кардо-Сысоев, А. Ф.** / А. Ф. Кардо-Сысоев, И. Г. Чашников, В. Б. Шуман // ФТП. – 1974. – № 6. – С. 1101.
13. **Кардо-Сысоев, А. Ф.** / А. Ф. Кардо-Сысоев, Е. А. Панютин, И. Г. Чашников // ФТП. – 1976. – № 8. – С. 1486.
14. **Caruso, A.** Negative resistance induced by avalanche injection in bulk semiconductors / A. Caruso, P. Spirito and G. Vitale // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1974. – Vol. ED-21, No 9. – P. 578 – 586.
15. **Scholl, E.** Current layers and filaments in a semiconductor model with an impact ionization induced instability / E. Scholl // Z. Phys. B – Condensed Matter. – 1982. – No 48. – P. 153 – 165.
16. **Thornton, C. G.** A new high current mode of transistor operation / C. G. Thornton, C. D. Simmons // IRE Trans. on Electron Devices. – 1958. – Vol. ED-5, No 6.
17. **Shafft, H. A.** Second breakdown – a comprehensive review / H. A. Shafft // Proc. IEEE. – 1967. – No 55. – P. 1272.
18. **Klein, N.** Electrical breakdown in solids / N. Klein; in Marton L. eds. // Advances in Electronics and Electron Physics. – Academic, N.Y., 1968.
19. **Dunn, L. N.** Investigation of the voltage sustained by epitaxial transistors in current mode second breakdown / L. N. Dunn, K. I. Nutall // Int. J. Electron. – 1978. – No 45. – P. 353.
20. **Nienhius, R. N.** Second breakdown in the forward and reverse base current region / R. N. Nienhius // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1966. – Vol. ED-13. – P. 655 – 652.
21. **Grutchfield, H. B.** Current mode second breakdown in epitaxial planar transistors / H. B. Grutchfield and T. J. Moutoux // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1966. – Vol. ED-13, No 11. – P. 743 – 748.
22. **Neudeck, G. W.** Reverse-biased $p^{+}-n-n^{+}$ junction at extreme currents / G. W. Neudeck // Electron. Lett. – 1975. – Vol. 11, No 17. – P. 397 – 398.
23. **Hane, K.** Effect of injected current on current-mode second breakdown in silicon $p^{+}-n-n^{+}$ structure / K. Hane and T. Suzuki // Jpn. Journ. Appl. Phys. – 1975. – Vol. 14, No 12. – P. 1961 – 1968.
24. **Vainshtein, S. N.** Avalanche transistor operation at extreme currents: physical reasons for low residual voltages / S. N. Vainshtein, V. S. Yuferev and J. T. Kostamovaara // Solid-State Electron. – 2003. – Vol. 47, No 8. – P. 1255 – 1263.
25. **Vainshtein, S. N.** Properties of the transient of avalanche transistor switching at extreme current densities / S. N. Vainshtein, V. S. Yuferev and J. T. Kostamovaara // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2002. – Vol. ED-49, No 1. – P. 142 – 149.
26. **Vainshtein, S. N.** Nondestructive current localization upon high-current nanosecond switching of an avalanche transistor / S. N. Vainshtein, V. S. Yuferev and J. T. Kostamovaara // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2003. – Vol. ED-50, No 9. – P. 1988 – 1990B.
27. Parasitic bipolar effects in submicrometer GaAs MESFET's / J. Van Zeghbroeck, W. Patrick, H. Meier and P. Vettiger // IEEE Electron Device Letters. – May 1987. – Vol. EDL-8. – P. 188 – 190.
28. Measurement and simulation of p -buffer MESFET's in impact ionization regime // Proc. Inst. Phys. Conf., ch. 2. – 1993. – P. 105 – 110.
29. **Kato, K.** Analysis of Kink characteristics in silicon-on-insulator MOSFET's using two-carrier modeling / K. Kato, T. Wada and K. Taniguchi // IEEE Trans. on Electron Devices. – Feb. 1985. – Vol. ED-32. – P. 458 – 462.
30. An analysis of the Kink phenomena in InAlAs/In-GaAs HEMT's using two-dimensional device simulation / T. Suemitsu, T. Enoki, N. Sano [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. – Dec. 1998. – Vol. 45. – P. 2390 – 2398.
31. Numerical analysis of Kink effect in HJFET with a heterobuffer layer / K. Kunihiro, H. Yano, N. Goto, Y. Ohno // IEEE Trans. on Electron Devices. – March 1993. – Vol. 40, No 3.
32. **Somerville, M. H.** A new physical model for the Kink effect on InAlAs/InGaAs HEMTs / M. H. Somerville, J. A. del Alamo, W. Hoke // IEDM Tech. Dig. – 1995. – P. 201 – 204.

33. **Brar, B.** Influence of impact ionization on the drain conductance in InAs–AlSb quantum well heterostructure field-effect transistor / B. Brar and H. Kroemer // IEEE Electron Device Letters. – Dec. 1995. – Vol. 16. – P. 548 – 550.
34. **Bolognesi, C. R.** Impact ionization suppression by quantum confinement: effects on the DC and microwave performance of narrow gap channel InAs/AlSb HFET's / C. R. Bolognesi, M. W. Dvorak and D. H. Chow // IEEE Trans. on Electron Devices. – May 1999. – Vol. 46. – P. 826 – 832.
35. Monte carlo study of the dynamic breakdown effects in HEMT's / A. Di Carlo, L. Rossi, P. Lugli [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – April 2000. – Vol. 21, No 4.
36. 4-GHz 15-W power GaAs MESFET / M. Fukuta, T. Mimura, H. Suzuki, K. Suyama // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1978. – Vol. ED-25, No 6. – P. 559 – 562.
37. **Kozlov, N. A.** Isothermal current instability and local breakdown in GaAs FET / N. A. Kozlov, V. F. Sinkevitch, V. A. Vashchenko // Electron. Lett. – 1992. – Vol. 28. – P. 1265 – 1267.
38. **Vashchenko, V. A.** Current instability and burnout of HEMT structures / V. A. Vashchenko and V. F. Sinkevitch // Solid-State Electron. – 1996. – Vol. 39. – P. 851 – 856.
39. **Martynov, Y. B.** Isothermal electric breakdown in MESFET's and MODFET's / Y. B. Martynov, A. S. Tager // 19'th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Stockholm, Sweden, May 21 –24, 1995.
40. Negative differential conductivity and isothermal drain breakdown of GaAs MESFET's / N. A. Kozlov, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1996. – Vol. ED-43, No 4. – P. 513 – 518.
41. Electrostatic discharge effects in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors / J. Kuzmik, D. Pogany, E. Gornik [et al.] // Applied Physics Letters. – 2003. – Vol. 83. – P. 4655.
42. **Мартынов, Я. Б.** Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы / Я. Б. Мартынов // ЖВМ и МФ. – 1999. – Т. 39, № 2. – С. 309 – 314.
43. **Гарматин, А. В.** Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках / А. В. Гарматин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1985. – Вып. 3(375). – С. 66 – 68.
44. GaN-based materials and devices / ed. M. Shur. – World Scientific, 2004.
45. **Morkoc, H.** Handbook of nitride semiconductors and devices. Vol. 2: Electronic and optical processes in nitrides / H. Morkoc. – Wiley-VCH, 2008.
46. Monte Carlo simulation of electron transport in wurtzite aluminum nitride / S. K. O'Leary [et al.] // Solid-State Communications. – 1998. – Vol. 105, No 10. – P. 621 – 626.
47. **Brennan, K. F.** Theory of modern electronic semiconductor devices / K. F. Brennan. – John Wiley & Sons, 2002.
48. **Москалюк, В. А.** Релаксационные параметры гексагонального нитрида галлия / В. А. Москалюк, М. Г. Овчарук // Электроника и связь. 3-й Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 2. – С. 7 – 10.
49. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase material system: binaries and ternaries / M. Farahmand [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, No 3. – P. 535 – 542.
50. Adachi. Properties of semiconductor alloys. Group IV, III-V and II-VI semiconductors. – 2009. – P. 231.
51. Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe / ed. Levinshtein. – John Willey & Sons, 2001
52. **Brazis, R.** The influence of phonon emission on electron transport in hexagonal and cubic gallium nitride / R. Brazis, R. Raguotis // Proceedings of the 12th International Symposium UFPS, Vilnius, Lithuania, 2004. – P. 324 – 327.
53. **Kasap, S.** Springer handbook of electronic and photonic materials / S. Kasap // Springer Science + Business Media, Inc, 2006.
54. Theory of hole initiated impact ionization in bulk zincblende and wurtzite GaN / I. H. Oguzman, E. Bellotti, K. F. Brennan [et al.] // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 81, No 12. – P. 7827 – 7834.
55. **Тагер, А. С.** Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. – М.: Советское радио, 1968.

Статья поступила 18 мая 2023 г.

УДК 621.385

МИНИАТЮРНЫЕ ДВУХАЗОРНЫЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ С ФРАКТАЛЬНЫМИ РЕЗОНАНСНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

А. В. Гнусарев, А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев, Н. А. Акафьева

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Исследован фотонно-кристаллический резонатор миниатюрного низковольтного клистрона, состоящий из решетки металлических стержней с экранирующими поверхностями. Внутри трехмерного дефекта фотонно-кристаллической решетки резонатора расположены на диэлектрической подложке полосковые линии, содержащие фрактальные элементы и пространство взаимодействия резонатора. Полосковые резонансные элементы соединены с центральным электродом резонатора, который имеет 13 каналов для пропускания электронного потока. Фрактальные элементы могут быть нулевой, первой или второй итерации фрактала «треугольник Серпинского». В ходе электродинамических расчетов были определены основные электродинамические параметры резонатора. Выяснено, что в качестве рабочей моды целесообразно выбрать 2π -вид колебаний, а в качестве оптимальной конструкции – фрактал второй итерации. Также изучено влияние шага фотонно-кристаллической решетки на резонансные частоты резонатора и диэлектрической проницаемости подложки на электродинамические параметры резонатора.

КС: миниатюрный многолучевой клистрон, фотонно-кристаллический резонатор, фрактальный элемент «треугольник Серпинского», диэлектрическая подложка, электродинамические параметры

MINIATURE TWO-GAP PHOTONIC CRYSTAL RESONATORS WITH FRACTAL RESONANT ELEMENTS MADE ON A PRINTED CIRCUIT BOARD

A. V. Gnusarev, A. Yu. Miroshnichenko, V. A. Tsarev, N. A. Akafyeva

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The photonic crystal resonator contains a lattice of round metal rods placed in a metal screen. The interaction space of the resonator is located inside the defect of the photonic crystal lattice. In the central part of the three-dimensional defect on a suspended dielectric substrate, there is a central electrode with 13 holes for transmitting electron beams, which is connected to two half-wave resonant conductors with fractal elements. The form of this element is determined by the iteration number ($k = 0, 1, 2$) of the Sierpinski Triangle fractal. Three designs of a resonator with a fractal resonant conductor of zero, first, and second iterations were studied. The main electrodynamic parameters of the resonator are determined. As a working mode, it is advisable to choose the in-phase mode of oscillations. In this case, the fractal of the second iteration is the optimal form of the fractal element. In this work, the behavior of resonant frequencies of the resonator depending on the pitch of the photonic crystal lattice was studied. Also, a study was made of the electrodynamic parameters of the resonator, such as the resonant frequency and the characteristic resistance $\rho = R/Q$, depending on the change in the permittivity of the substrates used.

Keywords: miniature multibeam klystron, photonic crystal resonator, Sierpinski Triangle fractal element, dielectric substrate, strip resonant element, electrodynamic parameters

1. ВВЕДЕНИЕ

При создании новых типов микроволновых усилителей с выходной мощностью до 1 кВт для радиосистем спутниковой связи и бортовых радиолокаторов требуются электронные приборы по-



вышенной надежности, с уменьшенными по сравнению с аналогами массой и габаритами, повышенной радиационной устойчивостью, стойкостью к температурным перепадам и вибрации [1]. Такие усилители должны обеспечивать коэффициент усиления 35...45 дБ с шириной полосы усиливаемых частот 50...200 МГц и КПД более 20 %. Однако существующие твердотельные усилители на частоте 10 ГГц имеют КПД около 15 % при выходной мощности до 20 Вт, а на частоте 30 ГГц выходная мощность падает до 10 Вт.

Составить существенную конкуренцию твердотельным приборам для этих случаев могут миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК), которые находят применения *X*- и *Ku*-диапазонах частот.

Но при разработке ММЛК, работающих в верхней части сантиметрового и миллиметровом диапазонах, необходимо учитывать особенности конструкции и технологии изготовления резонаторов, связанные с уменьшением их габаритных размеров и, как следствие, с уменьшением сечения электронного потока и возрастанием плотности тока отдельных лучей.

Решение проблемы обеспечения эффективного взаимодействия в резонаторах в этом случае — это переход к пространственно-развитым двухззорным и многоззорным резонаторам, которые бы имели высокое характеристическое сопротивление.

При увеличении резонансной частоты и переходе в миллиметровый диапазон размеры резонаторов уменьшаются, и к ним предъявляются особые требования. Это высокая точность изготовления деталей резонатора, высокое качество обработки поверхностей, необходимость разработки новых технологий изготовления резонаторов.

Также при работе резонансной системы в верхней части сантиметрового и миллиметровом диапазонах появляется большое количество паразитных частот и возникает «сгущение» спектра частот. Одной из приоритетных задач проектирования клистрона становится уменьшение влияния паразитных частот на спектр выходного сигнала.

На диэлектрических подложках в настоящее время успешно реализованы замедляющие системы для миниатюрных ЛБВ миллиметрового диапазона [2], такие технические решения могут также быть применены для миниатюрных многолучевых клистронов, обеспечивая высокую технологичность изготовления резонансной системы. Такие резонансные системы могут быть выполнены двухззорными (ДР), с расположенными перпендикулярно движению электронного потока подвешенными керамическими подложками, выполненными, например, из алмаза.

Известно, что спектр паразитных колебаний успешно подавляется в фотонно-кристаллических резонаторах (ФКР). Такие резонаторы имеют достаточно простую конструкцию, нашли применение в мощных клистропах и ускорителях [3–5]. Свойства ФКР применительно к миниатюрным многолучевым резонаторам практически не исследованы. Классический ФКР обычно состоит из металлических стержней, помещенных между двумя проводящими плоскостями. В центре ФКР, за счет удаления части стержней, находится так называемый «дефект решетки».

В области дефекта возбуждаются электромагнитные волны (моды дефектов), точно так же как в классических объемных резонаторах. Возбуждающееся в дефекте резонатора электромагнитное поле низших частот не проникает сквозь стержни в решетку, а отражается от них. Однако моды более высокого порядка могут проникнуть сквозь решетку, что приводит к их подавлению.

Одним из перспективных направлений в разработке резонансных систем для многолучевых низковольтных клистронов является применение в их конструкции фрактальных (или квазифрактальных) элементов, которые до сих пор активно используются при создании фрактальных антенн. Например, применение в миниатюрных двухззорных фотонно-кристаллических резонато-



рах (МДФКР) фрактальных элементов даст возможность получить у них новые свойства, такие, как повышенные характеристическое сопротивление и добротность, хорошая повторяемость параметров в различных диапазонах.

Одним из самых популярных фрактальных элементов является «треугольник Серпинского», предложенный польским математиком Вацлавом Серпинским в 1916 году. На рис. 1 показаны три итерации фрактала «треугольник Серпинского». К настоящему времени разработано множество конструкций антенн на базе этого фрактала [6–8], но свойства резонансных систем многолучевых клистронов с включением в конструкцию «треугольника Серпинского» в настоящее время практически не исследованы.



Рис. 1. Фрактальный элемент «треугольник Серпинского» трех итераций

При этом электродинамические характеристики таких резонансных систем будут зависеть как от формы и размеров фрактальных резонансных элементов, так и от параметров окружающей их фотонно-кристаллической решетки. Это открывает новые возможности в плане управления спектром колебаний и получения новых свойств резонатора.

В статье изучены электродинамические параметры и характеристики МДФКР с фрактальными резонансными элементами «треугольник Серпинского», который возбуждается на основном противофазном (π) и высшем синфазном (2π) видах колебаний при взаимодействии с многолучевым электронным потоком.

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

Конструкция МДФКР представлена на рис. 2. Резонатор состоит из фотонно-кристаллической решетки 1, с шагом $\Delta = 2,6$ мм и радиусом $\delta = 0,5$ мм, выполненной из металлических стержней. Фотонно-кристаллическая решетка ограничена боковыми крышками 2, расположенными на расстоянии $h = 2,8$ мм друг от друга. Диэлектрическая подложка 3 размещена в середине дефекта 4 фотонно-кристаллической решетки, изготовлена из алмаза с $\epsilon = 5,7$ и имеет толщину $t_1 = 0,7$ мм. В центре диэлектрической подложки выполнено отверстие, в котором размещен центральный электрод 5, имеющий форму четырехгранной призмы (размер грани $S = 3,12$ мм и высота $l = 1,4$ мм). Центральный электрод, а также боковые крышки резонатора 6 имеют 13 отверстий (каналов) для прохождения электронного потока. Кроме того, диэлектрическая подложка имеет отверстия для вставки металлических стержней решетки. Центральный электрод совместно с боковыми крышками резонатора образуют два симметричных высокочастотных зазора 7 длиной $d = 0,54$ мм. Центральный электрод соединен с четырьмя полосковыми резонансными элементами, имеющими форму фрактала «треугольник Серпинского». Резонансные элементы «треугольник Серпинского» могут быть трех итераций ($k = 0, 1, 2$; см. рис. 2, б-г) и размещены симметрично с двух сторон диэлектрической подложки. С другой стороны резонансные элементы «треугольник Серпинского» соединены с заземляющей поверхностью 8 и корпусом резонатора.

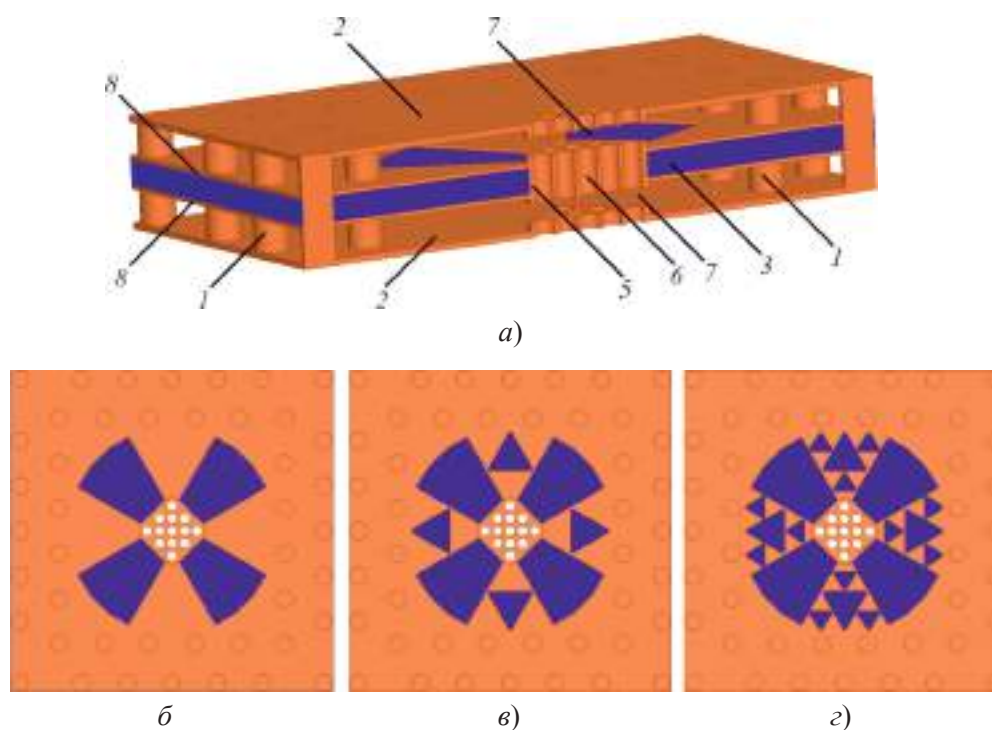


Рис. 2. Фотонно-кристаллический резонатор:

а – 3D-модель; б – нулевая итерация ($k = 0$); в – первая итерация ($k = 1$); з – вторая итерация ($k = 2$)

Задачами исследования было определить, как себя ведут основные электродинамические параметры резонатора, такие, как резонансная частота, собственная добротность и характеристическое сопротивление, при разных итерациях фрактальных элементов и различном шаге фотонно-кристаллической решетки.

При электродинамическом моделировании резонатора использовался метод конечных элементов в частотной области. Для оценки эффективности работы на той или иной резонансной частоте было выбрано эквивалентное сопротивление резонатора на резонансе $R_n = \rho_n Q_n$ (где ρ_n – характеристическое сопротивление на n -моду, Q_n – собственная добротность на n -моду), определяющее амплитуду ВЧ-напряжения, наводимого током электронных сгустков в зазорах резонатора. При этом индексы $n = 1, 2, \dots$ соответствуют номеру моды резонатора, а индексы $k = 0, 1, 2$ соответствуют номеру итерации фрактальных элементов. В резонаторе может возбуждаться множество частот, каждая из которых различна по своей природе. Первая мода с частотой f_1 возбуждается на ТЕМ-виде колебаний, характерна для полуволновых полосковых резонаторов и имеет противофазное распределение поля в зазорах, вторая мода – синфазные колебания с частотой f_2 , возбуждается в объеме резонатора.

Рис. 3 иллюстрирует зависимости эквивалентного сопротивления резонатора от частоты для трех итераций фрактального элемента «треугольник Серпинского». При этом для всех трех итераций фрактального элемента в диапазоне 12...15 ГГц расположены две частоты с максимальным импедансом, которые соответствуют основным типам колебаний (синфазный и противофазный соответственно). В этом случае эквивалентное сопротивление резонатора R_n на синфазной моде в 1,3 раза больше значения на противофазной моде. Результат применения в резонаторе фрактальных элементов первой и второй итераций приводит к небольшому уве-



личению R_n на противофазной моде на первой итерации и более значительному росту для синфазной моды на первой и второй итерациях. Также можно отметить смещение резонансных частот вниз по диапазону при переходе к фракталам первой и второй итерации.

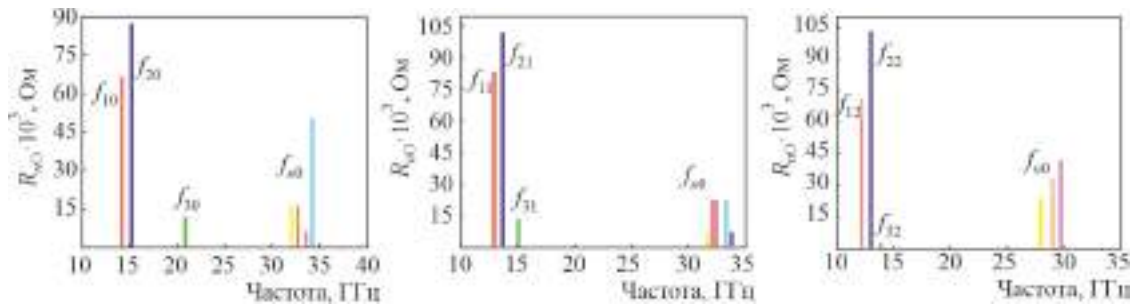


Рис. 3. Зависимости эквивалентного сопротивления резонатора от частоты для трех итераций фрактальных элементов

Высшие моды колебаний ($n > 3$) имеют более «густой» спектр частот, сосредоточенный в диапазоне 30...35 ГГц. Резонансами на этих частотах можно пренебречь, так как и на первой, и на второй итерациях фрактального элемента происходит существенное уменьшение эквивалентного сопротивления резонатора.

В таблице приведены результаты исследований электродинамических параметров резонатора для двух мод при значениях относительного радиуса фотонно-кристаллической решетки $\delta/\Delta = 0,19$.

Номер моды, n	Номер итерации	$k = 0$			$k = 1$			$k = 2$		
	Вид квази-фрактального элемента									
1	Противофазный вид колебаний (π)	f_{10} , ГГц	Q_{10}	ρ_{10} , Ом	f_{11} , ГГц	Q_{11}	ρ_{11} , Ом	f_{12} , ГГц	Q_{12}	ρ_{12} , Ом
		14,28	1211	54,9	12,92	908	91,6	12,67	757	93,3
	Изменение параметров, %	0	0	0	-9,5	-25	+67	-11,3	-37,5	+70
2	Синфазный вид колебаний (2π)	f_{20} , ГГц	Q_{20}	ρ_{20} , Ом	f_{21} , ГГц	Q_{21}	ρ_{21} , Ом	f_{22} , ГГц	Q_{22}	ρ_{22} , Ом
		15,2	1400	62,1	13,7	1189	85,2	13,59	1090	94,5
	Изменение параметров, %	0	0	0	-9,9	-15	+37	-11,8	-22	+52
f_{20}/f_{10}		6,4	1,3		6,0	1,2		6,8	1,45	



При этом можно отметить следующее:

- противофазный и синфазный виды колебаний имеют разницу частот около 7 %;
- для всех резонансных частот происходит смещение в область более низких частот (около 12 %);
- наблюдается уменьшение собственной добротности (38 % при $n = 1$, $k = 2$; 22 % при $n = 2$, $k = 2$);
- происходит увеличение характеристического сопротивления (70 % при $n = 1$, $k = 2$; 52 % при $n = 2$, $k = 2$);
- эквивалентное сопротивление резонатора R_n на синфазной моде в 1,5 раза превышает значение на противофазной моде.

По результатам исследований спектральных характеристик можно сделать вывод о целесообразности выбора в качестве рабочей синфазной моды с частотой f_2 и фракталом второй итерации.

В работе также было проведено исследование влияния шага фотонно-кристаллической решетки δ/Δ на спектр резонансных частот резонатора. Результаты приведены на рис. 4 в виде зависимости параметра S_{21} от частоты.

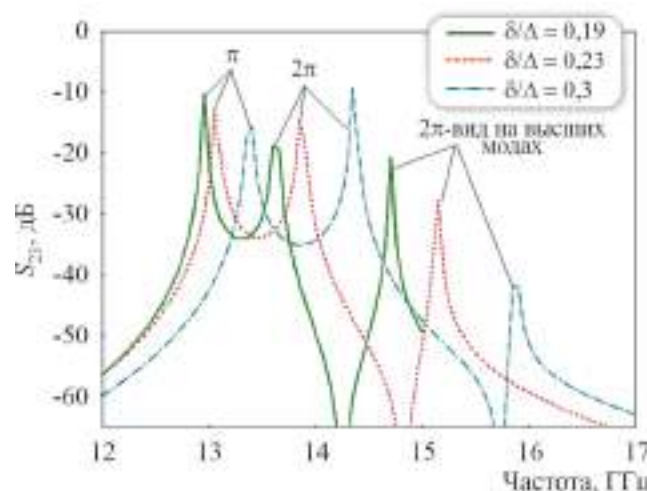


Рис. 4. Зависимости параметра S_{21} от частоты для трех значений δ/Δ

Из приведенных на рисунке результатов можно сделать вывод, что при увеличении шага фотонно-кристаллической решетки с 0,19 до 0,3 происходит сдвиг резонансных частот вверх по диапазону на 400 МГц. При этом наблюдается уменьшение амплитуды высшей противофазной моды около 22 %. В качестве полезных эффектов также можно отметить возрастание рабочей синфазной моды на 9 дБ и подавление паразитной синфазной моды.

Кроме того, в таком резонаторе можно управлять спектром частот. Для изменения резонансных частот использовались медные стержни диаметром 0,6 мм, расположенные в области дефекта резонатора (рис. 5). В объем полости помещали четыре стержня, по одному в каждой секции. В этом случае стержни перемещались по радиусу внутреннего объема резонатора синхронно с заданным шагом в направлении от центрального электрода.

Из рисунка видно, что, вводя стержни, можно эффективно изменять резонансные частоты как противофазной, так и синфазной мод. Частота π -моды колебаний на начальном участке кривой резко возрастает, а затем незначительно изменяется. Это можно объяснить повышенной концентрацией силовых линий в этой области. Резонансная частота меньше для первой итерации по сравнению с нулевой, разница между первой и второй итерациями по частоте незначительная.



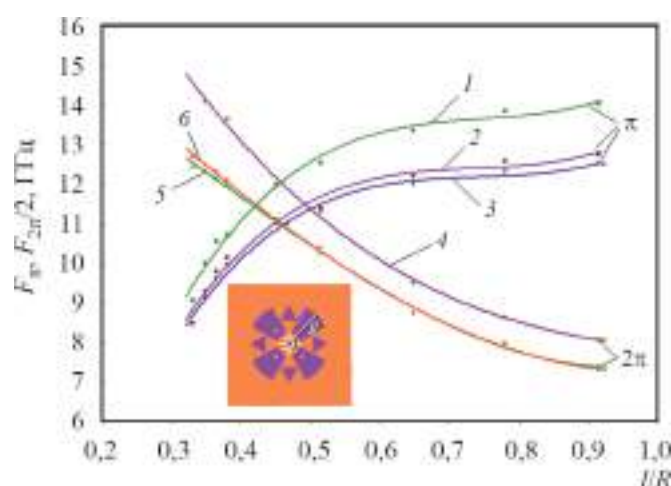


Рис. 5. Зависимости частот резонатора от положения настраивающих элементов для трех итераций фрактальных элементов:

l – текущее положение стержня от центра резонатора; R – радиус резонатора;

1, 4 – первая итерация; 2, 5 – вторая итерация; 3, 6 – третья итерация

Для колебаний типа 2π при перемещении стержней от центра к краю резонатора частота нелинейно уменьшается. При переходе от нулевой итерации фрактального элемента к первой итерации частота уменьшается, а при переходе от первой итерации ко второй частота практически не меняется. Подбирая положения настроечных стержней, можно добиться режима кратности частоты $f_{2\pi}/f_{\pi} = 2$ для π - и 2π -колебаний, что может быть использовано в рабочем режиме умножителя частоты, а также для получения режима несинусоидальной модуляции в резонаторе.

Также было проведено исследование электродинамических параметров резонатора, таких, как резонансная частота и характеристическое сопротивление $\rho = R/Q$, в зависимости от изменения диэлектрической проницаемости используемых подложек. В ходе проведенного моделирования были рассчитаны три варианта подложек с разной диэлектрической проницаемостью. Из рис. 6 видно, что с увеличением диэлектрической проницаемости подложки наблюдается рост частоты 2π -моды колебаний в пределах 3-4 %. В то же время π -мода колебаний более чувствительна при изменении диэлектрической проницаемости подложки и с увеличением ϵ частота снижается на 6-7 %.

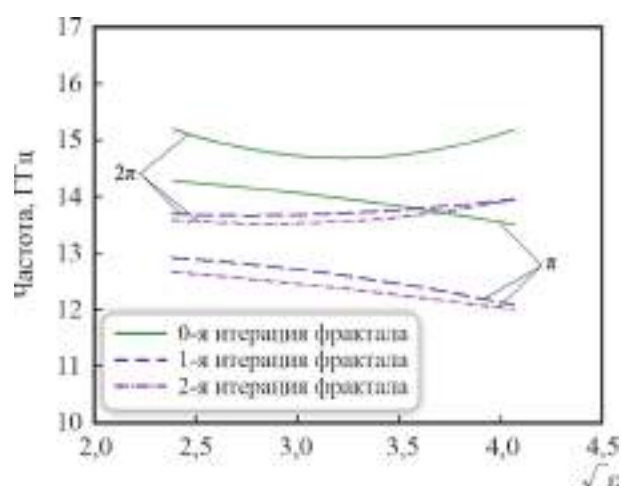


Рис. 6. Изменение частоты резонатора в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки



Как показано на рис. 7, при малых значениях диэлектрической проницаемости подложки расхождения характеристического сопротивления R/Q для π - и 2π -мод колебаний незначительны. Однако с увеличением ϵ характерное сопротивление для π -моды увеличивается, а для 2π -моды уменьшается.

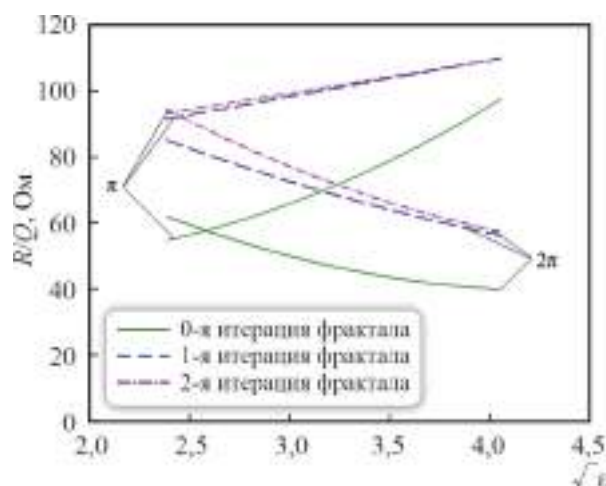


Рис. 7. Зависимости характеристического сопротивления (R/Q) резонатора от диэлектрической проницаемости подложки для трех итераций фрактального элемента

В этом случае разница достигает 48 %. Также наблюдается значительное увеличение характеристического сопротивления при переходе от нулевой к первой и второй итерации фрактального элемента (разница достигает 40 %) для обеих (π и 2π) мод колебаний.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован двухзворный многоканальный фотонно-кристаллический резонатор с фрактальными элементами «треугольник Серпинского», выполненными на диэлектрической подложке. Изучены спектр частот резонатора до 40 ГГц и влияние на резонансные частоты фрактальных элементов. Определены основные электродинамические параметры, такие, как резонансная частота, собственная добротность и характеристическое сопротивление. Проведено исследование влияния шага фотонно-кристаллической решетки на спектр резонансных частот, отмечено явление подавления паразитных частот при изменении параметров решетки. Получены результаты, показывающие возможность перестройки резонансных частот путем введения в объем дефекта фотонно-кристаллической решетки дополнительных настроечных стержней. При этом удалось добиться кратности частот настройки низшей противофазной и синфазной мод.

Подобный тип резонатора может найти применение при разработке низковольтных клистронов, работающих в Ku и K микроволновых диапазонах в качестве усилителей, генераторов и умножителей частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алыбин, В. Г. Бортовые твердотельные СВЧ-усилители мощности будущего для командно-измерительных систем / В. Г. Алыбин, А. С. Семочкин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3, вып. 3. – С. 89 – 97.





2. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона / Е. А. Ракова, А. В. Галдецкий, Г. Ф. Корепин [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. статей V Всерос. конф. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – Т. 1. – С. 148 – 152.
3. **Smirov, A.** PBG cavities for single-beam and multi-beam electron devices / A. Smirov, D. Newsham, D. Yu // Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. – Portland, Oregon, USA, 2003. – P.1153 – 1155.
4. **Yu, D.** PBG structures for multi-beam devices. / Yu, Newsham D., Smirnov A. // AIP Conference Proceedings. – 2002. – Vol. 647, iss. 1. – P. 394.
5. **Xu, Y.** Design of photonic crystal klystrons / Y. Xu, R. Seviour // Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference. JACoW, Kyoto, Japan. – 2010. – P. 4002 – 4004.
6. Sectoral sierpinski gasket fractal antenna for wireless LAN applications / Yogesh Kumar, Choukiker Santanu, Kumar Behera, Rajeev Jyoti // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2012. – Vol. 22, iss. 1. – P. 68 – 74.
7. Design of novel miniaturized and high quality Sierpinski square resonators / Hang Weng, Lin-Shen Chang, Wei-Yu Chen [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters. – 2008. – Vol. 50, iss. 6. – P. 1469 – 1471.
8. **Malik, J.** A stacked equilateral triangular patch antenna with sierpinski gasket fractal for WLAN applications / J. Malik, M. V. Kartikeyan // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2011. – Vol. 22. – P. 71 – 81.

Статья поступила 23 мая 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ШАШКОВ А.А. Антенны эллиптической поляризации в спутниковой навигации и телеметрии: монография / А.А. Шашков, О.А. Курдюмов, В.Е. Сагач. – Москва: Радиотехника, 2023. – 176 с.

Разработан метод определения координат фазового центра и на его основе уточнены некоторые характеристики ряда антенн. Проанализированы адаптивные фазированные антенные решётки, применяемые для борьбы с преднамеренными помехами, и предложено их новое решение. Описана борьба за безэховость безэховой камеры. Дополнительно представлены результаты по исследованию и созданию новых образцов антенн эллиптической поляризации.





УДК 539.293

ВСПЛЕСК ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ДВУХКАНАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЦИФРОВЫМИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ

С. А. Богданов, С. Н. Карпов, А. Б. Пашковский,
Р. А. Котекин, М. М. Абдулов

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

Проведены теоретические исследования двухканальных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры (ЦПБ). Выявлены особенности поперечного пространственного переноса электронов в предложенных конструкциях и их влияние на всплеск дрейфовой скорости электронов. Показано, что его величина в двухканальных гетероструктурах с дополнительными ЦПБ приближается к теоретическому пределу для используемой модели – всплеску дрейфовой скорости в нелегированном объёмном материале канала. Обнаружено, что в двухканальных гетероструктурах с δ -легированием и тонкими спейсерами из $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ вокруг центрального δ -слоя, даже при отсутствии в их конструкции ЦПБ, увеличение поверхностной плотности электронов с высокой подвижностью вдвое по сравнению с традиционными одноканальными двусторонне δ -легированными гетероструктурами (DpHEMT) не приводит к уменьшению всплеска дрейфовой скорости электронов.

КС: двухканальная гетероструктура, цифровые барьеры, полевой транзистор, поперечный пространственный перенос

ELECTRON DRIFT VELOCITY OVERSHOT IN TWO-CHANNEL HETEROSTRUCTURES WITH ADDITIONAL DIGITAL POTENTIAL BARRIERS

S. A. Bogdanov, S. N. Karpov, A. B. Pashkovsky,
R. A. Kotekin, M. M. Abdulov

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

Theoretical studies of two-channel heterostructures with donor-acceptor doping and systems of alternating thin layers of AlAs/GaAs forming additional digital potential barriers (DPB) have been carried out. The features of electron real space transfer in the proposed structures and their effect on the electron drift velocity overshoot are investigated. It is shown that its value in two-channel heterostructures with additional DPBs approaches the theoretical limit for the model used – a drift velocity overshoot in the undoped bulk material of the channel. It was found that in two-channel heterostructures with δ -doping and thin spacers made of $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ around the central δ -layer, even in the absence of a DPB in their design, a double increase in the surface density of electrons with high mobility as compared to traditional single-channel bilaterally δ -doped heterostructures (DpHEMT) does not lead to a decrease in the electron drift velocity overshoot.

Keywords: two-channel heterostructure, digital barriers, field-effect transistor, real space transfer

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным трендом современной мощной СВЧ-электроники является нитрид галлия, совершенствование эпитаксиальных технологий которого позволило мощным



приборам на его основе продвинуться в миллиметровый диапазон длин волн [1–6]. Однако если перспективность мощных нитридгаллиевых приборов на карбидокремниевых подложках с высокой теплопроводностью не вызывает сомнений, то использование для тех же целей гетероструктур на кремниевых подложках, теплопроводность которых гораздо ниже, вызывает определённые вопросы. Действительно, переход на кремниевые подложки вызывает огромное количество проблем [7]. Во многих случаях их удалось решить, например, фирме OMMIC [8, 9]. Однако основная проблема – относительно низкая теплопроводность кремния остаётся. Использование кремниевой подложки даже толщиной 50 мкм приводит к тому, что из-за меньшей тепловой проводимости кремния по сравнению с карбидом кремния удельная мощность транзистора при прочих равных условиях уменьшается минимум в полтора раза [8–10].

В то же время, как будет показано ниже, практически те же удельные мощности при одинаковой длине затвора могут быть получены на арсенидгаллиевых гетероструктурах при существенно большем коэффициенте усиления транзистора.

Арсенидгаллиевая технология имеет ряд ограничений. Разрыв зон на границе традиционного GaAs/AlGaAs-гетероперехода составляет обычно менее 0,3 эВ. При этом электроны в квантовой яме находятся на энергетических уровнях, которые, в свою очередь, существенно выше дна зоны проводимости. Если канал транзистора делать слишком узким или сильно повышать поверхностную плотность электронов в канале, то при разогреве электроны начинают интенсивно переходить из канала в широкозонный материал (поперечный пространственный перенос) и замедляться. Расширение канала также не позволяет существенно увеличить поверхностную плотность электронов, поскольку сильно изменяется потенциальный профиль в узкозонном материале. По существу, прямоугольный канал превращается в две практически независимые треугольные потенциальные ямы. Из-за особенностей локализации электронов в каналах традиционных арсенидгаллиевых гетероструктур поверхностная плотность электронов составляет около $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Такая поверхностная плотность обеспечивает удельную мощность на уровне 1...1,2 Вт/мм. Дальнейшее увеличение поверхностной плотности без существенного изменения конструкции гетероструктуры ведёт к заметному падению коэффициента усиления. Однако гетероструктуры на основе арсенида галлия имеют большие возможности для модернизации. Конкретным примером могут служить гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [11], позволившие поднять удельные мощности промышленных приборов на уровень более 1,5 Вт/мм и двукратно увеличить коэффициент усиления, а также гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами (Q-DpHEMT) [12], давшие возможность дополнительно почти вдвое увеличить коэффициент усиления транзисторов на их основе. Тем не менее, поверхностную плотность электронов с высокой подвижностью в канале таких гетероструктур нельзя сильно увеличивать, так как уровень Ферми в этом случае может оказаться сравним с высотой верхних долин в GaAs, что должно приводить к негативным последствиям в плане дрейфовой скорости электронов в канале. Поэтому для увеличения суммарной поверхностной плотности электронов, которые образуют двумерный электронный газ, остаётся, по-видимому, всего один путь – увеличение количества каналов в транзисторной гетероструктуре. Эта идея не нова – многоканальные гетероструктуры предлагались ещё на заре разработки мощных гетероструктурных транзисторов [13, 14]. Однако, как известно, на характеристики гетероструктурных транзисторов большое отрицательное влияние оказывает поперечный пространственный перенос электронов [15]. На первом этапе разработки многоканальных гетероструктур, а точнее до появления стабильных результатов по δ -легированию, возможности

эффективно бороться с поперечным пространственным переносом не было. На более поздних этапах этому вопросу, по-видимому, просто не придавали значения [16], делали слишком большое расстояние между каналами, что приводило к уменьшению подвижности в канале.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Дельта-легирование принципиальным образом меняет ситуацию с многоканальным транзистором. Представляет интерес проследить, как введение дополнительных барьеров около δ -слоя меняет зонную диаграмму и концентрацию электронов в канале и как это отражается на всплеске дрейфовой скорости электронов. На рис. 1 приведена зонная диаграмма двухканальной гетероструктуры с δ -легированным слоем в центре InGaAs-канала и суммарной поверхностной плотностью электронов $n_s = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (гетероструктура AlGaAs/InGaAs/AlGaAs – DCrHEMT-1). Также приведены квадраты модулей волновых функций при температуре электронного газа $T = 300 \text{ K}$ (в масштабах рисунка при других рассматриваемых температурах электронного газа квадраты модулей волновых функций практически идентичны). Здесь и далее расчёты проводились по модели [15], включающей в себя самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона, а также в случае расчёта всплеска дрейфовой скорости – с использованием системы уравнений гидродинамики, которая решается самосогласованно с первой системой.

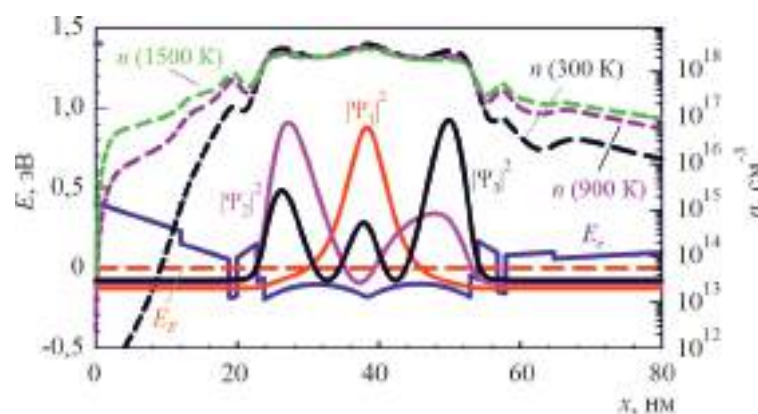


Рис. 1. Зонные диаграммы и распределения концентрации электронов в гетероструктуре с двумя каналами без цифровых барьеров и спейсеров для температур электронного газа 300, 900 и 1500 K, а также квадраты модулей волновых функций для первых трех уровней при температуре электронного газа 300 K

Видно, что максимум концентрации электронов находится как раз в области δ -легирования (зоны интенсивного рассеяния) – там находится и максимум квадрата первой волновой функции. Разогрев электронного газа немного выравнивает концентрацию электронов в канале и сильно увеличивает её за пределами канала.

Высокая концентрация электронов в областях с сильным рассеянием приводит к определённому уменьшению как подвижности, так и всплеска дрейфовой скорости электронов при их влёте в область сильного поля по сравнению с обычной двухсторонне легированной гетероструктурой (DrHEMT) с $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Это видно из рис. 2, где также приведены всплески дрейфовой скорости для рассматриваемых далее конструкций гетероструктур.

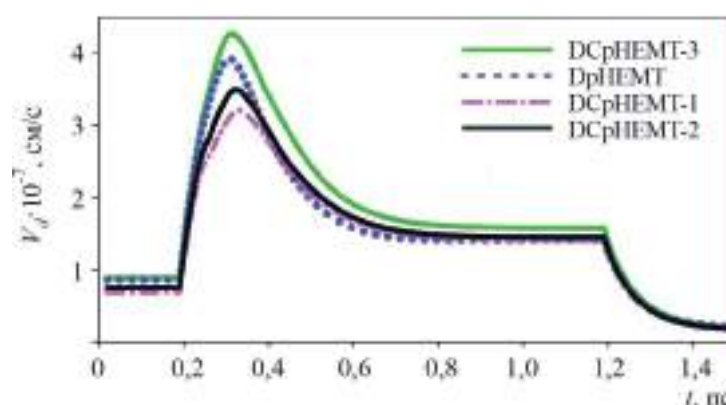


Рис. 2. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влёте электронов в область сильного поля ($t < 0,2$ пс, $E = 1$ кВ/см; $0,2$ пс $< t < 1,2$ пс, $E = 20$ кВ/см; $t > 1,2$ пс, $E = 1$ кВ/см)

Введение вокруг δ -слоя спейсеров из чистого GaAs (гетероструктура AlGaAs/InGaAs/GaAs/InGaAs/AlGaAs – DCrHEMT-2) сильно меняет структуру волновых функций (рис. 3). Это приводит к некоторому уменьшению концентрации электронов в области δ -слоя, однако практически не влияет на всплеск дрейфовой скорости (см. рис. 2).

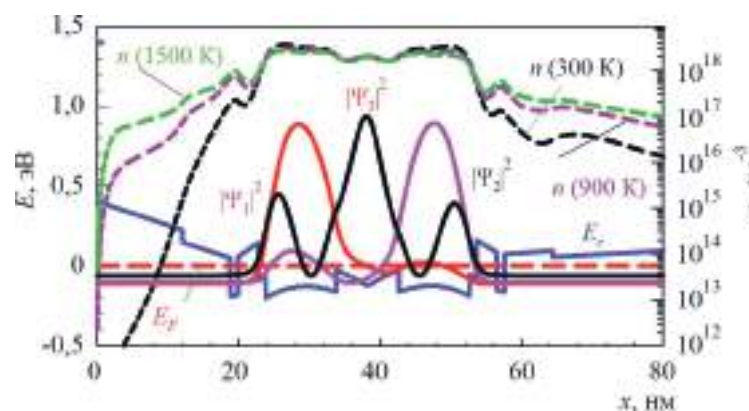


Рис. 3. Зонные диаграммы и распределения концентрации электронов в гетероструктуре с двумя каналами без цифровых барьеров и спейсерами из чистого GaAs вокруг центрального δ -слоя при температуре электронного газа 300, 900 и 1500 К, а также квадраты модулей волновых функций для первых трех уровней при температуре электронного газа 300 К

В принципе такое техническое решение вполне приемлемо, если не требуется высокий коэффициент усиления.

Однако если область легирования в центре стандартным образом ограничить спейсерами из нелегированного широкозонного материала (гетероструктура AlGaAs/InGaAs/AlGaAs/InGaAs/AlGaAs – DCrHEMT-3), то концентрация электронов в области легирования заметно упадёт даже при высоких температурах электронного газа (рис. 4). Происходит это из-за того, что волновые функции электронов на первых четырех нижних энергетических уровнях двухканальной системы теперь практически полностью локализованы в квантовых ямах каналов.

Это приводит к дополнительному увеличению всплеска дрейфовой скорости, и он начинает по величине даже превосходить всплеск дрейфовой скорости в одноканальной гетероструктуре.

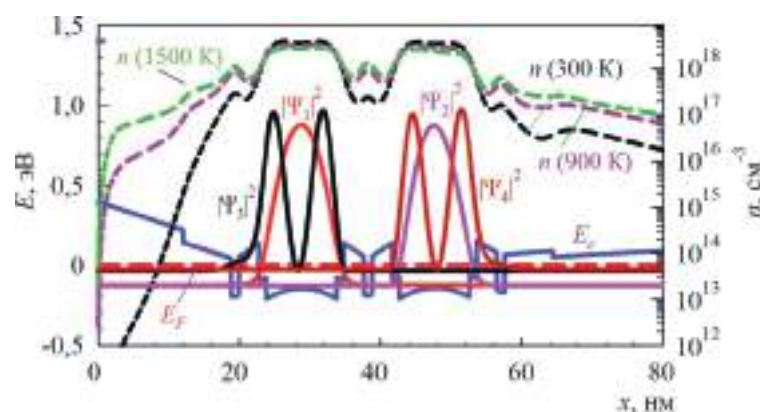


Рис. 4. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в гетероструктуре с двумя каналами без цифровых барьеров и спейсерами из $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ вокруг центрального δ -слоя при температуре электронного газа 300, 900 и 1500 К, а также квадраты модулей волновых функций для первых трех уровней при температуре электронного газа 300 К

Ещё более эффективно локализовать электроны в канале можно с помощью цифровых потенциальных барьеров (ЦПБ) (рис. 5), что продемонстрировано в конструкциях гетероструктур при решении аналогичных задач в работах [11, 12, 15]. Введение в конструкцию гетероструктуры ЦПБ существенно снижает влияние поперечного пространственного переноса электронов на динамику горячих электронов. Рассмотрим конструкцию Q-DCrHEMT-гетероструктуры с двумя каналами и цифровыми барьерами. От DCrHEMT конструктивно её отличает наличие трех короткопериодных сверхрешеток AlAs/GaAs с толщинами 3 и 4 атомных монослоя соответственно. Со стороны подложки и затвора решетку формируют шесть ЦПБ, каналы отделены друг от друга сверхрешеткой с четырьмя ЦПБ.

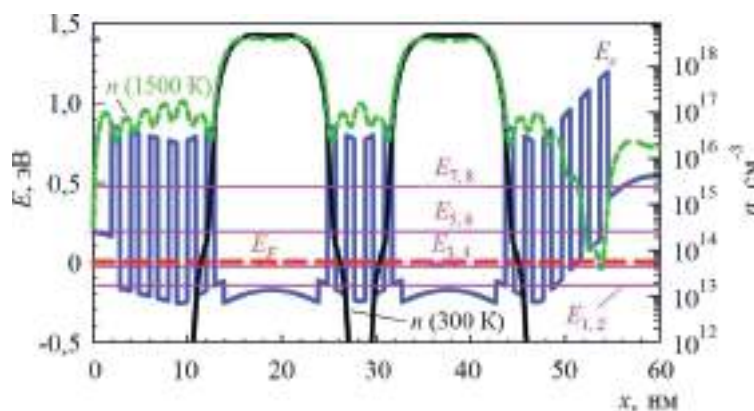


Рис. 5. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в гетероструктуре с двумя каналами и цифровыми барьерами при температуре электронного газа 300 и 1500 К, а также положения энергетических уровней электронов

Поверхностная плотность электронов в каждом канале, отделенном друг от друга набором ЦПБ, составляет $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Со стороны подложки введено дополнительное донорно-акцепторное легирование, минимизирующее уход электронов в подложку и их накопление в короткопериодной сверхрешётке AlAs/GaAs , расположенной в основании активной области гетероструктуры.



Легированный донорами δ -слой со стороны подложки разбит на два и разделён AlAs-барьером той же толщины, что и остальные. Это препятствует образованию в данной области локализованных низкоэнергетических состояний [15].

Со стороны затвора акцепторы предлагается не вносить – эквивалентный эффект достигается за счет поверхностных состояний при наличии сверхрешётки – низкоэнергетические состояния в сверхрешётке не образуются, электроны локализованы в канале. При отсутствии сверхрешётки поле поверхностных состояний не способно удержать горячие электроны в области канала, типовой изгиб зон составляет $0,2 \dots 0,3$ эВ. Именно по этой причине в работах [11, 12] использовалось донорно-акцепторное легирование у поверхности гетероструктуры. Под затвором накоплению заряда в сверхрешетке препятствует поле затвора.

Из решения самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона видно, что в такой гетероструктуре даже при температуре электронного газа 1500 К подавляющее большинство электронов находится в узкозонных каналах. Это, в свою очередь, приводит к тому, что всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте в область сильного поля оказывается весьма велик (рис. 6) – практически равен всплеску дрейфовой скорости электронов в нелегированном $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, что является для используемой модели теоретическим пределом.

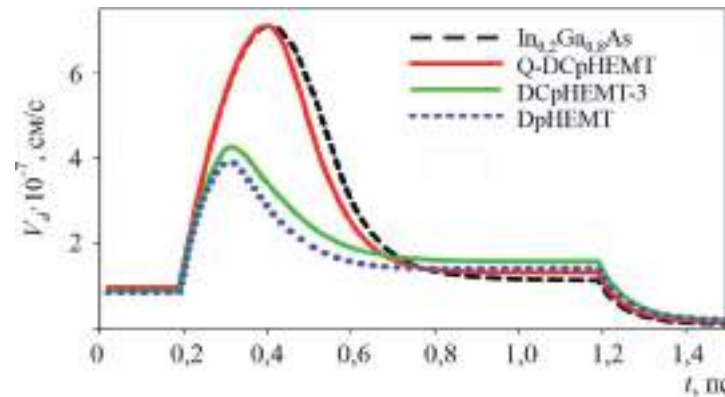


Рис. 6. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влёте электронов в область сильного поля ($t < 0,2$ пс, $E = 1$ кВ/см; $0,2$ пс $< t < 1,2$ пс, $E = 20$ кВ/см; $t > 1,2$ пс, $E = 1$ кВ/см)

Если этот результат, в свете работ [12, 15], в определённой мере предсказуем, то результат сравнения (см. рис. 6) всплеска дрейфовой скорости в обычной одноканальной двусторонне легированной гетероструктуре (традиционный DpHEMT) и двухканальной гетероструктуре, выполненной без ЦПБ и донорно-акцепторного легирования со стороны подложки (DCrHEMT-3) (см. рис. 4), оказывается совершенно неожиданным. Как отмечалось выше, в гетероструктуре с такой конфигурацией электроны локализованы вне областей интенсивного рассеяния сильнее, чем в гетероструктуре, приведенной на рис.1. Вследствие этого всплеск дрейфовой скорости электронов в такой двухканальной гетероструктуре оказывается по крайней мере не ниже, чем в гетероструктуре традиционного DpHEMT. Скорее всего, это связано с тем, что использование δ -легирования, в отличие от предыдущих работ по многоканальным транзисторам, делает область интенсивного рассеяния достаточно узкой. Естественно, если убрать внутренние спейсеры (барьеры по краям внутреннего δ -слоя), то интенсивность рассеяния заметно возрастет (см. рис. 2) и всплеск дрейфовой скорости электронов сильно уменьшится (DCrHEMT-1).

Как отмечалось выше, в Q-DCrHEMT-гетероструктуре всплеск дрейфовой скорости электронов при их влёте в область сильного поля близок к всплеску в объёмном материале канала. Однако модель [15] учитывает только объёмные механизмы рассеяния. В то же время в исследуемой Q-DCrHEMT-гетероструктуре четыре пары нижних уровней в каждом канале ($E_{1,2}$, $E_{3,4}$, $E_{5,6}$, $E_{7,8}$) разделены друг от друга энергетическим зазором, в несколько раз превышающим энергию оптического фонона (см. рис. 4). Это может приводить к заметному уменьшению интенсивности рассеяния, а значит, росту всплеска дрейфовой скорости. Следует отметить, что рассеяние между парами уровней с близкой энергией практически отсутствует, так как интеграл перекрытия волновых функций для них близок к нулю в большинстве режимов по напряжению на затворе. При напряжениях на затворе, когда энергии уровней практически совпадают, рассеяние, возможно, и будет близко к рассеянию в объёмном материале.

Однако в данном случае этот факт может иметь и крайне негативные в практическом плане последствия. Дело в том, что в полевом транзисторе стандартной конструкции со стороны истока каналы оказываются связаны только омическим контактом. При влёте под затвор электроны, несмотря на высокие скорости, разогреваются тоже не сразу. Интенсивные переходы из Γ -долины в другие начинаются обычно в районе стокового края затвора, и только там рассматриваемые два канала начнут интенсивно обмениваться электронами – то есть выступать как один общий канал. В этих условиях не совсем ясно, какие особенности электронного транспорта выйдут на поверхность в режиме работы на большом сигнале, а именно на такие режимы мощный транзистор и рассчитан. В частности, могут появиться токовые неустойчивости, которые будут блокировать работу транзистора. Однако пока на этот вопрос может ответить только непосредственный эксперимент. Впрочем, даже если это и произойдёт, на данном направлении остаётся крайне перспективным дальнейшая разработка структуры с двойным каналом, приведенной на рис. 4 (DCrHEMT-3). Как отмечалось выше, рассеяние в центральной области такой структуры не очень велико, и поэтому если ввести в неё, как и в структуре Q-DCrHEMT, донорно-акцепторное легирование со стороны подложки и цифровые барьеры по краям проводящего канала (рис. 7), то локализация электронов в канале такой гетероструктуры (по аналогии с DCrHEMT-3 обозначим её как Q-DCrHEMT-3) будет гораздо сильнее.

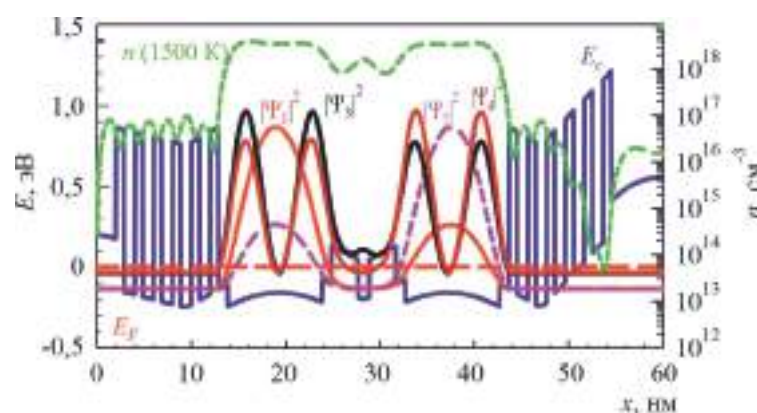


Рис. 7. Зонная диаграмма гетероструктуры с двумя каналами, цифровыми барьерами вокруг каналов и спейсерами из $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ вокруг центрального δ -слоя, а также квадраты модулей волновых функций для первых четырех уровней при температуре электронного газа 300 К и распределения концентрации электронов при температуре электронного газа 1500 К

Естественно, подобную процедуру можно провести и на структуре DCrHEMT-2 (рис. 8).

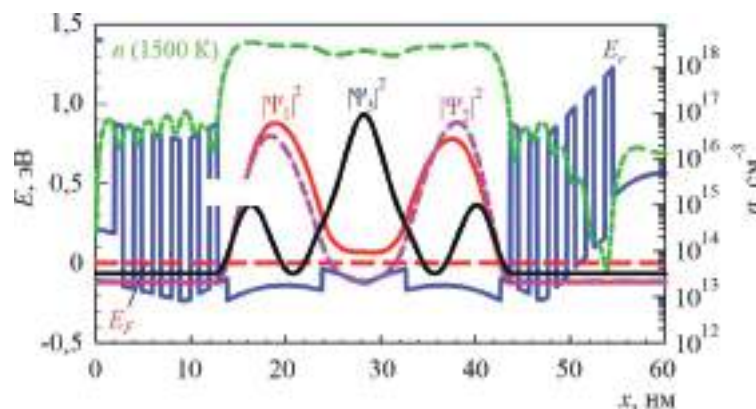


Рис. 8. Зонные диаграммы в гетероструктуре с двумя каналами, цифровыми барьерами вокруг каналов и спейсерами из чистого GaAs вокруг центрального δ -слоя, а также квадраты модулей волновых функций для первых трех уровней при температуре электронного газа 300 К и распределения концентрации электронов при температуре электронного газа 1500 К

Как и следовало ожидать, в обоих случаях введение цифровых барьеров заметно увеличивает величину всплеска дрейфовой скорости электронов (рис. 9).

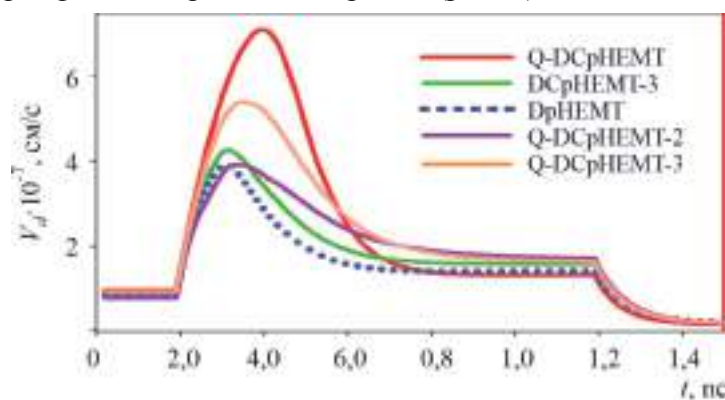


Рис. 9. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влёте электронов в область сильного поля ($t < 0,2$ пс, $E = 1$ кВ/см; $0,2$ пс $< t < 1,2$ пс, $E = 20$ кВ/см; $t > 1,2$ пс, $E = 1$ кВ/см)

Однако если во втором случае всплеск только достигает величины всплеска в традиционной одноканальной DrHEMT-структуре (правда, он оказывается несколько шире), то в случае Q-DCrHEMT-3 всплеск растёт довольно существенно. Его величина занимает среднее положение между всплеском в DCrHEMT-3-структуре и теоретическим максимумом.

Ранее мощные транзисторы на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием [17] продемонстрировали удельные мощности $1,5 \dots 1,8$ Вт/мм, а в работе [12] транзисторы на первых гетероструктурах с цифровыми барьерами показали пробивные напряжения затвор-сток около 30 В и удельную плотность тока 0,7 А/мм. В связи с этим для транзисторов на основе двухканальных гетероструктур с ЦПБ простые оценки позволяют ожидать удельных мощностей на уровне $3 \dots 4$ Вт/мм при коэффициенте усиления, как минимум, на 3 дБ [12] выше, чем в обычных DrHEMT-приборах.



3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По теоретическим оценкам, на гетероструктурах с двойным каналом без цифровых барьеров могут быть получены удельные выходные мощности на уровне 2...2,5 Вт/мм при коэффициенте усиления, близком к коэффициенту усиления традиционных DpHEMT. Введение в конструкцию гетероструктур с двойным каналом ЦПБ и донорно-акцепторного легирования со стороны подложки позволит увеличить коэффициент усиления, как минимум, на 3...4 дБ при сохранении и даже некотором росте удельной выходной мощности (до уровня 3...4 Вт/мм). Из-за тепловых эффектов снятие с арсенидгаллиевого прибора такой мощности без изменения его конструкции возможно либо в импульсных режимах, либо в режимах с высоким КПД. Для работы в непрерывных режимах с высокой удельной выходной мощностью необходимо уменьшать толщину подложки до 25 мкм и соответственно увеличивать расстояние между «пальцами» прибора. Возможен также перенос гетероструктуры на подложку с более высокой, чем у GaAs, теплопроводностью, например кремниевую.

ЛИТЕРАТУРА

1. Power amplifiers performance survey 2000-present / H. Wang, F. Wang, S. Li [et al.]. – URL: https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html.
2. 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, S. Wienecke, M. Guidry [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – Jan. 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 45 – 50. – DOI: 10.1109/TED.2017.2770087.
3. N-polar GaN/AlN MIS-HEMT with $f_{\max}$ of 204 GHz for kaband applications / Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Dec. 2011. – Vol. 32, No 12. – P. 1683 – 1685. – DOI: 10.1109/LED.2011.2168558.
4. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with $f_t/f_{\max}$ of 454/444 GHz / Y. Tang, K. Shinohara, D. Regan [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Jun. 2015. – Vol. 36, No 6. – P. 549 – 551. – DOI: 10.1109/LED.2015.2421311.
5. D-band and G-band high-performance GaN power amplifier MMICs / M. Cwikliński, P. Brückner, S. Leone [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Dec. 2019. – Vol. MTT-67. – P. 5080 – 5089.
6. **Schellnberg, J.** Millimeter-wave GaN SSPAs: technology to power 5G and the future / J. Schellnberg // 2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS). – 16 November 2020. – DOI:10.1109/BCICTS48439.2020.9392957.
7. **Кишинский, А. А.** Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития / А. А. Кишинский // Материалы 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2009. – С. 11 – 16.
8. OMMIC Catalog. – 2019. – Vol. 2. – Accessed: Nov. 21, 2020 [Online]. – DOI: https://www.ommic.com/wp-content/uploads/2019/09/OMMIC_Catalog-2019_V2.pdf.
9. 12 W, 30 % PAE, 40 GHz power amplifier MMIC using a commercially available GaN/Si process / J. Moron, R. Leblanc, F. Lecourt and P. Frijlink // 2018 IEEE IMS. – June 2018. – DOI:10.1109/MWSYM.2018.8439689.
10. **Лукашин, В. М.** GaN полевой транзистор с эффективным теплоотводом на Si-подложке / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, И. В. Пашковская // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49, вып. 2. – С. 10 – 13.
11. Исследование средней дрейфовой скорости электронов в pHEMT транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.
12. DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн / С. А. Богданов, С. Н. Карпов, В. Г. Лапин [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2 (549). – С. 19 – 31.



13. Multiple-channel GaAs/AlGaAs high electron mobility transistors / N. H. Sheng, C. P. Lee, R. T. Chen, D. L. Miller // IEEE Electron Device Lett. – 1985. – Vol. 6 (6). – P. 307 – 310.
14. Design and characteristics of InGaAs/InP composite-channel HFET's / T. Enoki, K. Arai, A. Kohzen, Y. Ishii // IEEE Trans Electron Dev. – 1995. – Vol. 42. – P. 1413–1418.
15. Всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах с двусторонним донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами / А. Б. Пашковский, С. А. Богданов, А. К. Бакаров // ФТП. – 2023. – Т. 57, вып. 1. – С. 21 – 28.
16. Comprehensive study of InGaP/InGaAs/GaAs dual channel pseudomorphic high electron mobility transistors / K. Chu, S. Cheng, M. Chiang [et al.] // Solid-State Electronics. – 2012. – Vol. 72. – P. 22 – 28.
17. Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием, эффективно работающие при нулевом смещении на затворе / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 5 – 14.

Статья поступила 11 мая 2023 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

АЛЕКСЕЙЧИК Л.В. СВЧ косимуляция в CST SUITE / Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2023. – 200 с.

Современный подход к овладению цифровыми технологиями автоматизированного проектирования при подготовке специалистов инженерной практики требует комплексного применения отдельных программных продуктов, совместимых между собой. Широкие возможности решения такой проблемы предоставляет пакет программ CST SUITE. В книге рассматривается решение электродинамических задач, объединённых с задачами, решаемыми методами теории цепей. Этот подход назван косимуляцией. Впервые даётся описание на русском языке программы CST DS, которая в современном программном продукте CST SUITE выполняет роль ядра системы. Решение рассматриваемых задач способствует овладению этим цифровым средством проектирования. Эффективность применения САПР СВЧ приводит к достижению необходимого темпа разработки устройств СВЧ, предназначенных для радиоканалов систем 5G-6G.

УДК 621.371.334

УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

В. А. Иовдальский, С. Б. Ключев

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

Предложена новая конструкция симметричной щелевой линии сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов, с полным заполнением щели диэлектрической композицией. Расчётным численным методом – методом конечных элементов было проведено математическое моделирование перехода и рассчитаны его характеристики. Приводятся результаты расчетов, показывающие возможность улучшения электрических характеристик, а именно: снижения вносимых потерь мощности проходящего сигнала и расширения рабочего диапазона частот по отношению к базовой конструкции симметричной щелевой линии. Показана возможность изготовления предложенной конструкции симметричной щелевой линии групповым методом на диэлектрических подложках, что позволяет использовать серийную технологию микрополосковых плат для их изготовления и обеспечить снижение трудоёмкости изготовления по отношению к полосковым линиям передачи – симметричной щелевой линии.

КС: симметричная щелевая линия, матрица рассеяния, метод конечных элементов, вносимые потери, волновое сопротивление, заполнение щели диэлектриком

IMPROVING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A SYMMETRICAL SLOT LINE

V. A. Iovdalskiy, S. B. Klyuev

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

A new design of a symmetrical slot signal line of microwave and EHF ranges with full filling of the gap with a dielectric composition is proposed. Mathematical modeling of the transition was carried out by the computational numerical method – the finite element method and its characteristics were calculated. The results of calculations are presented, showing the possibility of improving electrical characteristics, namely: reducing the power insertion loss of the transmitted signal, and expanding the operating frequency range relative to the basic design of a symmetrical slot line. The possibility of manufacturing the proposed design of a symmetrical slot line by a group method on dielectric substrates is shown, which makes it possible to use the serial technology of microstrip boards for their manufacturing and to reduce the complexity of manufacturing in relation to strip transmission lines – a symmetrical slot line.

Keywords: symmetrical slot line, scattering matrix, finite element method, insertion losses, wave resistance, filling the gap with a dielectric

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется изучением и техническим освоением см-, мм-, субмм- и оптического диапазонов электромагнитных волн. Этот процесс невозможен без создания элементной базы, основу которой составляют линии передачи. Для проектирования и создания аппаратуры, блоков, функциональных узлов в см-, мм-, субмм-диапазонах могут быть применены как

полосковые, так и щелевые линии передачи, а также их комбинации. Использование полосково-щелевых линий в схемах устройств позволит одновременно улучшить электрические и массогабаритные характеристики, в частности, в разработке бортовой радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, применять многослойные конструкции гибридных интегральных схем (ГИС). Примером этому могут служить приёмопередающие модули активных фазированных антенных решёток, которые выпускаются в настоящее время сотнями тысяч штук [1, 2]. Преимущества таких конструкций, которые описаны в работах отечественных специалистов в 80–90-х годах прошлого столетия [3–5], становятся всё более очевидными и востребованными.

В работах [3–8] указывается также на возможность и целесообразность применения в многослойных конструкциях ГИС нескольких видов линий передач. Особенности конструкции и характеристик этих линий передач, а следовательно, и целесообразность их использования в многослойных ГИС подробно изложены в работах [6–9]. В них указывается и на перспективность применения различных конструкций микрополосковой, симметричной и несимметричной щелевой линий (МПЛ, СЩЛ и НЩЛ) передач.

2. КОНСТРУКЦИИ СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

Базовый вариант СЩЛ

Базовый вариант СЩЛ представляет собой открытую направляющую структуру, конструкция которой приведена на рис. 1. СЩЛ содержит: узкую щель 3 шириной w , изготовленную в проводящей плоскости 2 (металлические экраны), расположенной на одной из сторон плоскопараллельного магнитоэлектрического слоя 1 определённой толщины с $\epsilon_r > 1$, образующего подложку. Такая конструкция СЩЛ была описана, например, в работе [5] и др.

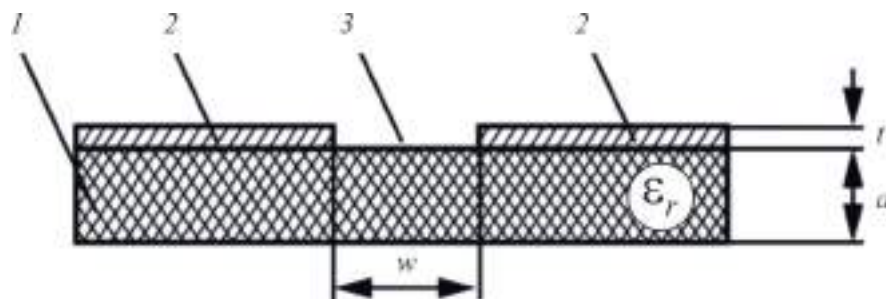


Рис. 1. Симметричная щелевая линия:

1 – диэлектрическое основание (подложка) с $\epsilon_r > 1$; 2 – металлические экраны (проводящие покрытия); 3 – щель; w – ширина щели; d – толщина диэлектрического основания; t – толщина металлических экранов

В СЩЛ электромагнитная волна, распространяясь вдоль щели, имеет эллиптическую поляризацию магнитного поля [3], что позволяет использовать её для построения, например, невзаимных устройств. В СЩЛ часть электрического поля находится в воздухе, другая часть – в диэлектрической подложке. При этом в щели концентрируются линии электрического поля при условии, что диэлектрическая проницаемость подложки больше единицы, а линии магнитного поля имеют вид эллипсов, переходящих в кривые типа «седло», образуя таким образом основную волну СЩЛ. Распределение тока в металлическом слое экспоненциальное. На поверхности проводящих

металлических полуплоскостей ток занимает относительно большую область, в силу чего потери у СЩЛ имеют малую величину относительно, например, несимметричной полосковой линии. Волновое сопротивление зависит от частоты и имеет большие значения [5, 10].

Известна другая СЩЛ, содержащая подложку, на одной стороне которой нанесён полупроводниковый слой. На полупроводниковом слое с целью уменьшения вносимых потерь дополнительно размещены две полосы, выполненные из легированного полупроводника, а на них – два металлических проводника. При этом проводимость легированного полупроводника равна не менее 1 Ом/см, толщина каждой полосы составляет $(0,02 \dots 0,1)t$, расстояние между ближайшими кромками полос – $(0,0025 \dots 0,06)\lambda$, где t – толщина подложки, λ – длина волны в линии, а расстояние между каждой из этих кромок и ближайшей к ней кромкой металлического проводника выбрано не менее четверти длины волны ($\lambda/4$) [11]. Однако это техническое решение не позволяет существенно расширить рабочий частотный диапазон и заметно снизить вносимые потери мощности проходящего сигнала.

Несмотря на простоту конструкции рассматриваемой линии передач, анализ СЩЛ, в отличие от других планарных линий (например, МПЛ, НЩЛ и др.), в статическом приближении довольно сложен. Также затруднен строгий анализ электромагнитного поля из-за сложных граничных условий: электромагнитное поле существует в диэлектрике [12], в щели и в воздухе. Известные методы расчета не позволяют получить выражения в замкнутой форме для длины волны и волнового сопротивления СЩЛ [13]. Учитывая, что применение проекционно-вариационных методов анализа таких структур (рис. 1) приводит к определенным сложностям в решении системы интегральных уравнений, содержащих логарифмические особенности и сингулярности типа Коши [14], возрастает роль численных методов, основанных на дискретизации расчетной области и применении функций непрерывного аргумента – сеточных функций [15]. В данной работе для математического моделирования СЩЛ был выбран метод конечных элементов (МКЭ) [16].

МКЭ удобен для численного решения физических и электродинамических задач потому, что имеет ряд преимуществ, которые важны при расчете СЩЛ: исследуемый объект может иметь любую геометрическую форму и электромагнитную среду; можно моделировать любые граничные условия; вычислительный алгоритм удобен для реализации с помощью средств вычислительной техники [17].

СЩЛ с диэлектрической вставкой в щели

Для улучшения электрических характеристик СЩЛ в [12] была предложена конструкция линии с размещением диэлектрической вставки в щели (рис. 2).

Предлагался вариант конструкции СЩЛ, представляющий собой открытую направленную структуру с узкой щелью или зазором в тонком проводящем слое, выполненным на одной стороне диэлектрической подложки. Добиться расширения полосы рабочих частот и снижения вносимых потерь мощности проходящего сигнала предполагалось за счет размещения в щели линии вставки с толщиной менее толщины проводящего слоя и диэлектрической проницаемостью материала вставки, превышающей значение диэлектрической проницаемости подложки ($\epsilon_r < \epsilon_{r1}$). При этом в СЩЛ часть электрического поля распространяется в воздухе, другая часть – в диэлектрической подложке и большая – в диэлектрической вставке. В результате численных расчетов СЩЛ с диэлектрической вставкой методом МКЭ были получены значения матрица рассеяния и волнового сопротивления, которые представлены на рис. 3 и 4 в сравнении с базовым вариантом СЩЛ (с воздушным заполнением щели) при одинаковых геометрических параметрах моделей.

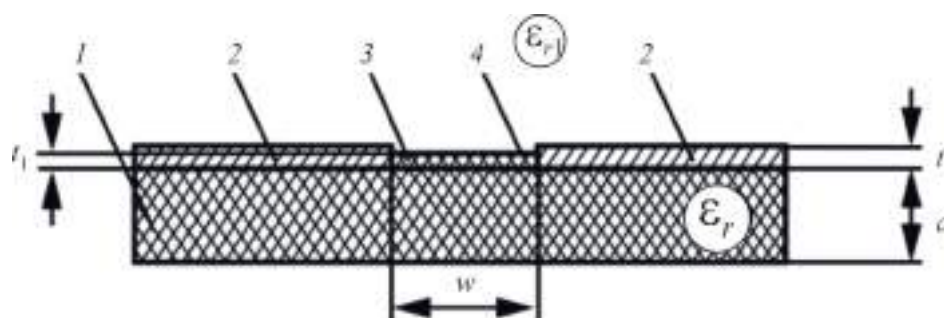


Рис. 2. СЩЛ с диэлектрической вставкой в щели:

1 – диэлектрическое основание (подложка) с ϵ_r ; 2 – металлические экраны (проводящее покрытие); 3 – щель; 4 – диэлектрическая вставка в щели с ϵ_{r1} ; w – ширина щели; d – толщина диэлектрического основания; t – толщина металлических экранов; t_1 – толщина диэлектрической вставки в щели с ϵ_{r1}

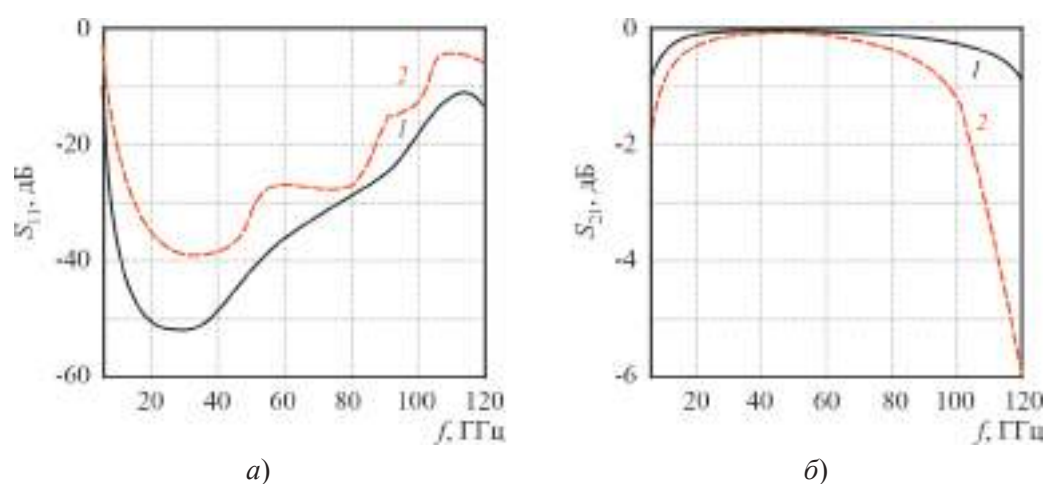
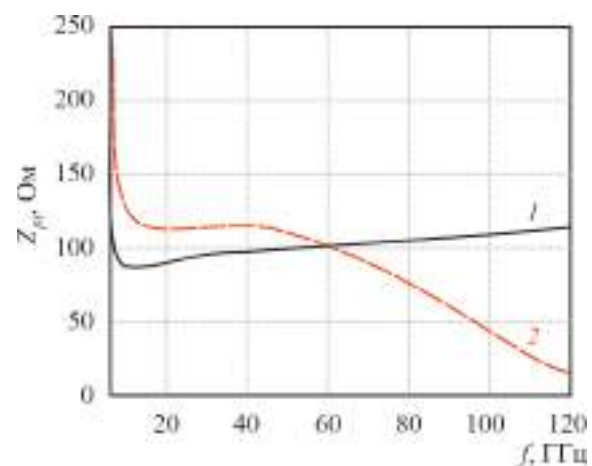


Рис. 3. Матрица рассеяния СЩЛ:

1 – СЩЛ с диэлектрической вставкой в щели; 2 – СЩЛ с воздушным заполнением щели

Рис. 4. Зависимости волнового сопротивления от частоты:

1 – СЩЛ с диэлектрической вставкой в щели;
2 – СЩЛ с воздушным заполнением щели



Отметим, что при применении диэлектрической вставки в щели получили более улучшенные характеристики линии по сравнению с базовой СЦЛ (с воздушным заполнением щели). В СЦЛ с диэлектрической вставкой ширина полосы рабочих частот по уровню -1 дБ увеличилась более чем на 10 % (см. рис. 3, б), вносимые потери уменьшились на 20 % (см. рис. 3, а). Изменение волнового сопротивления в линии происходит почти линейно.

СЦЛ с полным заполнением щели диэлектриком

Логичным продолжением улучшения характеристик СЦЛ и предложенной ранее конструкции [18] стало моделирование новой конструкции СЦЛ [19], с полным заполнением щели диэлектриком (рис. 5).

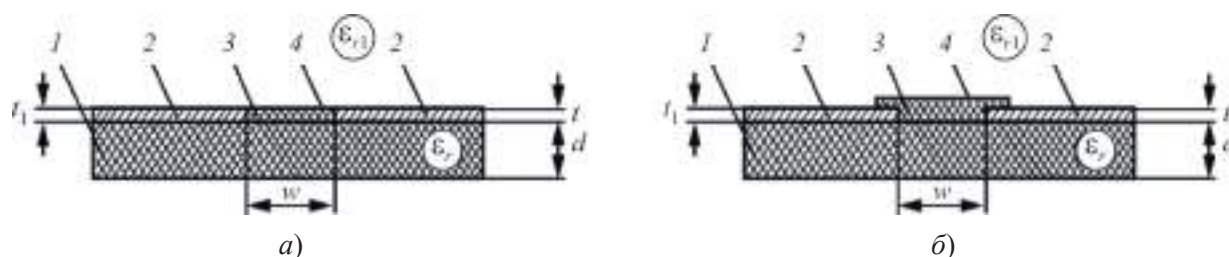


Рис. 5. СЦЛ с полным заполнением щели диэлектриком:

1 – диэлектрическая подложка с ϵ_r ; 2 – проводящее покрытие; 3 – щель; 4 – диэлектрик, полностью заполняющий щель; w – ширина щели; d – толщина диэлектрического основания; t – толщина металлических экранов; t_1 – толщина заполняющего щель диэлектрика с ϵ_{r1}

Представленная на рис. 5 конструкция СЦЛ содержит щель, выполненную в проводящем покрытии, расположенном на одной стороне плоскопараллельной диэлектрической подложки, и диэлектрик, размещённый в щели и полностью заполняющий её. Ширина щели $w = 0,2 \dots 1,7$ мм, отношение ширины щели к толщине подложки $w/d = 0,5 \dots 3,5$, толщина диэлектрика, заполняющего щель, – не менее толщины проводящего покрытия, а отношение диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего щель, к диэлектрической проницаемости материала подложки $\epsilon_{r1}/\epsilon_r = 1 \dots 40$. В качестве диэлектрика, заполняющего щель, может быть использована композиция материалов на основе отвердевающих соединений с диэлектрическим наполнителем, имеющая высокую степень адгезии к диэлектрической подложке и проводящим покрытиям (металлическим экранам), образующим щель.

Анализ ограничения ширины щели в диапазоне от 0,2 до 1,7 мм показывает, что это позволяет сосредоточить электромагнитное поле внутри щели, в диэлектрике, заполняющем щель, что снижает вносимые потери мощности сигнала. Объясняется это тем, что дальнейшее уменьшение ширины щели меняет структуру волны и электромагнитного поля и соответственно приводит к увеличению потерь и сужению рабочего диапазона частот. А увеличение ширины щели свыше 1,7 мм приводит к увеличению вносимых потерь мощности и ухудшению массогабаритных характеристик.

В то же время выбор отношения ширины щели к толщине подложки в интервале от 0,5 до 3,5 позволяет локализовать электромагнитное поле непосредственно в диэлектрике, заполняющем щель, что приводит к снижению вносимых потерь и расширению диапазона рабочих частот.



При этом ограничение отношения ширины щели к толщине подложки снизу от 0,5 объясняется тем, что при меньшем соотношении электромагнитная волна распространяется также с обратной стороны подложки, что приводит к увеличению потерь сигнала. Отношение ширины щели к толщине подложки более 3,5 приводит не только к увеличению вносимых потерь, но и к ухудшению массогабаритных характеристик.

Выбор отношения диэлектрической проницаемости материала, заполняющего щель, к диэлектрической проницаемости материала подложки в интервале от 1 до 40 за счёт локализации электромагнитного поля в диэлектрике, заполняющем щель, и верхней части подложки, прилегающей к щели, позволяет уменьшить вносимые потери мощности сигнала. При этом, если отношение диэлектрической проницаемости материала, заполняющего щель, к диэлектрической проницаемости материала подложки будет меньше 1, значительная часть электромагнитной волны будет проходить через подложку, что приведёт к увеличению вносимых потерь мощности сигнала. А если отношение будет больше 40, то наблюдается увеличение вносимых потерь мощности и сужение частотного диапазона.

Использование в качестве диэлектрика композиции на основе отвердевающих соединений с диэлектрическим наполнителем, обладающей высокой степенью адгезии к диэлектрической подложке и проводящим покрытиям, даёт возможность одновременного заполнения всех щелевых линий, находящихся на подложке, диэлектриком при групповом их изготовлении, что существенно упрощает технологию изготовления [20–22].

Превышение толщины диэлектрика (см. рис. 5, б), заполняющего щель, над толщиной проводящего покрытия на величину не более 0,05 мм позволяет сконцентрировать электромагнитное поле внутри щели, в диэлектрике, заполняющем щель, и подложке, что заметно снижает вносимые потери мощности проходящего сигнала, кроме того, позволяет повысить технологичность изготовления щелевой линии [21].

Дальнейшее увеличение превышения толщины диэлектрика, заполняющего щель, над толщиной проводящего покрытия, то есть более 0,05 мм, не целесообразно, поскольку снижение собственных потерь мощности проходящего сигнала будет незначительным.

Превышение ширины слоя диэлектрика, но не более чем на 0,2 мм с каждой стороны щели, обеспечивает полное заполнение щели диэлектриком и упрощает технологию изготовления щелевой линии.

Ограничение превышения ширины слоя диэлектрика над высотой проводящего покрытия щелевой линии значением не более 0,2 мм с каждой стороны щели объясняется тем, что современные технологические методы изготовления аналогичных плёночных устройств (щелевых линий передачи) гарантируют достаточную точность совмещения слоёв и, значит, вполне обеспечивают указанный предел. Дальнейшее увеличение указанного предела не будет снижать сложность изготовления.

Такая конструкция (см. рис. 5) реализуема промышленными методами и с использованием тонкоплёночной технологии, что позволяет упростить процесс изготовления по сравнению с предыдущей конструкцией (см. рис. 2).

Примером практической реализации такой СЩЛ (см. рис. 5, а) может быть конструкция, в которой на диэлектрической подложке из диэлектрика Rodgers (Ro3006) толщиной 0,5 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 6,15$ выполнена щель шириной 0,5 мм и длиной 10 мм с проводящим покрытием со структурой Cr (напыленный, 100 Ом/мм²) – Cu (напылённая, 1 мкм) – Cu (гальваническая, 6 мкм) – Ni (гальванический, 0,6...0,8 мкм) – Au (гальваническое, 3 мкм) [19, 20].



В качестве диэлектрика композиции с диэлектрической проницаемостью 16 на основе отвердевающих соединений с диэлектрическим наполнителем, имеющей высокую степень адгезии к диэлектрической подложке и проводящим покрытиям, может быть использован эпоксидный клей, содержащий примерно 70...80 % наполнителя. В качестве наполнителя используется мелкодисперсный порошок $Ba_3Ta_2MgO_9$ с диэлектрической проницаемостью 20 и размером частиц 3...5 мкм [19, 21, 22].

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ СЩЛ

Для обоснования преимуществ параметров и характеристик предложенной СЩЛ [19] и сравнения с классическим вариантом СЩЛ [5] и вариантом СЩЛ с диэлектрической вставкой [18] использовался метод МКЭ – метод математического моделирования геометрических и электрических характеристик на основе трёхмерного полноволнового алгоритма расчёта электромагнитного поля в частотной области [16].

Полученные результаты расчетов показывают, что СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком и определённым соотношением диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего щель, к диэлектрической проницаемости материала подложки позволяет существенно расширить рабочий диапазон частот и снизить вносимые потери мощности проходящего сигнала, по сравнению с классическим вариантом СЩЛ и вариантом СЩЛ с диэлектрической вставкой в щель, что подтверждается зависимостями, представленными на рис. 6, 7.

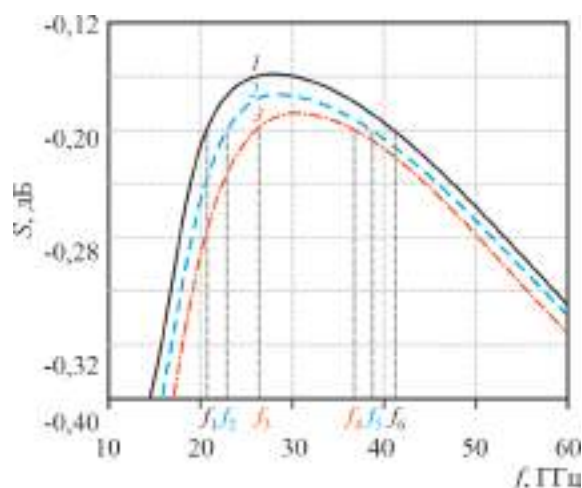


Рис. 6. Зависимости коэффициента передачи S проходящего сигнала по напряжению от рабочей частоты для трёх вариантов конструкции СЩЛ:

1 – разработанный вариант СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком; 2 – СЩЛ с диэлектрической вставкой; 3 – СЩЛ с воздушным заполнением щели

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 6, 7, позволяет провести оценку эффективности разработанной конструкции СЩЛ. Полученные результаты показывают, что СЩЛ с заполнением щели воздухом имеет минимальную величину коэффициента передачи, составляющую -0,185 дБ, а её рабочий диапазон частот на уровне коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ равен 25,86...37,17 ГГц (т. е. ширина диапазона составляет 11,31 ГГц). Величина коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ выбрана как соответствующая достаточно высокому уровню прохождения сигнала.

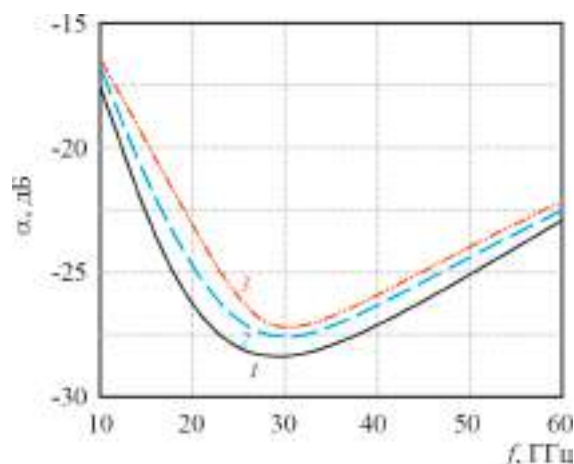


Рис. 7. Зависимости вносимых потерь мощности проходящего сигнала от рабочей частоты для трёх вариантов конструкции СЩЛ:

1 – разработанный вариант СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком; 2 – СЩЛ с диэлектрической вставкой; 3 – СЩЛ с воздушным заполнением щели

Сравнение результатов анализа двух других вариантов СЩЛ, а именно СЩЛ с вставкой из диэлектрика и разработанной СЩЛ с заполнением диэлектрической композицией, позволяет утверждать, что при заполнении щели диэлектрической композицией достигается снижение вносимых потерь мощности, что подтверждается изменением величины коэффициента передачи по напряжению. В случае заполнения щели диэлектрической композицией коэффициент передачи равен -0,021 дБ (при величине коэффициента передачи по напряжению на уровне -0,2 дБ), изменяется на 13,9 % по отношению к варианту с заполнением щели диэлектрической вставкой, и -0,055 дБ, изменяется на 42,3 % по отношению к варианту с заполнением щели воздухом. При этом наблюдается расширение частотного диапазона на 0,66 ГГц, что составляет 4,72 % по отношению к СЩЛ с заполнением щели диэлектрической вставкой, и на 3,33 ГГц, что составляет 29,44 % по отношению к варианту СЩЛ с заполнением щели воздухом.

Таким образом, анализ полученных результатов подтверждает, что полное заполнение щели СЩЛ диэлектрическим композиционным материалом позволяет сосредоточить электромагнитное поле внутри щели, в диэлектрике, заполняющем щель, и тем самым снизить вносимые потери мощности проходящего сигнала и расширить рабочий диапазон частот по отношению к конструкциям СЩЛ, известным ранее.

Учитывая возможность практической реализации варианта СЩЛ с заполнением щели диэлектрической композицией, можно утверждать о целесообразности его применения в конкретных устройствах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция СЩЛ передачи сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов с полным заполнением щели диэлектрической композицией. Исследования показали возможность существенного улучшения электрических характеристик, а именно: снижения вносимых потерь мощности проходящего сигнала и расширения рабочего диапазона частот по отношению к известным ранее конструкциям СЩЛ.



Возможность изготовления разработанной конструкции СЦЛ групповым методом на диэлектрических подложках максимального размера, выпускаемых отечественной промышленностью, позволяет использовать серийную технологию микрополосковых плат [20, 21] для их изготовления и обеспечить снижение трудоёмкости изготовления по отношению к аналогам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Активные фазированные антенные решётки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Коношенкова. – М.: Радио и связь, 2004. – 488 с.
2. Приёмопередающие модули АФАР СВЧ-диапазона: учебное пособие / В. А. Иовдальский, А. Г. Далингер, И. А. Соколов, М. С. Карасев; под ред. А. А. Борисова. – М.: Изд. «Курс», 2022. – 200 с.
3. Гвоздев, В. И. Объёмные интегральные схемы СВЧ / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефёдов. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
4. Математическое моделирование, САПР и конструкторско-технологическое проектирование объёмных интегральных схем (ОИС) СВЧ- и КВЧ-диапазонов: Тематический курс лекций 5 Всесоюзной школы-семинара с приложением тезисов докладов и сообщений / под ред. д.ф.-м.н., профессора Е. И. Нефёдова. – Тула, 1990. – 210 с.
5. Нефёдов, Е. И. Электромагнитные поля и волны / Е. И. Нефёдов. – М.: Изд. «Академия», 2014. – 220 с.
6. Неганов, В. А. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне высоких частот / В. А. Неганов, Е. И. Нефёдов, Г. П. Яровой. – М.: Наука, 1996. – 176 с.
7. Неганов, В. А. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайне высоких частот: учебное пособие // В. А. Неганов, Е. И. Нефёдов, Г. П. Яровой. – М.: Педагогика Пресс, 1998. – 234 с.
8. Нефёдов, Е. И. Полосковые линии передачи: электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ / Е. И. Нефёдов, А. Т. Фиалковский. – М.: Наука, 1980. – С. 146.
9. Ефимов, И. Е. Волновые линии передачи / И. Е. Ефимов, Г. А. Шермина. – М.: Связь, 1979. – 232 с.
10. Малышев, В. А. Основы электродинамики и микроволновой техники: учебное пособие / В. А. Малышев, Г. Г. Червяков, В. А. Лабынцев. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 596 с.
11. А. с. СССР 1224867, МПК 4 H 01 P 3/08. Щелевая линия / В. И. Борисов, В. А. Коробкин, В. Е. Любченко, Г. С. Макеева. – Приоритет 08.08.1984.
12. Гупта, К. Машинное проектирование СВЧ-устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
13. Петров, Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для вузов / Б. М. Петров. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.
14. Арефьев, А. С. Электродинамическая теория экранированной несимметричной двухщелевой линии передачи / А. С. Арефьев, В. А. Неганов, Е. И. Нефёдов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1998. – Т. XLI, № 4. – С. 507 – 518.
15. Самарский, А. А. Введение в численные методы: учебн. пособие для вузов / А. А. Самарский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 288 с.
16. Курушин, А. А. Проектирование объёмных интегральных структур СВЧ и КВЧ / А. А. Курушин, Е. И. Нефёдов, С. М. Смольский. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 451 с.
17. Ключев, С. Б. Модифицированная симметричная щелевая линия для интегральных схем СВЧ- и КВЧ-диапазонов / С. Б. Ключев, В. А. Иовдальский, В. П. Марин // Научные технологии. – 2022. – Т. 23, № 6. – С. 5 – 11. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j19998465-202206-01>.
18. Ключев, С. Б. Симметричная щелевая линия с диэлектрической вставкой в щель / С. Б. Ключев, Е. И. Нефёдов, А. А. Потапов // Труды десятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». – М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – Ч. 1. – С. 39 – 41.



19. Патент РФ 2776955, СПК Н 01 Р 3/023, МПК Н 01 Р 3/08. Симметричная щелевая линия СВЧ и КВЧ-диапазонов // С. Б. Клоев, В. А. Иовдальский, А. Г. Налогин, А. Н. Пашков. – Приоритет 07.09.2021.
20. **Иовдальский, В. А.** Конструкция и технология микрополосковых плат ГИС СВЧ-диапазона: учебное пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: Курс, 2018. – 175 с.
21. **Ляпин, Л. В.** Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе LTCC: учебное пособие // Л. В. Ляпин, В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: Курс, 2020. – 192 с.
22. **Акимов, А. И.** Керамические диэлектрики для высокочастотной техники / А. И. Акимов // Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела», (ФТТ-2005), 26-28 октября. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2005. – Т. 1. – С. 17 – 19.

Статья поступила 1 сентября 2023 г.

== НОВЫЕ КНИГИ ==

ИОВДАЛЬСКИЙ В.А. Новый принцип суммирования мощности ПТШ в усилителях СВЧ-диапазона: учеб. пособие / В.А. Иовдальский, Н.В. Ганюшкина, В.П. Марин. – Москва: КУРС, 2023. – 144 с.

Учебное пособие посвящено вопросам создания составных двухкристальных ПТШ и их использования для ГИС выходных каскадов твердотельных усилителей мощности СВЧ-диапазона. Изложен новый конструктивный принцип суммирования мощности кристаллов полупроводниковых приборов. Сформированы соответствующие направление и концепция совершенствования ГИС СВЧ усилительных каскадов.

КАТУЛЕВ А.Н. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов: монография / А.Н. Катулев, А.А. Храмичев, С.В. Ягольников. – Москва: Радиотехника, 2018. – 408 с.

Разработано новое направление в теории и практике цифровой обработки изображений, формируемых оптико-электронными приборами в сложных условиях функционирования при априорной неопределённости относительно контролируемой фоновой обстановки. Направление основано на вейвлет-фрактально-корреляционных свойствах выборки измерений оптико-электронным прибором.



УДК 621.372.54

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ИЗ МАТЕРИАЛА БМТ

В. М. Коломин, И. В. Филиппов, Н. С. Карасёв,
В. Н. Рыбкин, А. А. Смирнова, В. А. Иовдальский

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

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» для разработки и выпуска современных твердотельных СВЧ-изделий на диэлектрических резонаторах выстроены необходимые технологические переделы начиная от материало-ведческого комплекса до готовой радиоэлектронной аппаратуры. Для повышения уровня развития РЭА разрабатываются новые твердотельные СВЧ-фильтры. Перед авторами данной публикации была поставлена задача улучшить характеристики СВЧ-фильтра. Разработанные СВЧ-фильтры основаны на диэлектрических резонаторах из материала в системе оксидов Ba–Mg–Ta (БМТ) со сверхвысокой добротностью ($Q \geq 20\,000$) на частоте $F_0 \sim 10$ ГГц. В публикации представлены результаты улучшения характеристик СВЧ-фильтров, а также основы технологии производства материала БМТ и диэлектрических резонаторов из него.

КС: фильтры на основе диэлектрических резонаторов, диэлектрические резонаторы, добротность, побочные гармоники, уровень подавления гармоник, техника СВЧ

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF FILTERS BASED ON DIELECTRIC RESONATORS MADE OF BMT MATERIALS

V. M. Kolomin, I. V. Philippov, N. S. Karasev,
V. N. Rybkin, A. A. Smirnova, V. A. Iovdalskiy

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

The necessary technological changes have been made in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» starting from the material science complex to the finished radioelectronic equipment (REE) in order to develop and produce modern solid-state microwave products on dielectric resonators. To increase the level of REE progress new solid-state microwave filters are being developed. The task to improve the microwave filter characteristics was set for the authors of this paper. The developed microwave filters are based on dielectric resonators made of material in the system of Ba–Mg–Ta (BMT) oxides with a super-high Q -factor ($Q \geq 20\,000$) at the frequency of $F_0 \sim 10$ GHz. The paper presents the results of improving the characteristics of microwave filters as well as the basics of technology for the production of BMT material and dielectric resonators from it.

Keywords: filters based on dielectric resonators, dielectric resonators, Q -factor, side harmonics, harmonic suppression level, microwave technology

1. ВВЕДЕНИЕ

Для построения малогабаритных СВЧ-устройств могут быть использованы диэлектрические резонаторы (ДР) различной формы: цилиндрические (дисковые), прямоугольные, сферические и другие. Применение диэлектрических резонаторов в частотных фильтрах основано на возбужде-

нии преимущественно основных видов колебаний. В цилиндрическом ДР основным магнитным колебанием является TE_{016} . Этот вид колебаний возбуждается магнитной составляющей СВЧ-поля, совпадающей с осью резонатора [1]. Наибольшее применение в фильтрах получили ДР в форме цилиндра (диска) с основным типом колебаний H_{011} [2].

Современная радиоэлектронная аппаратура предъявляет высокие технические требования к технологии ее изготовления. Поэтому современный материаловедческий комплекс должен обеспечивать не только повторяемость свойств, но и широкую номенклатуру изделий. Для обеспечения всего комплекса разработок и производства твердотельных изделий на ДР на предприятии разработан комплекс материалов. Это, в частности, ЦТО ($\epsilon \sim 42$) на основе оксидов Ti–Zr–Sn–La, БЦНТ ($\epsilon \sim 30$) на основе оксидов Ba–Zn–Zr–Ta–Nd, БСТ ($\epsilon \sim 75 \dots 80$) на основе оксидов Ba–Sm–Ti–Sr–Nd. Для улучшения характеристик твердотельного СВЧ-фильтра были разработаны диэлектрические резонаторы в системе оксидов Ba–Mg–Ta с добротностью $Q \geq 20\,000$ на $F_0 \sim 10$ ГГц.

2. ПРОИЗВОДСТВО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Диэлектрическими называют объемные резонаторы из диэлектрических тел без проводящего покрытия [3]. Граничные условия на поверхностях ДР определяются явлением полного внутреннего отражения электромагнитных волн, поэтому такие резонаторы еще называют открытыми (рис. 1).

Чтобы соответствовать требованиям нынешних и будущих систем, необходимы улучшенные или новые ДР на основе специальных керамических диэлектриков. В этом плане отлично зарекомендовали себя материалы со структурой перовскит [4]. ДР, изготовленные на основе материалов со структурой перовскита, имеют значения добротности от 8000 до 20000. В данной работе для изготовления ДР использовали материал на основе оксидов Ba–Mg–Ta (БМТ), который имеет диэлектрическую проницаемость ~ 24 . За рубежом резонаторы из этого материала выпускаются рядом фирм: Murata (Япония), Temex Ceramics (Франция) [5–6]. Такие диэлектрические резонаторы обладают высокими значениями добротности ($Q \geq 20000$) на $F_0 \sim 10$ ГГц [5, 6].

Для стабильной работы твердотельной техники СВЧ на основе ДР помимо высоких значений добротности критически важно иметь возможность управлять значением температурного коэффициента частоты (ТКЧ). В идеальном случае ТКЧ ДР не должно превышать значения $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. При более высоких значениях ТКЧ резонансный пик ДР при изменениях температуры будет смещаться с рабочей частоты фильтра, что недопустимо в условиях реальной работы. В данной работе, по согласованию с разработчиком фильтров, используются ДР с ТКЧ $\sim 1,5 \dots 2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Практически полное отсутствие рыночных стимулов обусловило тот факт, что отечественные разработки в области производства ДР значительно уступают уровню ведущих мировых компаний. При этом на сегодняшний день возросли риски отказа поставок импортного сырья, материалов, готовых изделий или узлов, в том числе в области материаловедения. Поэтому огромный интерес представляет создание отечественного аналога ДР с высокой добротностью на основе материала БМТ и его практическое применение.

За основу для разработки материала БМТ и ДР из него принята керамическая технология, которая представляет собой расчет шихты и взвешивание исходных материалов, помол и сме-



Рис. 1. Общий вид диэлектрического резонатора

шивание порошков, твердофазный синтез, приготовление пресс-порошка, прессование и окончательная термическая обработка – обжиг [7].

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» реализована технология изготовления материала БМТ и ДР на его основе. Для получения высокоплотной керамики особое внимание было уделено, чтобы исходные компоненты имели достаточно малый размер частиц (не более 2...5 мкм) и полное отсутствие примесей [8]. Следующим важнейшим этапом в производстве диэлектрических резонаторов является твердофазный синтез, который представляет собой процесс диффузии атомов контактирующих между собой исходных компонентов до тех пор, пока не устанавливается равномерное состояние с равномерным их распределением в ходе термической обработки. Поскольку каждая компонента исходной шихты механической смеси является отдельной фазой с только ей присущей кристаллической решеткой, то исходная шихта в целом представляет собой многофазную систему, которая в процессе синтеза постепенно переходит в однофазную систему с новой кристаллической решеткой, соответствующей новому синтезированному материалу, обладающему комплексом заданных физико-химических свойств. Для материалов ДР это главным образом такие свойства, как диэлектрическая проницаемость ϵ , обратная величина добротности – тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, ТКЧ в диапазоне СВЧ.

Завершающим технологическим этапом, после твердофазного синтеза материала и формирования заготовок ДР, является термическая обработка. Обжиг заготовок ДР осуществляется в печах с воздушной или кислородной (окислительной) средой при температурах в диапазоне 1500...1600 °С с выдержкой в течение от нескольких часов до ~20 ч или более. В процессе обжига происходит спекание и усадка линейных размеров на 10...25 %, в зависимости от способа формообразования заготовок и гранулометрического состава шихты. Образуется плотное тело керамики с нулевой пористостью и заданной кристаллической структурой. Теоретическая плотность материала БМТ составляет ~7,5 г/см³. Разрабатываемый материал на основе оксидов Ва–Mg–Ta будет иметь структуру перовскита.

Проведена серия экспериментов, согласно разработанной технологии, по итогам которой получены диэлектрические резонаторы с $Q \geq 17000$ на $F_0 \sim 12$ ГГц. Измерения проводились на анализаторе цепей E5071C.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ИЗ БМТ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА

Известно, что ДР являются основой различных видов полосно-пропускающих фильтров, полосно-заграждающих фильтров, частотно-разделительных устройств, фильтров гармоник. От вида фильтра зависит способ включения ДР в схему работы.

В данной работе ДР включен в цепь фильтра при помощи микрополосковой линии передачи, как показано на рис. 2, а. Характеристики фильтра на частотах в диапазоне от 19,5 до 31,5 ГГц представлены на рис. 2, б. Полоса пропускания фильтра составляет 137 МГц при максимальных потерях 2,3 дБ. Коэффициент прямоугольности равен 0,36, усредненное значение крутизны скатов – 0,1 дБ/МГц.

Представленный фильтр на основе ДР – лишь часть рассматриваемой схемы. В данной работе фильтр используется в модуле сигнала гетеродина, который состоит из двух генераторов: высокочастотного (ГВЧ) и низкочастотного (ГНЧ), смесителя, фильтра и усилителя (рис. 3).

При использовании схемы (см. рис. 3) на выходе в спектре появляются нежелательные гармоники. Для очистки спектра сигнала применяется фильтр на основе ДР, при этом уровень по-

давления должен составить более 40 дБ. Для удовлетворения этого условия фильтр должен иметь достаточно узкую полосу пропускания и большую крутизну частотной характеристики. Для решения этой задачи использовались свойства ДР из материала БМТ. Благодаря высокой добротности ДР, обеспечивается необходимая крутизна АЧХ и узкая полоса пропускания.

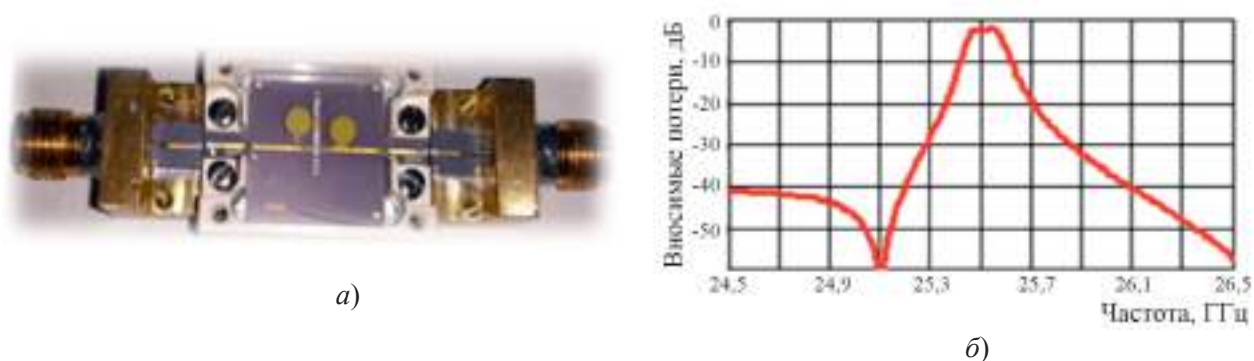


Рис. 2. Внешний вид (а) и характеристики (б) фильтра



Рис. 3. Структурная схема разработанного модуля

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной работе проводилось изучение влияния фильтра на спектр модуля при использовании резонаторов двух производителей: ООО «Керамика» ($\epsilon = 20$) и коллектива авторов данной публикации ($\epsilon = 24$ (БМТ)). Результат подавления побочных гармоник при использовании ДР производства ООО «Керамика» – 40 дБ (рис. 4).

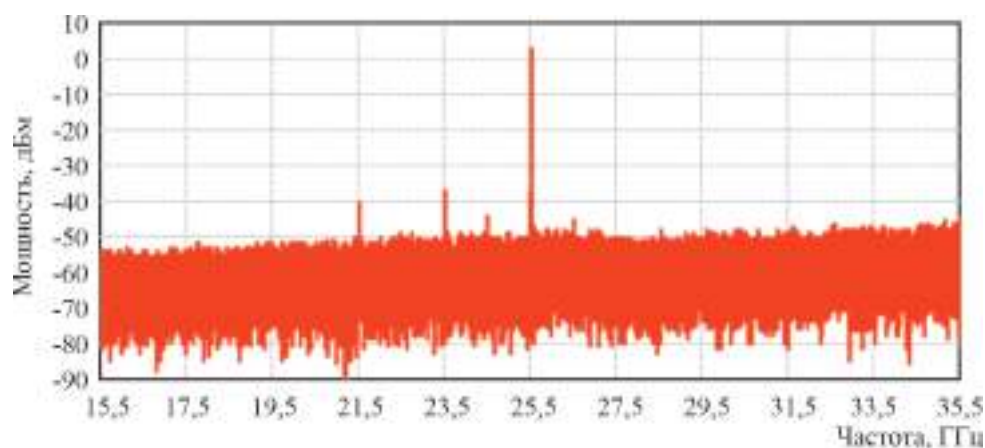


Рис. 4. Уровень подавления побочных гармоник фильтра с установленным резонатором из материала производства ООО «Керамика»

Результат подавления гармоник при использовании ДР, изготовленного коллективом авторов, – 48 дБ (рис. 5).

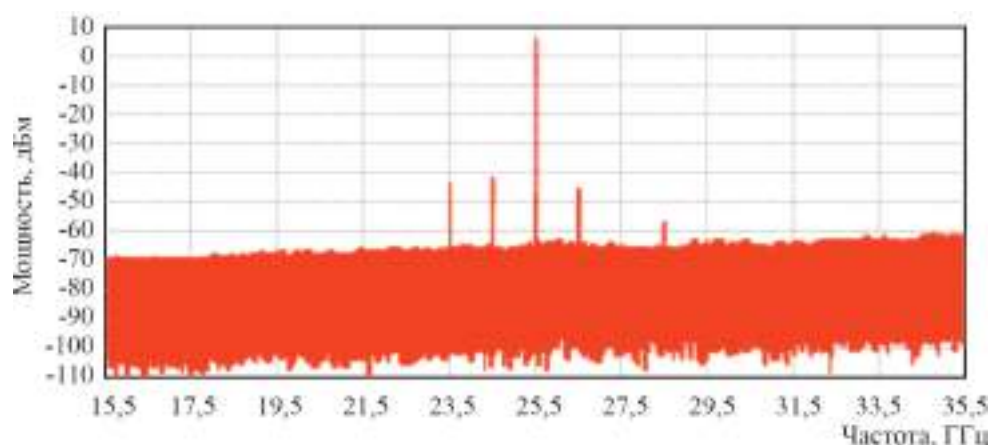


Рис. 5. Уровень подавления побочных гармоник фильтра с установленным резонатором из материала БМТ

Достигнут эффект улучшения электрических характеристик фильтра с ДР из материала БМТ на 20 %. Полученный уровень подавления побочных гармоник фильтра с установленным ДР из материала БМТ подтверждает высокие значения добротности и актуальность проводимых работ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За счет применения ДР из материала БМТ с высокой добротностью в фильтре СВЧ в модуле сигнала гетеродина устранены нежелательные гармоники. Такой результат достигнут путем подавления побочных гармоник на уровне 48 дБ. Это позволило улучшить характеристики фильтра на 20 %. Разработанные ДР обеспечивают необходимые параметры твердотельных фильтров и модуля в целом.

Конструкция фильтров с ДР из материала БМТ внедрена в серийное производство изделий, выпускаемых АО «НПП «Исток» им. Шокина».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильченко, М. Е.** Твердотельные СВЧ-фильтры / М. Е. Ильченко, Г. А. Мелков, Г. А. Мирских. – К.: Техника, 1972. – 117 с.
2. **Безбородов, Ю. М.** Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т. Н. Нарытник, Б. В. Федоров. – К.: Техника, 1989. – 184 с.
3. Диэлектрические резонаторы для изделий электронной техники СВЧ-диапазона: учебн. пос. / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, В. А. Иовдальский, И. А. Соколов. – М.: Курс, 2021. – 150 с.
4. **Sebastian, M. T.** Dielectric materials for wireless communication / M. T. Sebastian // Elsevier Science. – 2008.
5. Каталог компания «Murata» (Япония).
6. Каталог компания «Trans-Tech» (США).
7. **Балкевич, В. Л.** Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1968. – 199 с.
8. **Батыгин, В. Н.** Исследование и разработка алюмооксидной керамики для изготовления деталей и узлов электровакуумных СВЧ-приборов: дис. канд. техн. наук, НПО «Исток». – Фрязино, 1962.

Статья поступила 30 июня 2023 г.



ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.315.592

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ p -ТИПА ДЛЯ p - i - n -ДИОДОВ

А. С. Дубкова^{1,2}, Д. В. Пухов¹, Н. Б. Гудкова¹, В. Н. Рябов¹,
Н. Д. Ильюшина¹, В. Б. Кольцов²

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

²НИУ «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

Статья посвящена формированию кремниевой структуры для p - i - n -диодов. В работе рассмотрены и апробированы три метода получения контактного низкоомного слоя p -типа: ионная имплантация, эпитаксиальное наращивание, комбинация этих двух методов. Сделаны выводы об эффективности предлагаемых методик.

КС: кремний, ионная имплантация, газофазная эпитаксия, p - i - n -диод

OPTIMIZATION OF THE FORMATION TECHNOLOGY OF p -TYPE SILICON CONTACT LAYER FOR p - i - n DIODES

A. S. Dubkova^{1,2}, D. V. Pukhov¹, N. B. Gudkova¹, V. N. Ryabov¹,
N. D. Ilyushina¹, V. B. Koltsov²

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

²NRU «Moscow Institute of Electronic Technology», Zelenograd

The article is devoted to the formation of a silicon structure for p - i - n diodes. Three methods of obtaining a contact low-resistance layer of p -type were considered and tested: ion implantation, epitaxial expansion, combination of these two methods. Conclusions were made about the effectiveness of the proposed methods.

Keywords: silicon, ion implantation, gas phase epitaxy, p - i - n diode

1. ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные источники СВЧ-излучения средней и малой мощности находят широкое применение в науке и технике благодаря высокой надёжности, долговечности, малым размерам и массам. В настоящее время наряду с транзисторными и гибридными микросхемами, диодами Ганна и лавинно-пролётными диодами также используются p - i - n -диоды.

P - i - n -диоды (рис. 1) находят широкое применение в качестве активных элементов приемно-передающих модулей и в различных приборах ВЧ- и СВЧ-диапазонов, таких, как переключатели, управляемые аттенюаторы, ограничители, модуляторы. Это объясняется рядом достоинств, присущих данному типу приборов: простота конструкции и малые габаритные размеры, возмож-





ность коммутировать сигналы большой мощности при малом управляющем токе, высокая скорость переключения [1].



Рис. 1. Внешний вид $p-i-n$ -диода

Основой любого $p-i-n$ -диода является трехслойная полупроводниковая кремниевая структура (рис. 2)

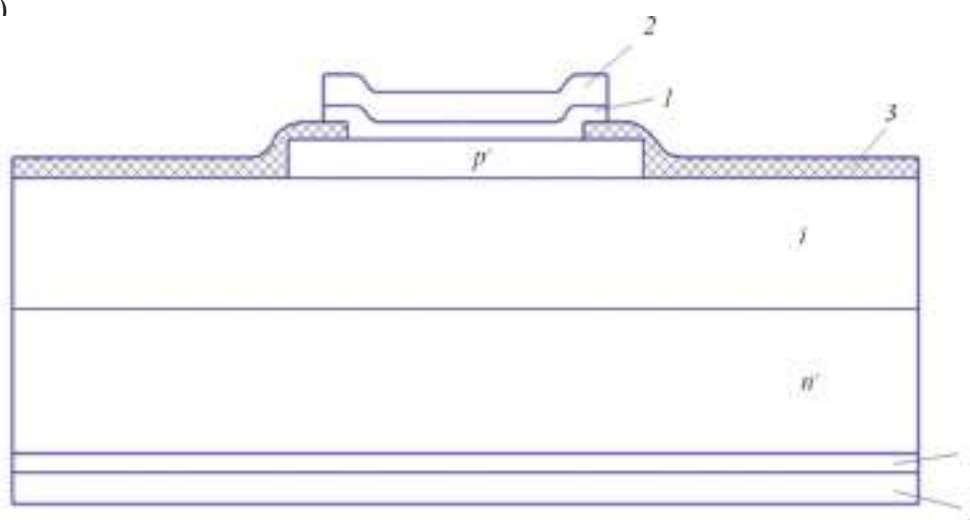


Рис. 2. Структура $p-i-n$ -диода:

n^+ – низкоомная подложка n -типа; i -область – высокоомный эпитаксиальный слой; p^+ – область p -типа (анод); 1 – первый слой металлизации; 2 – второй слой металлизации; 3 – пленка SiO_2

Структура $p-i-n$ -диода образована двумя сильнолегированными областями с проводимостью p - и n -типа, между которыми находится высокоомная область с собственной проводимостью, или i -область. Высокоомная внутренняя i -область, как правило, имеет толщину от единиц до сотен микрометров, концентрация носителей заряда в ней составляет примерно $10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Если источник внешнего постоянного напряжения подключен положительно к слою p^+ и отрицательно к n^+ , то в i -слое увеличивается концентрация электронов и дырок из-за инжекции дырок из p^+ -области и аккумуляции электронов из n -области. В зависимости от напряжения концентрация инжектированных носителей составляет $10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Через структуру протекает постоянный ток I_0 прямого направления. Таким образом, количество носителей в i -слое при переходе от режима прямого тока к режиму обратного смещения меняется на четыре порядка. Аналогично изменяется проводимость i -слоя.



На сегодняшний день формирование контактного слоя проводится методом ионного легирования. Метод ионной имплантации позволяет получать слои с высоким уровнем легирования, однако, из-за необходимости получения больших концентраций атомов бора ($\sim 10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$) в p^{++} -слое, процесс занимает продолжительное время (порядка нескольких рабочих дней). Альтернативным методом получения легированных слоев является эпитаксиальное наращивание. Метод газофазной эпитаксии при пониженной температуре позволяет получать тонкие высоколегированные слои менее чем за 2 ч.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью работы было определение оптимальных методов формирования контактных слоёв кремния для *p-i-n*-диодов СВЧ-диапазона. Для эксперимента было изготовлено несколько образцов *p-i-n*-структур (рис. 3), в которых активный *i*-слой сформирован методом эпитаксиального наращивания при пониженной температуре, а контактный p^{++} -слой методами ионной имплантации, эпитаксиального наращивания и комбинированным методом (эпитаксиальный рост основного *p*-слоя с последующим ионным легированием поверхности).

Активный *i*(*n*)-слой формируется методом газофазной эпитаксии путем пиролиза моносилана при пониженном давлении на сильнолегированной мышьяком подложке. Существенную роль в процессе легирования эпитаксиальных слоев кремния, осаждаемых на сильнолегированных подложках, играет процесс автолегирования, приводящий к загрязнению слоя примесями, поступающими из подложки, и увеличению толщины переходной области на границе подложка – эпитаксиальный слой. Для уменьшения нежелательного проявления автолегирования примеси использовались дополнительные технологические приемы [2].

Формирование *p*-слоя методом ионной имплантации проводилось на установке ЛАДА 30М. В качестве рабочего газа использовался флюобор (BF_3). Процесс имплантации происходил в 2 этапа: внедрение атомов примеси с большой дозой и энергией в глубину слоя и внедрение атомов примеси с меньшей дозой и энергией для легирования слоя на поверхности [3, 4]. Первый этап легирования основного слоя производился при дозе внедрения 1750 ион/см^2 с энергией 40 кэВ. Во время второго этапа доза внедрения составляла 300 ион/см^2 с энергией 20 кэВ. После второго этапа имплантации для восстановления кристаллической решетки проводился высокотемпературный отжиг в атмосфере азота.

Формирование *p*-слоя методом эпитаксиального наращивания осуществлялось на установке газофазной эпитаксии А209.17. В качестве легирующего газа использовался диборан (B_2H_6).

Комбинированный метод включал в себя формирование контактного слоя методом эпитаксиального наращивания из газовой фазы в смеси $\text{SiH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6$ с последующим проведением ионного легирования поверхности при дозе внедрения 300 ион/см^2 и энергии 20 кэВ.

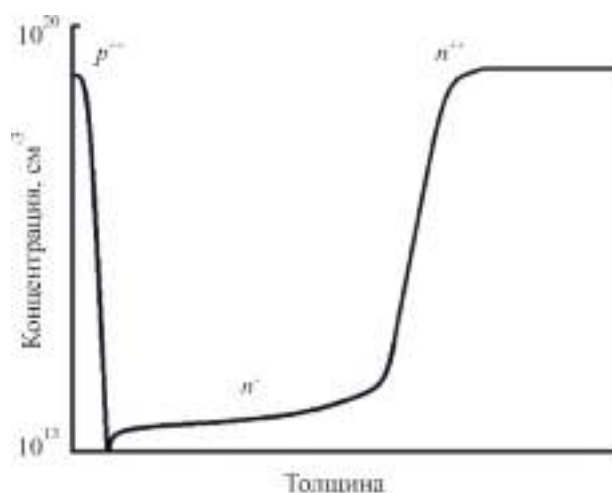


Рис. 3. Типовой профиль легирования структуры для *p-i-n*-диода

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Одним из требований к контактному слою $p-i-n$ -диода является малое значение поверхностного сопротивления. В таблице представлены значения поверхностного сопротивления образцов.

№ образца	Способ формирования контактного слоя	R_s , Ом
1	Комбинированный	11
2		12
3	Эпитаксия	50
4		50
5	Ионная имплантация	17
6		20

Из данных, приведенных в таблице, видно, что поверхностные сопротивления структур, полученных методом эпитаксии, имеют наибольшие значения. В то же время структуры, которые формировались методом ионной имплантации и комбинированным методом, имеют поверхностное сопротивление в несколько раз меньше.

Работа $p-i-n$ -диода характеризуется крутизной вольт-амперной характеристики и величиной прямого напряжения V_{ds} . На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики полученных диодов. Как видно из представленных характеристик, наилучшими параметрами обладает диод, полученный на структуре, сформированной комбинированным методом.

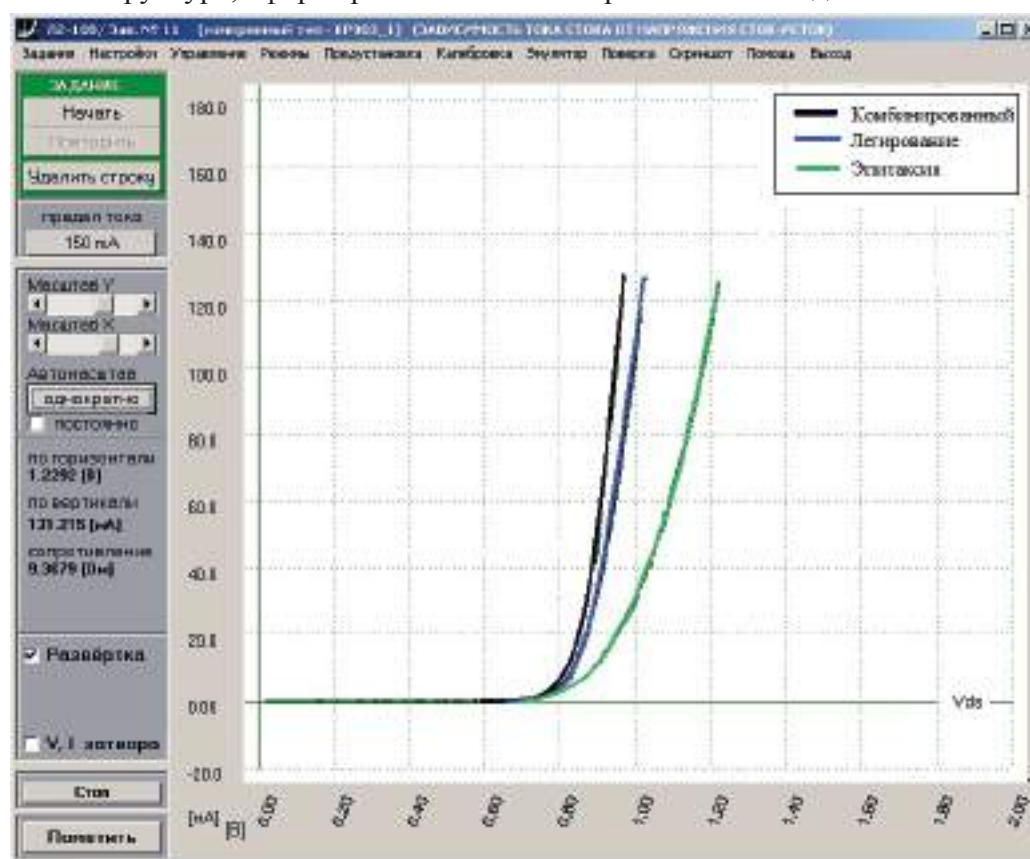


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики $p-i-n$ -диодов

Если сравнить первый этап формирования легированного слоя путем ионной имплантации и комбинации методов, то важно будет отметить, что в комбинированном методе p -слой наращивается эпитаксиально. Эпитаксиальный рост на первом этапе формирует идеальную кристаллическую решетку слоя в объеме, а ионная имплантация на втором этапе создает нужный уровень легирования поверхностного слоя. Это может служить объяснением лучших характеристик диода, по сравнению с диодом, изготовленным методом ионной имплантации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность получения контактного p^{++} -слоя комбинированным методом, который представляет собой наращивание контактного p^{+} -слоя эпитаксией из газовой фазы при пониженном давлении и температуре с последующим легированием поверхности методом ионной имплантации. Полученные опытным путем значения позволяют сделать вывод о том, что данный метод является предпочтительным для получения структур p - i - n -диодов, так как показывает лучшие рабочие характеристики и снижает время формирования контактного слоя в 4 раза. Получение контактного слоя p -типа с низким поверхностным сопротивлением методом эпитаксиального наращивания требует дальнейшей оптимизации технологических параметров роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Резников, В.** Высокочастотные и СВЧ p - i - n -диоды / В. Резников, Л. Губырин // Компоненты и технологии. – 2000. – № 3. – С. 42 – 43.
2. Особенности формирования низколегированных слоев кремния на сильнолегированных подложках / А. С. Дубкова, В. Н. Рябов, И. В. Тарасов [и др.] // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 393 – 395.
3. **Мейер, Д.** Ионное легирование полупроводников (кремний и германий) / Д. Мейер, Л. Эрикссон, Д. Дэвис; пер. с англ.; под ред. канд. физ.-мат. наук В. М. Гусева. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
4. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А. Ф. Буренков, Ф. Ф. Комаров, М. А. Кумахов [и др.]. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 352 с.

Статья поступила 6 июля 2023 г.



УДК 669.714; 621.771; 539.219

О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОЛОС И ЛЕНТ ИЗ НЕМАГНИТНОГО СПЛАВА ВАКУУМНОЙ ПЛАВКИ НММц 38-2В

П. А. Головкин

АО «Плутон», г. Москва

На основании особенностей немагнитного никелемедного сплава вакуумной плавки НММц 38-2В типа монель обосновываются технологические решения, направленные на повышение качества производимых из него полос и лент.

КС: сплав, полоса, лента, подстуживание расплава, магнитная восприимчивость, ликвация, гомогенизация, прокатка, диффузия, поверхность Матано, порообразование, расслоение материала

ON TECHNOLOGICAL FEATURES OF OBTAINING QUALITY STRIPS AND TAPES FROM NON-MAGNETIC ALLOY VACUUM MELTING Ni–Cu(38 %)-Mg(2 %) OF THE MONEL TYPE

P. A. Golovkin

«Pluton» JSC, Moscow

On the basis of the features of non-magnetic nickel-copper vacuum melting alloy Ni–Cu(38 %)-Mg(2 %) (Russian abbreviation «НММц 38-2В») of the monel type, technological solutions aimed at improving the quality of strips and tapes produced from it are substantiated.

Keywords: alloy, strips, tapes, melt quenching, magnetic susceptibility, liquation, homogenization, rolling, diffusion, Matano surface, pore formation, material delamination

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из типичных пороков в материале полос и лент из немагнитного сплава вакуумной выплавки типа монель НММц 38-2В, требования к которым определены ТУ СИ0.021.039 [1] и ТУ Яе0.021.070 [2], является расслоение, которое может привести к потере вакуумной плотности рабочей зоны электровакуумных приборов (ЭВП), детали которых изготавливаются из этого материала. Химический состав сплава НММц 38-2В, % (масс.): никель – основа; медь – 36...39; марганец – 1,4...2,2; углерод – 0,07...0,15; кремний ≤ 0,06; магний ≤ 0,03; цинк ≤ 0,002; висмут ≤ 0,002; фосфор ≤ 0,005; мышьяк ≤ 0,002; кислород ≤ 0,005; водород ≤ 0,002; азот ≤ 0,005; Σ примесей ≤ 0,17. Поскольку сплав содержит более 32 % (масс.) меди, он не является магнитным уже при комнатной температуре [3], а добавка марганца придаёт получаемым из него материалам необходимую технологичность при обработке резанием и прочностные свойства.

Следует отметить, что сплав не входит в перечень ГОСТ 492 [4] на химический состав никелевых и медно-никелевых сплавов и ГОСТ 5063 [5] на полосы из медно-никелевых сплавов. При этом ТУ [1, 2] не предъявляют требований к структуре и свойствам материала полос и лент и



к допустимости в нём тех или иных пороков. Однако это не значит, что этих пороков в материале нет и не может быть. В частности, в материале горячекатаных и холоднокатаных полос и лент могут иметь место поры и расслоения [6], не допустимые для деталей рабочей зоны ЭВП [7].

2. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОР И РАССЛОЕНИЙ И ПУТИ ИХ НЕДОПУЩЕНИЯ

Одной из причин возникновения пор и расслоений в материале полос и лент из сплава НММц 38-2В может стать недостаточная его химическая чистота, когда находящиеся в нём легкоплавкие и малорастворимые примеси могут скопиться преимущественно у тройных стыков зёрен и закипеть, и так образовать указанные пороки. Способам этого устранения посвящён ряд работ [6, 8, 9], однако причиной возникновения расслоений могут стать не только находящиеся в материале примеси.

Основой способа индукционной плавки является нагрев шихты мощными электромагнитными полями, из чего проистекает такая его особенность, как неравномерность распределения в расплаве его составляющих [10] с различной электромагнитной восприимчивостью [11]. В то время как никель является ферромагнитным материалом, медь и марганец парамагнитны. Из этого следует, что, поскольку магнитная восприимчивость ферромагнетиков при их плавлении изменяется слабо и описывающий это изменение сдвиг Найта незначителен [12], магнитная восприимчивость никеля и в расплавленном виде будет выше, чем у меди и марганца, и он будет в большей степени перемещён в центр расплавленного сгустка, чем последние.

Кроме того, необходимо учитывать и пути свободного термического движения расплава в тигле, которые также способствуют разделению металлического материала уже по признаку его температуры.

Схема естественного перемещения расплава в тигле индукционной печи показана на рис. 1, где 1 – расплав, 2 – тигель, 3 – индуктор. Там же представлены примеры его управляемого перемещения по преимущественному направлению сверху вниз и снизу вверх, вызываемому действием двухфазного электромагнитного поля специальных печных индукторов [13]. Недостатком естественной рециркуляции при индукционной плавке является её двухконтурный раздельный характер.

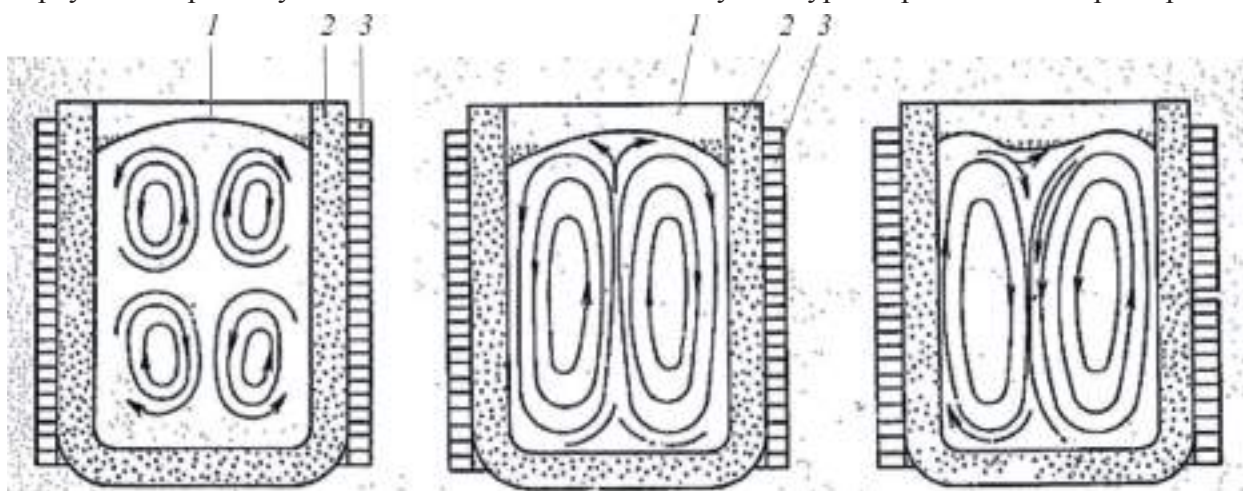


Рис. 1. Естественное перемещение расплава в тигле индукционной печи (слева) и его движение под действием двухфазного электромагнитного поля, перемещающегося сверху вниз (в центре) и снизу вверх (справа) [14]

Хорошо видно, что при естественном тепловом перемещении расплава в тигле он разбивается на две примерно равные, почти не пересекающиеся составляющие, что пресекает контакт примерно половины металлического материала с зеркалом расплава, отчего он не может естественным образом освобождаться от связанных в процессе раскисления, дегазации и модифицирования примесей при их выходе в шлак.

Скорость рециркуляции при индукционном воздействии пропорциональна квадратному корню его мощности, поэтому при раскислении и модифицировании мощность рабочих индукторов уменьшают примерно в 2 раза и перемешивание уменьшается примерно в 1,4 раза относительно времени разогрева шихты, при подстуживании перемешивание замедляется ещё сильнее [13]. При отсутствии в составе вакуумной печи индукторов специальной конструкции, дающих возможность управляемого перемешивания расплава, его химический состав будет сильно разниться от центра образованного сгустка к его краям и содержание никеля будет выше к середине сгустка расплава. Это может напрямую повлиять на качество получаемых полос и лент в части отсутствия в их материале пор и расслоений, если не добиться приемлемой с точки зрения возможной взаимной диффузии составляющих расплава его химической однородности.

На рис. 2 показаны взятые из классических источников графики зависимости диффузии меди в чистый никель и никель с примесью марганца [15], а также картина образования пор в медной полосе при её диффузии в полосы из никеля без отжига и после отжига в течение 4 ч при температуре 1000 °С и давлении 1 МПа [16]. Исходя из химического состава, график диффузии меди в никель с примесью марганца хорошо соответствует сплаву НММц 38-2В и объясняет природу появления в медной полосе близко расположенных пор, складывающихся в протяжённые расслоения.

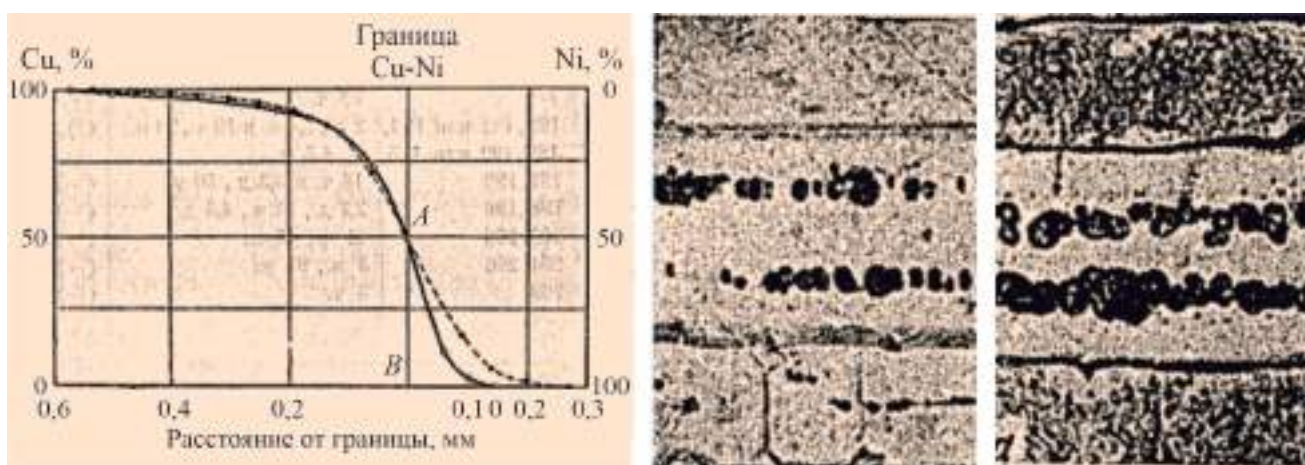


Рис. 2. Диффузия меди в чистый никель и никель с примесью марганца (слева) [15] и образование пор в медной полосе при переходе меди в полосу из никеля без отжига (в центре) и после него (справа) [16]. $\times 270$

Данные о диффузионных постоянных двойных систем [16] показывают, что при температуре 1000 °С в паре Ni–Cu проникновение меди в никель происходит, согласно разным данным, от трёх [16] до восьми раз [17] быстрее, чем из никеля в медь, и содержание меди на поверхности раздела веществ достигает 84 % и более, при этом энергия активации самодиффузии Q примерно на 20 % меньше, чем у никеля [11, 18]. Это значит, что образующиеся диффузионные поры, по сути, образуют поверхность Матано, наглядно отражающую коэффициент взаимной диффузии твёрдых веществ при его определении методом Матано – Больцмана [17, 19].

Поэтому при изготовлении слитка должны быть приняты меры для повышения химической однородности исходного расплава. В условиях отсутствия электромагнитного перемешивания этого можно частично добиться проведением операции подстуживания расплава, являющейся частью процессов его дегазации и модифицирования, когда при сниженной энергии нагрева разделение вещества расплава по магнитным свойствам прекращается и происходит его естественное диффузионное и тепловое перемешивание в тигле.

К сожалению, поскольку в процессе подстуживания составляющие расплава в существенном количестве испаряются, некоторые производители сокращают его продолжительность, проводя, по сути, лишь условно. Экономя на материале и электроэнергии, также совмещают раскисление расплава с его модифицированием и не выделяют необходимого для выхода из расплава связанных шлаков времени, которое в общем случае, с учётом вязкости расплава, размера шлаковых частиц, и других параметров, определяется по формуле Стокса [20]. Между тем, с учётом описанного раздельного естественного круговорота расплава, при подстуживании особенно важно обеспечить не только его необходимую продолжительность, но и, желательно, ступенчатость, когда его общее время перемежается кратковременными повышениями мощности имеющихся индукторов печи для дополнительного перемещения расплава.

Применение таких простых и недорогих технологических решений позволяет получить качественный материал полос и лент из сплава НММц 38-2В, удовлетворяющий требованиям к деталям рабочей зоны ЭВП. Дополнительно уменьшить химическую неоднородность материала слитка перед прокаткой позволяет проведение его проковки по сложным схемам, обеспечивающим последовательное перемещение в объёме заготовки очага деформации [8]. Если же этого не делать, то материал получаемого слитка не только будет отличаться заметным количеством не выведенных из него примесей, но и в определенной мере сохранит вызванную различной электромагнитной восприимчивостью компонентов расплава его химическую неоднородность.

Так и образуются в слитке, а затем в горячекатаной заготовке поры диффузионного происхождения, в процессе прокатки объединяющиеся и образующие в материале готовых полос и лент недопустимые для деталей рабочей зоны ЭВП расслоения. На рис. 3 показаны поры и расслоения в материале горячекатаной полосы из сплава НММц 38-2В в долевом и поперечном относительно проката направлении после травления шлифа. Видно, что расслоения имеют неправильную форму и соседствуют со следами как будто менее выраженных расслоений.

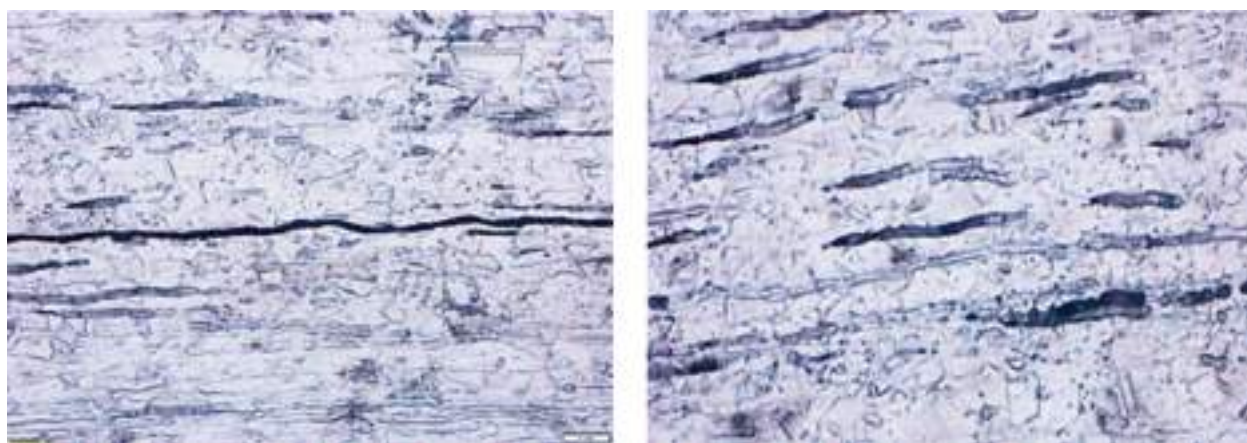


Рис. 3. Поры и расслоения в горячекатаной полосе вдоль (слева. $\times 100$) и поперёк (справа. $\times 200$) проката. Видны следы перемещения пороков при подогреве заготовки

Это явление хорошо объясняется Я. Е. Гегузиным [16] на примере трёхслойного образца Ni–Cu–Ni после отжига при температуре 950 °С (рис. 4), где цифры обозначают время отжига в часах. Поскольку горячая прокатка полос обычно производится в реверсивных станах типа «дуо» или «кваттро» [21], их получение за один проход невозможно, и производственный цикл требует нескольких подогревов заготовки. Перемещаясь во время подогревов заготовок в направлении наибольшей диффузии, поры и образованные ими расслоения оставляют на месте своего бывшего местоположения следы, по своей природе сравнимые с проявлением в металлическом материале старых границ зёрен [13].

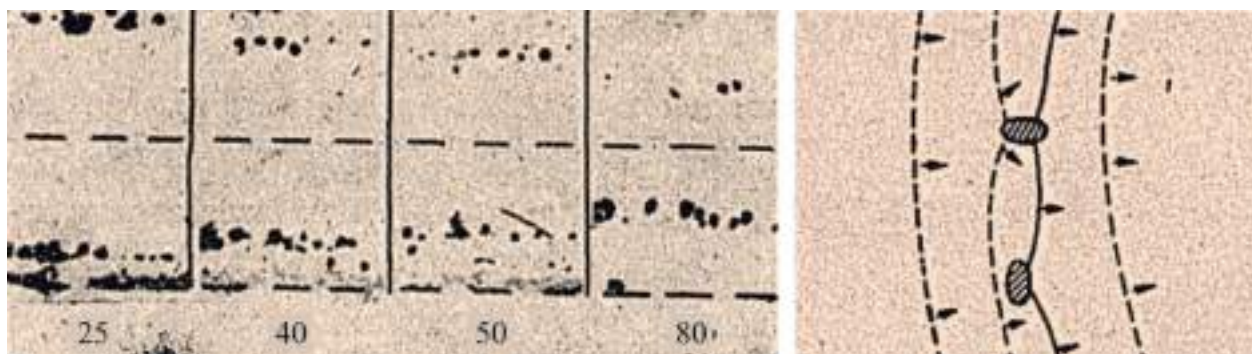


Рис. 4. Перемещение пор в трёхслойном образце Ni–Cu–Ni при отжиге (слева. $\times 50$) [15] и схема перемещения границ при подогреве заготовки (справа) [21]

Также известно, что при искажении структуры материала энергия активации диффузии очень резко уменьшается [3], отчего для перемещения пор по приведённой на рис. 3 схеме [22] становится достаточно времени, в течение которого материал заготовки претерпевает непосредственно прокатку и следующее за ней охлаждение.

Необходимо отметить особую опасность этого явления. Она проистекает из того, что, перемещаясь в направлении преобладающей диффузии, поры и образованные их скоплениями расслоения могут проявить себя уже в деталях готовых узлов ЭВП при их сборке-пайке, откатке ЭВП и других процессах, связанных с их нагревом. Это и становится причиной натекания ЭВП и неожиданного выхода их из строя тогда, когда, казалось бы, исходный материал и полученные из него детали неоднократно проверены на соответствие заданным требованиям.

Ещё большей опасностью является не сквозное расслоение материала деталей и натекание через него атмосферных газов в рабочую зону ЭВП, а выход пор и расслоений на внутреннюю поверхность деталей рабочей зоны. Тогда остаточное газовыделение и сублимация остающихся в металлическом материале примесей может вызвать отравление катода и выход ЭВП из строя не только в процессе его изготовления и наладки, но и длительного хранения, и непосредственно работы, связанной с нагревом его частей.

Следует отметить, что подобные явления имеют место не только в материале плоских полуфабрикатов, но и в прутках из медно-никелевых сплавов, например в сплаве равновесного по никелю и меди состава МН45-ВП, известного как константан, где характерным является появление на полированных металлографических образцах бугорков как следствие активного проникновения меди в никель, описанного автором данной статьи в работе [23].

По мере того как из горячекатаной заготовки производят холоднокатаные ленты, расслоения и их следы переходят в их материал, как это описано в работе [6] и что можно наблюдать

на рис. 5. Для того чтобы избежать этого, исходные слитки следует обязательно отжигать в режиме гомогенизации [8], выравнивая их химический состав. Однако некоторые производители, стремясь снизить затраты времени, нагрузку на оборудование и расходы на электроэнергию, этого не делают, усугубляя последствия повышенной химической неоднородности исходного слитка.

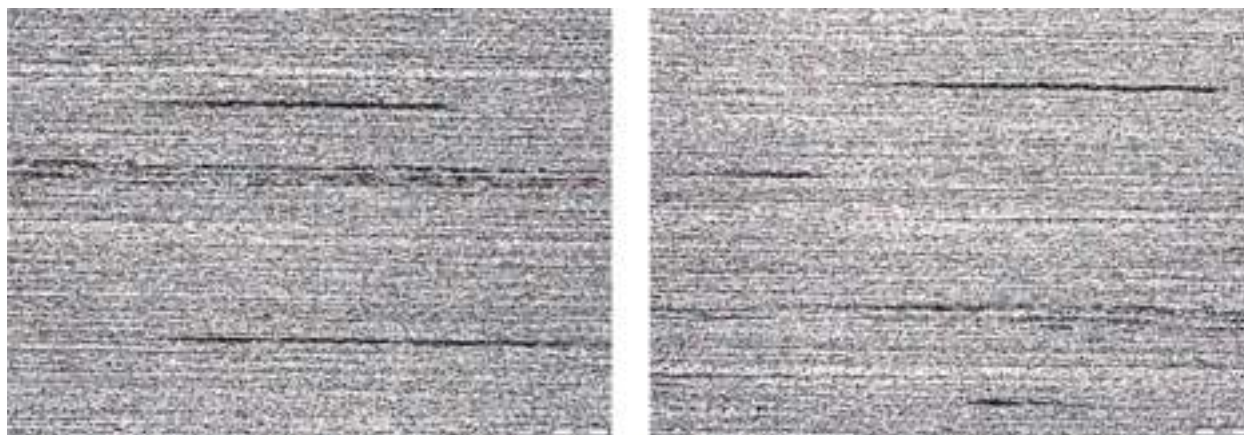


Рис. 5. Перешедшие в материал холоднокатаной полосы расслоения. $\times 100$

В заключение следует отметить, что описанные особенности поведения состоящего из нескольких веществ расплава не являются свойственными только для медно-никелевых сплавов. Похожие явления той же природы свойственны, например, железоникелькобальтовым сплавам 29НК и 29НК-ВИ, также известным под общим названием ковар. И в этом случае разделённый по признаку электромагнитной восприимчивости расплав склонен к развитию диффузионных явлений, вызывающих возникновение пор и расслоений, а двухконтурный раздельный характер при естественной циркуляции расплава и недостаточное время выдержки при подстуживании вызывают его зашлакованность, критичные при использовании в деталях ЭВП, как это подробно описано в работе [24].

3. ВЫВОДЫ

1. Причиной появления пор и образованных ими расслоений в полосах и лентах из сплава НММц 38-2В может стать отступление от канонов изготовления слитков и прокатки заготовок, заключающееся в отказе от проведения операций подстуживания исходного расплава и гомогенизирующего отжига слитков перед горячей прокаткой.

2. Отсутствие в индукционной печи индукторов с возможностью управления перемещением расплава в тигле не позволяет в нужной степени перемешать вещества расплава, разделённые по признаку их магнитной восприимчивости. В этих условиях отказ от проведения специального ступенчатого подстуживания расплава не дает возможность получить необходимую химическую однородность материала слитка.

3. Отказ от гомогенизации слитка перед прокаткой не позволяет снизить неравномерность его химического состава. Это приводит к тому, что медь проникает в области материала с повышенным содержанием никеля так быстро, что целые фронты образующихся пор не успевают заполниться веществом за счёт её самодиффузии и при прокатке складываются в расслоения материала заготовок.

4. Необходимость неоднократного подогрева материала заготовок для их горячей прокатки в универсальных станах типа «дуо» и «кваттро» приводит к перемещению пор и расслоений в материале горячекатаных полос, ввиду чего в их материале наблюдаются не только сами указанные пороки, но и их следы в местах более раннего расположения.

5. Образованные в ходе получения горячекатаных заготовок пороки переходят в материал холоднокатаных полос и лент, делая их непригодными для изготовления ответственных деталей электровакуумных приборов, поскольку могут привести к их выходу из строя, ввиду загрязнения их рабочей зоны, либо потере вакуумной плотности.

6. Особую опасность при неравномерности химического состава материала полос и лент представляет перемещение пор и расслоений диффузионного происхождения в материале готовых деталей электровакуумных приборов. Такое перемещение при нагреве материала как в процессе изготовления приборов, так и при хранении и работе может вызвать как прямую потерю вакуумной плотности их рабочей зоны, так и остаточное газовыделение и сублимацию примесей, приводящих к выходу приборов из строя.

7. При отсутствии возможности управляемого перемещения расплава в тигле, повысить равномерность химического состава материала заготовок перед прокаткой может не только обязательное проведение подстуживания расплава и гомогенизации слитков, но и их проковка по сложным схемам перед прокаткой, не только уплотняющая их материал и залечивающая диффузионные поры и другие дефекты, но и обеспечивающая выравнивание содержания составляющих материала заготовки при последовательном перемещении в её объёме очага деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. СИО.021.039ТУ (ТУ 11-82). Прутки и полосы из немагнитной монели вакуумной плавки марки НММц 38-2В / Взамен СИО.021.039ТУ, ред. 2-69 с 01.01.1983. – М.: п/я «Завод «Плутон», 1983. – 12 с.
2. Яе0.021.070 ТУ. Лента из сплава марки НММц 38-2В вакуумной плавки. Технические условия. – М.: п/я 4315, ОЗТМиТС, 1986. – 10 с.; изм.
3. Герцрикен, С. Д. Диффузия в металлах и сплавах в твёрдой фазе / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 564 с.
4. ГОСТ 492-2006. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. – М.: Стандартинформ, 2011. – 14 с.
5. ГОСТ 5187-2003. Ленты из мельхиора, нейзильбера и монеля. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 15 с.
6. Головкин, П. А. Повышение качества лент из немагнитного сплава типа монель вакуумной выплавки НММц 38-2В / П. А. Головкин // Политехника, Металлообработка. – 2021. – № 4 (124). – С. 34 – 45.
7. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов (серия «Электронное материаловедение») / А. С. Гладков, В. М. Амосов, Ч. В. Копецкий, А. М. Левин; под общей ред. А. И. Шокина. – М.: Энергия, 1969. – 600 с.
8. Головкин, П. А. Повышение качества прутков из немагнитного сплава типа монель вакуумной выплавки НММц 38-2В / П. А. Головкин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 4. – С. 151 – 154.
9. Головкин, П. А. Получение прутков из сплава НММц 38-2В методом ротационнойковки / П. А. Головкин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 5. – С. 221 – 226.
10. Повх, И. Л. Магнитная гидродинамика в металлургии / И. Л. Повх, А. Б. Капуста, Б. В. Чекин. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.

11. Физические величины: справочник / Коллектив авторов по ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.
12. **Вилсон, Д. Р.** Структура жидких металлов и сплавов / Д. Р. Вилсон; перевод с англ. – М.: Metallurgia, 1972. – 247 с.
13. **Бокштейн, Б. С.** Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / Б. С. Бокштейн, Ч. В. Капецкий, Л. С. Швиндлерман. – М.: Metallurgia, 1986. – 224 с.
14. **Тир, Л. Л.** Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах / Л. Л. Тир, М. Я. Столов. – М.: Metallurgia, 1975. – 224 с.
15. **Бэррер, Р.** Диффузия в твёрдых телах / Р. Бэррер; пер. с англ. З. С. Суворовой; под ред. Б. Д. Тазулахова. – М.: Госиноиздат, 1948. – 504 с.
16. **Гегузин, Я. Е.** Диффузионная зона / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 344 с.
17. **Шьюмон, П.** Диффузия в твёрдых телах / П. Шьюмон; пер. с англ. Б. С. Бокштейна. – М.: Metallurgia, 1966. – 196 с.
18. **Зайт, В.** Диффузия в металлах. Процессы обмена мест / В. Зайт; пер. со второго переработанного и расширенного немецкого издания Г. С. Куликова и Р. Ш. Малковича; под ред. Б. И. Болтакса. – М.: Издательство иностранной литературы, 1958. – 382 с.
19. **Лобанов, М. Л.** Методы определения коэффициентов диффузии: учебное пособие / М. Л. Лобанов, М. А. Зорина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 100 с.
20. **Павлов, Е. Ю.** Спецэлектрометаллургия сталей и сплавов: учебное пособие / В. А. Павлов, Е. Ю. Лозовая, А. А. Бабенко. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. – 168 с.
21. **Королёв, А. А.** Конструкция и расчёт машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королёв. – М.: Metallurgia, 1969. – 464 с.
22. **Чалмерс, Б.** Физическое металловедение / Б. Чалмерс; пер. с англ. В. А. Алексеева и В. К. Григоровича; под ред. А. К. Натансона. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 456 с.
23. **Головкин, П. А.** О технологических причинах появления бугорков на металлографических шлифах прутков из сплава МН45-ВП / П. А. Головкин // Металлы. – № 5. – 2023. – С. 1 – 5.
24. **Головкин, П. А.** О важности проведения подстуживания расплава при индукционной плавке и гомогенизации слитка под прокатку листов и лент из прецизионного сплава 29НК-ВИ / П. А. Головкин // Труды 30-й Всероссийской научн.-техн. конф. с межд.-ным. уч.-ем «Вакуумная техника и технологии – 2023», 20–22 июня 2023 г. – С.-Пб.: ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева. – С. 72 – 78.

Статья поступила 2 октября 2023 г.



УДК 621.793.1

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНОГО ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ ОКНА ИЗ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА В СВЧ-ВЫВОДЕ ЭНЕРГИИ

**Н. И. Бабкова, Д. А. Бессонов, Е. В. Горшкова,
В. А. Соляник, В. И. Шестеркин**

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Приведены результаты исследований и испытаний входящих в состав вывода СВЧ-энергии вакуумно-плотных паяных неразъемных соединений пиролитического нитрида бора (ПНБ) с металлами. Предложен технологический процесс пайки вывода СВЧ-энергии с окном из ПНБ для мощной импульсной ЛБВ, в котором для повышения надежности спая применен метод текстурирования поверхности ПНБ под спай с помощью лазерной абляции.

КС: вывод СВЧ-энергии, пиролитический нитрид бора, пайка пиролитического нитрида бора

THE APPLICATION OF LASER ABLATION TO ENSURE VACUUM-TIGHT SOLDERED CONNECTION OF A WINDOW MADE OF PYROLYTIC BORON NITRIDE IN MICROWAVE ENERGY OUTPUT

**N. I. Babkova, D. A. Bessonov, E. V. Gorshkova,
V. A. Solyanik, V. I. Shesterkin**

JSC «RPE «Almaz», Saratov

The results of researching and testing one-piece vacuum-tight soldered connections of pyrolytic boron nitride (PBN) with metals included in the microwave energy output are presented. The technological process of soldering the microwave energy output with a PBN window for high-power pulsed TWT is presented, in which a method of texturing the PBN surface for the junction using laser ablation to increase the reliability of the junction has been developed.

Keywords: microwave energy output, pyrolytic boron nitride, pyrolytic boron nitride soldering

1. ВВЕДЕНИЕ

Вывод СВЧ-энергии является наиболее уязвимым узлом электровакуумного прибора вследствие возникновения термомеханических напряжений и деформаций, которые при воздействии проходящей через него мощности электромагнитных волн могут привести к потере вакуумной плотности. Традиционно в качестве окна используют керамику на основе оксида алюминия Al_2O_3 или бериллия BeO , кварцевое стекло, пиролитический нитрид бора (ПНБ), поликристаллический алмаз. Каждый из перечисленных материалов обладает своими достоинствами и недостатками по совокупности электрофизических характеристик: механическая прочность, термостойкость, теплопроводность, возможность механической обработки и коммерческая доступность. Для ЭВП СВЧ определяющими являются газонепроницаемость, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Разработчики различного класса приборов



по уровню выходной мощности и диапазону длин волн выбирают компромиссный вариант при выборе материала для окна вывода СВЧ-энергии. Однако вакуумная плотность соединения окна из диэлектрического материала с корпусом СВЧ-вывода всегда является главным приоритетом.

Причинами разрушения окон или потери герметичности выводов СВЧ-энергии являются:

- термомеханические разрушения вследствие неравномерного нагрева детали ВЧ-мощностью из-за диэлектрических потерь;
- вторично-электронный СВЧ-разряд по внутренней поверхности диэлектрического окна;
- СВЧ-пробой по наружной поверхности диэлектрического окна;
- электрический объемный пробой диэлектрика, вызванный накоплением заряда под действием ионизирующего излучения.

Во всех перечисленных случаях выделившаяся энергия переходит в тепло. Нагрев диэлектрического окна приводит к термомеханической деформации материала, нарушению структуры материала окна (в случае применения ПНБ – расщеплению его слоев, их растрескиванию), что может являться причиной разгерметизации вывода СВЧ-энергии по спаю.

В работе [1] проведен сравнительный анализ пригодности ряда диэлектрических материалов для выводов СВЧ-энергии с помощью коэффициента K , учитывающего прочность материалов на растяжение, теплопроводность, коэффициент термического линейного расширения, модуль упругости, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Наивысший показатель по совокупности параметров показал ПНБ: $K = (500 \dots 700) \cdot 10^{-5}$ Вт/м. Для керамики ВК94-1 $K = (1 \dots 2) \cdot 10^{-5}$ Вт/м, для CVD-алмаза $K = 1000 \cdot 10^{-5}$ Вт/м. Среди рассмотренных материалов наибольшей устойчивостью к вторично-электронному разряду также обладал ПНБ.

Пиролитический нитрид бора получают методом пиролиза в результате диссоциации молекул летучих соединений азота и бора при температуре $1300 \dots 2100$ °С и давлении $1,3 \cdot 10^2$ Па [2]. ПНБ послойно высаживается на разогретую графитовую подложку, повторяя её форму и размеры, что позволяет формировать в процессе пиролиза готовые детали. ПНБ – химически инертный материал, обладает ярко выраженной анизотропией физико-химических свойств: теплопроводности, электропроводности, коэффициента термического линейного расширения. Температура плавления ~ 3000 °С. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4,15$ сохраняется в широком диапазоне температур (до ~ 500 °С) при частоте 108 Гц. Тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается с ростом частоты. При $f = 108$ Гц $\operatorname{tg} \delta = 9,5 \cdot 10^{-5}$.

«Недостатком» ПНБ с точки зрения его практического использования в качестве материала для изготовления окон выводов СВЧ-энергии является его химическая инертность. Он не образует устойчивых химических связей с расплавами большинства металлов, что затрудняет его металлизацию и последующую пайку.

Для улучшения качества и надежности спаев цилиндрическая (боковая) часть поверхности диска из ПНБ была текстурирована методом лазерной абляции [3].

2. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Учитывая химическую инертность ПНБ, для получения неразъемного вакуумно-плотного соединения нитрида бора с металлами традиционно применялась металлизация спаиваемой поверхности активным металлом, например титаном, методами:

- нанесения «сырой» металлизационной пасты;
- нанесения активного металла ионно-плазменным методом в вакууме.



Основные технологические процессы при пайке ПНБ с «сырой» пастой требуют изготовления порошка активного металла необходимой дисперсности и самой пасты в помещениях со строго контролируемой средой, нанесения слоя металлизационной пасты заданной толщины, нанесения второго металлизационного слоя, например из меди. Формирование металлизационного покрытия заданной толщины данным способом затруднительно.

В работе [4] для повышения прочности спая посередине цилиндрической поверхности диска из нитрида бора протачивали канавку, совпадающую с плоскостями скольжения нитрида бора, которая увеличивает площадь спаиваемой поверхности. Глубина канавки не превышала толщину активного покрытия. Край канавки отстоял от внешних плоскостей скольжения на расстоянии $0,05 \dots 0,15$ от ширины паяного соединения. Затем на активное покрытие наносилось неактивное покрытие из медного порошка толщиной $0,1 \dots 0,5$ от толщины активного покрытия. Для дисков толщиной ≤ 1 мм изготовление подобных канавок является сложной задачей.

При нанесении активного металла ионно-плазменным методом в вакууме уменьшается разброс толщины металлизационного покрытия, улучшается равномерность металлизации даже на малогабаритных деталях с толщиной стенки менее 1 мм, а также на деталях нецилиндрической формы, например в виде параллелепипеда с закругленными краями (рис. 1, средняя деталь).

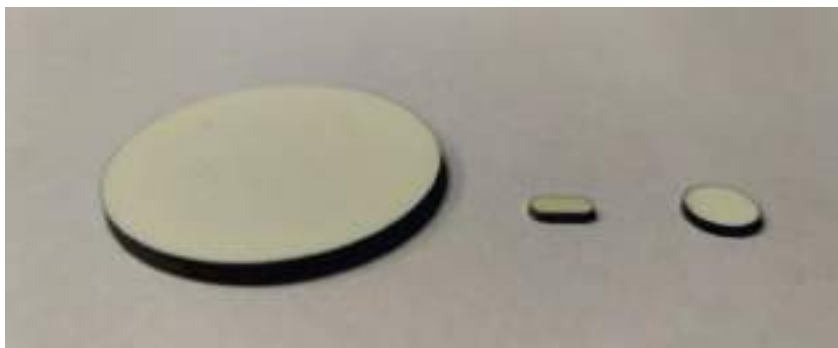


Рис. 1. Детали из ПНБ
с металлизацией титаном ионно-плазменным методом

Улучшение чистоты поверхности под пайку не связано с улучшением адгезии металлизационного покрытия на деталях из ПНБ. Так, при шероховатости $Ra\ 1,25 \dots 1,6$ адгезия покрытия была удовлетворительной, при дальнейшем уменьшении шероховатости поверхности наблюдалось отслоение металлизационного покрытия.

При механической обработке ПНБ необходимо учитывать хрупкость данного материала. В результате механического воздействия резца на обрабатываемой поверхности детали из нитрида бора образуются мелкодисперсные частицы, препятствующие получению металлизационного покрытия с высокой для пайки адгезией и не поддающиеся удалению методами химической очистки (рис. 2)

В процессе механической обработки необходимо тщательно подбирать скорость вращения детали, скорость подачи и угол заточки резца для предотвращения образования неконтролируемых по размерам продольных и поперечных трещин в слоях ПНБ, в которые не проникает припой. Такие трещины могут быть не выявлены при проверке металлокерамического узла на течеискателе, но проявиться в процессе работы прибора и стать причиной нарушения вакуумной плотности паяного соединения (рис. 3) [5].



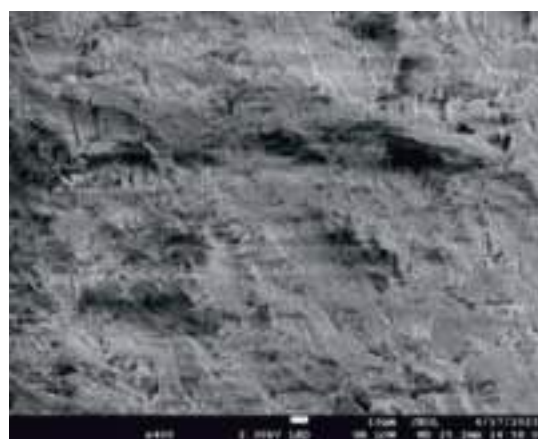


Рис. 2. Цилиндрическая поверхность ПНБ после токарной обработки (микроскоп электронный JEOL JSM-7100F. $\times 400$). Шероховатость R_a 1,25...1,6



а)



б)

Рис. 3. Шлиф паяного диска ПНБ диаметром 6,3 мм (а) и 29 мм (б) с медным кольцом (металлографический микроскоп Olympus BX-51. $\times 500$)

3. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРОМ

После токарной обработки диски диаметром 29 и 6,3 мм шлифовали на плоскошлифовальном станке алмазным кругом на бакелитовой связке. При обработке деталей строго контролировали расположение слоев, наличие трещин и сколов.

После механической обработки цилиндрическая поверхность дисков под пайку подвергалась лазерной абляции [3] с использованием установки на базе импульсного волоконного лазера Raucus RFL-P20Q (30 Вт).

Параметры лазерного излучения, а также способ сканирования пятна лазерного излучения по поверхности подбирались экспериментально такими, чтобы в процессе термического воздействия энергией лазерного излучения удалялись мелкодисперсные частицы и неотделившиеся частицы более крупного размера, а также происходило расщепление слоев ПНБ с образованием между ними щелей шириной 0,5...2 мкм и глубиной до 50 мкм от края цилиндрической поверхности к центру диска.



Параметры лазерного излучения

Длина волны.....	1064 нм
Мощность излучения.....	18 – 23 Вт
Длительность импульса.....	120 нс
Частота следования импульсов излучения.....	25 кГц
Диаметр пятна лазерного излучения на поверхности.....	70 мкм

Сканирование пятна лазерного излучения по торцевой поверхности единичного диска осуществляли по линиям, пересекающимся с верхней и нижней плоскостями диска под углами $\sim 45^\circ$, с шагом 60 мкм и скоростью перемещения 1500...2000 мм/с (рис. 4) в границах следующих друг за другом прямоугольных обрабатываемых зон размером $\Delta \times 2,5$ (мм), где Δ – высота зоны сканирования, равная толщине диска. Затем сканирование проводили в той же зоне в обратном направлении по линиям, перпендикулярным к ранее сформированным линиям. После завершения сканирования предыдущей зоны диск поворачивался по азимуту на угол α , обеспечивающий коэффициент перекрытия соседних зон до 50 % при заданном диаметре диска d . Сканирование следующих друг за другом перекрывающихся зон осуществлялось до поворота диска на 360° . Время обработки одного диска диаметром 29 мм составляло ~ 45 с [6]. Процесс лазерной абляции ПНБ проходил на воздухе.



Рис. 4. Обработка цилиндрической поверхности диска из ПНБ методом лазерной абляции

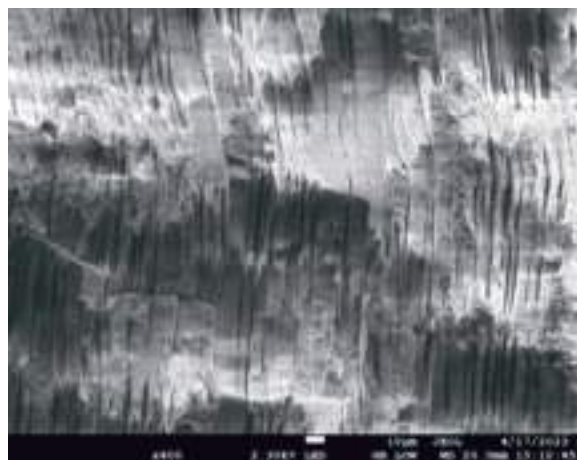


Рис. 5. Поверхность диска из ПНБ после лазерной абляции (микроскоп электронный JEOL JSM-7100F. $\times 400$)

Для увеличения производительности диски собирались в единый пакет из 10...15 штук, который закреплялся в специальной оснастке.

Метод текстурирования поверхности ПНБ под спай лазерной абляцией позволил использовать слоистость ПНБ для увеличения контактирующей с припоем поверхности в несколько раз за счет расщепления слоев нитрида бора на глубину до 50 мкм (рис. 5).

После текстурирования поверхности под спай методом ионно-плазменного напыления в вакууме наносилось металлизационное покрытие из титана, которое имело высокую адгезию к текстурированной лазером поверхности (рис. 6).



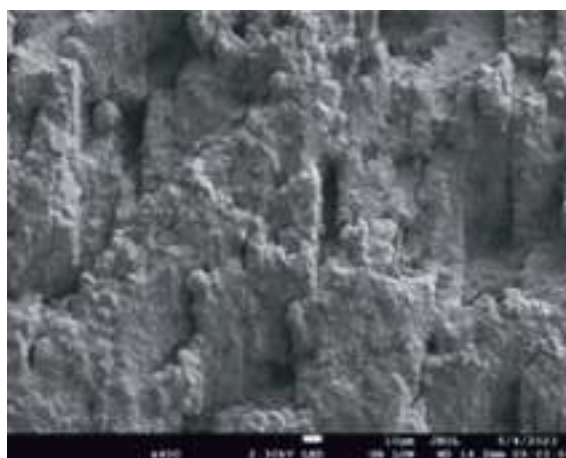


Рис. 6. Металлизация поверхности пленкой из титана (микроскоп электронный JEOL JSM-7100F. $\times 400$)

4. ПАЙКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПНБ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Для пайки окон выводов СВЧ-энергии использована действующая конструкция узла вывода СВЧ-энергии, в которой манжета, являвшаяся корпусом вывода энергии, изготовлена из меди. Пайка осуществлялась припоями ПСр72В (ТУ 1868-330-05785324-2011) и ПСрМПд 68-27-5В (ТУ 1868-330-05785324-2011) в вакууме при температуре 800...810 и 830...840 °С соответственно.

В процессе пайки за счет капиллярных сил припой проникал в зазор между диском и манжетой, обеспечивая надежное вакуумно-плотное неразъемное соединения диска из ПНБ с медью. Для контроля качества пайки на паяных узлах были сделаны продольный и поперечный шлифы (рис.7).

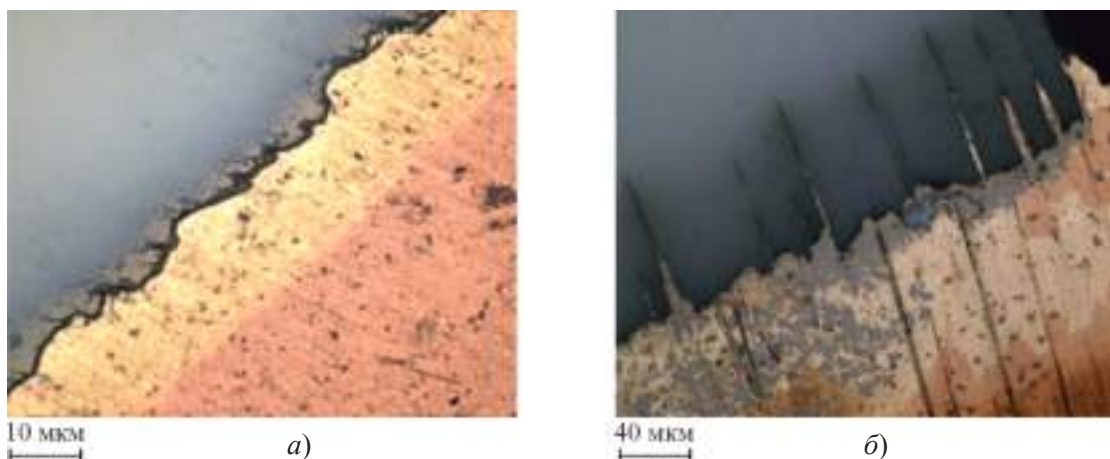


Рис. 7. Продольный (а) и поперечный (б) шлифы паяного диска ПНБ с медным кольцом (металлографический микроскоп Olympus BX-51. $\times 500$)

Из анализа рис. 7, б следует, что слоистость ПНБ была использована для увеличения контактирующей с припоем поверхности путем расщепления слоев нитрида бора на глубину до



50 мкм в процессе лазерной абляции. В процессе пайки за счет капиллярных сил припой проник в зазор между расщепленными слоями, обеспечивая надежное вакуумно-плотное неразъемное соединения диска из ПНБ с медью. Продольные и поперечные трещины на партии дисков без лазерной абляции в той же партии дисков после текстурирования лазером отсутствовали. Работы проводились на дисках из ПНБ диаметрами 6,3 и 29 мм и толщиной 0,9 и 2,0 мм. Следует отметить, что данный способ применим для дисков из ПНБ произвольного диаметра и толщины.

Герметичность паяных узлов проверялась с помощью течеискателя Modul 1000 методом обдувания узла струей гелия. Все паяные узлы с текстурированной лазерной абляцией поверхностью сохраняли интегральную скорость натекания в приборе не выше $1,33 \cdot 10^{-13}$ м³·Па/с.

Проведены испытания надежности выводов СВЧ-энергии:

- на изменения температуры узлов от 20 до 680...720 °С и от 680...720 до 20 °С со скоростью не ниже 80 °С/мин (30 термоударов) в среде азота;
- на кратковременное (по 15 мин пять раз) воздействие температуры от 20 до 700 °С и от 700 до 20 °С в вакууме;
- на длительное (в течение 8 ч) воздействие температуры от 20 до 600 °С и от 600 до 20 °С в вакууме;
- на циклическое воздействие (10 циклов по 30 мин) температурой от -60 до +150 °С и от +150 до -60 °С на воздухе;
- на влагостойкость узла при температуре 40 °С и относительной влажности 96 % в течение 10 суток.

Для испытания на стойкость к воздействию импульсной СВЧ-мощности 28 кВт при скважности 4 в течение 10 ч (2 часа включено, 0,5 часа выключено) было собрано два макета ЛБВ, в которых использовались диски диаметром 29 мм. Оба макета после проведенных испытаний при проверке на течеискателе сохранили герметичность со скоростью натекания не выше $1,33 \cdot 10^{-13}$ м³·Па/с.

Приборы с металлокерамическими выводами энергии прошли все этапы производства. Микротечи в отпаянных приборах отсутствовали. Выход годных узлов составил 100 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом применения лазерной абляции поверхности ПНБ под пайку является удаление мелкодисперсных частиц и текстурирование боковой поверхности ПНБ после токарной обработки с расщеплением слоев и образованием между ними зазоров шириной 0,5...2 мкм на глубину до 50 мкм от края цилиндрической поверхности к центру диска. Проникновение припоя в расщепленные зазоры между слоями увеличивает площадь поверхности соединения ПНБ с корпусом в несколько раз и тем самым увеличивает прочность паяного соединения и повышает вакуумную плотность и надежность конструкции вывода СВЧ-энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокофьев, Б. В. Выбор диэлектрических материалов для применения в выводах энергии мощных ЭВП СВЧ / Б. В. Прокофьев // Доклады VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 28 – 31 мая 2018. – Санкт-Петербург: СПбГУ. «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – Т. 1. – С. 176 – 181.
2. Батыгина, Э. И. Нитрид бора. Свойства и применение в электронике: Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ / Э. И. Батыгина, В. Н. Батыгин. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1971. – Вып. 19 (320). – С. 32.



3. Лазерная абляция: физические представления и приложения (обзор) / Н. А. Иногамов, Ю. В. Петров, В. А. Хохлов, В. В. Жаховский // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, № 4. – С. 689 – 706.

4. **А. с. № 1739590 СССР, МПК В 23 К 1/20, С 04 В 37/02.** Способ вакуумного соединения керамики из нитрида бора с металлами / Е. В. Ерошев, В. Д. Павлова, И. И. Королева: заявка № 2261302/08. 21.06.1979: опубл. 15.01.1994.

5. Неразъемные соединения тонкостенного пиролитического нитрида бора с металлами и анизотропного пиролитического графита с металлами и керамикой в теплонагруженных узлах ЭВП / Е. В. Горшкова, Н. И. Бабкова, Д. А. Бессонов [и др.] // Юбилейная научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина». 25-26 мая 2023. Фрязино. Тезисы докладов. – С. 60 – 61.

6. **Заявка № 2023118553.** Способ пайки пиролитического нитрида бора с металлами / Е. В. Горшкова, Д. А. Бессонов, В. И. Шестеркин: зарегистрирована 25.07.2023.

Статья поступила 6 сентября 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Воздействие ионизирующего излучения в электронике: от схем памяти до формирователей изображений / под ред. М. Багатина, С. Жерардена. – М. : Техносфера, 2023. – 504 с.

Цель этой книги – дать читателю широкое представление о влиянии ионизирующего излучения на современные полупроводниковые приборы и методах повышения их стойкости. В ней собраны труды экспертов высочайшего уровня в области радиационных эффектов, представляющих промышленность, научно-исследовательские лаборатории и научное сообщество. Благодаря наличию справочных материалов, тематических исследований и обновлённых ссылок, эта книга подходит как для новичков, желающих познакомиться с радиационными эффектами, так и для экспертов в области радиации, желающих открыть для себя что-то новое.

УДК 621.371, 621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА С КИРАЛЬНЫМ СЛОЕМ

В. И. Васильев^{1,2}, О. А. Дьяконова², Р. Н. Денисюк²

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

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Описаны исследования отражательной характеристики двухслойного радиопоглощающего материала для разных углов наблюдения в диапазоне частот 2...5 ГГц. Определена зависимость мощности поглощения падающего излучения от частоты и угла падения.

КС: векторный анализатор цепей, свободное пространство, коэффициент отражения, дециметровые волны, сантиметровые волны

INVESTIGATION OF REFLECTIVE PROPERTIES OF RADIO-ABSORBING MATERIAL WITH A CHIRAL LAYER

V. I. Vasilyev^{1,2}, O. A. Dyakonova², R. N. Denisyuk²

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

²FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

Studies of reflective characteristics of a two-layer radio-absorbing material for different viewing angles were described for 2...5 GHz frequency range. The dependence of the absorption power of the incident radiation on frequency and on the angle of incidence is determined.

Keywords: vector circuit analyzer, free space, coefficient of reflection, decimeter waves, centimeter waves

1. ВВЕДЕНИЕ

Часто при создании радиопоглощающего материала (РПМ) выбирают композиционные материалы с основным поглощающим слоем в виде киральной структуры. Свойства киральных сред могут быть полезны при разработке частотно-селективных поверхностей радиопоглощающих покрытий. Взаимодействие электромагнитного излучения с киральной средой происходит по резонансному типу [1, 2]. Важно исследовать отражательные характеристики образцов РПМ в условиях, приближенных к свободному пространству. В диапазоне дециметровых и сантиметровых волн основным методом остаётся метод с применением двух антенн, работающих в комплексе с векторным анализатором цепей. Передающая и приёмная антенны направляются на образец, расположенный на расстоянии $3\lambda_{\max}$. Метод позволяет измерять не только коэффициенты зеркального отражения, но и эффект рассеивания, то есть так называемую «индикатрису рассеяния».

Целью работы являлось создание лабораторной измерительной установки для исследования отражательных характеристик РПМ при различных углах наблюдения в диапазоне частот 2...5 ГГц.

2. МЕТОД СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА

Для измерения отражательных свойств РПМ на длинных волнах используются две антенны (приёмная и передающая), работающие в свободном пространстве.

Измерения угловых характеристик рассеяния проводились по схеме, представленной на рис. 1. Одним из основных помеховых факторов при проведении угловых измерений является сигнал прямого просачивания из передающего рупора в приёмный. В наших измерениях этот сигнал в значительной степени исключался за счёт векторного вычитания сигнала «фона» (измерения без образца).

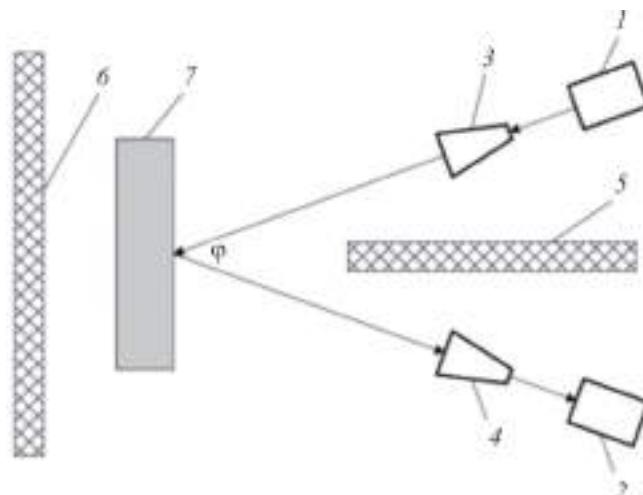


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

На экспериментальных установках лабораторного типа проводятся бистатические измерения, которые используют две отдельные рупорные антенны: передающую и приёмную. Антенны разнесены на угол $\varphi \leq 30^\circ$. Размеры испытуемого образца РПМ должны выбираться порядка $(6 \dots 10)\lambda_{\max}$.

В состав измерительной установки входят передатчик 1, приёмник 2, экранирующий РПМ 5 и подложка из высококачественного РПМ 6. Электромагнитная волна от передатчика 1 поступает в передающую антенну 3, падает на измеряемый образец 7 и, отражаясь, попадает через приёмную антенну 4 в приёмник 2, затем происходит регистрация сигнала. Взаимная связь между антеннами уменьшается помещением поглотителя 5 между ними. Для исключения влияния окружающих предметов за измеряемым образцом устанавливается поглощающая стенка 6. Металлическая пластина или образец РПМ 7 располагается в вертикальной плоскости, которая равноудалена от приёмной и передающей рупорных антенн. Расстояние от выходной апертуры рупорной антенны до исследуемого образца составляет порядка 45 см. Даже на самой длинной волне рабочего диапазона (15 см) угол, под которым был виден образец при нормальном падении, соответствовал ширине диаграммы направленности антенны по уровню не выше -3 дБ.

Измеряется мощность P_1 , принятая приёмной антенной 4 при отражении электромагнитной волны от испытуемого образца РПМ. Затем образец РПМ заменяется металлическим листом и измеряется мощность P_2 , принятая приёмной антенной 4 при отражении волны от металлического листа. Коэффициент отражения определяется как отношение амплитуд сигналов, отражённых от образца РПМ и металлической пластины, по формуле $R = P_1/P_2$ и, как правило, выражается в децибелах: $R = 10\lg(P_1/P_2)$.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

В качестве генератора и приёмника использовался векторный анализатор цепей Е-5071В. Для него были написаны небольшие программы, которые позволили провести первичную обработку результатов измерений (вычитание фона и калибровка на металлический отражатель).

Векторный анализатор цепей Е-5071В состоит из трёх связанных между собой блоков: синтезатора частот, преобразователя и индикатора. Часть сигнала от генератора (синтезатора) сразу ответвляется по кабелю к приёмнику и служит опорным сигналом. Принятый сигнал – отклик сравнивается с опорным сигналом, в результате записывается информация об его амплитуде и фазе. Диапазон работы прибора составляет 2...18 ГГц. Пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты генератора – $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Работой прибора управляет компьютер по специальной программе. Связь между компьютером и аппаратурой осуществляется через канал общего пользования. Обычный режим измерений – дискретная перестройка частоты в заданном диапазоне – измерения на сетке частот. Количество точек измерения – 512 или 256. Шаг перестройки определяется заданным диапазоном и выбранным числом точек. Минимальный шаг перестройки частоты – 0,1 МГц в диапазоне от 2 до 10 ГГц.

Две стандартные рупорные антенны П6-23А являлись передающей и приёмной. Антенна П6-23А (рис. 2) имеет выходную апертуру 342×256 мм, что сравнимо с максимальной длиной волны рабочего диапазона. Это позволяет провести измерения образцов РПМ в лабораторных условиях. Диаграммы направленности антенны на разных частотах представлены на рис. 3 и 4.



Рис. 2. Фото рупорной антенны П6-23А

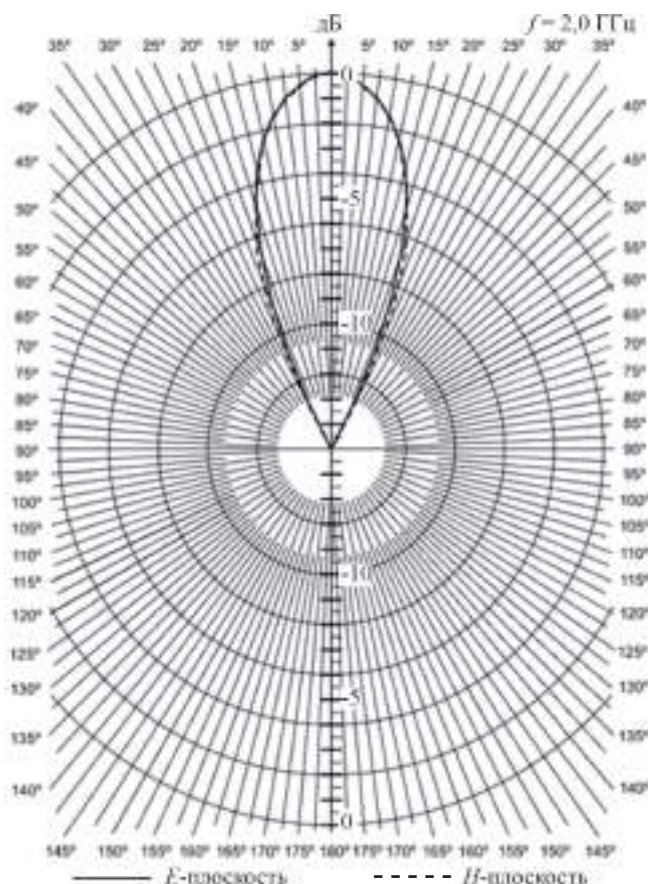


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны П6-23А на частоте 2 ГГц

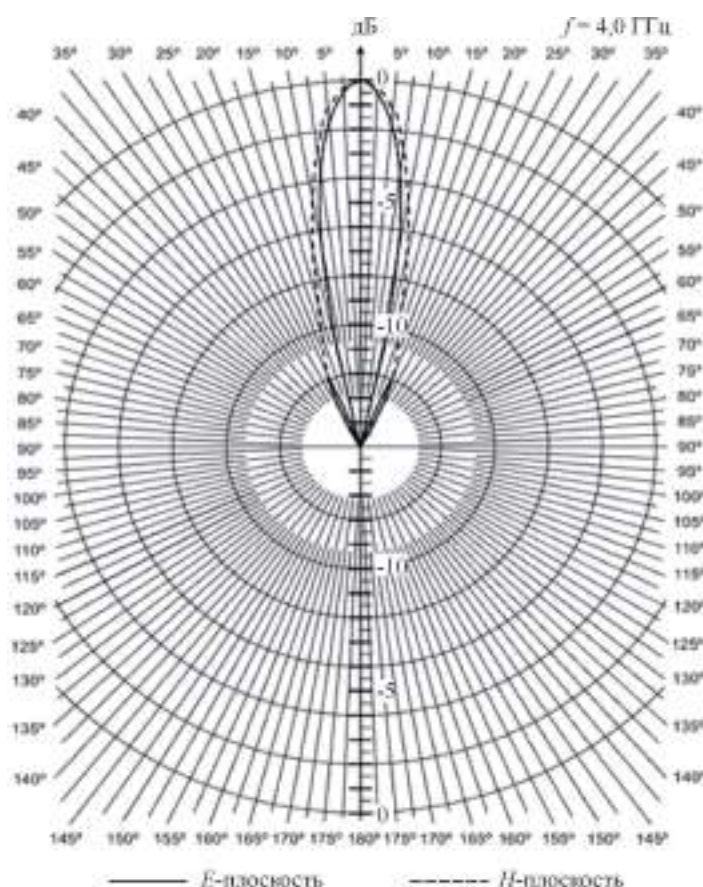


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны П6-23А на частоте 4 ГГц

4. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбрана двухслойная структура, описанная в работах [3, 4]. Структура, схематично показанная на рис. 5, расположена на металлической подложке 1 с основным киральным слоем 2 толщиной $\delta = 30$ мкм и согласующим диэлектрическим слоем 3 толщиной $D = 4,5$ мм.

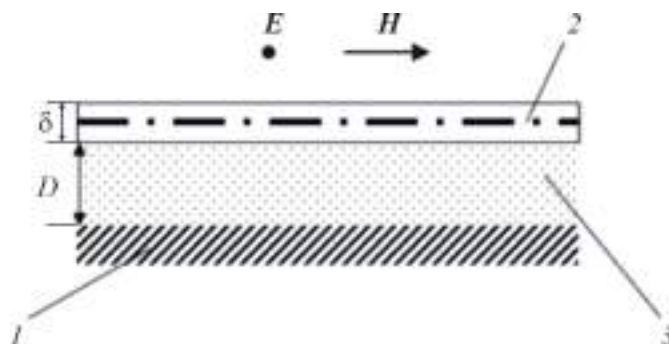


Рис. 5. Схематическое изображение двухслойной структуры

Для измерения отражательных характеристик изготовлен образец такой структуры размерами 800×800 мм. Киральным слоем является кольцевая структура, изображенная на рис. 6.

Киральный элемент решётки состоит из двух разомкнутых колец, расположенных в виде ромба. Каждый элемент ряда повернут относительно соседних на 90° . Киральные элементы вы-



полнены из вольфрамовой проволоки с удельным сопротивлением $6,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Диэлектрический слой между решёткой и металлической поверхностью представляет собой пористый полиэтилен. Малое кольцо диаметром $d_2 = 10$ мм находится внутри большого кольца диаметром $d_1 = 18$ мм. Кольца имеют фиксированные разрывы шириной $k = 0,2$ мм, причем разрыв внутреннего кольца противоположен внешнему. Разрывы в кольцах закручены по часовой стрелке. Расстояние между кольцами $\Delta = 1$ мм.

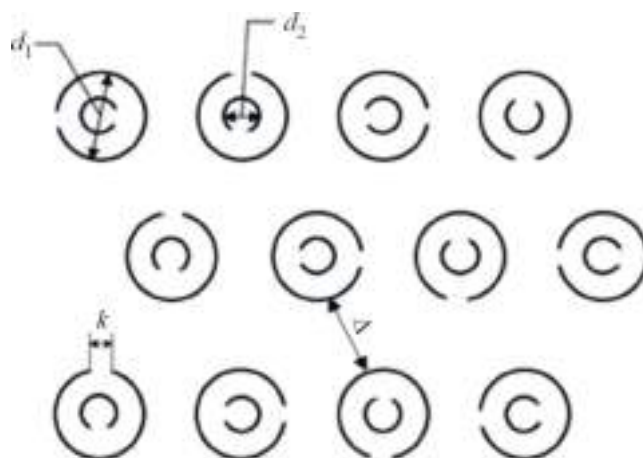
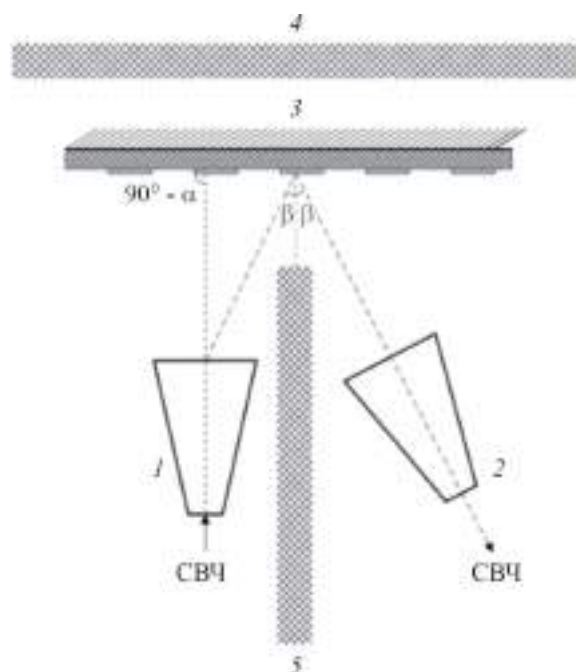


Рис. 6. Схематическое изображение кирального слоя двухслойной структуры

5. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО СПЕКТРА КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОБРАЗЦА РПМ

На лабораторной экспериментальной установке проведены измерения углового спектра коэффициента отражения от образца РПМ по схеме рис. 1.



При облучении объекта, размеры которого в несколько раз больше длины волны, излучаемой передатчиком, энергия, рассеянная назад, на несколько порядков (в среднем на три) меньше энергии, рассеянной вперед по линии облучения. Пример расположения рупорных антенн представлен на рис. 7.

Рис. 7. Структурная схема расположения рупорных антенн (α – угол падения по нормали; β – угол наблюдения)

Плоский образец РПМ 3, металлизированный с тыльной стороны, располагался в вертикальной плоскости. Повороты передающего 1 и приёмного 2 рупоров осуществлялись по дуге окружности



в горизонтальной плоскости. Каждый из рупоров соединялся с соответствующим одномодовым (H_{10}) волноводным трактом (коаксиально-волноводным переходом), так что облучение образца проводилось линейно поляризованным сигналом. При проведении измерений на ортогональной поляризации, рупоры поворачивались вокруг своей оси на угол 90° . Поглотители 4 и 5 исключали как влияние посторонних предметов, так и взаимное влияние рупоров друг на друга. Непосредственно задачей измерения было снятие зависимости СВЧ-сигнала на приёмном рупоре от угла β при заданном положении передающего рупора (угол α). Измерения проводились в диапазоне частот 2...5 ГГц. В качестве рупоров использовались стандартные широкополосные антенны П6-23А.

На рис. 8 представлен один из частных примеров угловых измерений, когда образец облучался по нормали, а отражённый (рассеянный) сигнал наблюдался под углом 30° («образец 0–30°» – оранжевая кривая на рис. 8).

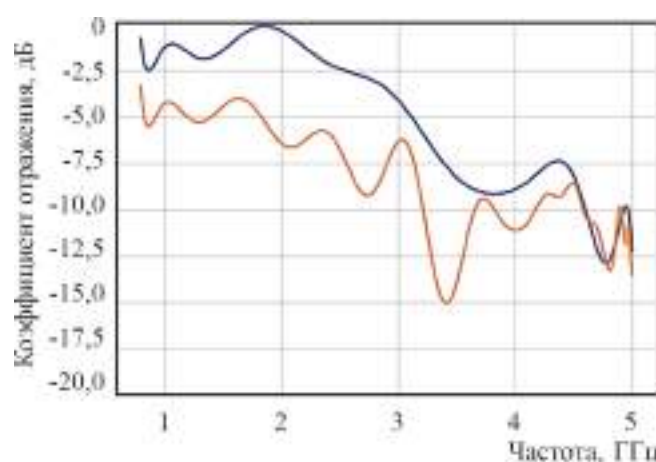


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения от образца РПМ и металлической пластины

При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать, что на характер наблюдаемых кривых рассеяния (в данном частном случае – оранжевая кривая на рис. 8) оказывает влияние диаграмма направленности приёмно-передающих антенн. Поэтому для сравнения параллельно нужно измерять зависимость «металл 0–30°» – синяя кривая на рис. 8.

Металлическая поверхность не является рассеивающей структурой, она отражает только в зеркальном направлении. Экспериментальные кривые для образца лежат ниже соответствующих значений для металлической поверхности.

Можно сделать вывод о том, что испытуемый образец не обладает выраженными рассеивающими свойствами.

На рис. 9 и 10 приведены частотные спектры образца РПМ при различных углах падения и наблюдения для двух поляризаций. Измерения проводились в диапазоне частот 2...5 ГГц. Цвета кривых соответствуют следующим значениям углов падения и отражения: синяя кривая – «0–0°»; оранжевая кривая – «0–15°»; зеленая кривая – «0–30°».

Приведенные кривые на рис. 9 и 10 построены с учетом диаграммы направленности антенны П6-23А для разных частот.

На кривых этих зависимостей наблюдаются резонансные провалы, имеющие малый коэффициент отражения (меньше -20дБ), что свидетельствует о наличии значительного уровня (порядка 90...99 %) поглощения в измеряемом образце РПМ.

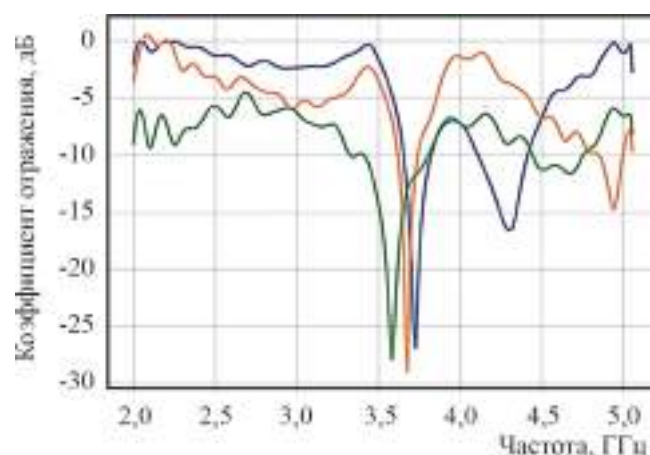


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента отражения (поглощения) от образца РПМ при различных углах падения и наблюдения (*TE*-поляризация)

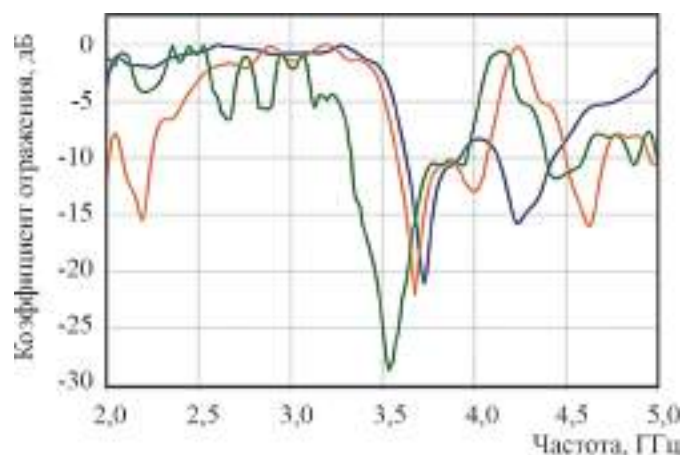


Рис. 10. Частотные зависимости коэффициента отражения (поглощения) от образца РПМ при различных углах падения и наблюдения (*TM*-поляризация)

Из рис. 9 и 10 видно, что при увеличении угла наблюдения происходит смещение резонанса в сторону низких частот.

Обычно измерения углового спектра рассеянного сигнала при испытаниях РПМ имеют особое значение тогда, когда образец содержит крупнопериодные неоднородности, сравнимые с длиной волны. В этом случае в угловом спектре рассеянного образцом сигнала могут присутствовать боковые лепестки. Проведённые измерения таких лепестков не выявили.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована лабораторная установка для оперативных оценок коэффициентов отражения от плоских образцов РПМ для разных углов падения и наблюдения ($0\text{--}30^\circ$) в диапазоне частот $2\text{...}5$ ГГц.

Приведены результаты измерения коэффициента отражения от образца РПМ для двух поляризаций (*TE*- и *TM*-поляризации).

Обнаружено существенное поглощение в исследуемом образце РПМ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Третьяков, С. А.** Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы / С. А. Третьяков // Радиотехника и электроника. – 1994 – Т. 39, № 10 – С. 1457 – 1470.
2. **Неганов, В. А.** Отражающие волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами / В. А. Неганов, О. В. Осипов. – М.: Радио и связь, 2006. – 280 с.
3. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах / О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, С. В. Маречек и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 2. – С. 51 – 57.
4. Особенности взаимодействия кольцевых киральных сред с электромагнитным излучением сантиметрового и дециметрового диапазонов / И. В. Воронин, С. А. Горбатов, О. А. Дьяконова, В. Ю. Науменко // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2012. – № 3 (95). – С. 11 – 18.

Статья поступила 3 августа 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ЕРОХИН В. В. Теория и практика проектирования. – М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 256 с.

В книге даётся представление о методах, средствах и алгоритмах, используемых в процессе проектирования микропроцессоров, рассматриваются подходы к разработке архитектуры микропроцессоров общего назначения, их основных блоков, проводится анализ методов построения рассматриваемых блоков с точки зрения теории алгоритмов. Это позволяет дать предварительную оценку описываемых методов и алгоритмов как с точки зрения занимаемой площади, так и по их быстродействию – основных показателей качества проектирования электронной аппаратуры. В книге приведены RTL коды базовых алгоритмов, используемые для построения блоков микропроцессоров, что позволяет синтезировать их принципиальные электрические схемы средствами стандартных САПР.

Описанные в книге методы и алгоритмы дают возможность сильно упростить самостоятельную разработку как архитектуры микропроцессоров в целом, так и разработку их отдельных блоков.

ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОПЫТ

УДК 621.317

ВОПРОСЫ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ

В. В. Самков, С. Е. Баранов, А. П. Баринов, М. А. Ежов, В. А. Свиридов,
В. Н. Федоров, А. В. Евсеев

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

Произведен комплексный анализ работ по автоматизации стендового оборудования современного «умного производства» для оптимизации требований к построению системы мониторинга высоковольтных устройств измерительных стендов. Предложены шаги по модернизации существующего парка стендов на базе промышленного интернета вещей (IIoT) с учетом обобщенного мирового опыта и опыта авторов в части эргономики, архитектуры компьютерных систем и специфических требований к работе с высоковольтными цепями, причем по всем стадиям жизненного цикла стендов.

КС: мониторинг, стенд, IIoT, жизненный цикл, оператор, программное обеспечение

ISSUES OF MONITORING HIGH-VOLTAGE DEVICES OF MEASUREMENT STANDS

V. V. Samkov, S. E. Baranov, A. P. Barinov, M. A. Ezhov, V. A. Sviridov,
V. N. Fedorov, A. V. Evseev

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

The measurement equipment monitoring problems have been analysed using the research articles data in the field of smart manufacturing for high-voltage stands. The recommendations for full life-cycle monitoring of power supplies measurement stands based on the IIoT have been proposed.

Keywords: monitoring, stand, IIoT, life cycle, operator, software

1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития стендового измерительного оборудования широко используют различные информационные технологии, позволяющие не только автоматизировать процесс производства, но и снизить общие расходы.

Широко известны глобальные стратегии «Индустрия-4.0» в Германии, «Промышленный интернет» в США, инициатива «Сделано в Китае 2025» [1], где отмечается глубокое влияние на производство успехов в интернет-технологиях, интернете вещей, с обязательным мониторингом параметров, как правило, и продукции, и оборудования. В работе [2] представлен ещё более широкий подход с описанием новых организационно-правовых и психологических вопросов «умного производства». Например, проблема авторского сопровождения и ремонта автоматизированного оборудования.

Анализ известных технических решений позволяет выдвинуть предположение о теоретической возможности построения системы удаленного мониторинга измерительных высоковольтных стендов на профильном предприятии.

Целью данной работы является подготовка рекомендаций для разработки системы мониторинга высоковольтных узлов измерительных стендов в порядке их модернизации с учетом эргономических, аппаратных и программных особенностей высоковольтных устройств по всему их жизненному циклу и общих тенденций современного «умнеющего» производства. При этом ставится задача учесть известные технические и организационные решения автоматизированного управления, применимые к измерительным стендам, а также собственный опыт предприятия.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В ходе анализа научных и документальных источников выявлены основные направления применения информационных технологий в области автоматизации стендового измерительного оборудования в процессе производства источников электропитания.

Автор [3] по итогам эксплуатации универсальной системы классификации дефектов (the fault detection classification, FDC) делает заключение о необходимости её трёхмодульного построения: 1 – физическая система, 2 – киберсистема с функциями моделирования/анализа и 3 – их интеграция на основе интернета вещей и облачных технологий.

Успешные модели организации ремонта сложного технологического оборудования для полупроводникового производства, в том числе его мониторинга (в частности, анализа изменений параметров оборудования (predictive analytics)), приводят авторы в работе [4]. Такой подход получается средним по эффективности и стоимости между плановым ремонтом в заранее назначенные сроки и ремонтом по состоянию.

Термин «мониторинг» в данном случае, в соответствии с п. 3.11.3 ГОСТ Р ИСО 9000-2015, означает «определение (3.11.3) статуса системы (3.5.1), процесса (3.4.1), продукции (3.7.6), услуги (3.7.7) или действия» [5]. Статус, в свою очередь, присваивается по результатам измерений контрольных параметров и анализа полученных данных.

Возможные варианты параллельной обработки больших данных (генерация данных, сбор, хранение и анализ) представлены в работе [6]. Также анализируются возможности параллельного и распределенного программирования.

Вопросы сопровождения цифрового двойника изделия, например, для целей мониторинга его состояния освещаются в [7].

Работа [8] и обзор возможностей высоковольтных изолированных преобразователей на интерфейсе RS-485 и аналого-цифровых преобразователей [9] раскрывают возможности современной электронной компонентной базы для измерений электрических величин тока и напряжения под высоким электрическим напряжением (до 5,7 кВ, эфф.).

При этом в указанных работах не затронуты особенности такого специфического раздела промышленности, как автоматизация высоковольтного стендового оборудования. Особенно в части взаимодействия киберпространства, с одной стороны, и оператора с его психологическими и физическими особенностями – с другой.

Для решения данной проблемы авторами предложен комплекс рекомендаций по организации структуры автоматизированной системы мониторинга на базе промышленного интернета вещей (IIoT) и существующего парка стендов.

Реализация указанной идеи потребовала создания экспериментального стенда для тестирования высоковольтных источников электропитания с удаленным управлением через платформу промышленного интернета вещей «IoT.Istok» [10] и разработки соответствующего программного обеспечения для ЭВМ, в том числе для управления приборами серии Щ02П [11].

В процессе работы операторов с экспериментальным стендом выявлены особенности тестирования источников электропитания при использовании удаленного доступа через промышленный интернет вещей. На основе анализа этих особенностей и требований стандартов Российской Федерации выработаны следующие рекомендации для разработки системы мониторинга высоковольтных узлов измерительных стендов:

- Если время задержки реакции на управляющее воздействие больше 1 с, то восприятие ответной реакции понижается, и в таком случае необходима предварительная установка обратной связи.
- Принцип исправления ошибок. Системы должны быть способны выполнить проверку наличия ошибок в своей работе и предоставить оператору средства для того, чтобы исправить выявленные ошибки.
- Принцип выделения достаточного времени на обработку ошибок. Оператору должно быть предоставлено достаточное время для восстановления системы при возникновении любых ошибок.
- Время сохранения информации. За время сохранения воспринятой информации (половина промежутка времени, по истечении которого информация полностью стирается из памяти) принимают промежуток времени, равный приблизительно от 0,1 до 1 с для зрительной памяти и приблизительно от 0,9 до 3,5 с для слуховой памяти.
- Время реакции моторной системы. Время реакции используется для обозначения времени с момента появления у оператора ощущения воздействия внешнего сигнала до момента реакции со стороны его моторной системы. Простая рефлекторная дуга имеет время реакции приблизительно 0,04 с, в то время как самое быстрое время реакции с включением мозга составляет приблизительно 0,15 с. Обычный диапазон времени реакции на ожидаемые сигналы составляет от 0,2 до 0,3 с. Когда сигнал поступает неожиданно, время реакции превышает 0,5 с.
- Проектирование должно быть основано на точном определении предполагаемых пользователей, задач и среды.
 - Пользователи должны быть вовлечены в проектирование и разработку.
 - Для улучшения проекта должна быть выполнена его человекоориентированная оценка.
 - Совершенствование проекта должно быть итеративным.
 - Проект должен учитывать опыт пользователя.
 - В группу проектирования должны быть включены специалисты с навыками и знаниями в различных областях.
- Подключение компьютерной сети к высоковольтным и высокопотенциальным узлам стендов может решаться применением распространенных изоляторов через волоконно-оптический кабель.
- Конкурирующим выбором изолятора сигналов компьютерной сети до напряжения 5,7 кВ (эфф.) может стать изоляция через импульсные трансформаторы.

Применение данных рекомендаций при автоматизации с использованием технологии промышленного интернета вещей позволяет создавать надежные и эффективные системы мониторинга высоковольтных устройств измерительных стендов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы авторами данной статьи:

- 1) произведен анализ проблем и перспектив автоматизации мониторинга высоковольтного измерительного оборудования источников электропитания на современном производстве;
- 2) разработано прикладное программное обеспечение для стенда испытаний источника электропитания, в том числе программа для ЭВМ «Модуль удаленного управления щитовыми электроизмерительными приборами серии Щ-02П платформы промышленного интернета вещей «IIoT.Istok»;
- 3) выработаны рекомендации для разработки системы мониторинга высоковольтных узлов измерительных стендов;
- 4) получен навык работы с дистанционным мониторингом измерительного высоковольтного стенда при использовании платформы промышленного интернета вещей «IIoT.Istok».

По итогам работы сделан вывод о возможности повышения производительности стендов путём автоматизации проведения технологических операций, даны практические рекомендации, в том числе пути развития средств мониторинга высоковольтных узлов измерительных стендов на базе «IIoT.Istok».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tao, Fei.** Data-driven smart manufacturing / Tao Fei & Qi Qinglin & Liu Ang // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 48. – P. 157– 169. – DOI:10.1016/j.jmsy.2018.01.006.
2. **Kusiak, A.** Smart manufacturing must embrace big data / A. Kusiak // Nature. – Vol. 544(7648). – P. 23 – 25. – DOI:10.1038/544023a.
3. **Lee H.** Framework and development of fault detection classification using IoT device and cloud environment // J. Manuf. Syst. – 2017. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.02.007>.
4. **Munirathinam, S.** Big data predictive analytics for proactive semiconductor equipment maintenance / S. Munirathinam, B. Ramadoss // 2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). – DOI:10.1109/bigdata.2014.7004320.
5. Мониторинг // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Электронный ресурс]. – URL: <https://rostcertification.ru/мониторинг/> (дата обращения: 23.09.2022).
6. Programming big data analysis: principles and solutions / L. Belcastro, R. Cantini, F. Marozzo [et al.] // J. Big Data. – 2022. – Vol. 4. – URL: <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00555-2>.
7. Digital twin in industry: state-of-the-art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15 (4). – P. 2405 – 2415. – DOI:10.1109/tii.2018.2873186.
8. **Скотт Уэйн.** Применение устройств гальванической развязки цифрового сигнала iCoupler в интерфейсах RS-232, RS-485 и CAN // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 74 – 79.
9. Решения Analog Devices для гальванической изоляции: Обзор технологий и новинок (материалы вебинара). Мероприятие прошло 27.04.2021. – URL: <https://www.compel.ru/lib/144473>.
10. Experimental stand for setting up a power supply as the beginning of targeted development of automated control systems for high-tech equipment / V. V. Samkov, S. E. Baranov, A. P. Barinov [et al.] // AIP Conference Proceedings 2486, 020029 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0105566>.
11. **Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2022663004.** Модуль удаленного управления щитовыми электроизмерительными приборами серии Щ-02П платформы промышленного интернета вещей «IIoT.Istok»: заявка № 2022662697: дата поступления 11.07.2022: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.07.2022 / В. В. Самков, А. П. Баринов, В. А. Свиридов [и др.]; правообладатель АО «НПП «Исток» им. Шокина» (RU).

Статья поступила 30 июня 2023 г.

ИСТОРИЯ

УДК 9

«ИСТОК» УКАЗАЛ НАМ ДОРОГУ ПО ЖИЗНИ

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

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

«ISTOK» SHOWED US THE ROAD OF LIFE

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

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

Благодаря деятельности министра электронной промышленности Александра Ивановича Шокина, академика Николая Дмитриевича Девяткова, членов дирекции «Истока» (от НИИ-160 до НПП «Исток»), кадровых и информационных служб, дружеским и родственным связям сотрудников предприятия, увеличивающимся с годами в геометрической прогрессии, с середины сороковых годов и пяти последующих десятилетий «почтовый ящик № 17» (НИИ-160) в поселке (городе) Фрязино Московской области стал известным в стране предприятием, куда на работу приезжали ежегодно до четырехсот молодых специалистов из различных вузов страны по специальности «Электронная техника» или близких к ней. Подавляющее число из этих специалистов навсегда связали свою жизнь с «Иском» или с возникшими на его основе другими предприятиями наукограда Фрязино.

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ ПОКРОВСКИЙ



Е. Н. Покровский

Е. Н. Покровский родился 19 сентября 1939 года в г. Муроме Владимирской области. В 1963 г. окончил Московский энергетический институт, с этого же года начал работать на «Истоке». Последовательно занимал должности инженера, старшего инженера, начальника участка, начальника цеха, заместителя директора завода, первого заместителя генерального директора – директора по производству.

Талант организатора высокотехнологичного производства начал проявляться у Евгения Николаевича уже в должности начальника цеха. В короткие сроки ему с сотрудниками удалось освоить выпуск новых для тематики «Истока» электронных приборов – лазеров. С его именем связаны выдающиеся достижения в выпуске первых высококачественных отечественных газовых лазеров. В 1989 году Е. Н. Покровский возглавил цех № 35, выпускающий лазеры различных модификаций. Этот опыт работы позволил Евгению Николаевичу в дальнейшем

довести до совершенства выпуск атомно-лучевых трубок на парах цезия для систем единого времени и стандартов частоты, используемых в системах глобального позиционирования ГЛОНАСС.

С 2004 года Е. Н. Покровский – первый заместитель генерального директора «Истока» – директор производства. На протяжении многих лет Е. Н. Покровский обеспечивал руководство подразделениями и службами предприятия по организации промышленного выпуска изделий различного класса: от электронных приборов (клистронов и ЛБВ, ГИС и МИС) до сложнейших систем и комплексированных устройств для наземных и бортовых РЛС.

Е. Н. Покровский – лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2003 г.). За трудовые достижения он награжден орденом «Знак Почета» и тремя медалями. Ему присвоены высокие звания «Почетный радист РФ» и «Заслуженный работник промышленности Московской области».

Евгений Николаевич скончался в 2022 г.

ЕВГЕНИЙ ИСАЕВИЧ ГОЛАНТ

Евгений Исаевич Голант родился 24 февраля 1945 года в семье выпускников Московского энергетического института (МЭИ). Окончил Фрязинскую школу № 1, затем МЭИ, куда поступил по примеру своих родителей. Здесь он познакомился со студенткой Наталией, с которой связал свою жизнь на многие десятилетия. После завершения учебы в МЭИ они пришли работать на «Исток»: Евгений Исаевич – в отделение 4, Наталия Васильевна – в отдел 240. Супруги воспитали дочь Марию и сына Александра.

Коренной поворот в научно-технической деятельности Е. И. Голанта произошел в 1972 году, когда в теоретическом отделе 110 была образована новая лаборатория, № 116, начальником которой был назначен доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской премии А. С. Тагер. Евгений Исаевич стал первым сотрудником этой лаборатории. Теоретические исследования в лаборатории А. С. Тагера были связаны в первую очередь с углубленным пониманием физики работы диодов и транзисторов СВЧ, проектированием конкретных устройств на их основе и созданием соответствующего математического обеспечения. Е. И. Голантом в этот период был выполнен большой комплекс работ: были решены математические проблемы численного решения уравнений в частных производных; создан общий алгоритм расчета лавинно-пролетных диодов (ЛПД) в режиме большого сигнала; разработаны программы расчета ЛПД миллиметрового диапазона длин волн; выполнены тепловые расчеты ЛПД в импульсном режиме работы. Выдающимся достижением является развитый им новый подход к интегрированию систем дифференциальных уравнений в частных производных, названный им методом «прогонки», который был выполнен на высоком математическом уровне и опубликован в «Журнале вычислительной математики и математической физики». До настоящего времени Евгений Исаевич является единственным сотрудником «Истока», который напечатал статью в этом отечественном всемирно известном математическом журнале.



Е. И. Голант

Важнейший этап в развитии полупроводниковой электроники СВЧ был связан с переходом к квантово-размерным структурам. Теоретические исследования возможностей и путей построения нанoeлектронных приборов СВЧ, начатые в середине 80-х годов А. С. Тагером, Е. И. Голантом и А. Б. Пашковским, оформились в самостоятельное научное направление – теоретическая нанoeлектроника. Ими был разработан новый вариант квантовой теории возмущений, позволяющий сравнительно просто решать задачи о прохождении электронов через ограниченное число потенциальных барьеров и квантовых ям под действием электрических полей СВЧ.

Работы, проводимые в лаборатории Александра Семеновича Тагера, были тесно связаны с конкретными СВЧ-устройствами для отечественных новейших радиолокационных систем и традиционной радиоэлектронной аппаратуры.

Евгений Исаевич был подлинным энтузиастом физической культуры и спорта. Когда-то свой 40-летний юбилей он отпраздновал на лыже, пробежав дистанцию в 40 километров. Возрастные этапы жизни для него не являлись помехой. Он совершал ежедневные кроссы или многокилометровые пешие прогулки, круглый год купался в озере Большом. Евгений Исаевич обладал недюжинным талантом и в литературной деятельности. В архивах лаборатории А. С. Тагера хранятся многочисленные стихи и юмористические поздравления, написанные им к юбилейным датам сотрудников.

Нам приятно сознавать, что на протяжении более 40 лет мы работали с разносторонним математиком с широким охватом задач великой науки и тонким знатоком полупроводниковой техники, заботливым мужем, любящим отцом, надежным товарищем и прекрасным человеком.

Евгений Исаевич скончался в мае 2021 г.

ГЕОРГИЙ ДМИТРИЕВИЧ КОЛМОГОРОВ



Г. Д. Колмогоров

Г. Д. Колмогоров родился 10 ноября 1929 года в с. Верблюжье Омского округа Сибирского края РСФСР.

Трудовую деятельность Г. Д. Колмогоров начал рабочим на сибирском заводе, вместе со всем советским народом, ковавшим Победу в Великой Отечественной войне. После окончания школы трудового резерва Георгий с красным дипломом окончил электромеханический техникум, а в 1963 году – Новосибирский электромеханический институт. Затем последовательно он прошел все должности от мастера участка до директора крупного объединения заводов всесоюзного масштаба.

В 1966 году в возрасте 35 лет Г. Д. Колмогоров был назначен директором Фрязинского завода полупроводниковых приборов. Не все давалось директору сразу. Но выбор сделан, и молодой руководитель, невзирая на трудности, с головой погрузился в проблемы вверенного ему коллектива. В 1972 году заводу было присвоено новое название – завод имени 50-летия СССР.

За десятилетие Г. Д. Колмогоров превратил завод в стабильно работающее мощное производственное объединение. Фрязинский завод по праву считался отечественным флагманом в производстве полупроводниковых приборов. Выпуск полупроводниковых диодов и транзисторов

принял массовый характер. Приборы, изготавливаемые на этом заводе, позднее ставшем объединением «Электронприбор», составляли сердцевину практически всех отечественных телевизоров и радиоприемников.

Г. Д. Колмогоров – крупный ученый, доктор технических наук, профессор, академик Российской инженерной академии. Член КПСС с 1952 года, кандидат в члены ЦК КПСС в 1986 – 1990 гг., депутат Верховного Совета СССР 11-го созыва. За большие заслуги перед отечественной наукой и производством он удостоен Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР, награжден орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени и другими наградами.

На научном поприще Георгий Дмитриевич проявил себя уникальным изобретателем, вдумчивым ученым, пытливым исследователем. Интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям в области твердотельной электроники для него не был формальным интересом крупного руководителя. Он всегда стремился понять суть сложнейших физических явлений, протекающих в приборах, начиная от диодов и заканчивая сложнейшими интегральными схемами. Обладая незаурядным даром изобретателя, Г. Д. Колмогоров с уважением относился к труду новаторов, способствовал широкому внедрению новых идей в производство.

Благодаря применению оригинальных технологических методов изготовления биполярных транзисторов и интегральных схем на их основе, подтвержденных десятком авторских свидетельств на изобретения (среди авторов которых был будущий начальник лаборатории НПК-8 «Истока» Юрий Исаевич Молдованов), завод полупроводниковых приборов сэкономил для страны 45 т золота, 18 т серебра и много других дорогостоящих материалов.

Учитывая огромные организаторские способности Георгия Дмитриевича, в 1975 году он был назначен первым заместителем министра промышленности средств связи (МПСС), а позднее – председателем Госкомстандарта СССР. Даже когда Г. Д. Колмогоров переехал жить в столицу, он не прерывал связь с Фрязино, считая его своим родным городом, где сформировался и окреп его талант руководителя и государственного деятеля.

Георгий Дмитриевич относится к числу увлеченных, разносторонне талантливых людей. Фрязинцам хорошо известны его успехи в области изобразительного искусства. Он горячий поклонник различных видов спорта, в том числе волейбола, футбола, тенниса.

Статья поступила 5 июня 2023 г.



ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в течение 2023 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

I. История

1. *Алексеевко З.Т.* – Михаил Борисович Голант (к 100-летию со дня рождения). – Вып. 1 (557). – С. 68 – 71.
2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – «Исток» указал нам дорогу по жизни. – Вып. 4 (560). – С. 86 – 89.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Мы «истоковцы». – Вып. 2 (558). – С. 83 – 109.

II. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д., Полников И.Г.* – 50 лет созданию нового направления – биомедицинской радиоэлектроники. Академик Н. Д. Девятков. – Вып. 1 (557). – С. 58 – 67.
2. *Чеканов А.В., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Изучение механизма антиагрегантного действия микроволнового излучения. – Вып. 2 (558). – С. 69 – 76.

III. Производственно-технический опыт

1. *Самков В.В., Баранов С.Е., Баринков А.П., Ежов М.А., Свиридов В.А., Федоров В.Н., Евсеев А.В.* – Вопросы мониторинга высоковольтных устройств измерительных стендов. – Вып. 4 (560). – С. 82 – 85.

IV. Радиоэлектронные устройства

1. *Батаев В.Я., Гринев А.Ю., Багно Д.В., Бронников Д.В., Демиевский В.В., Зайкин А.Е., Ильин Е.В.* – Двухдиапазонные совмещённые антенные системы на основе метаструктур со свойствами частично отражающей поверхности. – Вып. 3 (559). – С. 51 – 66.
2. *Перегонов С.А.* – Микромодуляция радиосигналов и/или параметров узлов как способ оптимизации характеристик и конструкции СВЧ радиоэлектронных устройств. – Вып. 1 (557). – С. 6 – 15.
3. *Перегонов С.А., Криворучко В.И., Орлов Ю.А.* – ФАР для антенны-аппликатора радиотермографа органов тела человека. – Вып. 2 (558). – С. 6 – 22.

V. Твёрдотельная электроника

1. *Богданов С.А., Карпов С.Н., Пашковский А.Б., Котекин Р.А., Абдулов М.М.* – Всплеск дрейфовой скорости электронов в двухканальных гетероструктурах с дополнительными цифровыми потенциальными барьерами. – Вып. 4 (560). – С. 28 – 37.
2. *Гусарев А.В., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А., Акафьева Н.А.* – Миниатюрные двухзачерные фотонно-кристаллические резонаторы с фрактальными резонансными элементами, выполненными на печатной плате. – Вып. 4 (560). – С. 19 – 27.





3. Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Федоров Н.А., Медянова Е.В. – Модернизация конструкции гибридной интегральной схемы ГУН СВЧ-диапазона. – Вып. 1 (557). – С. 46 – 51.
4. Иовдальский В.А., Ключев С.Б. – Улучшение электрических характеристик симметричной щелевой линии. – Вып. 4 (560). – С. 38 – 47.
5. Карпов С.Н. – Методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе. – Вып. 2 (558). – С. 61 – 68.
6. Кишинский А.А., Чернов В.Г., Кондратенко А.В., Шишкин Д.А., Сорвачев П.С., Редька Ал.В., Бутерин А.В., Щербаков А.С., Миннебаев В.М., Миннебаев С.В. – Особенности проектирования АФАР радиолокационных комплексов с применением СВЧ интегральных схем собственной разработки. – Вып. 3 (559). – С. 82 – 95.
7. Ключев С.Б., Демиевский В.В. – Электродинамическое моделирование многослойного перехода для интегральных схем СВЧ. – Вып. 3 (559). – С. 96 – 101.
8. Коломин В.М., Филиппов И.В., Карасёв Н.С., Рыбкин В.Н., Смирнова А.А., Иовдальский В.А. – Улучшение характеристик фильтров на основе диэлектрических резонаторов из материала БМТ. – Вып. 4 (560). – С. 48 – 52.
9. Мартынов Я.Б., Синкевич В.Ф. – Лавинно-инжекционная неустойчивость и лавинный пробой в широкозонных гетероструктурных полевых транзисторах. – Вып. 4 (560). – С. 6 – 18.

VI. Технология и материаловедение

1. Анисимов А.Г., Безлепкин В.А., Мали В.И., Михлин Ю.Л., Токарева Е.Ю., Немущенко Д.А. – Электрофизические характеристики высокоплотной корундовой керамики, спеченной в условиях SPS. – Вып. 1 (557). – С. 52 – 57.
2. Бабкова Н.И., Бессонов Д.А., Горшкова Е.В., Соляник В.А., Шестеркин В.И. – Применение лазерной абляции для обеспечения вакуумно-плотного паяного соединения окна из пиролитического нитрида бора в СВЧ-выводе энергии. – Вып. 4 (560). – С. 66 – 73.
3. Васильев В.И., Дьяконова О.А., Денисюк Р.Н. – Исследование отражательных свойств радиопоглощающего материала с киральным слоем. – Вып. 4 (560). – С. 74 – 81.
4. Васильев В.И., Дьяконова О.А., Насонов В.А. – Согласующие плавные рупорные антенны миллиметрового диапазона длин волн. – Вып. 2 (558). – С. 52 – 60.
5. Головкин П.А. – О технологических особенностях получения качественных полос и лент из немагнитного сплава вакуумной плавки НММц 38-2В. – Вып. 4 (560). – С. 58 – 65.
6. Дерябкин А.В., Дубкова А.С., Куликов Е.Н., Фёдоров Ю.Ю., Гордеев С.К., Корчагина С.Б. – Двухстадийная планаризация поверхности поликристаллических алмазных подложек и композиционных материалов на основе алмаза. – Вып. 3 (559). – С. 17 – 23.
7. Дубкова А.С., Пухов Д.В., Гудкова Н.Б., Рябов В.Н., Ильюшина Н.Д., Кольцов В.Б. – Оптимизация технологии формирования контактного слоя кремния p -типа для p - i - n -диодов. – Вып. 4 (560). – С. 53 – 57.
8. Жуков А.С. – Изготовление изделий из ферромагнитных материалов на основе сплавов систем Fe–Cr–Ni (–Co) с помощью аддитивных технологий. – Вып. 3 (559). – С. 6 – 16.
9. Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Карасёв Н.С., Смирнова А.А. – Некоторые методики измерения свойств керамических материалов. – Вып. 2 (558). – С. 43 – 51.



10. Соколов Д.А., Коломин В.М., Карасев Н.С., Юрасов А.Н., Тарасовский В.П., Соколов А.Д. – Анализ технологических приемов получения станната кальция методом твердофазового синтеза. – Вып. 3 (559). – С. 34 – 42.

11. Уржумцев А.Н., Мальцева В.Е., Волегов А.С. – Магнитометрический подход к установлению механизмов перемагничивания в постоянных магнитах типа Nd-Fe-B. – Вып. 3 (559). – С. 43 – 50.

12. Чернышев Б.Д., Щетинин И.В. – Исследование возможности получения постоянных магнитов на основе систем Fe-Cr-Co и Fe-Sr-O методами аддитивных технологий. – Вып. 3 (559). – С. 24 – 33.

VII. Экономика

1. Шутов Д.Г., Александров В.Р. – Алгоритм учета движения и восполнения материалов на предприятии радиоэлектронной отрасли. – Вып. 2 (558). – С. 77 – 82.

VIII. Электровакуумные приборы

1. Галина Н.М., Зубилов Р.М., Поливникова О.В., Симонов К.Г., Перминов И.Г., Ключников Н.А., Романов В.А. – Катод для сверхмощного клистрона. – Вып. 3 (559). – С. 67 – 75.

2. Калачев А.Д., Царев В.А. – Широкополосный малогабаритный многолучевой клистрон Кидиапазона. – Вып. 1 (557). – С. 34 – 45.

3. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Акафьева Н.А. – Исследование многочастотного четырехлучевого квазифрактального клистронного резонатора. – Вып. 2 (558). – С. 23 – 32.

4. Моисеев Д.С., Юнаков А.Н., Евсеев С.В. – Исследование многотрубного многоззорного резонатора для мощного двухтрубного многолучевого клистрона С-диапазона с увеличенной в 2 раза полосой рабочих частот. – Вып. 1 (557). – С. 25 – 33.

5. Симонов К.Г., Юнаков А.Н., Евсин Д.В., Ключников Н.А., Лагутин Н.В., Перминов И.Г., Романов В.А., Степанов А.В., Поливникова О.В., Галина Н.М., Зубилов Р.М., Галдецкий А.В., Голованов Н.А., Савин А.Н., Гришин С.И., Неретина Т.А. – Сверхмощный 20-МВт клистрон S-диапазона частот. – Вып. 3 (559). – С. 76 – 81.

6. Столяров И.И. – Динамическая имитационная модель перспективного квантового стандарта частоты для исследования взаимосвязи мощности сигнала возбуждения и выходных характеристик устройства. – Вып. 2 (558). – С. 33 – 42.

7. Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.А., Арион О.А., Комраков П.А., Соляников А.В. – Режимы включения/выключения ЭОС с кольцевым катодом в ЛБВ с низковольтным управлением. – Вып. 1 (557). – С. 16 – 24.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2023 г.

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

Абдулов М.М. V.1
Акафьева Н.А. V.2; VIII.3
Александров В.Р. VII.1
Алексеев З.Т. I.1
Анисимов А.Г. VI.1
Арион О.А. VIII.7
Бабкова Н.И. VI.2
Багно Д.В. IV.1
Балыко А.К. I.2, 3
Балыко Т.А. I.2, 3
Баранова О.А. II.2
Баранов С.Е. III.1
Баринов А.П. III.1
Батаев В.Я. IV.1
Безлепкин В.А. VI.1
Бессонов Д.А. VI.2
Богданов С.А. V.1
Бронников Д.В. IV.1
Бутерин А.В. V.6
Васильев В.И. VI.3, 4
Волегов А.С. VI.11
Галдецкий А.В. VIII.5
Галина Н.М. VIII.1, 5
Гнусарев А.В. V.2
Голованов Н.А. VIII.5
Головкин П.А. VI.5
Гордеев С.К. VI.6
Горшкова Е.В. VI.2
Горюнов И.В. V.3
Гринев А.Ю. IV.1
Гришин С.И. VIII.5
Гудкова Н.Б. VI.7
Демиевский В.В. IV.1; V.7
Денисюк Р.Н. VI.3

Дерябкин А.В. VI.6
Дубкова А.С. VI.6, 7
Дьяконова О.А. VI.3, 4
Евсеев А.В. III.1
Евсеев С.В. VIII.4
Евсин Д.В. VIII.5
Ежов М.А. III.1
Жуков А.С. VI.8
Зайкин А.Е. IV.1
Зубилов Р.М. VIII.1, 5
Ильин Е.В. IV.1
Ильюшина Н.Д. VI.7
Иовдальский В.А. V.3, 4, 8
Казаринов К.Д. II.1, 2
Калачев А.Д. VIII.2
Карасев Н.С. V.8; VI.9, 10
Карпов С.Н. V.1, 5
Кищинский А.А. V.6
Клюев С.Б. V.4, 7
Ключников Н.А. VIII.1, 5
Коломийцева Н.А. VIII.7
Коломин В.М. V.8; VI.9, 10
Кольцов В.Б. VI.7
Комраков П.А. VIII.7
Кондратенко А.В. V.6
Корчагина С.Б. VI.6
Котекин Р.А. V.1
Криворучко В.И. IV.3
Куликов Е.Н. VI.6
Лагутин Н.В. VIII.5
Мали В.И. VI.1
Мальцева В.Е. VI.11
Мартынов Я.Б. V.9
Медянцева Е.В. V.3



Миннебаев В.М. V.6
Миннебаев С.В. V.6
Мирошниченко А.Ю. V.2; VIII.3
Михлин Ю.Л. VI.1
Моисеев Д.С. VIII.4
Морев С.П. VIII.7
Насонов В.А. VI.4
Немущенко Д.А. VI.1
Неретина Т.А. VIII.5
Орлов Ю.А. IV.3
Пашковский А.Б. V.1
Перегонов С.А. IV.2, 3
Перминов И.Г. VIII.1, 5
Поливникова О.В. VIII.1, 5
Полников И.Г. II.1, 2
Пухов Д.В. VI.7
Редька Ал.В. V.6
Романов В.А. VIII.1, 5
Рыбкин В.Н. V.8; VI.9
Рябов В.Н. VI.7
Савин А.Н. VIII.5
Самков В.В. III.1
Свиридов В.А. III.1
Симонов К.Г. VIII.1, 5
Синкевич В.Ф. V.9
Смирнова А.А. V.8; VI.9
Соколов А.Д. VI.10
Соколов Д.А. VI.10

Соляник В.А. VI.2
Соляников А.В. VIII.7
Сорвачев П.С. V.6
Степанов А.В. VIII.5
Столяров И.И. VIII.6
Тарасовский В.П. VI.10
Терешкин Е.В. I.2, 3
Токарева Е.Ю. VI.1
Уржумцев А.Н. VI.11
Федоров В.Н.. III.1
Федоров Н.А. V.3
Фёдоров Ю.Ю. VI.6
Филин Ю.Ю. VIII.7
Филиппов И.В. V.8
Царев В.А. V.2; VIII.2
Чеканов А.В. II.2
Чернов В.Г. V.6
Чернышев Б.Д. VI.12
Чернышев М.А. VIII.3
Шестеркин В.И. VI.2
Шишкин Д.А. V.6
Шутов Д.Г. VII.1
Щелконогов В.А. II.2
Щербаков А.С. V.6
Щетинин И.В. VI.12
Юнаков А.Н. VIII.4, 5
Юрасов А.Н. VI.10





=== НОВЫЕ КНИГИ ===

МАСЛОВ А. Р. Технологии производства микродеталей. – Москва: Техносфера, 2023.

В книге представлены основные элементы технологии микрообработки деталей машиностроительного производства, медицинской техники и инструментария, радиотехники и оптических систем.

Дано описание основных видов оборудования с использованием многоцелевых станков с ЧПУ для обработки резанием заготовок микродеталей из основных применяемых конструкционных материалов. Даны сведения о получении микроизделий и малоразмерных деталей литьём и методами аддитивных технологий.

Приведены сведения об инструментарии и методах диагностирования состояния технологических процессов микрообработки. Дано представление о современных способах повышения надёжности технологических систем путём нанесения износостойких и антифрикционных покрытий методами вакуумно-плазменных технологий.

Приведены сведения об инструментальных системах и средствах инструментального обеспечения, повышающих эффективность микрообработки. Дан обзор средств измерения микродеталей и способов исследования поверхностных структур в наноразмерном диапазоне.

ОВЧИННИКОВ В. В. Сварочное производство. Сварочные материалы. Свойства сварных соединений. Дефекты сварных соединений: учебник / В.В. Овчинников, М.А. Гуреева. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 508 с.: илл., табл.

Рассматриваются сведения по различным сварочным материалам, рекомендации по их выбору для выполнения сварных конструкций из конкретных сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Представлены методики расчёта необходимого количества электродов, присадочного металла и защитных газов для выполнения сварных соединений. Большое внимание уделено классификации дефектов сварных соединений, причинам их образования, методам выявления и способам устранения.





=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ОВЧИННИКОВ В. В. Сварочное производство: современные процессы сварки: учебник / В.В. Овчинников, М.А. Гуреева. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 496 с.: илл., табл.

Рассмотрены вопросы физических основ, классификации процессов сварки, свариваемости и структуры сварных соединений. Показаны технологические особенности сварки различных конструкционных материалов, а также их наплавки и резки. Большое внимание уделено описанию современных сварочных материалов.

РУБЦОВ Е. А. Авиационные радиоэлектронные системы и комплексы и основы их применения: учебное пособие / Е.А. Рубцов, О.М. Шикавко. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.: илл., табл.

Приведены основные характеристики бортовых радиоэлектронных систем и комплексов: радиовысотомеров, самолётных ответчиков систем вторичной радиолокации, бортовых радиолокационных станций, бортовых систем предупреждения близости земли, бортового навигационно-посадочного оборудования, доплеровских измерителей скорости и угла сноса, спутниковых навигационных систем, аппаратуры автоматического зависящего наблюдения, радиосвязного оборудования воздушных судов, бортовых систем предупреждения столкновения, бортовых пилотажно-навигационных комплексов, принципы их функционирования, типы и размещение применяемых антенн, особенности лётной эксплуатации. Рассматриваются общие вопросы лётной эксплуатации бортовых радиоэлектронных систем и комплексов. Отражены особенности радиооборудования воздушных судов нового поколения, приведён типовой состав бортовых радиоэлектронных систем и комплексов современных воздушных судов.





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

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

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), должность, ученую степень,

последующее специальное образование (аспирант, соискатель, докторант, студент, магистрант), место работы, город, страна, домашний и электронный адрес, телефон;

- информацию о финансировании статьи (грантовая поддержка).

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 фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDraw;
- 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 Р 7.0.100–2018 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 2024 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 оформить заказ, 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 по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», отдел сбыта; тел.: 8(495)465-88-67. Отчетные документы высылаются с каждым номером сборника.

ЗАКАЗ

Прошу принять заказ на подписку научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2024 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)



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 1.12.2023 г.

Усл. п. л. 12,0

Формат 60×88^{1/8}

Отпечатано Печатная компания ООО «ТипоГрафф»
г. Москва

Уч.-изд. л. 12,5
Индекс 36292

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





Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2023, вып. 4(560), с. 1-98

Подписной индекс 36292

