



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (536)

2018

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(536)

2018

Издается с 1950 г.

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (зам. главного редактора),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (зам. главного редактора),
Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
Б.Ф. Горбик, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малышик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченко**,
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
д.ф.-м.н. **А.И. Панас**, д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**,
к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
В.П. Стебунов (ответственный секретарь),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь 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», 2018 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(536)

2018

Founded in 1950 г.

Editor-in-chief

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

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
U.A. Budzinsky, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
B.F. Gorbik, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**,
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**, C.T.Sc. **V.G. Lapin**,
D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov**,
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**, D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**,
C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**,
D.T.Sc., professor **R.A. Silin**, D.T.Sc. **K.G. Simonov**,
V.P. Stebunov (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**

The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate ПИ № ФС 77-24651 date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

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

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

- Новиков С.И., Пашковский А.Б., Мартынов Я.Б., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Маковецкая А.А.* – Особенности заполнения размерно-квантованных подзон в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием..... 6
- Корчагин И.П., Калита Д.В.* – Многоканальный усилитель X-диапазона с суммарной выходной мощностью не менее 55 Вт..... 21
- Маковецкая А.А., Калита Д.В., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Щербаков С.В., Новиков С.И., Журавлев К.С., Торопов А.И.* – Усилительный каскад X-диапазона частот с выходной мощностью более 6 Вт на гетероструктурных полевых транзисторах с донорно-акцепторным легированием..... 25

Электровакуумные приборы

- Акимов П.И., Никитин А.П., Сыровой В.А.* – К вопросу об адекватности численных моделей при расчете электронно-оптических систем приборов СВЧ с осесимметричными и ленточными электронными пучками..... 32

Радиоэлектронные устройства

- Перегонов С.А.* – Звуковые сигналы СВЧ-стереорадара для слепых..... 43

Технология и материаловедение

- Дяденко М.В., Любецкий Н.В., Карпович В.А., Петуховская А.Г.* – Стекловидные материалы с различным комплексом электрофизических характеристик..... 52

Медицинская электроника

- Казаринов К.Д., Борисенко Г.Г., Полников И.Г.* – Влияние ЭМИ низкой интенсивности, микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках..... 60

Экономика

- Чекаданова М.В.* – Инновационно-территориальный радиоэлектронный кластер как часть национальной инновационной системы России..... 69

Краткие сообщения

- Балыко И.А., Балыко А.К.* – Число ветвящихся деревьев графа и число ионизированных частиц в полупроводнике..... 75

История

- Балыко А.К.* – 90-летний юбилей Роберта Андреевича Силина..... 83

CONTENTS

Solid-state electronics

- Novikov S.I., Pashkovsky A.B., Martynov Ya.B., Lapin V.G., Lukashin V.M., Makovetskaya A.A.* – Peculiarities of the size-quantized subbands filling in inverted heterostructures with donor-acceptor doping..... 6
- Korchagin I.P., Kalita D.V.* – X-band multichannel amplifier with a total output power not less than 55 W..... 21
- Makovetskaya A.A., Kalita D.V., Pchelin V.A., Lapin V.G., Pashkovsky A.B., Lukashin V.M., Scherbakov S.V., Novikov S.I., Zhuravlev K.S., Toropov A.I.* – X-band amplifying stage with more than 6 W power on DA-DpHEMTs 25

Electrovacuum devices

- Akimov P.I., Nikitin A.P., Syrovoy V.A.* – To adequacy of numerical models for electron-optical system calculations of microwave tubes with axisymmetric and sheet electron beams.... 32

Radioelectronic devices

- Peregonov S.A.* – Sound signals of microwave stereo radar for blind people..... 43

Technology and material science

- Dyadenko M.V., Lyubetsky N.V., Karpovich V.A., Petukhovskaya A.G.* – Vitreous materials with different complex of electrophysical characteristics..... 52

Medical electronics

- Kazarinov K.D., Borisenko G.G., Polnikov I.G.* – The influence of electromagnetic radiation of low intensity, microwave range on oxidizing processes in cells..... 60

Economics

- Chekadanova M.V.* – Innovative-territorial radioelectronic cluster as a part of the national innovation system of Russia..... 69

News in brief

- Balyko I. A., Balyko A.K.* – The number of branching trees of the graph and the number of ionized particles in a semiconductor..... 75

History

- Balyko A.K.* – The 90-th anniversary of Robert Andreevich Silin..... 83

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.323

ОСОБЕННОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ РАЗМЕРНО-КВАНТОВАННЫХ ПОДЗОН В ОБРАЩЁННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

С. И. Новиков, А. Б. Пашковский, Я. Б. Мартынов, В. Г. Лапин,
В. М. Лукашин, А. А. Маковецкая

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

Предложена модификация обращённой транзисторной гетероструктуры путём встраивания дополнительного $p-i-n$ потенциального барьера, уменьшающего поперечный перенос горячих электронов в подложку, и дополнительного потенциального барьера на основе гетероперехода AlAs/GaAs, уменьшающего поперечный перенос горячих электронов в затвор. Согласно проведенным расчетам, такая структура имеет разность энергий между уровнями размерного квантования, в несколько раз превышающую энергию оптического фонона в GaAs, и повышенную линейность передаточной характеристики.

КС: обращенная гетероструктура, квантовые уровни, поперечный пространственный перенос

PECULIARITIES OF THE SIZE-QUANTIZED SUBBANDS FILLING IN INVERTED HETEROSTRUCTURES WITH DONOR-ACCEPTOR DOPING

S. I. Novikov, A. B. Pashkovsky, Ya. B. Martynov, V. G. Lapin,
V. M. Lukashin, A. A. Makovetskaya

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

The modification of the inverted transistor heterostructure by embedding additional $p-i-n$ potential barrier that reduces the real space transfer of hot electrons to the substrate, and an additional potential barrier based on the heterostructure AlAs/GaAs, which reduces the cross-transfer of hot electrons to the gate. According to the calculations, such structure has the energy difference between the levels of dimensional quantization several times higher than the energy of optical phonon in GaAs and increased linearity of the transfer characteristics.

Keywords: the inverted heterostructure, quantum levels, real space transfer

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на достаточно долгую историю успешных разработок гетероструктур с селективным легированием [1–3], полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на их основе до сих пор продолжают демонстрировать рекордные характеристики [4–6]. За это время было создано большое число конструкций, отличающихся как набором слоёв, так и их составом

и способом легирования. Однако при промышленном производстве транзисторов обычно используют два основных типа гетероструктур: для малошумящих приборов – структуры с односторонним расположением δ -слоя донорной примеси относительно канала, для мощных – с двусторонним (рис. 1). На первых этапах канал транзистора делали из чистого GaAs, а в настоящее время для улучшения характеристик применяют $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ обычно при не слишком высокой мольной доле In в канале ($x < 0,2$) для сохранения пробивных напряжений.

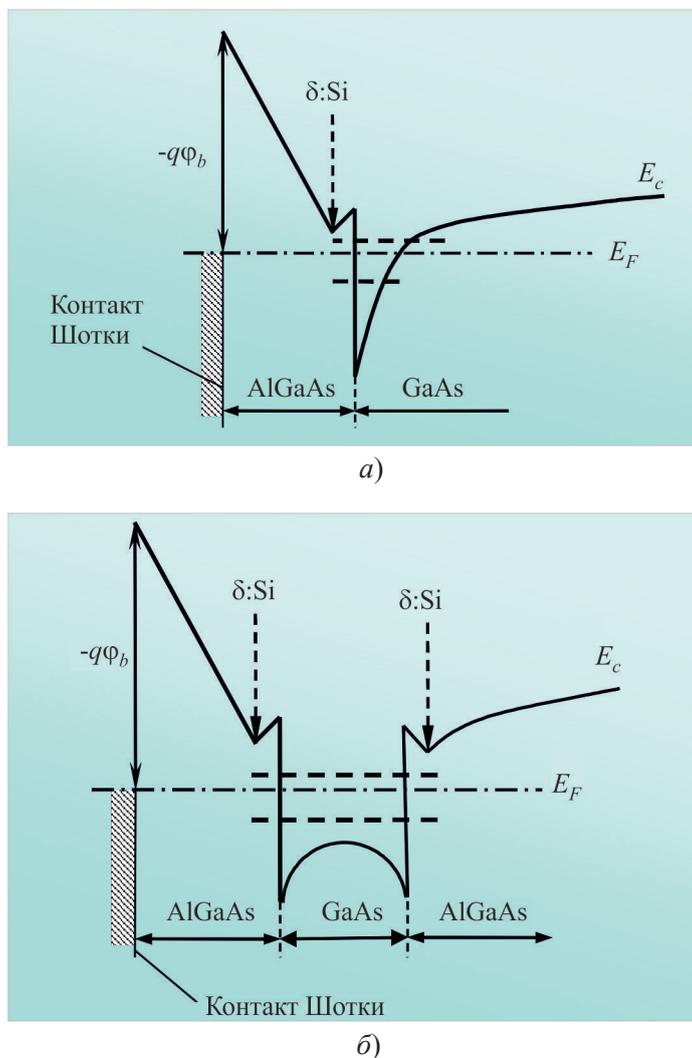


Рис. 1. Схематический вид фрагмента равновесной зонной диаграммы структуры с контактом Шотки при одностороннем (а) и двустороннем (б) расположении δ -слоев донорной примеси

Однако, хотя транзисторы на гетероструктурах с селективным легированием по традиции часто называют транзисторами с двумерным электронным газом, до последнего времени их преимущество перед приборами с объёмным легированием канала практически полностью определялось только тем, что в них электроны с высокой объёмной концентрацией имели возможность дрейфа в нелегированном слое канала с высокой слабополевой подвижностью электронов (соответственно с большим всплеском их дрейфовой скорости под затвором). При этом влияние

размерного квантования на дрейф электронов было незначительно [7], так как электроны под затвором транзистора быстро разогреваются и попадают в слои, выращенные выше и ниже канала. По этой причине электроны после разогрева занимают диапазон энергий, где расстояние между уровнями составляет единицы миллиэлектрон-вольт, то есть, по сути дела, оказываются в области практически непрерывного спектра. Лишь с появлением гетероструктур с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [8, 9] возникла возможность усиления влияния размерно-квантовых эффектов на перенос в канале транзистора [10]. В этих структурах использовалось двустороннее расположение δ -слоев донорной примеси относительно канала и формировались достаточно высокие p - i - n потенциальные барьеры (рис. 2), введение которых привело к тому, что практически весь спектр электронов в квантовой яме (КЯ) канала оказался квантован.

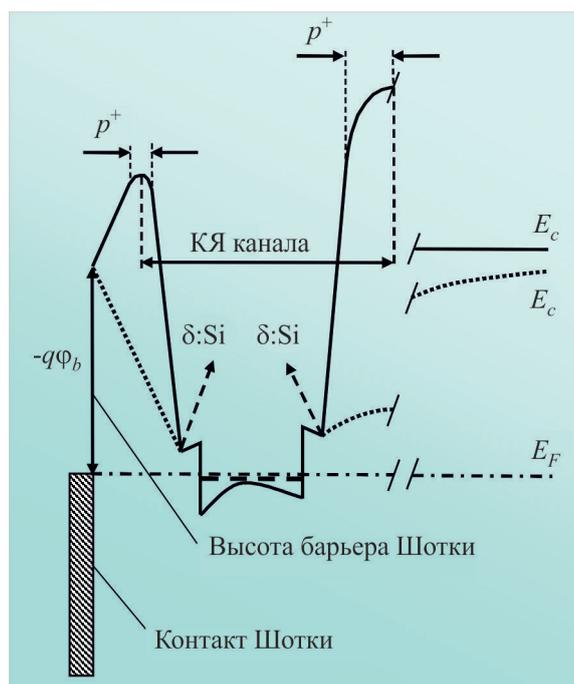


Рис. 2. Схематический вид фрагмента равновесной зонной диаграммы DA-DpHEMT-структуры с p - i - n -барьерами и контактом Шотки (—) и DpHEMT-структуры (без p - i - n -барьеров) с контактом Шотки (.....)

Ещё одним типом структур, в которых могли проявляться квантовые эффекты при работе полевых транзисторов, были обращённые гетероструктуры с селективным легированием [11, 12], главная особенность которых, в отличие от традиционных структур [13–15], — сужение, а не расширение квантовой ямы при увеличении напряжения на затворе [16] и соответственно увеличение, а не уменьшение энергии между минимумами размерно-квантованных подзон. Однако, к сожалению, такая конструкция при использовании в полевых транзисторах имеет существенный недостаток. В ней электроны из слоя канала при разогреве попадают в область, по существу, ничем не ограниченного по толщине слоя широкозонного материала с высокой интенсивностью рассеяния, что должно приводить к интенсивному рассеянию и падению подвижности электронов в сильных полях (рис. 3, а). Однако проблема интенсивного поперечного пространственного переноса электронов, а соответственно усиления интенсивности рассеяния

в сильных полях по аналогии с DA-DpHEMT-структурами может быть достаточно просто решена – путем создания дополнительного $p-i-n$ потенциального барьера ниже слоя канала и вставки широкозонного слоя AlAs, формирующего потенциальный барьер над слоем канала (рис. 3, б).

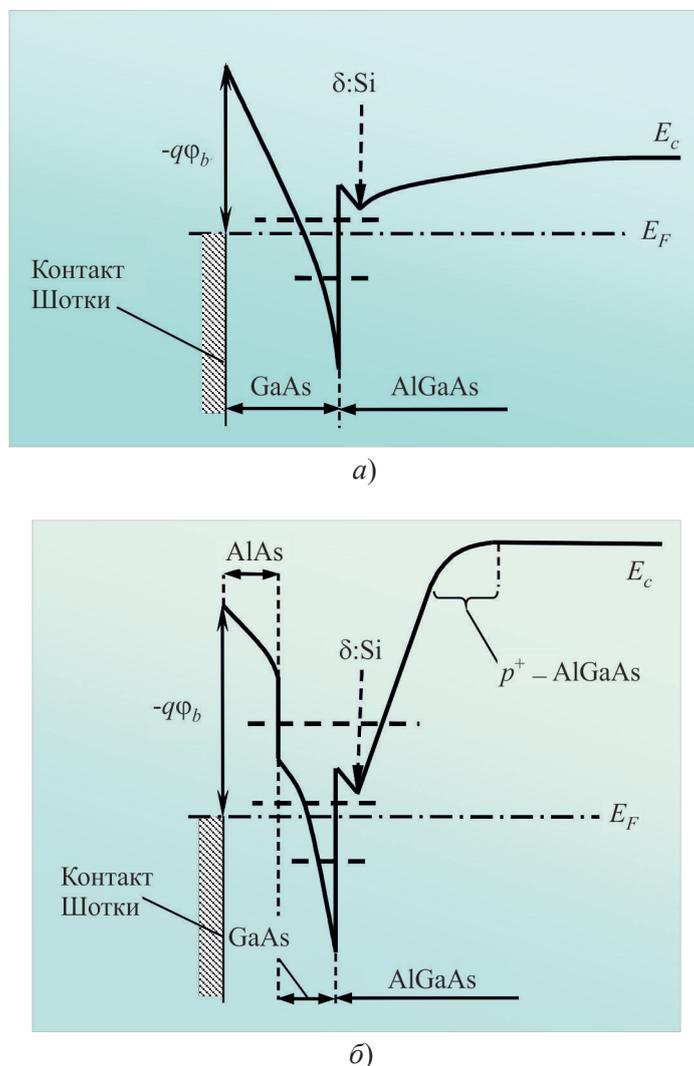


Рис. 3. Схематические зонные диаграммы обращенной структуры (а) и обращённой структуры с $p-i-n$ потенциальным барьером и слоем AlAs под затвором (б)

Такая конструкция может иметь ряд существенных преимуществ перед обычной, особенно при работе транзисторов в коротковолновой части миллиметрового и терагерцовом диапазонах длин волн. Во-первых, она позволяет существенно приблизить КЯ к затвору, то есть уменьшить затворные краевые эффекты и заметно увеличить крутизну транзистора, что соответственно сильно уменьшит влияние паразитных элементов [17, 18]. Во-вторых, даже в обычных DA-DpHEMT-структурах расстояние между всеми уровнями размерного квантования заметно превышает энергию оптического фонона в InGaAs ($\hbar\omega_{ph} \approx 35$ мэВ) [9], что, возможно, и ведет к заметному уменьшению вероятности рассеяния горячих электронов, а значит, к росту

всплеска дрейфовой скорости электронов под затвором, увеличению быстродействия и коэффициента усиления таких приборов [10]. В обращённой структуре с верхним AlAs-барьером и с нижним $p-i-n$ -барьером затвор сильнее приближен к слою канала, КЯ более узкая, поэтому такая структура более перспективна для увеличения быстродействия, коэффициента усиления, снижения шумов. Для конструирования таких структур, а тем более для корректного описания полевых транзисторов на их основе и моделирования в них транспорта электронов вероятности всех механизмов рассеяния необходимо рассчитывать с реальными волновыми функциями электронов в КЯ, для чего, в свою очередь, надо знать распределение электронов в ямах с учётом квантования. Первые шаги в этом направлении уже делаются [19]. На этом пути есть определённые трудности как в плане учета всех существенных механизмов рассеяния [20–22], так и в плане построения модели. Пока остается невыясненным, достаточно ли использовать классическое кинетическое уравнение, а все особенности, связанные с сильным размерным квантованием, учесть в выражении для вероятности рассеяния, или же приемлемую точность может обеспечить только более сложная и строгая квантовая модель. В принципе на первом этапе исследований много полезной информации можно получить и из исследований энергетического спектра и распределения электронной плотности в КЯ различных профилей с учетом приложенного к полупроводниковой структуре напряжения.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

На первом этапе при заданном профиле легирования и заданном напряжении распределение потенциала в полупроводниковой структуре находится из решения уравнения Пуассона (1), в котором электронный заряд рассчитывается по формуле (2) для непрерывного энергетического спектра в объемном полупроводнике:

$$\frac{d}{dx} \left(\varepsilon(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} \right) = - \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

$$\rho(x) = q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x), \quad (2)$$

$$\rho_c(x) = -qn_c(x) = -q \cdot N_c(x) \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{(kT)^{\frac{3}{2}}} \int_{E_c(x)}^{\infty} \frac{\sqrt{U - E_c(x)} dU}{1 + \exp\left(\frac{U - \mu}{kT}\right)}, \quad (3)$$

$$E_c(x) = E_{c0}(x) - q \cdot \varphi(x). \quad (4)$$

Здесь μ – химический потенциал; $N_c = 2(2\pi m^*(x)kT / (2\pi\hbar)^2)^{\frac{3}{2}}$ – эффективная плотность состояний в зоне проводимости; $N_D(x)$ и $N_A(x)$ – концентрации ионизованных доноров и акцепторов [23]; $E_c(x)$ – дно зоны проводимости; $E_{c0}(x)$ – дно зоны проводимости в структуре без учёта пространственного заряда и внешних полей; q – абсолютное значение заряда электрона; $\varepsilon(x)$, ε_0 – диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума; m^* – эффективная масса электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; \hbar – постоянная Планка. Для упрощения расчётов надбарьерным и туннельным током из металла пренебрегаем. Соответственно пренебрегаем экспоненциально малыми поправками к концентрации электронов, связанными с изменением химического потенциала вблизи границы. Поэтому химический потенциал в полу-

проводнике считается постоянным, а его значение определяется из равновесных условий в глубине полупроводника. На границе металл-полупроводник он терпит разрыв, величина которого определяется напряжением, подаваемым на затвор. Граничными условиями для решения уравнения Пуассона служат потенциал, задаваемый на границе металл-полупроводник, и отсутствие электрического поля в глубине структуры.

Интеграл Ферми (3) вычисляется численно. Так как распределение электронного заряда зависит от распределения потенциала (4), то решение этого уравнения проводится самосогласованно итерационным методом. Численное решение уравнения Пуассона осуществляется методом матричной прогонки по трехточечной разностной схеме, в которой функционал от потенциала раскладывается в ряд с удержанием первых двух членов (метод Ньютона). Такой подход учитывает не только значения искомой функции на предыдущем итерационном слое, но и ее градиент, что обеспечивает устойчивость процесса сходимости самосогласованной задачи.

Полученное распределение потенциала используется в качестве исходного для итерационного процесса самосогласованного решения уравнений Пуассона (5) и Шредингера (6), где $E_x(x)$ – обменная энергия электрона [24]:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d\Psi(x)}{dx} \right) + E_c(x)\Psi(x) + E_x(x)\Psi(x) = E\Psi(x), \quad (5)$$

$$E_x(x) = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon(x)\epsilon_0} \left(\frac{3}{\pi} n(x) \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Для КЯ сложной формы уравнение Шредингера допускает в качестве решений не только локализованные, но и резонансные состояния. Алгоритм нахождения собственных функций и собственных значений оператора Гамильтона (задача Штурма-Лиувилля) включает в себя три этапа:

1. Поиск локализованных состояний.
2. Поиск резонансных состояний с полным отражением.
3. Поиск резонансных состояний с частичным отражением.

Описание вычислительного алгоритма решения задачи Штурма-Лиувилля

1. Локализованные состояния

Для нахождения волновой функции локализованного состояния выбирается узел сетки внутри барьера ямы и задается произвольное значение функции. Далее подбирается производная (значение функции в соседнем узле) такая, чтобы интегрирование уравнения в глубь барьера обеспечило затухание волновой функции. Затем осуществляется численное интегрирование в противоположную сторону методом прогонки. Внутри противоположной стенки ямы волновая функция сначала затухает, а затем решение расходится. При прохождении по шкале энергий собственного значения оператора Гамильтона направление расходимости численного решения меняется на противоположное. В найденном таким образом энергетическом интервале поиск энергии осуществляется на более густой сетке для достижения требуемой точности. Для нивелирования асимметрии, вносимой численной погрешностью метода прогонки, для уже найденного собственного значения энергии осуществляется интегрирование в противоположном

направлении с дальнейшей сшивкой решений в точке симметрии. Полученная волновая функция нормируется.

2. Резонансные состояния с полным отражением

По мере увеличения энергии электрона барьеры, образующие стенки КЯ, могут быть проницаемыми, но процесс прохождения электрона через барьеры ямы носит резонансный характер (волновая функция между барьерами становится велика). При поиске резонансных состояний с полным отражением от одной из стенок ямы волновая функция с противоположной стороны не расходится, а осциллирует. Поэтому для поиска резонансных уровней используется тот факт, что при энергиях, являющихся собственными значениями оператора Гамильтона, волновая функция является практически полностью локализованной внутри ямы.

3. Резонансные состояния с частичным отражением

При еще более высоких энергиях (тонкие барьеры или над ямой) электрона распределение электронной плотности имеет вид стоячей волны в областях пространства с постоянным потенциалом. Для нахождения волновой функции в этом случае нельзя использовать условие затухания ее в каком-либо барьере ямы. Численное решение уравнения Шредингера осуществляется методом матричной прогонки с граничными условиями Неймана.

После нахождения энергетического спектра КЯ рассчитывается электронный заряд вдоль всей полупроводниковой структуры. В области пространства, в которой локализованы волновые функции дискретного энергетического спектра, электронный заряд рассчитывается по формулам (7), (8):

$$\rho(x) = q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x) - q \sum_i n_i |\Psi_i(x)|^2, \quad (7)$$

$$n_i = \left(\frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{q(\mu - E_i)}{kT} \right] \right\}. \quad (8)$$

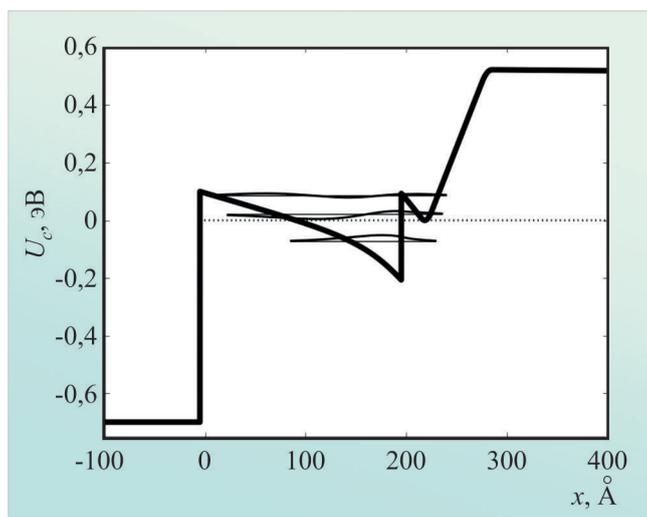
где $\Psi_i(x)$ и E_i – собственные функции и собственные значения оператора Гамильтона [3] для квантового уровня с номером i .

Выше последнего найденного уровня, а также в областях координатного пространства, в которые не проникают волновые функции локализованных и резонансных состояний, энергетический спектр считается непрерывным и заряд вычисляется по формулам (2), (3), где отсчёт энергии в формуле (3) ведётся в зависимости от координаты либо от дна зоны проводимости, либо от последнего квантового уровня (в зависимости от того, что выше). Полученное распределение заряда используется при решении уравнения Пуассона (1). Данная процедура циклически повторяется, пока не будет получено самосогласованное решение.

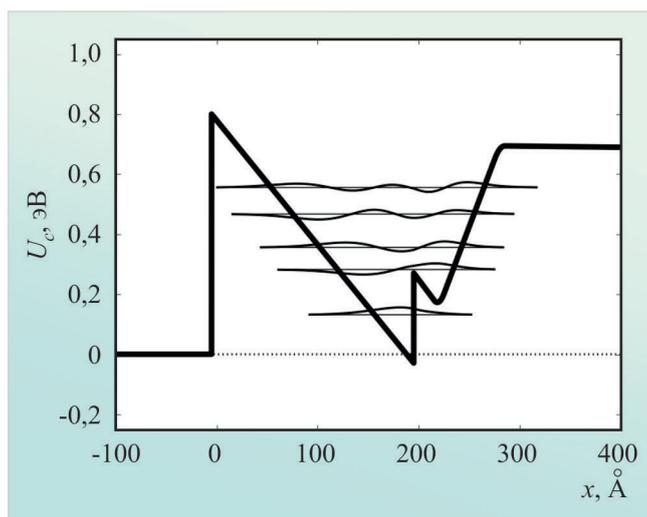
3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Как отмечалось выше, одним из главных преимуществ обращённых структур, по сравнению с обычными, является возможность приблизить канал транзистора к затвору. Однако, если делать это напрямую, сильно уменьшая толщину канала и не предпринимая дополнительных мер, могут возникнуть определённые проблемы. На рис. 4 приведены зонные диаграммы простейшего варианта обращённой структуры при нулевом и положительном смещении на затворе. Здесь

уровень Ферми в полупроводнике соответствует нулевой отметке. По сути дела, рассматривается транзистор с очень длинным затвором (чтобы можно было пренебречь краевыми эффектами) и нулевым потенциалом электродов истока и стока.



a)



б)

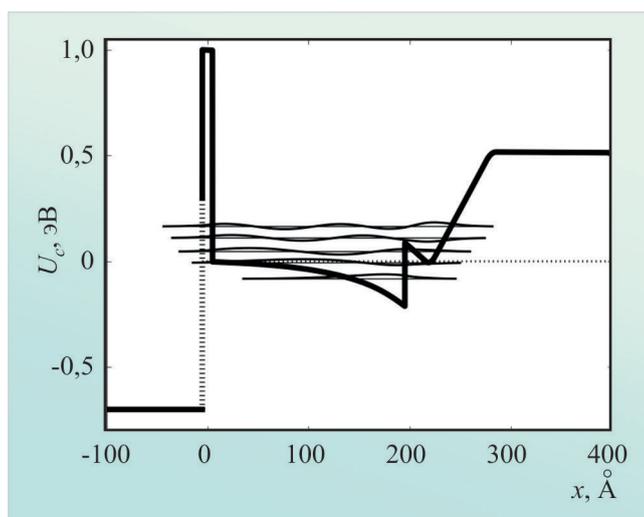
Рис. 4. Зонные диаграммы рассматриваемой структуры (высота барьера Шотки равна 0,8 В):

a – при напряжении на затворе +0,7 В; б – при нулевом напряжении на затворе

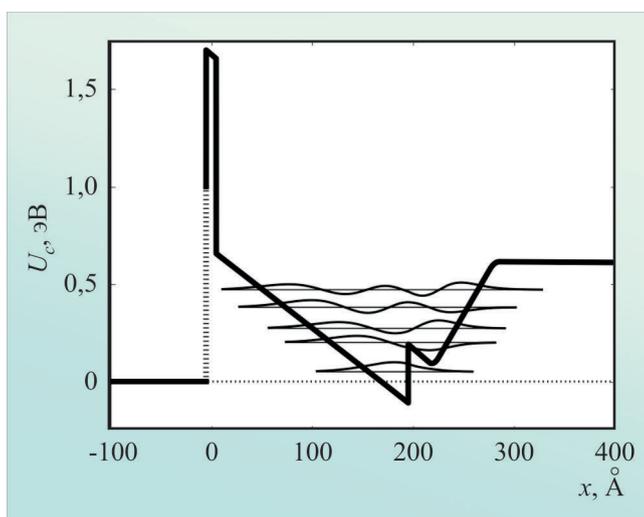
Обычно [17, 18] при рассмотрении обращённых структур КЯ рассматривается практически как треугольная, однако видно, что при данных параметрах структуры и положительных смещениях на затворе поле пространственного заряда сильно меняет форму ямы, яма расширяется и уровни сближаются. Видно также, что при потенциале на затворе, равном +0,7 В, третий квантовый уровень, расположенный совсем недалеко от второго, как раз попадает на дно зоны проводимости на границе с металлом. Таким образом, в такой структуре даже при самом минимальном разогреве электронов начнутся интенсивные переходы из полупроводника в металл. В то же время для исследования рабочих режимов полевых транзисторов основной интерес представляют только

те ситуации, когда электроны локализованы в яме и не могут свободно переходить в металл и обратно. В принципе разработанная модель позволяет провести расчёт с непрерывным спектром электронов (как бы металлом) при $x < 0$, однако в работающем транзисторе, вообще говоря, не совсем понятно, чему это соответствует.

В то же время, как отмечалось выше, избежать проблемы ухода электронов в затвор можно, введя высокий тонкий барьер (см. рис. 3, б). Зонные диаграммы и положение уровней размерного квантования для такой структуры при различных напряжениях на затворе приведены на рис. 5. Видно, что для такой структуры при положительных смещениях на затворе введение даже тонкого, достаточно высокого барьера заметно меняет как форму ямы на границе гетероперехода, так и положение уровней.



а)



б)

Рис. 5. Зонные диаграммы рассматриваемой структуры (высота барьера Шотки равна 1 В):

а – при напряжении на затворе +0,7 В; б – при нулевом напряжении на затворе

Для двух таких (по существу, модельных) простейших обращенных структур с донорно-акцепторным легированием и различными толщинами канала на рис. 6 приведены графики зависимости поверхностной плотности электронов и её производной (по существу, удельной ёмкости затвора) при одинаковой разнице поверхностной плотности доноров и акцепторов, равной $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ($n_s^D = 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $n_s^A = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Высота барьера Шотки на границе с металлом ($x = 0$) бралась равной -1 В [25].

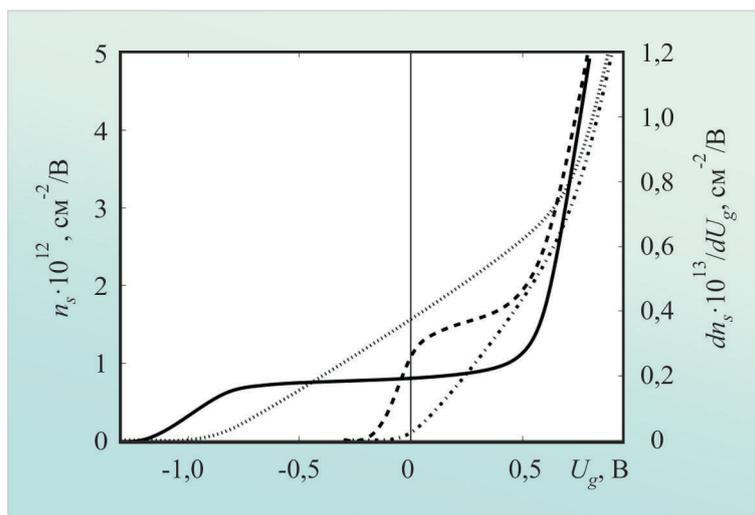


Рис. 6. Зависимости поверхностной плотности электронов и её производной для двух обращенных структур разной толщины dn_s/dU_g :
 — $H = 400 \text{ \AA}$; --- $H = 200 \text{ \AA}$; ... $H = 400 \text{ \AA}$; · · · $H = 200 \text{ \AA}$

Из рисунка видно, что при потенциале на затворе, равном +0,7 В, второй квантовый уровень оказывается вблизи уровня Ферми (см. также табл. 1), что ведет к резкому увеличению поверхностной плотности электронов в квантовой яме.

Таблица 1

i	$U_g = 0$			$U_g = +0,5 \text{ В}$			$U_g = +0,7 \text{ В}$		
	E_{i^p} мэВ	$\Delta E_{(i+1),i^p}$ мэВ	$n_{si^p} \text{ см}^{-2}$ ($n_s = 9,8 \cdot 10^{10}$)	E_{i^p} мэВ	$\Delta E_{(i+1),i^p}$ мэВ	$n_{si^p} \text{ см}^{-2}$ ($n_s = 1,81 \cdot 10^{12}$)	E_{i^p} мэВ	$\Delta E_{(i+1),i^p}$ мэВ	$n_{si^p} \text{ см}^{-2}$ ($n_s = 2,88 \cdot 10^{12}$)
1	50	150	$9,49 \cdot 10^{10}$	-61	108	$1,70 \cdot 10^{12}$	-82	76	$2,20 \cdot 10^{12}$
2	200	72	$3,66 \cdot 10^8$	47	72	$1,04 \cdot 10^{11}$	-6	52	$5,56 \cdot 10^{11}$
3	272	108	$2,18 \cdot 10^7$	119	50	$7,55 \cdot 10^9$	46	64	$1,07 \cdot 10^{11}$
4	380	90	$2,99 \cdot 10^5$	169	66	$1,17 \cdot 10^9$	110	54	$1,09 \cdot 10^{10}$
5	470	—	$1,06 \cdot 10^4$	235	—	$8,03 \cdot 10^7$	164	—	$1,39 \cdot 10^9$

Примечание. Расстояние от металла до гетероперехода равно 200 Å.

Как раз на рис. 6 этому соответствует резкий перегиб на графике зависимости dn_s/dU_g от напряжения на затворе. Второй резкий перегиб с последующим падением до нуля начинается,

когда с увеличением отрицательного напряжения на затворе первый квантовый уровень пересекает уровень Ферми и поднимается над ним примерно на kT . Как отмечалось ранее, расстояние между уровнями размерного квантования с увеличением напряжения на затворе (перекрытием канала), а именно эти режимы особенно интересны для малошумящих транзисторов, тоже сильно увеличивается (см. табл. 1 и рис. 5).

В данных структурах разность поверхностной плотности доноров и акцепторов в δ -слоях составляет величину $n_s^D - n_s^A = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Так как на линейном участке зависимости $n_s(U_g)$ поверхностная плотность электронов для более тонкого канала гораздо меньше этой (рис. 6), то для данной структуры суммарная поверхностная концентрация электронов явно является избыточной, а при толщине слоя узкозонного материала около 400 \AA , по-видимому, близка к оптимальной. Из рис. 5 также сразу видно, что при отсутствии донорно-акцепторного потенциального барьера горячие электроны со второго уровня должны интенсивно уходить ещё и в широкозонный материал со стороны подложки.

В данном расчёте рассматривался простейший вариант изоляции затвора – один высокий и тонкий потенциальный барьер на границе с металлом.

Еще более привлекательной (и более технологичной) выглядит идея составного барьера: например, в структуре, приведенной на рис. 3, б, после ямы вставить тонкий спейсер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с мольной долей алюминия x менее 0,4, а затем высокий барьер из чистого AlAs. Спейсер нужен для увеличения подвижности электронов в яме, а высокий барьер – как основной изолятор контакта от ямы. На первый взгляд, из-за инверсии долин в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $x > 0,4$ такая конструкция вызывает определённые вопросы в плане эффективности, однако в большинстве рабочих режимов в барьере будет еще и дополнительное довольно сильное электрическое поле (см. рис. 3 и 5), которое будет выталкивать электроны обратно в КЯ. Надо отметить, что если делать обращенную структуру без донорно-акцепторного легирования и использовать для предотвращения ухода горячих электронов в подложку только гетеробарьеры, то из-за отсутствия сильного электрического поля со стороны подложки такая конструкция скорее всего не будет эффективной. Однако в принципе дополнительный AlAs-барьер можно встроить в донорно-акцепторный барьер сразу после δn -слоя.

Результаты расчетов зависимости удельной скорости изменения заряда электронов в КЯ (dn_s/dU_g) для различных структур (табл. 2), которые в принципе или используются, или их можно считать пригодными для приборного применения, при изменении напряжения на затворе U_g приведены на рис. 7. При данных параметрах структур разница между структурой с донорным легированием и структурой с донорно-акцепторным легированием, при той же поверхностной плотности некомпенсированных доноров, в масштабе рисунка практически отсутствует.

Таблица 2

№	Слой структуры	x	Толщина слоя, нм / уровень легирования, см^{-3}				
			Вариант структуры				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,35	100/10 ¹⁴	–	100/10 ¹⁴	100/10 ¹⁴	100/10 ¹⁴
2	Барьерный слой $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,35	–	–	–	1/6·10 ¹⁹	1/6·10 ¹⁹
3	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,35	–	–	–	5/10 ¹⁴	5/10 ¹⁴

Окончание табл. 2

№	Слой структуры	x	Толщина слоя, нм / уровень легирования, см ⁻³				
			Вариант структуры				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
4	Слой n ⁺ -Al _x Ga _{1-x} As(δ:Si)	0,35	1/2·10 ¹⁹	–	–	1/8·10 ¹⁹	1/9·10 ¹⁹
5	Спейсер Al _x Ga _{1-x} As	0,35	2/10 ¹⁴	–	–	2/10 ¹⁴	2/10 ¹⁴
6	Канал GaAs	–	7/10 ¹⁴	100/10 ¹⁴	7/10 ¹⁴	7/10 ¹⁴	7/10 ¹⁴
7	Спейсер Al _x Ga _{1-x} As	0,35	–	2/10 ¹⁴	2/10 ¹⁴	–	–
8	Слой n ⁺ -Al _x Ga _{1-x} As(δ:Si)	0,35	–	1/2·10 ¹⁹	1/2·10 ¹⁹	–	–
9	Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As	0,35	–	–	–	4/10 ¹⁴	4/10 ¹⁴
10	Барьерный слой p ⁺ -Al _x Ga _{1-x} As	0,35	–	–	–	–	–
11	Барьерный слой AlAs	1,0	–	–	–	5/10 ¹⁴	5/10 ¹⁴
12	Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As	0,35	20/10 ¹⁴	17/10 ¹⁴	17/10 ¹⁴	1/10 ¹⁴	1/10 ¹⁴
13	Металл затвора (φ _B , эВ)	–	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

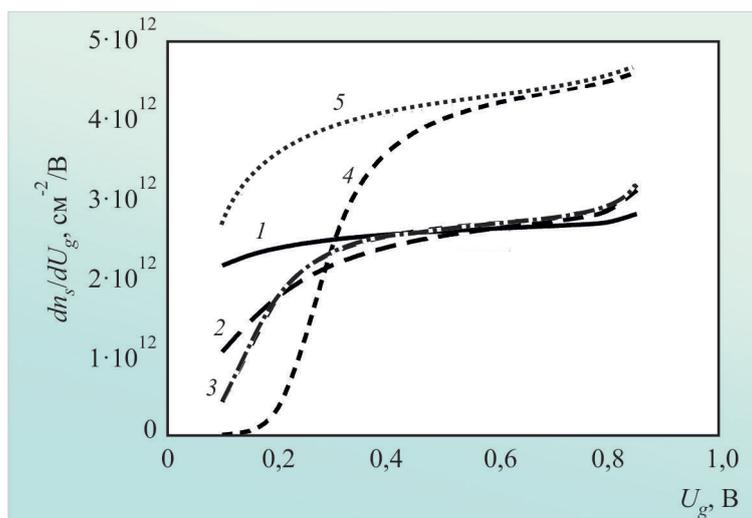


Рис. 7. Зависимости скорости изменения поверхностной плотности электронов от напряжения на затворе:

- 1 – обращенная гетероструктура, см. табл. 2, вариант № 1; 2 – прямая гетероструктура, № 2;
- 3 – прямая гетероструктура, № 3; 4 – обращенная гетероструктура, № 4;
- 5 – обращенная гетероструктура с дополнительным барьером, вариант № 5

Главной особенностью обращённых структур (см. также рис. 6) оказывается линейность характеристики dn_s/dU_g в широком диапазоне изменения напряжений на затворе. Такое поведение также может служить предпосылкой к постоянству крутизны транзистора ($g_m = dI_d/dU_g$) на основе таких структур. Здесь I_d – ток стока полевого транзистора. Постоянство этих двух параметров,

в свою очередь, дает существенные преимущества при разработке высокочастотных транзисторов средней и малой мощности с пониженным уровнем амплитудных и фазовых шумов [26, 27] и повышенной линейностью. Естественно, краевые эффекты и особенности нелокального разогрева электронов могут существенно изменить эту картину, причём как в сторону увеличения линейности, так и в сторону её уменьшения. Ещё одно достоинство такой конструкции заключается в том, что для увеличения рабочих частот крутизну в ней можно дополнительно увеличивать, уменьшая толщину структуры (рис. 3, 7). Интересно, что в такой гетероструктуре из-за большого расстояния между квантовыми уровнями интенсивное заполнение второй размерно-квантованной подзоны начинается при довольно больших поверхностных плотностях электронов (рис. 8).

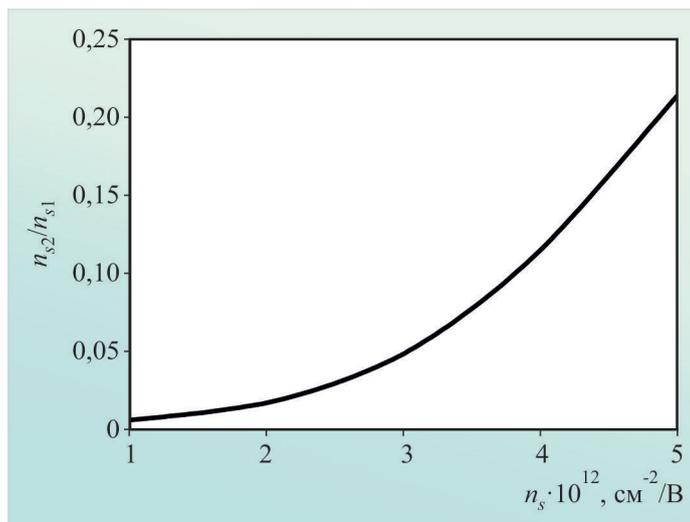


Рис. 8. Зависимость относительной заселённости первых двух уровней обращенной структуры (см. табл. 2, вариант № 4) при изменении разности поверхностной плотности доноров в δ -слое № 4 от $7 \cdot 10^{12}$ до $11 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

$$(n_s = n_s^D - n_s^A)$$

Естественно, особенности характеристик подобных систем сильно зависят от особенностей их строения. Например, рассмотрим результаты расчетов разности энергий от уровня E_i с номером i до уровня Ферми, заселённости n_{si} и разности энергий между ближайшими уровнями $\Delta E_{(i+1),i}$ для первых пяти уровней (табл. 3) в структуре № 5 (см. табл. 2) при разных напряжениях на затворе U_g .

Таблица 3

i	$U_g = +0,9 \text{ В}$			$U_g = +0,1 \text{ В}$		
	E_{i^p} мэВ	$\Delta E_{(i+1),i^p}$ мэВ	$n_{si^p}, \text{см}^{-2}$ ($n_s = 3,36 \cdot 10^{12}$)	E_{i^p} мэВ	$\Delta E_{(i+1),i^p}$ мэВ	$n_{si^p}, \text{см}^{-2}$ ($n_s = 2,32 \cdot 10^{12}$)
1	-116	141	$3,09 \cdot 10^{12}$	25	158	$2,28 \cdot 10^{11}$
2	25	105	$2,53 \cdot 10^{11}$	183	91	$7,47 \cdot 10^8$
3	130	130	$6,00 \cdot 10^9$	274	163	$2,08 \cdot 10^7$
4	260	88	$4,03 \cdot 10^7$	437	108	$4,27 \cdot 10^4$
5	348	—	$1,41 \cdot 10^6$	545	—	$6,48 \cdot 10^2$

Как отмечалось выше, расстояния между квантовыми уровнями в такой гетероструктуре оказываются даже больше, чем в двойных структурах с донорно-акцепторным легированием [9], что в принципе может приводить к существенному падению интенсивности рассеяния горячих электронов, а значит, к росту дрейфовой скорости электронов под затвором и быстродействия полевых транзисторов [28], что, в свою очередь, открывает новые перспективы использования таких гетероструктур в полевых транзисторах субмиллиметрового диапазона длин волн. Уточнить величину этих эффектов можно в результате расчёта вероятности рассеяния горячих электронов с учётом размерного квантования поперечной компоненты импульса электронов. Однако, как уже говорилось, достаточно корректный расчёт выглядит пока весьма проблематичным. Поэтому в настоящее время наибольший интерес представляют как результаты экспериментальных измерений полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в таких структурах, так и непосредственные эксперименты по изготовлению полевых транзисторов на их основе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация обращённой гетероструктуры за счёт встраивания в структуру дополнительных потенциальных барьеров, уменьшающих поперечный пространственный перенос из канала в подложку и контакт затвора. Со стороны подложки барьер формируется на основе легированного акцепторами слоя, со стороны поверхности – на основе гетероперехода GaAs–Al_xGa_{1-x}As–AlAs. Согласно проведенным расчетам, такая структура имеет разность энергий между уровнями размерного квантования, в несколько раз превышающую энергию оптического фона в GaAs, и повышенную линейность передаточной характеристики и может быть перспективна для транзисторов средней и малой мощности миллиметрового диапазона длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dingle, R.** Electron mobilities in modulated – doped semiconductors heterojunction super-lattices / R. Dingle, H. L. Stormer, A. C. Gossard, W. Wigman // *Appl. Phys. Letters*. – 1978. – Vol. 33, No 7. – P. 665 – 667.
2. **Stormer, H. L.** Two-dimensional electron gas at semiconductor – semiconductor interface / H. L. Stormer, R. Dingle, A. C. Gossard et al. // *Solid State Commun.* – 1978. – Vol. 29, No 10. – P. 705 – 709.
3. **Андо, Т.** Электронные свойства двумерных систем / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. – М.: Мир, 1985. – 416 с.
4. **Mei, X.** First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process / X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee et al. // *IEEE Electron Device Letters*. – 2015. – Vol. 36, No 4. – P. 327 – 329.
5. **Moschetti, G. A.** 183 GHz metamorphic HEMT low-noise amplifier with 3.5 dB noise figure / G. Moschetti, A. Leuther, H. Mabler, B. Aja et al. // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2015. – Vol. 25, No 9. – P. 618 – 620.
6. **Amado-Rey, B. A.** 280 GHz stacked-FET power amplifier cell using 50 nm metamorphic HEMT technology / B. A. Amado-Rey, Y. Campos-Roca, C. Friesicke, A. Tessmann et al. // 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – P. 189 – 192.
7. **Кальфа, А. А.** Двумерный электронный газ в пространственно неоднородной потенциальной яме / А. А. Кальфа, А. Б. Пашковский // *ФТП*. – 1988. – Т. 22, вып. 11. – С. 2090 – 2092.
8. **Лукашин, В. М.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, А. Б. Соколов // *Письма в ЖТФ*. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
9. **Лукашин, В. М.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, Е. И. Голант, А. А. Капалова // *ФТП*. – 2014. – Т. 48, вып. 5. – С. 684 – 692.

10. **Борисов, А. А.** Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рНЕМТ транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, А. А. Маковецкая, В. И. Новоселец, А. Б. Пашковский, А. И. Торопов, Н. Д. Урсуляк, С. В. Щербаков // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.
11. **А. с. 897062 СССР.** Полевой транзистор / А. С. Тагер, А. А. Кальфа. – Приоритет от 03.09.1980.
12. **Кальфа, А. А.** Гетероструктуры с селективным легированием и их применение в полевых транзисторах СВЧ / А. А. Кальфа, А. С. Тагер // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 12 (348). – С. 26 – 38.
13. **Mimura, T. A.** New field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterostructures / T. Mimura, S. Hiyamizi, T. Fuji, K. Numbu // Jap. Journ. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 19, No 5. – P. L225 – L227.
14. **Mimura, T.** High-electron mobility transistors with selectively doped GaAs/n-AlGaAs heterojunction / T. Mimura, S. Hiyamizi, H. Hashimoto, M. Fukuta // IEEE Trans. on Electron Dev. – 1980. – Vol. ED-27, No 11. – P. 2197.
15. **Delagebeaudeuf, D.** Two-dimensional electron GaAs MESFET inversion channels / D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etinne et al. // Electron Lett. – 1980. – Vol. 16, No 17. – P. 667 – 668.
16. **Delagebeaudeuf, D.** Charge control of the heterojunction two dimensional electron gas for MESFET application / D. Delagebeaudeuf, N. T. Linch // IEEE Trans. on Electron Dev. – 1981. – Vol. ED-28, No 7. – P. 790 – 795.
17. **Nicolas, C.** Inverted GaAs/AlGaAs modulation – doped field-effect transistors with extremely high transconductances / C. Nicolas, Jr. Cirillo, M. S. Shur, K. A. Jonatan // IEEE Electron Dev. Lett. – 1986. – Vol. EDL-7, No 2. – P. 71 – 74.
18. **Крещук, А. М.** Инвертированная гетероструктура InP/In_{0,53}Ga_{0,47}As для полевого транзистора / А. М. Крещук, Е. П. Лаурс, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, Е. М. Семашко, М. А. Стовповой, А. Я. Шик // ФТП. – 1990. – Т. 24, вып. 6. – С. 1145 – 1147.
19. The influence of impurity profiles on mobility of two-dimensional electron gas in AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures modulation-doped by donors and acceptors // Solid State Electronics. – 2017. – Vol. 129. – P. 66 – 72.
20. **Пожела, Ю.** Подвижность и рассеяние электронов на полярных оптических фононах в гетероструктурных квантовых ямах / Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене // ФТП. – 2000. – Т. 34, вып. 9. – С. 1053 – 1057.
21. **Пожела, Ю.** Рассеяние электронов на захваченных поверхностных полярных оптических фононах в двухбарьерной гетероструктуре / Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене // ФТП. – 2007. – Т. 41, вып. 9. – С. 1093 – 1098.
22. **Пожела, Ю.** Транспорт электронов в квантовой яме GaAs в сильных электрических полях / Ю. Пожела, К. Пожела, Р. Рагуотис, В. Юцене // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 9. – С. 1217 – 1221.
23. **Фистуль, В. И.** Сильно легированные полупроводники / В. И. Фистуль. – М.: Издательство «Наука», 1967. – 415 с.
24. **Харрисон, У.** Электронная структура и свойства твердых тел / У. Харрисон // Физика химической связи. Т. 2.: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 332 с.
25. **Adashi, S.** Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors / S. Adashi // 2009 John Wiley & Sons, Ltd. – ISBN: 978-0-470-74369-0.
26. **Богданов, Ю. М.** Зависимость низкочастотных флуктуаций входной емкости полевого транзистора от профиля легирования канала / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Микроэлектроника. – 1993. – Т. 22, вып. 2. – С. 15 – 19.
27. **Богданов, Ю. М.** Полевые транзисторы с низкой модуляционной чувствительностью для маломощных СВЧ-устройств / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 33, вып. 2. – С. 346 – 355.
28. **Пашковский, А. Б.** Оценка влияния полупроводниковой структуры на шумовые характеристики гетероструктурных полевых транзисторов / А. Б. Пашковский // Микроэлектроника. – 1993. – Т. 22, вып. 5. – С. 26 – 32.

Статья поступила 17 октября 2017 г.

УДК.621.385.6

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ X-ДИАПАЗОНА С СУММАРНОЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ НЕ МЕНЕЕ 55 Вт

И. П. Корчагин, Д. В. Калита

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

Разработан многоканальный усилитель X-диапазона, обеспечивающий выходную импульсную мощность каждого канала не менее 13,5...16,0 Вт с коэффициентом усиления 20 дБ. Для согласования транзисторов использована керамика с высоким значением ϵ .

КС: полевой транзистор, усилитель мощности, X-диапазон

X-BAND MULTICHANNEL AMPLIFIER WITH A TOTAL OUTPUT POWER NOT LESS THAN 55 W

I. P. Korchagin, D. V. Kalita

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

X-band multichannel amplifier providing an output pulse power of each channel not less than 13.5...16.0 W with 20 dB gain has been developed. Ceramics with high ϵ value was used to match the transistors.

Keywords: FET, power amplifier, X-band

Заданные высокие электрические параметры усилителя должны быть получены в конструкции с малыми габаритами. Наиболее предпочтительными активными элементами являются МИС, однако из-за ограничительных мер зарубежные МИС труднодоступны. Отечественные МИС к настоящему времени не выпускаются. В связи с этим было принято решение разработать конструкцию, удовлетворяющую заданным требованиям, с использованием керамики, имеющей высокий коэффициент диэлектрической проницаемости ϵ .

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» была выполнена работа по созданию приёмопередающего субмодуля X-диапазона с выходной мощностью не менее 15 Вт. В усилителе мощности субмодуля применены 6-ваттные транзисторы нашего предприятия «Принц 4-70». Используя накопленный опыт, нами разработан многоканальный усилитель X-диапазона с выходной импульсной мощностью канала 13,5...16,0 Вт. В настоящее время работа закончена и идут поставки усилителей.

За основу конструкции взят 2-каскадный усилитель мощности, в первом каскаде которого используется один транзистор, а в выходном – суммируется мощность четырех транзисторов «Принц 4-70». Данная конструкция выходного каскада позволяет разместить в заданном объеме четыре синфазных канала.

Методика межкаскадного согласования приближалась в какой-то мере к методике согласования МИС. С целью уменьшения продольного размера выходная схема входного каскада согласовывалась со входом выходного каскада без перехода на 50-омную линию.

Электрическая схема выходного усилителя имеет некоторые особенности. Параметры дели-

телей и сумматоров мощности подбирались одновременно с параметрами элементов согласования затворов и стоков элементарных ячеек транзистора. Делители и сумматоры мощности вместе с согласующими цепями, реализованными на керамике БСТ (барий–самарий–титан), и проволоками монтажа затворов и стоков элементарных ячеек транзистора представляют собой единую электрическую схему. Для разделения каскадов по постоянному току вместо конденсаторов был применен полосовой фильтр на двух связанных микрополосковых линиях. Этот фильтр позволил подавить излишнее усиление схемы на низких частотах и обеспечить устойчивость усилителя вне рабочей полосы частот. Эксперименты показали значительное уменьшение импульсного питающего напряжения от ввода до цепи стока выходного каскада (0,7 В), поэтому питание подводилось с помощью золотой ленты (фольги) непосредственно к сумматору СВЧ.

Проектирование выходного усилителя осуществлялось с помощью методов электродинамического моделирования, реализованных в программном комплексе компьютерного проектирования AWR. В усилителе используется мощный транзистор, выполненный на псевдоморфных гетероструктурах с селективным легированием. Для каждой ячейки такого транзистора разрабатывалась нелинейная модель с использованием измеренных сопротивлений истока, стока, затвора, ВАХ и S -параметров [1]. Сопротивления истока, стока и затвора определялись из прямых измерений. Также проводились измерения ВАХ транзистора. На основе измеренных S -параметров ячейки определялись параметры ее линейной эквивалентной схемы в нескольких режимах (при разных напряжениях на затворе и стоке).

Полученная таким образом нелинейная модель транзистора использовалась при проектировании усилителя в целом.

Определение электрических характеристик транзистора «Принц 4-70», имеющего большую ширину затвора, представляет большую сложность, поэтому проводилось тщательное обследование одной ячейки транзистора. На рис. 1 показана микрополосковая схема для измерений электрических характеристик ячейки транзистора.

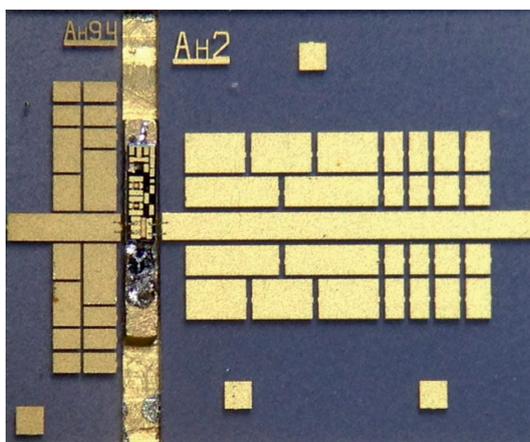


Рис. 1. Микрополосковая схема для измерения электрических характеристик ячейки транзистора

После определения характеристик секции была рассчитана схема полного транзистора (рис. 2) с применением согласователей из БСТ, обеспечивающая максимальную выходную мощность. В этой схеме тестировались транзисторы «Принц 4-70» различных партий.

Электрические характеристики транзистора показаны на рис. 3.

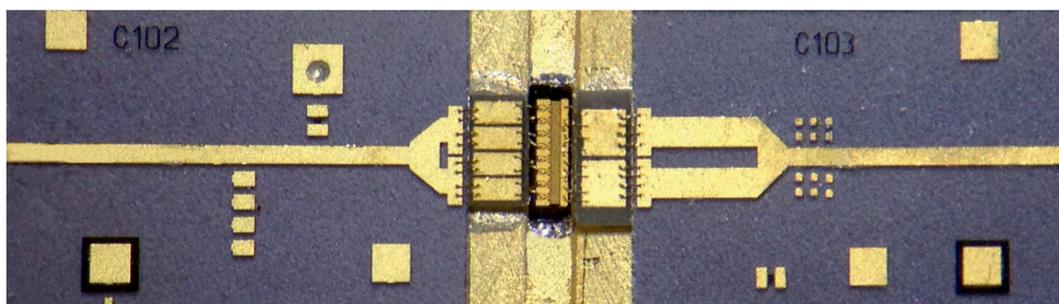
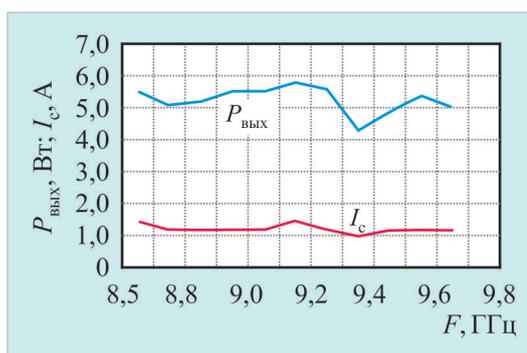


Рис. 2. Топология тестовой схемы

Рис. 3. Электрические характеристики транзистора «Принц 4-70»



На основе полученных характеристик была рассчитана [2] схема выходного усилителя (рис. 4).

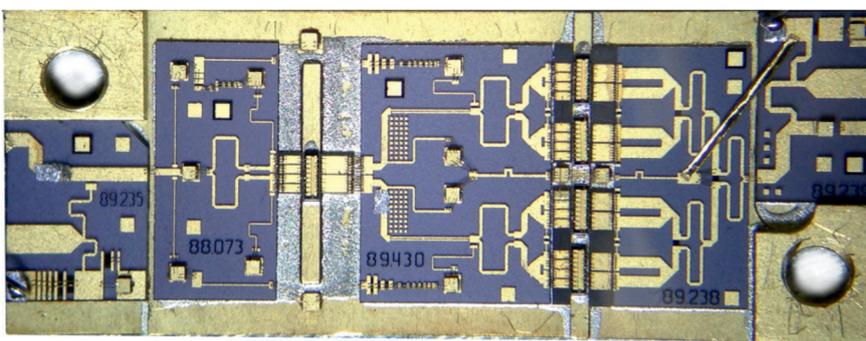


Рис. 4. Топология двухкаскадного усилителя

Для обеспечения работы четырех каналов на их вход подавалась мощность от задающего каскада, который представляет собой однокаскадный усилитель, с использованием 4-ваттного транзистора «Принц 4-50» (рис. 5).

Импульсный режим работы обеспечивается модулятором напряжения стока с четырьмя ключевыми транзисторами IRLML2244 размерами 3×1,4×1,1 мм.

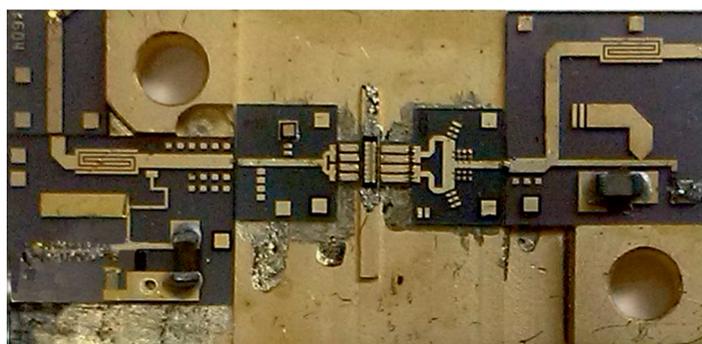


Рис. 5. Задающий усилитель мощности

Выбор импортной комплектации обусловлен тем, что отечественный аналог 2П7165А имеет размеры 18,6×10,7×4,8 мм, что делает его неконкурентоспособным. Модулятор расположен в дне корпуса, подключен ко всем каскадам и управляется генератором импульсов.

Для уменьшения влияния нагрузки на усилитель и развязки между задающим и выходным усилителями введены вентили. С целью уменьшения габаритных размеров усилителя и удобства соединения с аппаратурой заказчика на выходе каждого канала были использованы СВЧ-выводы типа SMP нашего предприятия. Внешний вид усилителя показан на рис. 6. Его амплитудно-частотная характеристика приведена на рис. 7.

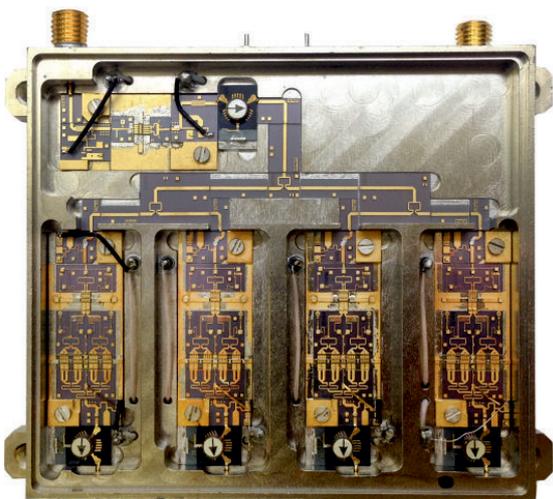


Рис. 6. Внешний вид многоканального усилителя

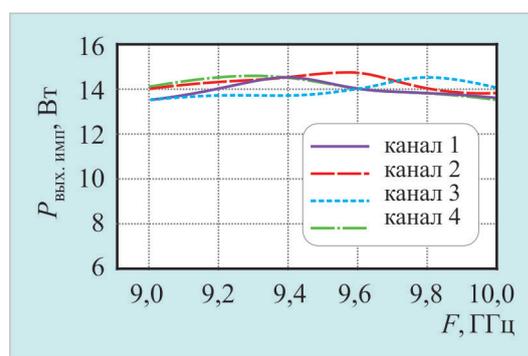


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика многоканального усилителя

Таким образом, разработанный многоканальный усилитель имеет габариты 74×89×19,5 мм. Его потребляемая импульсная мощность составляет 9 В×32 А, суммарная выходная импульсная мощность – не менее 55 Вт. Параметры задающего импульса: длительность – 1...100 мкс, скважность – 6...10. Электрические параметры усилителя соответствуют современному мировому уровню для GaAs-технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красник, В. М. Нелинейная модель гетероструктурных полевых транзисторов с субмикронным затвором ФГУП «НПП «Исток» / В. М. Красник, Л. В. Манченко, А. Б. Пашковский, Т. И. Потапова, В. А. Пчелин // 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). Севастополь, 10 – 14 сентября 2007 г.: материалы конференции. – Севастополь: «Вебер», 2007. – С. 69 – 70.
2. Пчелин, В. А. Двухкаскадный усилитель X-диапазона с выходной мощностью 17 Вт на элементной базе ФГУП «НПП «Исток» / В. А. Пчелин, И. П. Корчагин, В. М. Малышик, А. В. Галдецкий, Л. В. Манченко, А. А. Кап-ралова // Материалы 21-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: «Вебер», 2011. – С. 135 – 136.

Статья поступила 1 ноября 2017 г.

УДК 621.375.4

**УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 6 Вт
НА ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ
С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

**А. А. Маковецкая, Д. В. Калита, В. А. Пчелин, В. Г. Лапин, А. Б. Пашковский,
В. М. Лукашин, С. В. Щербаков, С. И. Новиков**

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

К. С. Журавлев, А. И. Торопов

ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

Представлены первые результаты разработки мощного усилительного каскада в гибридно-интегральном исполнении, изготовленного на основе полевого транзистора на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием (ДА-ДрНЕМТ). При длине Г-образного затвора около 0,3 мкм и ширине 4,8 мм на частоте 9,2 ГГц при входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9,5 В в импульсном режиме выходная мощность усилительного каскада на ДА-ДрНЕМТ составила более 6 Вт. Продемонстрировано, что при работе в усилительном каскаде ДА-ДрНЕМТ имеет удельную выходную мощность более 1 Вт/мм в рабочей полосе частот более 2 ГГц.

КС: донорно-акцепторное легирование, гетероструктурный полевой транзистор, усилительный каскад, усилитель мощности

X-BAND AMPLIFYING STAGE WITH MORE THAN 6 W POWER ON DA-DpHEMTs

**A. A. Makovetskaya, D. V. Kalita, V. A. Pchelin, V. G. Lapin, A. B. Pashkovsky,
V. M. Lukashin, S. V. Scherbakov, S. I. Novikov**

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

K. S. Zhuravlev, A. I. Toropov

A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk

The first results of development of power amplifying stage, based on heterostructure field effect transistor with a donor-acceptor doping (DA-DpHEMT) are shown. The power amplifying stage on DA-DpHEMT with Г-shaped gate length about 0.3 microns and 4.8 mm width under input power of 600 mW and the drain voltage of 9.5 V, demonstrated output power more than 6 W at a frequency of 9.2 GHz in pulse mode. It is shown that power amplifying stage on DA-DpHEMT has specific power more than 1 W/mm in a range of frequencies not less than 2 GHz.

Keywords: donor-acceptor doping, pHEMT, amplifying stage, power amplifier

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромный прогресс приборов на основе нитрида галлия [1], усилители мощности (УМ) на основе гетероструктурных полевых транзисторов типа рНЕМТ до сих пор оста-

ются широко востребованными во многих системах СВЧ-электроники, таких, как радиолокационные станции, активные фазированные антенные решетки, системы связи, аппаратура радиолокационного противодействия. С каждым годом к данным системам предъявляются всё более возрастающие требования по выходным характеристикам, что, в свою очередь, повышает требования к входящим в их состав активным элементам. Одним из перспективных методов улучшения характеристик СВЧ полевых транзисторов является разработка гетероструктур с донорно-акцепторным легированием [2–5]. Апробация данного типа гетероструктур проводилась на конструкции мощного полевого транзистора с длиной трапецевидного затвора 0,4...0,5 мкм и шириной 0,8 мм. На частоте 10 ГГц в импульсном режиме удельная выходная мощность такого транзистора (DA-DpHEMT) составила более 1,7 Вт/мм при коэффициенте усиления более 9,5 дБ и КПД до 50 % [2]. Полученный результат демонстрирует существенное (в 1,5...2 раза) увеличение коэффициента усиления по мощности по сравнению с приборами на традиционных DpHEMT-структурах. Этот результат был подтвержден во время последующих экспериментов на DA-DpHEMT с общей шириной затвора 0,4; 0,8 и 1,2 мм и длиной затвора 0,3 и 0,5 мкм [3–5]. Однако все измерения мощности проводились с помощью измерительной установки, в которой согласующие трансформаторы обеспечивали хорошее согласование в одной задаваемой точке частотного диапазона (10 ГГц). Поэтому для оценки эффективности применения DA-DpHEMT в промышленных изделиях важно было провести исследование транзисторов с большой шириной затвора в используемых на практике согласующих схемах и в достаточно широкой полосе частот.

2. СРАВНЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА ОСНОВЕ DA-DpHEMT И DpHEMT, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Для изучения возможностей данного типа транзисторов в реальной схеме усилителя были изготовлены DA-DpHEMT с шириной Г-образного затвора 4,8 мм. Несколько экземпляров транзисторов были смонтированы в тестовые схемы двух типов (рис. 1). Эти схемы применяются для тестирования мощных транзисторов типа pHEMT, выпускаемых АО «НПП «Исток» им. Шокина», в диапазоне частот 8...12 ГГц.

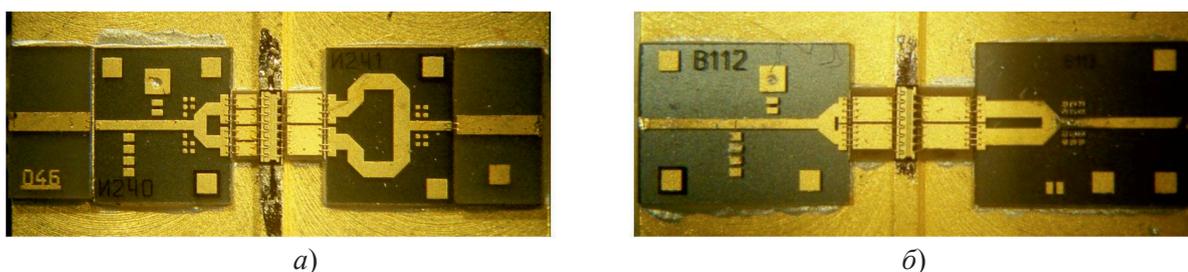


Рис. 1. Фотографии двух типов тестовых схем с DA-DpHEMT:
а – тип 1; б – тип 2

Тестовые схемы состоят из двух плат толщиной 0,25 мм, выполненных из керамики БСТ (барий-самарий-титан) с диэлектрической проницаемостью 80, и двух плат из поликора толщиной 0,25 мм. Микрополосковые линии на керамике БСТ являются основными элементами согласования транзистора; расположенные на поликоре делитель и сумматор мощности помимо своих основных функций также играют роль дополнительных элементов согласования. Так как тестовые платы разрабатывались как универсальные для нескольких типов приборов, то

для получения оптимальных выходных характеристик дополнительно используются простые индиевые подстройки. В целях достижения максимальной выходной мощности для усилительного каскада на DA-DpHEMT были подобраны длины отрезков микрополосковых линий (из имеющихся в наличии) на керамике БСТ, однако поскольку делители и сумматоры ранее рассчитывались для другого типа транзисторов, то площадь подстроек на некоторых образцах оказалась довольно значительной (рис. 2).

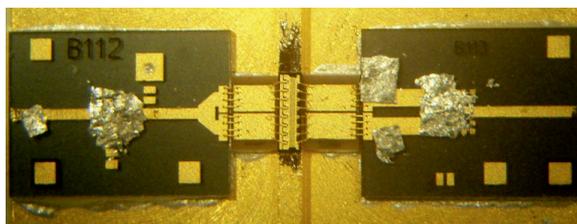


Рис. 2. Фотография тестовой схемы типа 2 с DA-DpHEMT, настроенным на максимум мощности с помощью индиевых подстроек

Были проанализированы данные измерений тестовых схем типа 1 и 2 на основе традиционных DpHEMT за 5 предыдущих лет и выбраны наиболее типичные образцы для сравнения с данными измерений тестовых схем на основе DA-DpHEMT. На рис. 3 приведены частотные зависимости выходных характеристик одной из тестовых схем типа 1 с DA-DpHEMT и характеристики тестовой схемы типа 1 с DpHEMT, измеренные при $P_{\text{вх}} = 500$ мВт и напряжении на стоке 8 В.

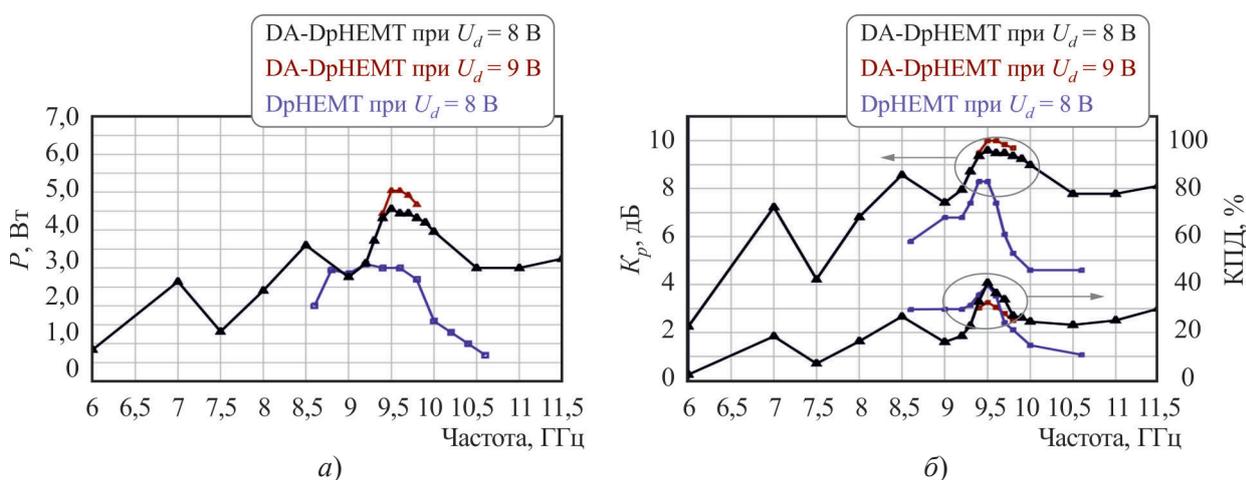


Рис. 3. Выходные характеристики тестовых схем типа 1:

a – зависимость выходной мощности от частоты; *б* – зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты

Из графиков видно, что выходная СВЧ-мощность и коэффициент усиления тестовой схемы с DA-DpHEMT более чем в 1,5 раза превосходят аналогичные параметры в тестовой схеме с DpHEMT, а КПД данных схем практически одинаков. Следует отметить, что DA-DpHEMT эффективно работают, т. е. имеют максимальную выходную мощность при напряжении на стоке более 9 В, в то время как у DpHEMT снижаются выходные характеристики при увеличении напряжения на стоке более 8 В. Для демонстрации максимальных возможностей транзисторов в дальнейшем измерения DA-DpHEMT проводились при напряжении на стоке 9 В, а DpHEMT – при напряжении на стоке 8 В.

На рис. 4 приведены частотные зависимости выходных характеристик двух тестовых схем типа 2 с DA-ДрНЕМТ в сравнении с характеристиками тестовой схемы типа 2 с ДрНЕМТ, измеренные при $P_{\text{вх}} = 500$ мВт. Как видно из графиков, оба типа транзисторов в схеме данного типа имеют более высокие выходные характеристики. Так, в полосе частот 7,5...8,5 ГГц тестовая схема на основе DA-ДрНЕМТ имеет выходную мощность более 6 Вт при коэффициенте усиления более 10,5 дБ и КПД около 45 %, а в полосе частот 7...9 ГГц – более 5 Вт при коэффициенте усиления более 10 дБ и КПД более 30 %.

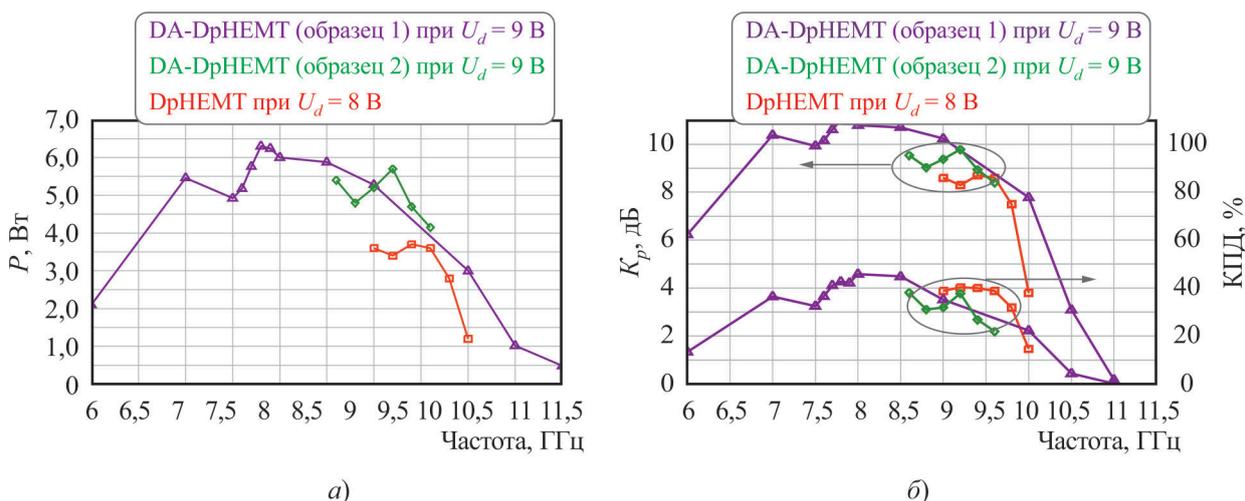


Рис. 4. Выходные характеристики тестовых схем типа 2:

а – зависимость выходной мощности от частоты; б – зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты

Если соотнести полученные результаты с удельной мощностью транзистора, то получим, что в полосе частот 7,5...8,5 ГГц DA-ДрНЕМТ с общей шириной затвора 4,8 мм имеет удельную выходную мощность 1,25 Вт/мм, а в полосе частот 7...9 ГГц – более 1 Вт/мм. Данные результаты находятся на уровне лучших мировых достижений в области разработки мощных транзисторов на AlGaAs-InGaAs-GaAs-гетероструктурах [6] (а возможно, и превосходят его, т. к. получены при большом значении общей ширины затвора – 4,8 мм – и в достаточно широком диапазоне частот).

На рис. 5 приведено семейство амплитудных характеристик нескольких тестовых схем типа 2 на частоте 9,2 ГГц. Из графиков видно, что на частоте 9 ГГц при входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9,5 В в импульсном режиме выходная мощность тестовой схемы на DA-ДрНЕМТ составила более 6 Вт.

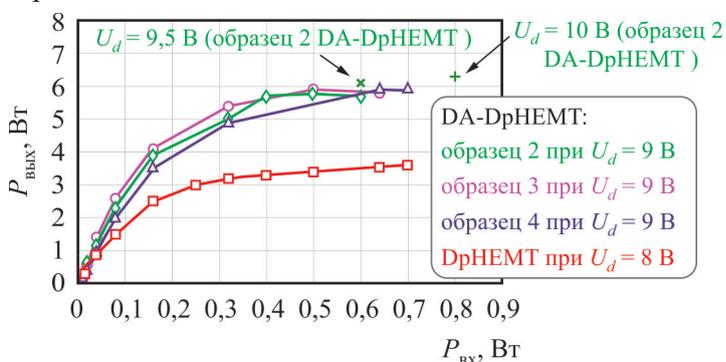


Рис. 5. Амплитудные характеристики тестовых схем типа 2 на частоте 9,2 ГГц

Из рис. 4 и 5 видно, что, как и в случае с тестовой схемой типа 1, DA-DpHEMT демонстрирует выходную мощность и коэффициент усиления, более чем в 1,5 раза превосходящие аналогичные характеристики тестовой схемы на основе DpHEMT.

Следует отметить, что оба типа транзисторов, сравниваемых по поведению в составе одинаковых тестовых схем, были изготовлены по одной и той же технологии с использованием метода оптической литографии, имели одинаковую топологию и длину затвора.

3. СРАВНЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА ОСНОВЕ DA-DpHEMT И DpHEMT, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Для сравнения были выбраны DA-DpHEMT и DpHEMT с геометрическими размерами, обусловленными технологией изготовления: DA-DpHEMT с длиной затвора 0,3 мкм, шириной затвора 4800 мкм, размеры кристалла – 600×1950 мкм, толщина полупроводниковой подложки – 100 мкм, расстояние между затворами – 28 мкм; DpHEMT с длиной затвора 0,25 мкм, шириной затвора 6720 мкм, размеры кристалла – 580×1830 мкм, толщина полупроводниковой подложки – 30 мкм, расстояние между затворами – 14 мкм. Изготовление всех элементов конструкции DA-DpHEMT проводилось на установке проекционной фотолитографии Nikon, большинство операций изготовления DpHEMT также проходило на этом типе литографа, однако затворы транзисторов изготавливались с помощью метода электронной литографии (нанолитограф фирмы Vistec). На рис. 6 приведены фотографии сравниваемых транзисторов, а на рис. 7 – частотные зависимости выходных характеристик тестовых схем типа 2 на их основе.

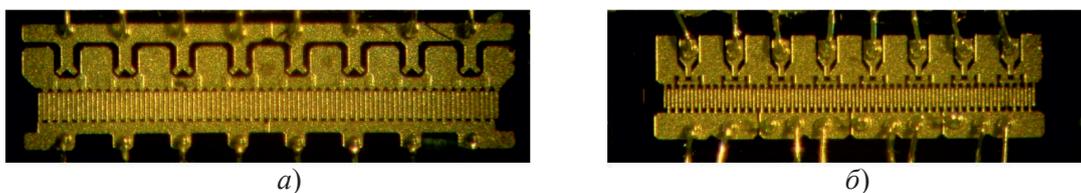


Рис. 6. DA-DpHEMT (а) и DpHEMT (б)

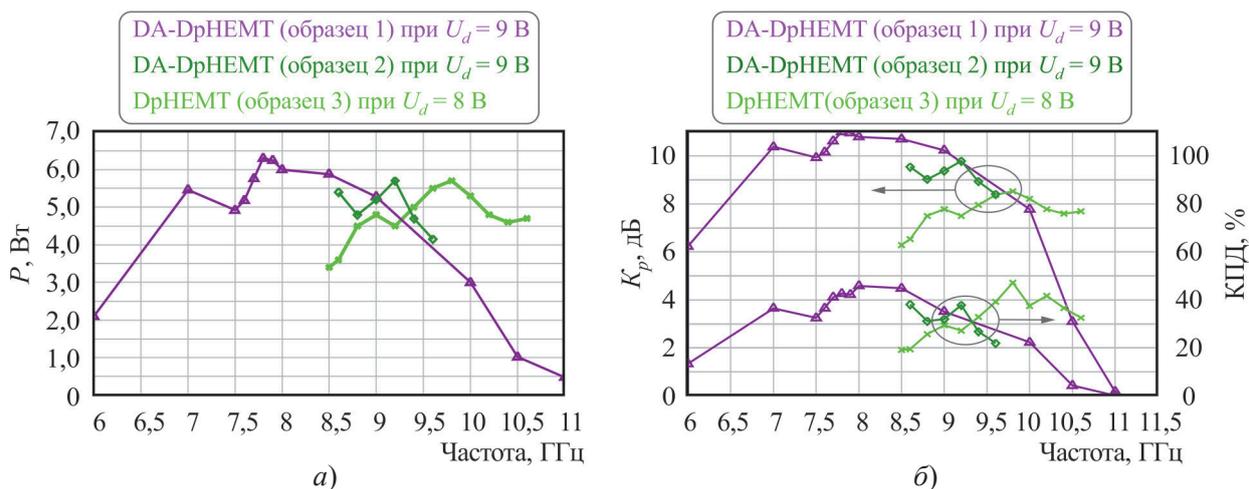


Рис. 7. Выходные характеристики тестовых схем типа 2:

а – зависимость выходной мощности от частоты; б – зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты

Из сравнения результатов видно, что при входной мощности 500 мВт и напряжении на стоке 9 В для DA-DpHEMT и при входной мощности 700 мВт и напряжении на стоке 8 В для DpHEMT выходная СВЧ-мощность и КПД тестовых схем на основе DA-DpHEMT и DpHEMT практически равны и составляют около 6 Вт и 40 % соответственно, при этом коэффициент усиления тестовой схемы на DA-DpHEMT более чем в 1,5 раза больше. Таким образом, DA-DpHEMT в сравнении с DpHEMT показывает практически равные значения выходной мощности и КПД, хотя он имеет общую ширину затвора в 1,4 раза меньше.

Необходимо отметить ещё две особенности разработанного транзистора:

1) DA-DpHEMT изготовлены с помощью метода оптической литографии, что сокращает время операции экспонирования в 10 раз и ведет к снижению общей стоимости изделия;

2) большая толщина кристалла (100 мкм) обеспечивает простоту монтажа DA-DpHEMT в гибридные схемы.

Однако эти преимущества обусловлены не применением новой гетероструктуры, а способом изготовления транзистора [7].

При анализе результатов данной работы видно, что удельная выходная мощность DA-DpHEMT с общей шириной затвора 4,8 мм оказалась меньше удельной выходной мощности DA-DpHEMT с общей шириной 0,8 мм [2–5]. По-видимому, это обусловлено как потерями на суммирование, так и тем, что усилительный каскад был настроен на более широкую полосу частот (более 25 %) [8]. Также возможен естественный разброс характеристик между партиями транзисторов в условиях неотработанной пока технологии изготовления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования работы DA-DpHEMT с большой шириной затвора (4800 мкм) в используемых на практике усилительных схемах. Показано, что мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием обеспечивают в усилительных каскадах выходную СВЧ-мощность, более чем в 1,5 раза превышающую выходную мощность усилителей с транзисторами на традиционной гетероструктуре. При входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9,5 В в импульсном режиме на частоте 9,2 ГГц выходная мощность усилительного каскада на DA-DpHEMT составила более 6 Вт. Продемонстрировано, что при работе в усилительном каскаде DA-DpHEMT имеет удельную выходную мощность более 1 Вт/мм в рабочей полосе частот более 2 ГГц, что находится на уровне лучших мировых достижений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кищинский, А. А.** Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития / А. А. Кищинский // *Материалы 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. – Севастополь: Вебер, 2009. – С. 11 – 16.
2. **Лукашин, В. М.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, А. Б. Соколов // *Письма в ЖТФ*. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
3. **Лукашин, В. М.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, Е. И. Голант, А. А. Капралова // *ФТП*. – 2014. – Т. 48, вып. 5. – С. 684 – 692.

4. **Лукашин, В. М.** Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, А. А. Капралова // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 3. – С. 81 – 87.
5. **Борисов, А. А.** Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-pHEMT / А. А. Борисов, А. Б. Пашковский, В. М. Лукашин, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков, А. А. Маковецкая, К. С. Журавлев, А. И. Торопов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – № 1 (528). – С. 65 – 69.
6. **Fanning, D.** Dielectrically defined optical T-gate for high power GaAs pHEMTs / D. Fanning, L. Witkowski, J. Stidham, H.-Q. Tserng, M. Muir and P. Saunier // GaAs MANTECH Conference.
7. **Кувшинова, Н. А.** Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором / Н. А. Кувшинова, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, К. И. Петров // Радиотехника. – 2011. – № 11. – С. 90 – 93.
8. **Сечи, Ф.** Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти; под ред. А. А. Борисова. – Москва: Техносфера, 2016. – С. 218 – 224.

Статья поступила 2 ноября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Справочник-прейскурант. Приборы полупроводниковые, предлагаемые к поставке в 2018 – 2019 гг. / Составители: Е. Н. Жукова, Ю. В. Петров, Ю. Н. Смирнов, Д. В. Дядиченко. – М.: АО «ЦКБ «Дейтон», 2017. – 241 с.

Справочник-прейскурант содержит информацию о ценах на серийно освоенные и находящиеся в стадии освоения приборы полупроводниковые, а также сведения о предприятиях-изготовителях приборов полупроводниковых с адресами и телефонами технических и сбытовых служб.

Справочник-прейскурант. Микросхемы интегральные, предлагаемые к поставке в 2018 – 2019 гг. / Составители: Е. Н. Жукова, Ю. В. Петров, Ю. Н. Смирнов, Д. В. Дядиченко. – М.: АО «ЦКБ «Дейтон», 2017. – 247 с.

Справочник-прейскурант содержит информацию о ценах на серийно освоенные и находящиеся в стадии освоения микросхемы интегральные, а также сведения о предприятиях-изготовителях микросхем интегральных с адресами и телефонами технических и сбытовых служб.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 537.533

К ВОПРОСУ ОБ АДЕКВАТНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ СВЧ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ И ЛЕНТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ*

П. И. Акимов, А. П. Никитин

АО «НПП «Торий», г. Москва

В. А. Сыровой

ФГУП «ВЭИ им. В.И. Ленина», г. Москва

На примерах использования 3D-программ траекторного анализа, включая их коммерческие варианты, при расчетах ленточных электронных пучков конечной ширины (в том числе пучков с эллиптическим сечением) обсуждаются проблемы адекватного описания прикатодной зоны при эмиссии в ρ - и T -режимах, а также модели области лапласовского поля вблизи кромки катода (тепловой зазор).

КС: ленточные пучки, 3D-программы анализа, тепловой зазор

TO ADEQUACY OF NUMERICAL MODELS FOR ELECTRON-OPTICAL SYSTEM CALCULATIONS OF MICROWAVE TUBES WITH AXISYMMETRIC AND SHEET ELECTRON BEAMS

P. I. Akimov, A. P. Nikitin

JSC «RPE «Toriy», Moscow

V. A. Syrovoy

FSUE «All-Russian Electrotechnical Institute named after V.I. Lenin», Moscow

The problems of adequate description of cathode vicinity in ρ - and T -modes and the models of Laplace's field near cathode (thermal gap) are discussed on examples of 3D codes use (including the commercial variants of programs) for calculations of sheet electron beams with finite width (in particular, beams with elliptical cross section).

Keywords: sheet beams, 3D codes, thermal gap

*Основные положения работы доложены на XII Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». Москва, декабрь 2015.

Не только в жизни богов и демонов
раскрывается могущество числа.

Пифагор

1. ВВЕДЕНИЕ

В любые времена странно было бы подвергать сомнению использование вычислительной техники не только при выполнении практических расчетов, но и в теоретических построениях: адекватность любой модели в конечном счете в теории или эксперименте поверяется числовыми характеристиками явления. Претензии, предъявляемые авторами этого сообщения создателям программных модулей по расчету плотных электронных пучков, разумеется, не относятся к разработчикам мощных электронных приборов: для решения задач им приходится пользоваться имеющимся в наличии программным продуктом.

Заметим, что этот продукт, благодаря впечатляющему набору сервисных программ, выглядит очень привлекательно и создает впечатление неограниченных возможностей, оставляя в тени вопрос о точности вычислений применительно к различным типам задач. По умолчанию предполагается, что создатели пакетов в полной мере осведомлены о результатах теории плотных электронных пучков и приложили достаточные усилия, чтобы точность расчетов во всех случаях обеспечивала адекватное описание физических процессов. При отсутствии подобных гарантий результаты расчетов могут относиться не к физике явления, а к исследованию внутренних свойств самой программы.

Цель сообщения – указать потребителям имеющегося в доступе программного продукта на те моменты, где гарантированная точность вычислений отсутствует и нельзя рассчитывать на адекватность заложенной в программы математической модели, так как она не учитывает или прямо нарушает известные положения теории интенсивных пучков. Это утверждение иллюстрируется примерами подобных, вызывающих сомнение или попросту абсурдных численных результатов в публикациях последних лет.

Все сказанное выше относится к задачам, требующим высокой точности вычислений: исследованию существенно разномасштабных электронно-оптических систем, расчету пучков с высокой компрессией или с необходимостью учета влияния теплового зазора, формированию торцов ленточных пучков с прямоугольным сечением или с сечением в виде параллелограмма в случае планарного гиротрона. В программах практического характера с умеренными характеристиками пучка, в которых важна не тонкая структура потока, а его интегральные характеристики, точность на уровне 5...10 % ошибки обеспечивали уже программы анализа предыдущего поколения.

Численные модели траекторного анализа основаны на гидродинамическом описании прикатодной области при эмиссии, ограниченной пространственным зарядом (ρ -режим) или температурой (T -режим), и на той или иной модели крупных частиц (результат дискретизации потока), движущихся в самосогласованном электромагнитном поле. В работах [1, 2] уже рассматривалась проблема непирсовского угла заделки нулевого формирующего электрода и теплового зазора при расчете пучков с высокой компрессией и было показано отсутствие теоретических оснований для ряда численных моделей. Однако в последнее время наблюдается взрывное число публикаций по расчету ленточных пучков для различных приборов СВЧ с использованием трехмерных коммерческих программ, что заставляет вернуться к этой теме.

2. АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Общие рекомендации, которые можно сформулировать по поводу адекватности приближенных и численных моделей, сводятся в основном к двум позициям [3]:

1) необходимость тестирования на полном наборе эталонных точных решений уравнений пучка, описываемых элементарными и специальными функциями или обыкновенными дифференциальными уравнениями;

2) использование модели прикатодной области, которая не была бы основана на решениях для одномерных диодов (обычно плоском или сферическом).

В работе [3] приведен обширный перечень упомянутых эталонов, включающих все основные черты общей постановки: криволинейный катод с неоднородным токоотбором, неоднородным электрическим и магнитным полем; релятивистские эффекты; решения с высокочастотными осцилляциями; потоки с замкнутыми или бесконечными периодическими траекториями.

Пример тестирования на полном наборе решений с мультипликативным и аддитивным разделением переменных приведен в работе [4] для приближенных $2D$ -моделей электронных потоков, построенных на основе геометризованных уравнений пучка [5, 6]. Аналогичные по полноте исследования современных программ траекторного анализа отсутствуют. Две работы [7, 8] по тестированию на единичных эталонах относятся к пакетам предыдущего поколения, авторов которых вполне устроила ошибка на уровне 7 и 3 % соответственно. Часто используемые при тестировании решения для плоского и сферического диодов обеспечивают в лучшем случае устранение самых грубых несоответствий; при этом многие программные модули, предназначенные для решения неодномерных задач, оказываются попросту незадействованными или используются в щадящем режиме.

Между тем при появлении в задаче малого характерного параметра порядка ϵ ($1/L$, где L – линейная компрессия пучка или величина теплового зазора) для его уверенной фиксации ошибка программы должна быть хотя бы на порядок меньше: $\delta \approx \epsilon/10$. При $L \approx 30$ величина δ составляет около 0,3 %. О подобной точности авторы общеупотребительных прикладных пакетов не сообщают.

Как правило, описание прикатодной области основано на модели плоского или сферического диода, первая из которых не учитывает кривизны стартовой поверхности, а вторая – ее изменения (например, эллипсоидный катод); обе не принимают во внимание неоднородный токоотбор и возможное наличие магнитного поля. Модель прикатодной зоны с учетом упомянутых эффектов на основе теории антипараксиальных разложений приведена в работах [9, 10] и в монографиях [4, 5, 11]. Реализация некоторых специальных видов этой модели описана в работах [12–16], однако внедрение результатов теории в программы траекторного анализа далеко от завершения.

К сказанному необходимо добавить интересный вопрос о соответствии силового воздействия на пучок при гидродинамическом описании и в численных моделях [16]. В уравнениях узких пучков присутствует фокусирующая сила, равная квадрату продольной составляющей магнитного поля, появляющаяся в результате существования поперечного шира продольной скорости. В численных моделях остается имеющая знак сила Лоренца, действующая на дискретный элемент потока, а шир в смысле сплошной среды отсутствует.

Представим теперь, что проблемы тестирования получили разрешение и необходимый уровень точности нам гарантирован. Обратимся к модели зоны вблизи сингулярной эмитирующей поверхности и к ее описанию в программах анализа.

3. ТЕОРИЯ ПРИКАТОДНОЙ ЗОНЫ

Модель прикатодной зоны состоит из двух частей и сводится к расчету пучка в окрестности эмиттера и описанию лапласовского поля вблизи кромки катода, которое позволяет определить конфигурацию нулевой и отрицательных эквипотенциалей. Проблема полного описания прикатодной области для цилиндрического пучка при эмиссии в ρ -режиме рассмотрена в работе [18]. В ней сформулирована концепция синтезированного теплового заряда, не приводящего к нарушению принятой гидродинамической картины явления: зазор образован боковой поверхностью катода и электродом с отрицательным значением потенциала φ .

В последующие годы решение этой проблемы при эмиссии в ρ - и T -режимах построено для двумерных потоков с искривленного катода с неоднородным токоотбором в неоднородном внешнем магнитном поле с учетом релятивистских поправок в рамках теории антипараксиальных разложений [5, 6, 11]. Результатом решения является полное гидродинамическое описание пучка (распределения потенциала, плотности, трубки тока и траектории), а также конфигурация лапласовского поля вблизи кромки катода, схематически представленная на рис. 1. Угол наклона нулевого формирующего электрода к границе потока в общем случае составляет $67,5^\circ$ ($22,5^\circ$ для боковой поверхности катода) в ρ -режиме и 90° в T -режиме.

Для электростатических пучков в ρ -режиме эквипотенциаль $\varphi = 0$ в системе X, Y (нормаль, касательная к катоду на периферии пучка) описывается уравнением

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots, \quad a_1 = \operatorname{tg} \frac{3p}{8} \quad (1)$$

и помимо угла наклона характеризуется кривизной k_0 :

$$k_0 = -\left(\frac{4}{5} k_1 - \frac{1}{20} \frac{\sin u}{R_0} \right) \cos \frac{\pi}{8} + \left(\frac{16J'}{35J} + \frac{9}{28} \frac{\cos u}{R_0} \right) \sin \frac{\pi}{8}, \quad (2)$$

где k_1 – кривизна катода; J – плотность тока эмиссии; R_0 – расстояние кромки до оси симметрии Z ; u – угол наклона оси X к оси Z . Аналогичными уравнениями описываются кривые $\varphi < 0$ [2].

Совокупность параметров электронного потока и лапласовского поля вблизи кромки катода представляет собой единственное локальное решение уравнений пучка при его гидродинамическом описании, на котором основаны и действующие пакеты траекторного анализа.

Трехмерные потоки вблизи произвольной стартовой поверхности рассмотрены в работах [19, 20]. Решение задачи о расчете формирующих электродов в общем случае пространственных пучков неизвестно. Известные результаты относятся к формированию цилиндра с произвольным сечением и произвольного конуса (вырезки из плоского и сферического диодов), а также к параксиальной форме решения для пучков с произвольным сечением (электростатические потоки или режим магнитного сопровождения) [5, 6, 21, 22]. Универсальность углов в $67,5^\circ$ и 90° сохраняется и в этих случаях в плоскости нормаль к контуру сечения – продольная координата.

Кривизна k_0 и ее производная k'_0 эквипотенциали $\varphi = 0$ для произвольного цилиндра определены формулами (аналогичные формулы имеются и для произвольного конуса)

$$k_0 = \left(\frac{9}{28} \sin \frac{p}{8} \right) k_r, \quad k'_0 = -\left(\frac{513}{3136\sqrt{2}} \frac{1}{\sin p/8} \right) k_r^2, \quad (3)$$

где k_r – кривизна контура. Эти результаты могут быть использованы при рассмотрении трехмерных проблем, так как пучок с искривленного катода локально близок к произвольному цилиндру.

Известно, что отрицательные эквипотенциали в случае двумерных течений имеют своими асимптотами две ветви нулевой эквипотенциали в первом и третьем квадрантах (рис. 1). Решение задач о произвольном цилиндре и конусе для сплошных пучков справедливо в первом квадранте, но отсутствует во втором и третьем, где находятся отрицательные эквипотенциали, конфигурацию которых вместе с боковой ветвью кривой $\varphi = 0$ необходимо знать для синтеза теплового зазора. Вместе с тем для произвольных цилиндра и конуса установлен локальный закон независимости сечений: кривизна линии $\varphi = 0$ зависит только от кривизны контура в данном сечении, но не от ее производных.

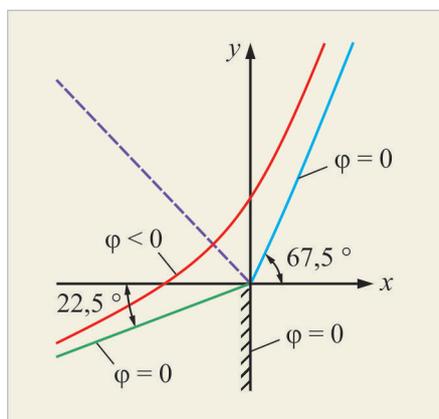


Рис. 1. Качественная картина поля
вблизи кромки катода
для ленточного пучка с тепловым зазором

Учитывая сказанное при рассмотрении трехмерной задачи о тепловом зазоре, по существу, локальной, нет оснований считать, что отмеченные выше факты, справедливые для двумерных систем, произвольных цилиндра и конуса, не имеют места в общем случае. В результате конфигурацию и положение отрицательной эквипотенциали можно рассчитать, исходя из решения осесимметричной задачи для пучка, радиус которого совпадает с радиусом кривизны трехмерного контура в фиксированной точке. Обойдя контур, получим конфигурацию соответствующей эквипотенциальной поверхности [23].

В работе [2] предложен алгоритм итеративного встраивания описанной выше модели прикатодной области с тепловым зазором в численные модели для двумерных пучков. Однако во всех используемых пакетах окрестность кромки катода задается без учета известных положений теории. Если простейшая модель закона $4/3$ при всей своей грубости не противоречит физике явления и уравнениям пучка, то произвольное назначение непирсовского угла наклона или теплового зазора означает выход за рамки гидродинамического описания с невозможностью оценить ошибку за счет использования программы, на этом описании основанной. Аналогом подобных действий для пучка было бы назначение не закона $4/3$, а любой произвольно взятой функции (например, $1 - \exp(-x^2)$).

Можно ожидать, что ошибка, порождаемая принятой практикой рассмотрения прикатодной зоны, будет особенно значительной для пучков с высокой компрессией: в двумерном случае отклонение угла наклона кривой $\varphi = 0$ от $67,5^\circ$ приводит к нарушению модели, а возмущение dk_0 ее кривизны на основании (2) – к шестикратному изменению $\delta J'/J$ – относительного градиента плотности тока эмиссии.

Постановка задачи о непирсовском угле наклона с физической точки зрения вполне оправдана. Однако аппаратом для ее решения должна быть более сложная кинетическая модель с уравнением для функции распределения (уравнения Власова). Вопрос о точности расчетов при необходимости работать в шестимерном фазовом пространстве для двумерных и трехмерных задач электронной оптики едва ли является более простым, чем проблема точности программ траекторного анализа. К настоящему времени кинетическое рассмотрение выполнено только для плоских диода и магнетрона [24–29].

Достижение упоминавшейся выше точности (ошибка – порядка 0,3 %) представляется сомнительным при грубых действиях по замене решения произвольно задаваемым полем вблизи кромки катода и при отсутствии качественного тестирования на полном наборе имеющихся в наличии эталонных точных решений. На основании сказанного выше можно утверждать, что при использовании коммерческих программ численные результаты совсем не всегда обеспечены качественной моделью исследуемого физического явления. Не прошедшие тестирования программные модули можно уподобить нетарированным приборам, используемым в ходе эксперимента.

4. ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ХАРАКТЕРНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Иллюстрацией сформулированных положений служит рассмотрение нижеперечисленных работ.

На рис. 2 представлены результаты расчета ленточного пучка с тепловым зазором при помощи пакета TORAZ 3D [30]. Геометрия электродов не соответствует решению уравнений модели вблизи кромки катода: участок с большой кривизной электрода с $\varphi < 0$ не обусловлен теорией, угол наклона к границе пучка, который не может быть меньше $67,5^\circ$, составляет 61° ; угол между фронтальной и боковой поверхностями катода равен 57° вместо $67,5^\circ$. Сама возможность рассмотрения этой задачи не подтверждается гарантированной точностью программы. Геометрия потока, достигнутая с использованием неадекватных гидродинамической модели средств, не может не вызывать сомнений в ее достоверности.

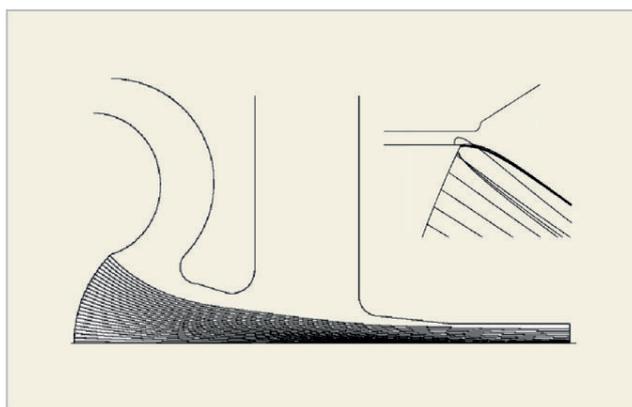


Рис. 2. Расчет сходящегося ленточного пучка, конфигурация теплового зазора и электронного потока в окрестности кромки катода [30]

На рис. 3 представлены расчеты [31] электронно-оптической системы магникона с электростатической линейной компрессией 38,7, полученной за счет «оптимизации» с непирсовским

углом наклона электрода $\varphi = 0$. Теоретическим обоснованием этих действий явилась работа [32], ошибочность которой показана в [1]. Ориентация и форма теплового зазора произвольны и ничем не обоснованы. Исследования проведены с использованием пакета Super SAM [33].

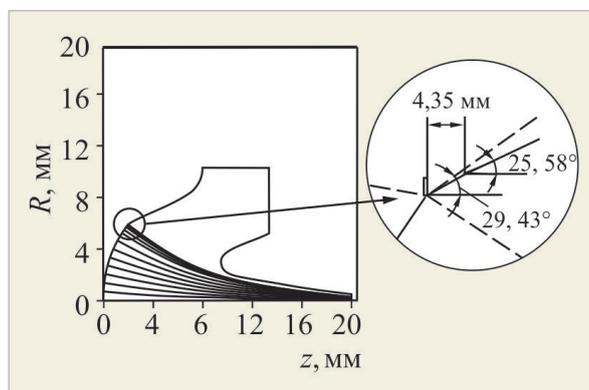


Рис. 3. Расчет осесимметричной пушки для магникона с электростатической линейной компрессией пучка 38,7 и конфигурация теплового зазора [31]

Алгоритмы коммерческих программ не публикуются в открытой печати, однако работа [34] может дать представление о подобных моделях. Цель автора состояла в том, чтобы облегчить задание формирующих электродов для ленточного пучка в трехмерных программах анализа, определяя их поверхностями второго порядка, которые описываются аналитическими формулами. На рис. 4 представлен цилиндрический катод с эллиптическим контуром пучка на этой поверхности и нулевым электродом $abcd$, описываемым формулой с тремя произвольными постоянными. Последние позволяют провести электрод через точку d и выдержать значения пирсовских углов в a и c . Между этими точками на контуре угол наклона эквипотенциали отличен от $67,5^\circ$. О последствиях этого говорилось выше.

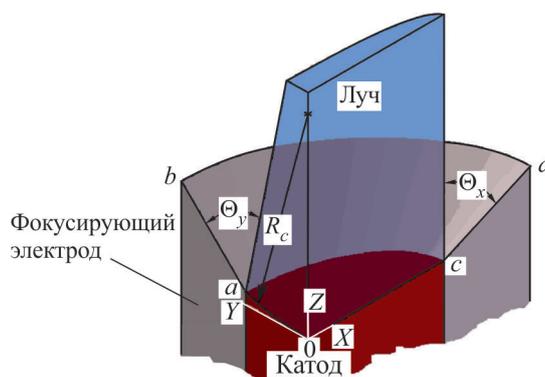


Рис. 4. Иллюстрация одного из алгоритмов 3D-пакета: электрод $\varphi = 0$, аппроксимируемый кривыми второго порядка, для пучка с эллиптическим сечением с цилиндрического катода [34]

Расчет ленточного пучка прямоугольного сечения с цилиндрического катода для W -band усилителя иллюстрирует рис. 5 [35]. Линейная компрессия составляет 30,3, о торцевых электродах сведения отсутствуют; как и на рис. 2, пучок «пережат» за счет приближения электрода

с $\varphi < 0$ к его границе, конфигурация зазора не соответствует теории. Расчет выполнен с использованием пакета MICHELLE.

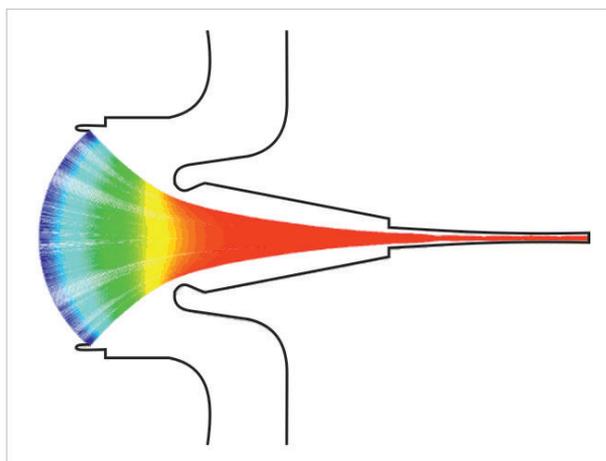


Рис. 5. Электронно-оптическая система для *W*-band усилителя с ленточным пучком прямоугольного сечения, цилиндрическим катодом, линейной компрессией 30,3 [35]

Для пучка с теми же параметрами в работе [36] исследовалось влияние изменения наклона формирующего электрода в $0,075^\circ$ (что составляет 0,1 % от $67,5^\circ$) на плотность тока эмиссии, вариация которой оказалась в 15...20 раз выше. Отклик, превышающий величину возмущения на порядок, не насторожил авторов и не получил объяснения. Фиксация величины в 0,1 % требует от программы совсем фантастической точности с ошибкой в 0,01 %.

Работа [36] посвящена расчету пучка с эллиптическим сечением на катоде и формирующим электродом, имеющим также эллиптическую форму или вид расширяющегося прямоугольного короба (рис. 6). В первом случае пучок оказался перефокусированным, а во втором – конфигурация типа прямоугольника со скругленными углами удовлетворила авторов.

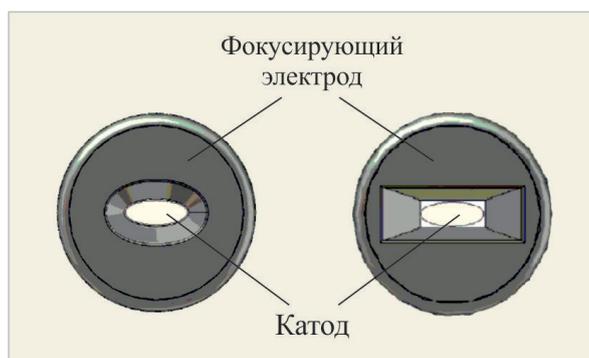


Рис. 6. Два варианта фокусирующего электрода для пучка с эллиптическим сечением [37]

Иначе как к недоразумению, которое может быть вызвано неправильным обращением с пакетом (CST Studio), дополненному безоговорочной верой в компьютер, эти результаты отнести нельзя. Эллиптический пучок естественно формировать при помощи поверхности, имеющей в сечении вид овала, на что указывает решение для цилиндра с эллиптическим сечением [5, 6],

но закон расширения этой поверхности не может быть произвольным. Ожидать эффективного формирования пучка посредством короба, где в лучшем случае правильные углы наклона нулевой эквипотенциали имеют место только в четырёх точках контура и силы со стороны пространственного заряда не сбалансированы, по меньшей степени странно.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные 3D-программы траекторного анализа осесимметричных и ленточных пучков, включая их коммерческие варианты, не имеют адекватной модели прикатодной зоны при эмиссии, ограниченной пространственным зарядом или температурой, когда поверхность катода является сингулярной поверхностью с обращаемой в бесконечность плотностью пространственного заряда. Сказанное относится как к области пучка, где используются наиболее простые модели одномерных диодов, так и к лапласовской области вблизи кромки катода. Если упомянутые одномерные модели во всяком случае не противоречат физике явления, то в области прикатодных формирующих электродов (тепловой зазор) единственное решение задачи заменяется полем системы электродов, не имеющих отношения к этому решению и самой гидродинамической модели пучка.

Вносимая таким образом ошибка не может быть оценена в рамках использования тех же траекторных модулей и должна быть особенно существенна для пучков с высокой компрессией.

Для достижения высокой точности расчета необходимо введение в программы известных теоретических моделей прикатодной зоны и физическое (в отличие от математических тестов с измельчением шага) тестирование численных алгоритмов на эталонных точных решениях уравнений пучка.

Результаты численного моделирования истинны лишь до тех пор, пока заложенная в программы модель сохраняет свою адекватность.

Авторы признательны Н. К. Приступчику за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сыровой, В. А.** Об использовании непирсовского угла заделки нулевого формирующего электрода при оптимизации параметров плотного электронного пучка с высокой компрессией / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 7. – С. 879 – 884.
2. **Акимов, П. И.** Проблема теплового зазора в программах траекторного анализа плотных электронных пучков / П. И. Акимов, П. В. Невский, В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 1. – С. 92 – 101.
3. **Сыровой, В. А.** Проблемы адекватности математических моделей в оптике плотных релятивистских электронных пучков / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 4. – С. 467 – 493.
4. **Сапронова, Т. М.** Тестирование геометризованных моделей двумерных электронных пучков / Т. М. Сапронова, В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 726 – 756.
5. **Сыровой В. А.** Теория интенсивных пучков заряженных частиц / В. А. Сыровой. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
6. **Syrovoy, V. A.** Theory of intense beams of charged particles / V. A. Syrovoy. – New York: Elsevier, 2011.
7. **Birtles, A. B.** High efficiency numerical analysis of charged-particle beam devices / A. B. Birtles, D. Dirmikis // International Journal of Electronics. – 1975. – Vol. 38, No 1. – P. 49 – 67.
8. **Мануилов, В. Н.** О расчете стационарных электронных пучков в режиме ограничения тока пространственным зарядом / В. Н. Мануилов, Б. В. Райский, Ш. Е. Цимринг, Е. А. Солянова // Известия вузов. Радиофизика. – 1992. – Т. 35, № 9 – 10. – С. 846 – 856.

9. **Данилов, В. Н.** О приближенном решении краевой задачи для уравнений стационарного электростатического пучка заряженных частиц / В. Н. Данилов, В. А. Сыровой // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1969. – № 1. – С. 11 – 19.
10. **Акимов, П. И.** Проблемы повышения точности программ траекторного анализа интенсивных электронных пучков / П. И. Акимов, Г. П. Осипова, В. А. Сыровой // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Т. 29, № 3. – С. 405 – 422.
11. **Сыровой, В. А.** Введение в теорию интенсивных пучков заряженных частиц / В. А. Сыровой. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
12. **Свешников, В. М.** О численном расчете пучка заряженных частиц методом итераций по подобластям / В. М. Свешников, В. А. Сыровой // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 11. – С. 1675 – 1688.
13. **Свешников, В. М.** Расчет прикатодной области в электронно-оптических системах, формирующих интенсивные пучки заряженных частиц / В. М. Свешников // Прикладная физика. – 2004. – № 1. – С. 50 – 55.
14. **Свешников, В. М.** Повышение точности расчета интенсивных пучков заряженных частиц / В. М. Свешников // Прикладная физика. – 2004. – № 1. – С. 55 – 65.
15. **Свешников, В. М.** О расчете интенсивных пучков заряженных частиц методом итераций по подобластям / В. М. Свешников // Прикладная физика. – 2006. – № 3. – С. 49 – 57.
16. **Greenfield, D.** Finite-element simulation of thermoemission electron guns / D. Greenfield // Proceedings of SPIE. – 2006. – Vol. 6278. – P. 627805-1 – 627805-8.
17. **Сыровой, В. А.** Ленточный релятивистский электронный пучок в узкой полости / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 2. – С. 244 – 249.
18. **Данилов, В. Н.** К расчету электронных пушек с тепловым зазором по методу синтеза / В. Н. Данилов, В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 2. – С. 418 – 421.
19. **Сыровой, В. А.** О геометрии пространственных электронных потоков в окрестности произвольного гладкого эмиттера / В. А. Сыровой // Известия вузов. Радиофизика. – 1988. – Т. 31, № 8. – С. 984 – 994.
20. **Сыровой, В. А.** Окрестность произвольной стартовой поверхности при эмиссии в T -режиме / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 5. – С. 493 – 501.
21. **Сыровой, В. А.** О формировании цилиндрического электронного пучка с произвольным сечением при эмиссии в T -режиме / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 12. – С. 1503 – 1508.
22. **Сыровой В. А.** Регуляризованное решение задачи расчета формирующих электродов для трехмерных параксиальных электронных пучков / В. А. Сыровой // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 2. – С. 240 – 254.
23. **Акимов, П. И.** Электронно-оптические системы с экранированным катодом и ленточным пучком эллиптического сечения / П. И. Акимов, А. А. Гаврилин, А. П. Никитин и др. // Радиотехника и электроника. – В печати.
24. **Langmuir, I.** The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plane electrodes / I. Langmuir // Physical Review. – 1923. – Vol. 21, No 4. – P. 419 – 435.
25. **Lindsay, P. A.** Potential distribution between two plane emitting electrodes / P. A. Lindsay, F. W. Parker // Journal of Electronics and Control. – 1959. – Vol. 7, No 4. – P. 289 – 315.
26. **Lindsay, P. A.** Potential distribution between two plane emitting electrodes. II. Thermionic engines / P. A. Lindsay, F. W. Parker // Journal of Electronics and Control. – 1960. – Vol. 9, No 2. – P. 81 – 111.
27. **Lindsay, P. A.** General steady-state theory of linear magnetrons. I / P. A. Lindsay // Journal of Electronics and Control. – 1960. – Vol. 8, No 3. – P. 177 – 190.
28. **Lindsay, P. A.** General steady-state theory of linear magnetrons. II / P. A. Lindsay // Journal of Electronics and Control. – 1964. – Vol. 17, No 1. – P. 67 – 80.
29. **Hernqvist, K. G.** Duo-emitter diode / K. G. Hernqvist, J. R. Fendley // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34, No 4. – P. 979 – 984.

30. **Ivanov, V.** 3D method for the design of multi or sheet beam RF sources / V. Ivanov, K. Ko, A. Krasnykh et al. // Stanford Linear Accelerator Center. SLAC-PUB-9366. – August 2002.
31. **Запругаев, А. И.** Исследование 100-МВт источника электронов с высокой компрессией пучка: дисс. канд. техн. наук / Запругаев А. И. – Новосибирск, 2004. – 139 с.
32. **Lomax, R. J.** Effect of inclination of focusing electrodes on electron beam formation / R. J. Lomax // Journal of Electronics and Control. – 1959. – Vol. 6, No 1. – P. 39 – 49.
33. **Baryshev, Y. V.** A 100-MW electron source with extremely high beam area compression / Y. V. Baryshev, I. V. Kazarezov, E. V. Kozyrev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1994. – Vol. 340. – P. 241 – 258.
34. **Krasnykh, A.** Employment of second order ruled surfaces in design of sheet beam guns / A. Krasnykh // Stanford Linear Accelerator Center. SLAC-PUB-12277. – January 2007.
35. **Nguyen, K. T.** High-perveance *W*-band sheet-beam electron gun design / K. T. Nguyen, J. Pasour, E. L. Wright et al. // IVEC-2008. – P. 179 – 180.
36. **Pasour, J.** Demonstration of a 100-kW solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers / J. Pasour, K. T. Nguyen, E. L. Wright et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, No 6. – P. 1792 – 1797.
37. **Tang, X.** Ellipse-shaped electron gun for *W*-band sheet beam devices / X. Tang, Z. Duan, X. Guo et al. // IVEC-2012. – P. 385 – 386.

Статья поступила 16 ноября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ЛОПАТКИН А. Проектирование печатных плат в системе Altium Designer: учеб. пособие для практических занятий. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 554 с.: ил.

В книге подробно с применением пошаговых инструкций описывается весь цикл проектирования печатной платы – от ввода схемы до верификации проекта и выпуска рабочей документации. Рассмотрены инструменты автоматической и интерактивной трассировки, размещения и редактирования полигонов, задания и проверки конструкторско-технологических норм. Большое внимание уделено созданию и ведению библиотек, включающих все известные разновидности электронных компонентов.

Второе издание обновлено с учетом новых версий системы, а также включает материал, посвященный разработке иерархических и многоканальных схем, приемам работы с рабочими панелями списков, генератором символов и инструментами архивирования проектов. Кроме того, расширен список подробно разобранных системных и проектных настроек.

Книга может быть полезна для разработчиков электронной аппаратуры и студентов технических вузов, начинающих осваивать систему Altium Designer.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.96.98:612.84

ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ СВЧ-СТЕРЕОРАДАРА ДЛЯ СЛЕПЫХ

С. А. Перегонов

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

Техническая суть предлагаемого СВЧ-стереорадара для слепых заключается в том, что СВЧ-локатор с непрерывно излучаемыми и принимаемыми сигналами с линейной по частоте модуляцией (ЛЧМ) обеспечивает непосредственное преобразование СВЧ принятых отражённых сигналов от объектов в стереофоническую пару звуковых сигналов, воспроизводящих сигналы для левого и правого уха. Это, как показано в ряде работ, формирует в сознании слепого образ окружающей обстановки. В статье анализируется ожидаемый характер звуковых сигналов предлагаемого СВЧ-стереорадара.

КС: технические поводыри для слепых, ЛЧМ-локаторы малой дальности, СВЧ-локаторы для слепых

SOUND SIGNALS OF MICROWAVE STEREO RADAR FOR BLIND PEOPLE

S. A. Peregonov

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

The technical essence of the proposed microwave stereo radar for the blind is that the microwave locator with continuously emitted and received signals with linear frequency modulation (FMCW) provides a direct conversion of the microwave received signals reflected from the objects into a stereo pair of audio signals reproducing signals for the left and right ear. As a number of works show, it forms the image of the environment in the minds of the blind. This article analyses the expected character of the sound signals of the proposed microwave stereo radar.

Keywords: technical guides for the blind, short range LFM locators, microwave locators for the blind

Преобразование СВЧ-сигналов непосредственно в стереосигналы диапазона слышимых частот обеспечивается за счёт использования специальной трёхлучевой системы антенн. Одна передающая антенна обеспечивает облучение пространства по азимуту в пределах угла 60...90 град, а две приёмные антенны, которые имеют диаграммы направленности более узкие (в пределах 40...60 град), имитирующие аудиограммы ушей человека, отклонены от оси передающей антенны на 20...30 град, оставаясь в зоне, облучаемой передающей антенной.

В результате этого соотношение уровней принятых СВЧ-сигналов в двух приёмных каналах будет зависеть от величины отклонения положения объекта от оси РЛС, что дает возможность сформировать стереофоническую пару звуковых сигналов, подводимых к ушам человека, позволяя ему определить направление на объект по азимуту (рис. 1). При этом дальность до объекта будет характеризоваться частотой звукового сигнала.

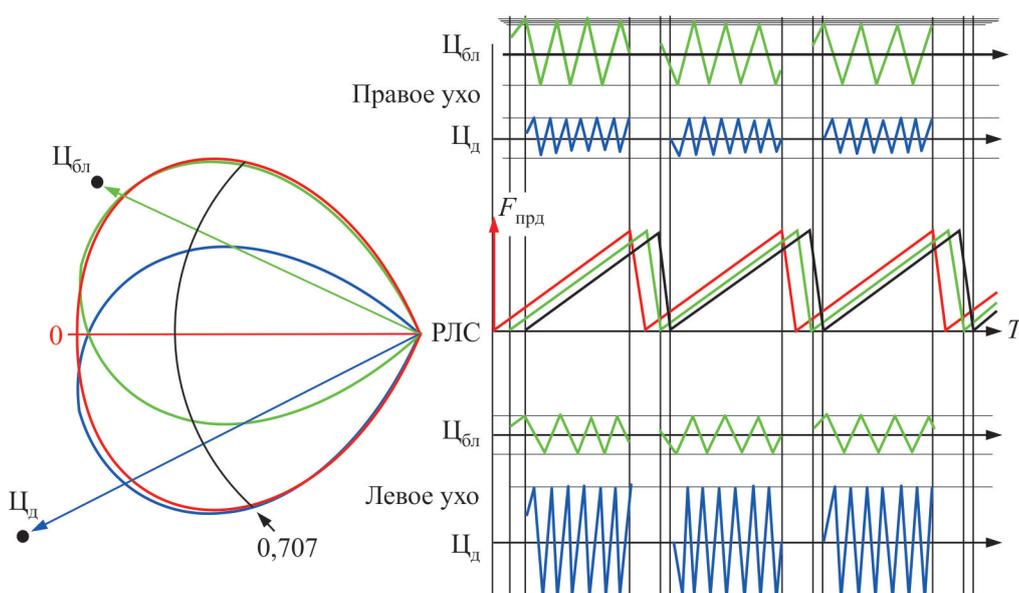


Рис. 1. Двухканальный прием сигналов от двух целей стереорадаром

На рис. 1 красным цветом выделены диаграмма передающей антенны и изменение частоты во времени. Зелёным цветом – диаграмма антенны правого канала, а синим – левого. На рисунке также приведены две цели: ближняя $\Psi_{\text{бл}}$ и дальняя $\Psi_{\text{д}}$.

Сигнал от ближней цели низкой частоты для правого уха будет больше, чем для левого (зелёные синусоиды), а сигнал дальней цели высокой частоты будет больше для левого уха (синие синусоиды), что обеспечит определение направления по азимуту. Для разрешения объектов по углу места антенны должны иметь плоские диаграммы с шириной луча $1 \dots 3$ град по вертикали, с использованием для формирования изображения 3D ручного сканирования по углу места.

Чтобы создать условия для непосредственного преобразования СВЧ-сигнала с ЛЧМ в сигналы звукового диапазона при заданных дальностях контроля (например, $0,5 \dots 10$ м), необходимо обеспечить вполне определённые значения крутизны изменения частоты несущей и диапазона перестойки несущей частоты, с учётом возможности реализации радиотехнической части устройства и характеристик слуховой системы человека, которая включает в свой состав уши и мозг, обрабатывающий звуковую информацию.

Зависимости частоты выходных сигналов приёмных каналов от дальности до объектов для трёх значений крутизны перестройки несущей частоты приведены на рис. 2. Как следует из рисунка, при крутизне 91 ГГц/с и дальности от $0,5$ до $5 \dots 7$ м звуковые частоты будут находиться в диапазоне $300 \dots 4100$ Гц, что практически совпадает с оптимальным диапазоном слышимости у большинства людей. Практически этот диапазон используется в телефонной связи. При значениях крутизны 51 и 30 ГГц/с диапазоны звуковых частот смещаются вниз, до значений $175 \dots 2400$ и $100 \dots 1400$ Гц, что не оптимально, но может быть принято, исходя из возможностей практической реализации радиотрактов, что будет обсуждено с учётом свойств слуховой системы человека.

Перечень основных характеристик слуховой системы человека, составленный по данным работ [1–3], приводится в таблице. Используя эти данные, с учётом параметров модуляции частоты передатчика, можно спрогнозировать вид звуковых сигналов.

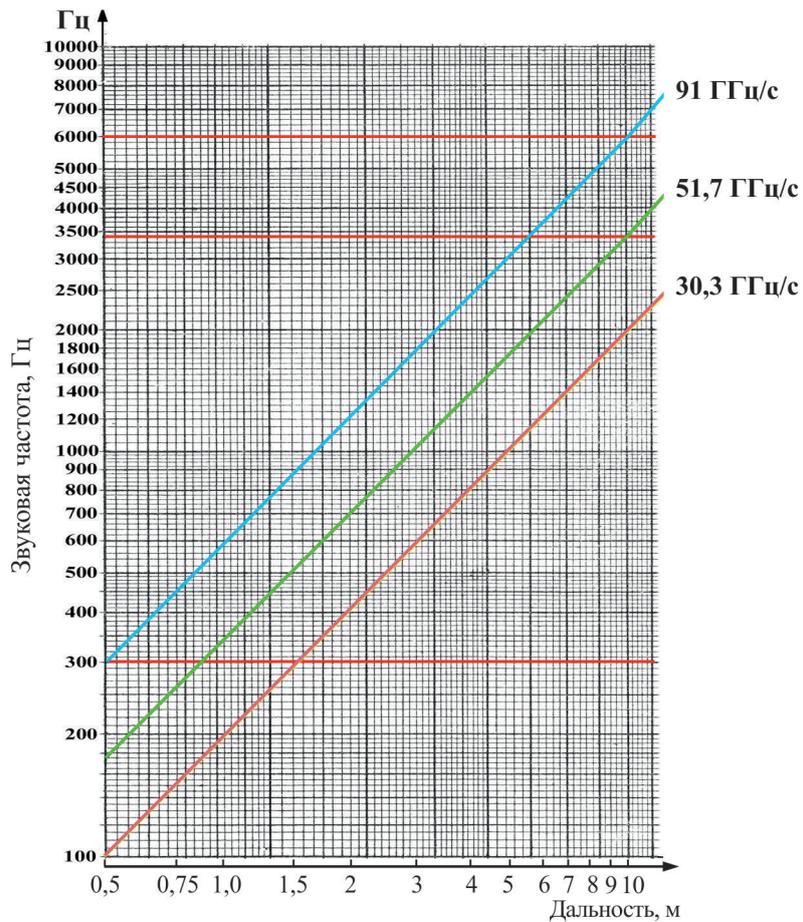


Рис. 2. Зависимости звуковой частоты на выходе приемного канала от дальности до объектов для трех значений крутизны перестройки несущей частоты

Номер позиции	Параметр	Значение
1	Полная полоса слышимости	От 16 Гц до 20 кГц
2	Основная, оптимальная полоса	300 Гц – 4 кГц
3	Число различных градаций частот	620 в полосе 16 – 20000 Гц, 140 в полосе 16 – 500 Гц
4	Время различения тона сигнала	15 мс в диапазоне 1 – 2 кГц, до 60 мс на частотах ≤ 500 Гц
5	Инерционность восприятия звука	От 30 – 50 – 70 до 165 мс
6	Время распознавания (инерционность слуха)	$\leq 15 - 50$ мс
7	Быстродействие на звук опасности	0,12 – 0,18 с

Окончание таблицы

Номер позиции	Параметр	Значение
8	Разрешение по частоте	1 – 2 Гц в диапазоне 50 – 500 Гц, 5 – 6 Гц на частотах ≥ 500 Гц
9	Полоса слуховых анализаторов по уровню 0,7	35 Гц на 250 Гц, 50 Гц на 1000 Гц, 200 Гц на 4000 Гц
10	Добротность резонатора «улитки»	7,1 на 250 Гц, 20 на 1000 Гц, 20 на 4000 Гц
11	Бинауральный эффект	Способность определять направление, сравнивая сигналы правого и левого уха
12	Погрешность локализации по азимуту	От 3,8 град в диапазоне 50 – 500 Гц до 0,5 град в диапазоне 0,5 – 7 кГц
13	Погрешность в угломестной плоскости	10 – 15 град
14	Динамический диапазон слухового канала	120 дБ от 10^{-12} до 1 Вт/м ²
15	Дифференциальные пороги ощущения уровней сигналов в обоих каналах	Ощущаются изменения звукового давления на 6 – 12 % (5,5 – 1,0 дБ). Всего до 374 скачков уровней на частоте 1000 Гц для каждого уха
16	АЧХ слухового канала относительно уровня на 1 – 4 кГц	Снижение чувствительности на частоте 250 Гц на 35 дБ и на частоте 100 Гц на 60 дБ
17	Запас по чувствительности под шумами к монохромному сигналу	До 15 дБ в полосе 100 – 5000 Гц
18	Определяющий параметр при определении направления на источник звука	Разность фаз сигналов правого и левого уха до примерно 1300 Гц и разность уровней сигналов ушей выше этой границы

Примечание. Некоторые расхождения в приводимых цифровых значениях параметров, полученных разными авторами, объясняются, вероятно, разными методиками измерений испытуемых субъектов.

Важнейшим параметром, определяющим работу стереорадара, является период модуляции. Он должен быть, с одной стороны, достаточным для формирования чёткого звукового сигнала, а с другой – возможно коротким, чтобы уменьшить требуемый диапазон перестройки несущей частоты, что упростит реализацию радиотракта.

В результате анализа свойств слуха и параметров СВЧ-сигналов было выбрано компромиссное значение периода модуляции в 100 мс (рис. 3) с длительностью обратного хода не более 5 мс. При этом за период модуляции даже для частоты 300 Гц сформируется 30 периодов звукового сигнала, что достаточно для распознавания сигнала (см. поз. 4 и 6 таблицы).

Требуемый диапазон перестройки несущей частоты при крутизне 90 ГГц/с составит 9 ГГц, что может быть реализовано, с учётом возможных полос пропускания усилителей и антенн, а также при перестройке генератора передатчика, на частоте 80 ГГц и более.

При крутизне перестройки 50 или 30 ГГц/с требуемый диапазон перестройки понизится

до 5 и 3 ГГц, что позволит реализовать радар на несущих частотах 24...60 ГГц, разумеется, с ухудшением качества отражения реальности.

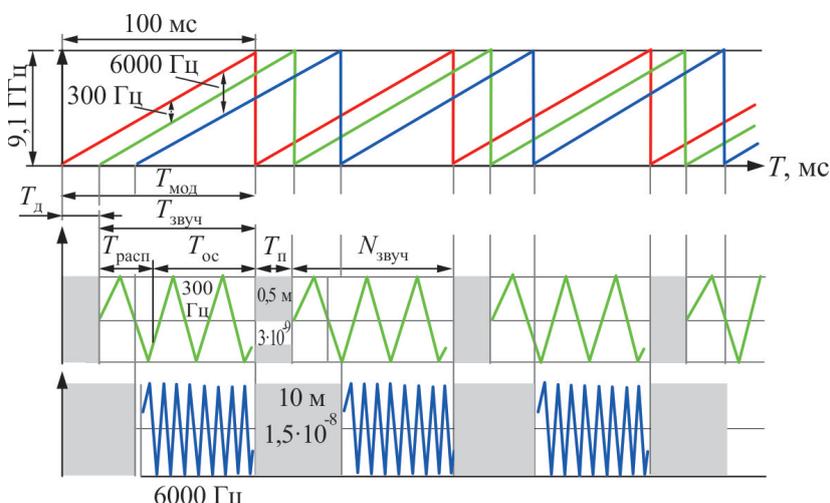


Рис. 3. Основные характеристики и параметры сигналов стереорадара:

$T_{\text{мод}}$ – период модуляции несущей частоты; $T_{\text{звуч}}$ – время звучания за период модуляции;
 $T_{\text{расп}}$ – время распознавания тона звука; $T_{\text{д}}$ – время, определяемое дальностью до цели;
 $T_{\text{ос}}$ – время осознания тона звука; $T_{\text{п}}$ – длительность мертвой паузы;
 $N_{\text{звук}}$ – число периодов частоты дальности за $T_{\text{звуч}}$

Как же будет звучать сигнал от одиночной цели? На рис. 4 представлены по два периода сигнала излучения (красный цвет) и принимаемых сигналов (зелёный цвет в первом периоде и коричневый – во втором). Низкочастотные сигналы на выходе радиотракта будут появляться практически мгновенно (зелёная синусоида) в момент возврата отраженного сигнала, а вот на выходе слухового канала, т. е. на выходе улитки среднего уха, с задержкой, определяемой добротностью резонаторов улитки (см. поз. 10 таблицы). Длительность времени распознавания тона сигнала $T_{\text{расп}}$ в зависимости от частоты звука составляет 15...50 мс (см. поз. 6 таблицы). В момент прекращения перестройки частоты сигнал звуковой частоты на выходе радиотракта оборвётся мгновенно, а на выходе слухового канала спад сигнала будет постепенным, с задержкой.

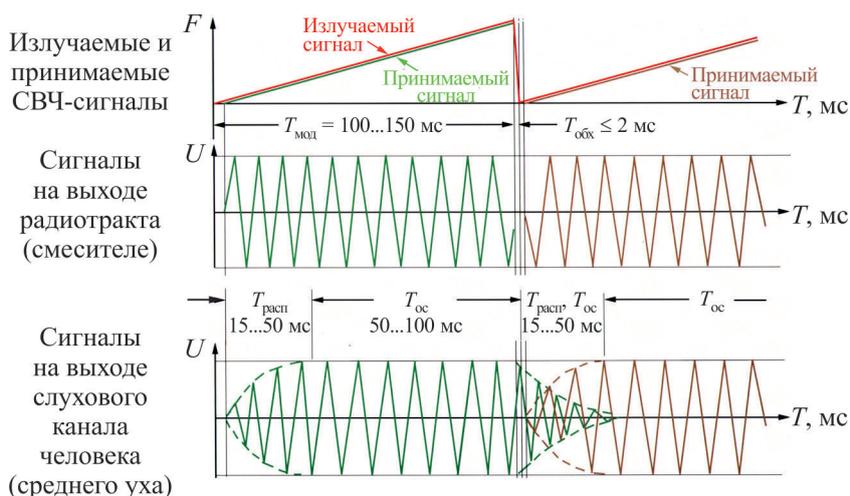


Рис. 4. Вид принимаемых сигналов на выходе радиотракта и среднего уха

В момент начала нового цикла перестройки на выходе слухового канала (коричневая синусоида) начнётся период распознавания, сигнал которого будет суммироваться с затухающим сигналом предыдущего периода. Так как звуковые сигналы в разных периодах некогерентны, а начальные фазы равновероятны, то в среднем будет звучать непрерывный тон с амплитудой, пропорциональной дальности и величине объекта, и короткими периодическими помехами в виде неглубоких замираний. Таким ожидается сигнал от одиночного плоского объекта.

Реально перед незрячим будет объёмная реальность с большим числом предметов и препятствий. Сымитируем приближённую к реальности обстановку, в которой может оказаться слепой. На рис. 5, а схематически представлен план отрезка улицы с различными объектами. Выделено 4 сектора, в которых будет находиться человек по мере движения. Отражённые от каждого объекта сигналы будут иметь сложный спектр с различной ориентацией по азимуту. Для наглядности использованы шкалы дальности, в которых частоты обозначены цветами радуги от красного (дальность – 0,5; частота – 300 Гц) до зелёного (дальность – 8 м; частота – 4800 Гц).

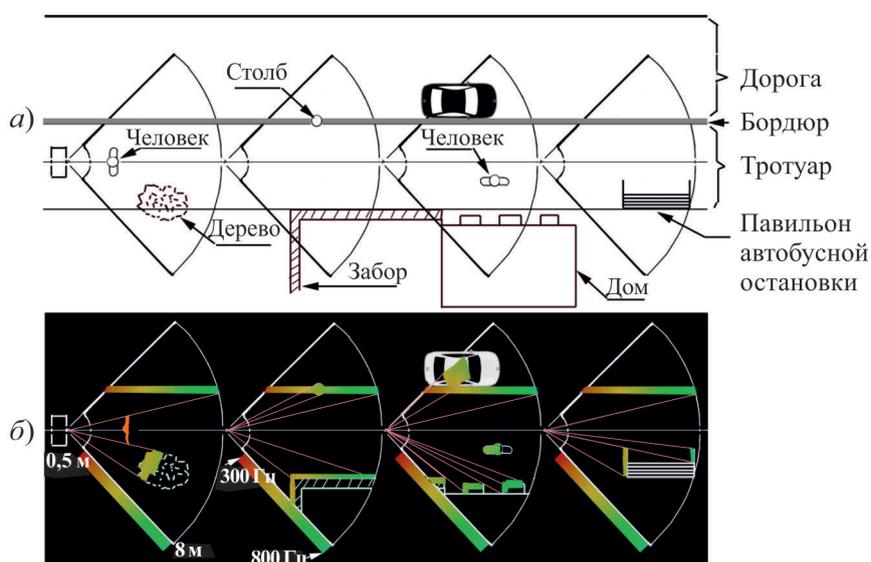


Рис. 5. Иллюстрация формирования звуковой картины

Ожидаемые спектры отражённых сигналов, которые будет слышать человек, приведены на рис. 6. Спектр от шершавого бордюра будет непрерывным с подъёмом на низкой частоте из-за меньшей дальности, а спектр от железного гофрированного забора с периодической структурой будет звучать как набор синусоид с распределением тонов по азимуту в зависимости от расположения забора относительно слепого (рис. 6, поз. 2).

А как будет звучать сигнал от объёмного объекта, например от лица человека, находящегося на расстоянии одного метра? Для оценки вида спектра в этом случае нужно учитывать, что при крутизне перестройки 90 ГГц/с каждый сантиметр увеличения расстояния приводит к повышению частоты отраженного сигнала на 6 Гц. При положении лица анфас расстояние от кончика носа до кончиков ушей составит 15...18 см, т. е. частота звуков будет в пределах 600...708 Гц, а число градаций частот 18...21 (см. поз. 8 таблицы). При ширине лица 20...22 см азимутальный размер составит 11...12 град, что при азимутальном разрешении 0,5...1,0 град (см. поз. 12 таблицы) обеспечит получение 12...24 точек. Наконец, по высоте лицо имеет размер 22...25 см, при угломестной ширине лучей антенн в 1...3 град это даст порядка 10...25 строк разложения.

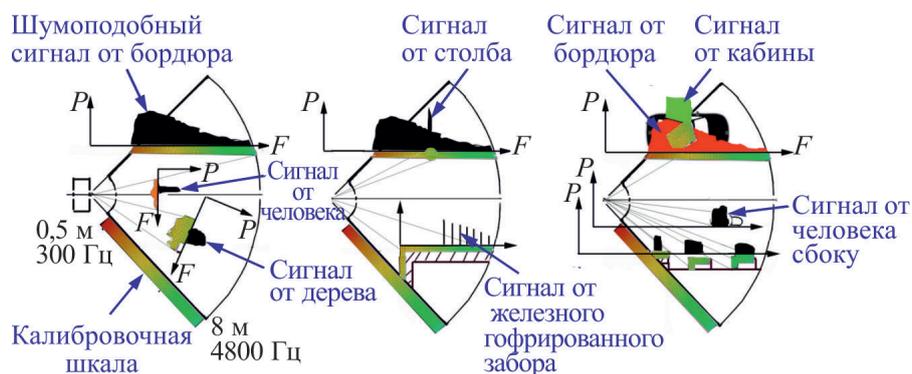


Рис. 6. Ожидаемые спектры звуковых сигналов СВЧ-стереорадара с ЛЧМ от различных объектов: от бордюра автодороги, от человека при положении спереди, от дерева, от столба, от железного гофрированного забора с периодической структурой, от кабины легкового автомобиля, от человека с боковой стороны и тому подобных целей

Полное число параметров звукового портрета лица при расстоянии 1 м составит по дальности, ширине и высоте $(18...21) \times (12...24) \times (10...25) = 2160...12600$ единиц. Четвёртой характеристикой сигнала будет его громкость. При этом звуковой портрет лица будет восприниматься как выпуклый (объёмный) объект, а цикл обзора будет составлять доли секунды. Предлагаемой технологии можно присвоить шифр СТРЛ (СТереоРадиоЛокация).

На сегодняшний момент известны три варианта реализации систем для слепых, работающих по принципу сканирования обозреваемого пространства [4–6].

Первый вариант основан на использовании миниатюрной видеокамеры, цифровой кадр которой разбивается с равномерным шагом на 64×64 участка (пикселя). Последовательно кадр сканируется слева направо по оси «ширина» с одновременной оцифровкой столбцов из 64-х пикселей каждый, с учётом их яркости (16 градаций) и с присвоением соответствующей частоты (64 значения) и силы звучания пикселя, отражающей положение пикселя по высоте. Чем выше расположен пиксель, тем выше частота звучания (система eVOIS).

Полученные сигналы в процессе сканирования и преобразования аналог-цифра запоминаются в оперативной памяти и после обратного преобразования цифра-аналог озвучиваются в течение 1 с. То есть цикл обзора длится не менее секунды, что ограничивает скорость перемещения оператора, создавая определённые неудобства.

Конвейерная цифровая обработка аналоговых сигналов кадра видеокамеры в выходные аналоговые звуковые сигналы с обратным преобразованием и дискретная форма пикселей приводят к определённым искажениям отражения действительности. Очень существенно, что данная система не индицирует дальность до предметов, создавая плоскую реальность, при которой о перспективе можно судить лишь по размерам предметов.

Вторая система создана в Иерусалимском университете. Разработанное устройство позволяет обеспечить подмену визуального восприятия звуковым (sensory substitution device – SSD), что даёт возможность слепым людям в некотором смысле «видеть» окружающую обстановку.

В основе SSD используется миниатюрная камера на очках, подключаемая к небольшому компьютеру. Разработанная программа преобразует визуальную информацию в звуковую.

Базовые правила их формирования довольно просты. Например, контрастная линия, идущая слева направо и вверх, может быть отражена сигналом с нарастающим тоном, а линия, идущая вниз, – звуком с постепенно понижающейся частотой.

Эксперименты с привлечением незрячих подтвердили высокую эффективность аппаратуры, а исследователи сделали вывод: мозг организует зоны коры по принципу специфики обработки информации (условно – по типу необходимых вычислений), вне зависимости от вида сенсорных каналов: зрительного, слухового или тактильного.

В 2017 г. появилась информация о создании сотрудниками Финского технического научно-исследовательского центра VTT носимого радара ближнего действия Guidesense. В данное время устройство находится в финальной стадии разработки и тестирования, однако предварительные испытания показали высокую эффективность радара. Согласно заявлениям разработчиков, 92 % испытуемых сообщили, что новое устройство помогло им лучше ориентироваться в пространстве.

Приводимые технические характеристики устройства весьма скудны и малоинформативны: рабочий диапазон перестройки частоты – 24,0...24,25 ГГц, что свидетельствует о малом разрешении по дальности и подтверждается приводимой цифрой – 0,5 м.

Управление работой радара обеспечивается специальным блоком, определяющим перестройку частоты, усреднение сигналов и формирование звуковых сигналов.

Чем обеспечивается сканирование по азимуту и длительность цикла обзора остаётся неясным.

В процессе работы над аппаратной частью СВЧ-стереорадара для слепых приходится учитывать ряд характеристик и параметров:

1. Диапазон дальностей до объектов в контролируемом пространстве.
2. Выбор звукового диапазона частот дальности с учётом п. 1, 3, 5, 8 данного перечня.
3. Крутизна перестройки частоты передатчика с учётом п. 1, 2, 5...7.
4. Рабочий диапазон частот передатчика с учётом п. 3, 5, 9.
5. Диапазон перестройки частоты передатчика с учётом п. 6, 7.
6. Длительность периода модуляции частоты передатчика с учётом п. 5, 8.
7. Реализуемость по полосам частот радиотрактов и антенн с учётом п. 4, 5.
8. Временные характеристики восприятия звуков человеком с учётом п. 6.
9. Влияние доплеровских частот на точность определения расстояния при движении.
10. Требуемая мощность передатчика с учётом ЭПР объектов и п. 1.
11. Требования к параметрам НЧ-каналов стереорадара с учётом слуха конкретного человека.

Как следует из приведённого перечня параметров и их взаимозависимости друг от друга, задача создания оптимального варианта потребительских характеристик стереорадара может быть решена только с учётом противоречивых свойств слуховой системы человека и реализуемости требуемых радиотехнических характеристик приёмопередатчика.

Таким образом, объединение информационных возможностей трёхлучевой РЛС с ЛЧМ-сигналом, частотно- и времяанализирующих способностей слуховой системы человека и вычислительно-синтезирующей структуры мозга позволят в процессе обучения формировать в сознании незрячего образы окружающих предметов с хорошим разрешением на дальностях до 5...10 м.

Сравнение характеристик устройств для ориентации слепых в пространстве с использованием видеокамеры со сканированием кадра eVOIS, системы SSD и радара Guidesense с СВЧ-стереорадаром (СТРЛ) позволяет сделать вывод о преимуществах предлагаемой технологии и о необходимости скорейшей реализации предлагаемой идеи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как мы слышим. Психоакустика. <http://e-ar.ru/1500717/>
2. Теоретические основы физической акустики. Звуковые колебания и волны. <http://userdocs.ru/fizika/4987/index.html?page=3>
3. Показатели слуха. <http://doctor-v.ru/med/indicators-hearing/>
4. **Patent 5.097.327 US.** Filing date July 27.1990. <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=US38108485&recNum=2&maxRec2=&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=ALLNUM%3A%285097326%29&tab=PCTDescription>
5. Израильские учёные разработали звуковые очки для слепых. <http://jewish.ru/ru/news/articles/153055/>
6. Финны разработали нагрудный радар для слепых. <http://www.guidesense.com>
7. **Заявка на патент № 2018105285 от 13.02.2018.** СВЧ-стереорадар для слепых / С. А. Перегонов.

Статья поступила 13 ноября 2017 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

СКВОРЦОВ Л.А. **Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии.** – М.: Техносфера, 2017. – 220 с.: ил.

В книге содержится последовательное изложение принципов фототермической радиометрии/спектроскопии и лазерной термографии – перспективного направления в спектроскопии и тепловидении. В основе нового метода исследований лежит радиометрическая регистрация поглощенной энергии в исследуемых средах при воздействии на них лазерного излучения. Подробно излагается современное состояние и перспективы развития нового направления, его преимущества и границы применимости по сравнению с другими фототермическими методами. Рассмотрены теоретические основы метода модуляционной и импульсной фототермической радиометрии, ее различные модификации, включая резонансную и ринг-пробе фототермическую радиометрию и термографию. Приводятся многочисленные примеры практической реализации фототермической радиометрии и лазерной термографии в различных областях науки и техники, в частности для дистанционного измерения температуры объектов, исследования слабопоглощающих сред, дистанционного обнаружения и идентификации следовых количеств вещества, неразрушающего контроля материалов и покрытий, измерения их теплофизических параметров. Обсуждаются вопросы, связанные с особенностями применения метода для контроля качества полупроводниковых материалов, например, в части обнаружения подповерхностных дефектов и примесей, измерения их концентрации и энергии активации. Особое внимание в книге уделяется возможностям метода применительно к таким практически значимым областям, как медицина и биология.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области спектроскопии, лазерной физики, химии, биологии, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.117.9:537.868

СТЕКЛОВИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С РАЗЛИЧНЫМ КОМПЛЕКСОМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

М. В. Дяденко¹, Н. В. Любецкий², В. А. Карпович², А. Г. Петуховская¹

¹Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь

Работа посвящена актуальным проблемам получения радиопрозрачных и радиозащитных стекловидных материалов с заданным комплексом электрофизических характеристик, которые могут быть использованы в различных отраслях народного хозяйства. Приведены результаты исследования величины ослабления СВЧ-излучения опытными стеклами в диапазонах 8...11,3 и 26...35 ГГц.

КС: стекло, синтез, электромагнитная волна, сверхвысокочастотный диапазон, радиопрозрачность, радиозащитный материал, величина ослабления

VITREOUS MATERIALS WITH DIFFERENT COMPLEX OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS

M. V. Dyadenko¹, N. V. Lyubetsky², V. A. Karpovich², A. G. Petukhovskaya¹

¹Belorussian State Technological University,
Minsk, Republic of Belarus

²Scientific Research Institution «Institute of Nuclear Problems», BSU,
Minsk, Republic of Belarus

The article is devoted to topical problems of obtaining radiotransparent and radioprotective vitreous materials with a given set of electrophysical characteristics which can be used in various sectors of national economy. The results of the study of the attenuation value of microwave radiation by experimental glasses in the ranges of 8...11.3 and 26...35 GHz are presented.

Keywords: glass, synthesis, electromagnetic wave, microwave range, radiotransparency, radioprotective material, attenuation value

Создание принципиально новых материалов с особыми физическими свойствами в значительной степени определяет научно-технический прогресс в различных отраслях науки и техники. В настоящее время все более важную роль приобретают стекловидные материалы с особым комплексом радиофизических характеристик: радиопрозрачные и радиозащитные стекловидные материалы, предназначенные для высокоэффективного пропускания и поглощения сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных излучений (ЭМИ) соответственно.

К радиопрозрачным относятся неметаллические материалы, обеспечивающие пропускание электромагнитного излучения радиочастотного диапазона (0,3...300 ГГц) при минимальном его отражении. Основу таких материалов составляют органические и неорганические диэлектрики или пластмассы, различные керамопласты, керамические изделия различных видов, плавный кварц, а также специальные типы стекол. Прозрачность указанных материалов для радиоволн обеспечивается тем, что в интервале рабочих температур они имеют достаточно низкие диэлектрические потери и практически не отражают радиоволн. Такими материалами являются, в частности, радиопрозрачные стекла [1].

Основными механизмами защиты от ЭМИ СВЧ-диапазона являются отражение, поглощение и многократное отражение. Первичным механизмом защиты от данного фактора является отражение ЭМИ, для чего нужны подвижные носители заряда (электроны или вакансии), взаимодействующие с внешними полями. В результате защита сводится к появлению электропроводности в материале, используемом в качестве радиозащитного. Вторичным механизмом защиты от электромагнитных полей (ЭМП) является поглощение, которое обусловлено электрическими и магнитными диполями, взаимодействующими с внешними ЭМП. Электрические диполи могут быть обеспечены материалами, имеющими высокое значение диэлектрической константы. Магнитные диполи могут быть вызваны материалами, имеющими высокий уровень магнитной проницаемости [2].

Взаимодействие стекол с электромагнитным полем предопределяет комплекс особых требований к ним: необходимые значения диэлектрической проницаемости; определенная величина поглощения (отражения) ЭМИ радиочастотного диапазона; показатели термостойкости не ниже 100 °С и требуемый тангенс угла диэлектрических потерь.

Для электроники СВЧ несомненный интерес представляют стекла с низкими значениями диэлектрической проницаемости и низким тангенсом угла диэлектрических потерь. Они могут быть использованы для изготовления экранов и корпусов различных радиотехнических устройств. Для таких стеклообразных материалов характерна достаточно широкая запрещенная зона, исключающая термическую генерацию носителей заряда.

Широко применяемые на практике в настоящее время инженерно-технические методы и средства защиты от СВЧ-излучений, основанные на реализации принципа отражения электромагнитных волн с использованием металлических экранов, сетки, фольги, не позволяют решить весь комплекс проблем защиты от СВЧ-излучений [3].

В связи с этим приобретает актуальность проблема разработки качественно новых эффективных методов и средств защиты от СВЧ-излучений.

Целью данных исследований является изучение влияния химического состава силикатных стекол на электрофизические характеристики в диапазоне СВЧ.

Для синтеза стекол с требуемым комплексом электрофизических характеристик в качестве основы предложены следующие системы: $R_2O-BaO-TiO_2-SiO_2$, где $R_2O - Li_2O, K_2O$ и Na_2O (система «Б»); $RO-R_2O_3-B_2O_3-SiO_2$, где $RO - BaO, MgO, ZnO$ и CaO ; $R_2O_3 - Al_2O_3, Fe_2O_3, La_2O_3$ (система «В»); $R_2O-RO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$, где $R_2O - Li_2O, K_2O$ и Na_2O ; $RO - BaO, MgO, ZnO$ и CaO (системы «Г» и «Д»).

Выбор систем обусловлен тем, что, согласно анализу литературных данных, увеличение электрической прочности в радиопрозрачных стеклах достигается путем введения в их состав оксидов кремния и бора [4–6]. Кроме того, химический состав радиозащитных стекол должен включать элементы, способствующие появлению в стеклах ионной и электронной проводимости.

Синтез стекол осуществлялся в газовой пламенной печи периодического действия при максимальной температуре $(1500 \pm 50)^\circ\text{C}$ с выдержкой 2 ч.

По результатам синтеза установлено, что опытные стекла составов 1В...3В, 4В...6В, 7Д, 8Д, 11Д, 12Д характеризуются наличием непровара, что исключает возможность их использовать для исследования величины ослабления СВЧ-излучения.

Химический состав стекол указанных выше систем «Б», «В», «Г» и «Д» представлен на рис. 1...4.

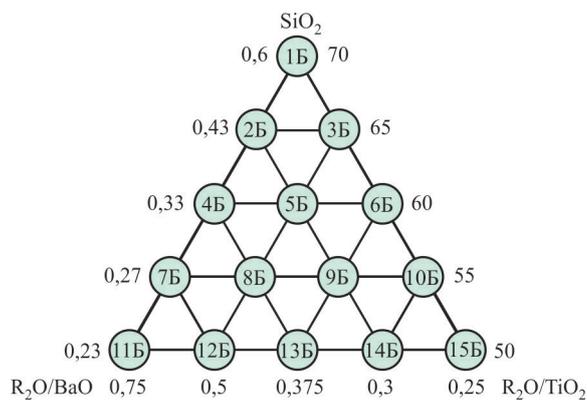


Рис. 1. Составы опытных стекол серии «Б», мол. %

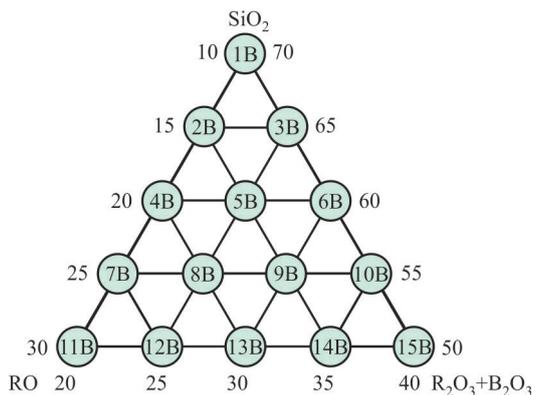


Рис. 2. Химический состав стекол серии «В», мол. %

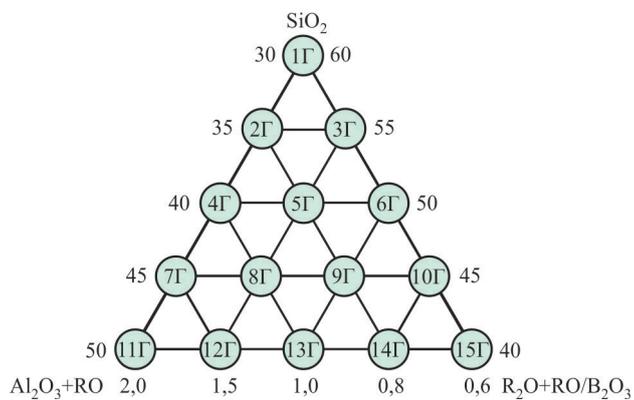


Рис. 3. Химический состав стекол серии «Г», мол. %

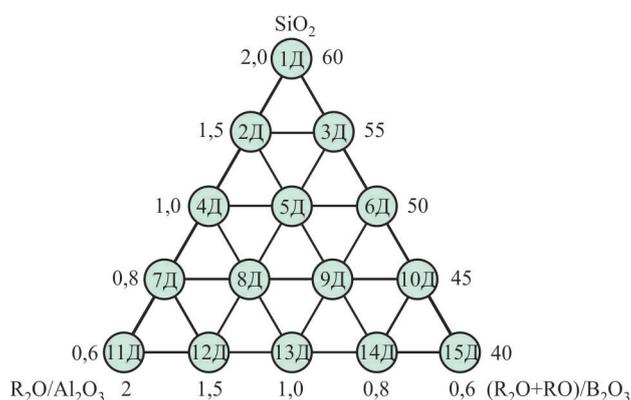


Рис. 4. Химический состав стекол серии «Д», мол. %

Стекла разных составов оценивались на ослабление СВЧ-излучения волноводным методом в диапазонах 8...11,3 и 26...35 ГГц. Данный метод позволяет определить коэффициент стоячей волны (КСВН) и ослабление, которые характеризуют исследуемые материалы с точки зрения практического использования их в СВЧ-диапазоне.

При проведении измерений ослабления или коэффициента передачи ЭМИ образцы закрепляли между фланцами волноведущей системы или рупорными антеннами измерительного тракта нормально к оси волновода. Аналогичное положение образца сохранялось при измерении коэффициента отражения, что соответствует наиболее «жестким условиям» (максимальному коэффициенту отражения) в случае использования плоскопараллельных образцов и плоского фронта волны.

В данной работе для исследования электромагнитных свойств образцов использовались панорамные измерители КСВН и ослабления ЭМИ и автоматизированные скалярные анализаторы цепей, позволяющие получить информацию о соотношениях амплитуд волн в измерительном тракте, то есть модули комплексных элементов волновой матрицы рассеяния, описывающей линейный четырехполюсник (ЧП). Допущения, связанные с пренебрежением незначительным затуханием ЭМИ в свободном пространстве по сравнению с ослаблением излучения, обеспечиваемым материалом образца, позволяют использовать упрощенную методику измерения. В этом случае образец представляется в качестве пассивного ЧП, а для оценки эффективности образца измеряется модуль коэффициента передачи в прямом направлении пассивного ЧП $|S_{21}|$, равный отношению напряженности электромагнитного поля на выходе ЧП к ее значению на входе.

Волноводный метод позволяет измерять ослабление электромагнитной волны $A(\omega)$ в стекло-видных образцах. В основу построения схемы измерения положен принцип отдельного детектирования сигналов падающей и прошедшей волн в волноведущем тракте [7]. Измеряется мощность волны, падающей на исследуемый образец, и мощность волны, прошедшей через него. Отношение прошедшей и падающей мощностей определяет ослабление $A(\omega) = 10 \lg(P_{\text{прош}}/P_{\text{пад}})$ исследуемого образца. Измеряемый образец подключается к выходному плечу направленного ответвителя падающей мощности измерителя КСВН и ослабления. Калировка измерительной схемы осуществляется в диапазоне рабочих частот по определению уровней сигнала от согласованной нагрузки после установки диапазона перестройки частоты и уровня падающей мощности. Погрешность определения ослабления при калировке в рабочем диапазоне частот измерителя КСВН и ослабления в децибелах не превышает величины, определяемой по формуле:

$$\Delta A = \pm(0,05A_x + 0,5),$$

где A_x – измеряемое ослабление, дБ.

Погрешность измерения ослабления при калибровке на фиксированной частоте измерителя КСВН и ослабления в децибелах не превышает значения

$$\Delta A = \pm(0,05A_x + 0,35),$$

где A_x – измеряемое ослабление, дБ.

Измеряемый образец устанавливается между волноводными фланцами измерительной системы перпендикулярно оси волновода. Такое расположение образца соответствует максимальному ослаблению УНМ.

Измерение ослабления исследуемого образца производится с использованием согласованной нагрузки. Это позволяет исключить неопределенность определения ослабления для образцов с малым ослаблением, которая появляется в случае кратности толщины измеряемого образца четверти длины волны ЭМИ в исследуемом образце (четвертьволновым поглотителям резонансного типа свойственно явление самопоглощения электромагнитных волн).

Выбор частотных диапазонов для исследований (8...12 и 26...37 ГГц) обусловлен особенностями распространения ЭМИ, используемого измерительной техникой, и перспективой использования разрабатываемых материалов в системах дистанционного зондирования, радиовидения и др.

Учитывая тот факт, что отдельные стекла серии «В» характеризуются наличием непровара, для системности исследования величины ослабления СВЧ-излучения выбраны составы с постоянным содержанием SiO_2 , составляющим 50 и 60 мол. %.

Результаты определения величины ослабления СВЧ-излучения опытными стеклами толщиной 5 мм в диапазонах 8...11,3 и 26...35 ГГц представлены на рис. 5...12.

Определены составы стекол серий «Б», «В», «Г» и «Д», которые в радиочастотном диапазоне 8...11,3 и 26...35 ГГц характеризуются минимальной величиной ослабления (стекла серии «Б») и максимальной степенью поглощения ЭМИ радиочастотного диапазона (составы №№ В4, В6, Г4, Г8, Г12...Г14, Д1, Д3, Д5, Д10), с целью их дальнейшего исследования, оптимизации и рекомендации к использованию в качестве стекол радиопрозрачного и радиозащитного назначения соответственно.

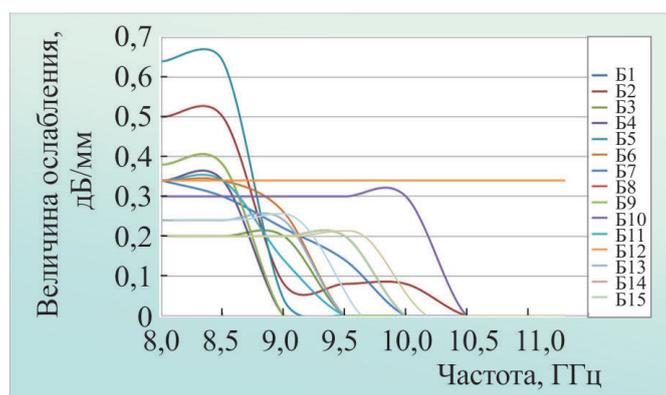


Рис. 5. Величина ослабления стекол серии «Б» в диапазоне 8..11,3 ГГц

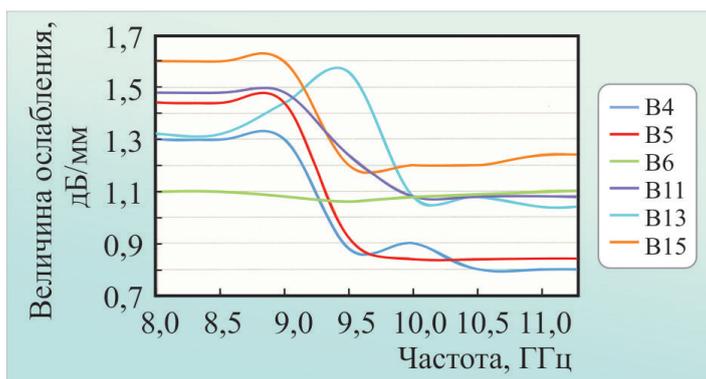


Рис. 6. Величина ослабления стекол серии «В» в диапазоне 8..11,3 ГГц

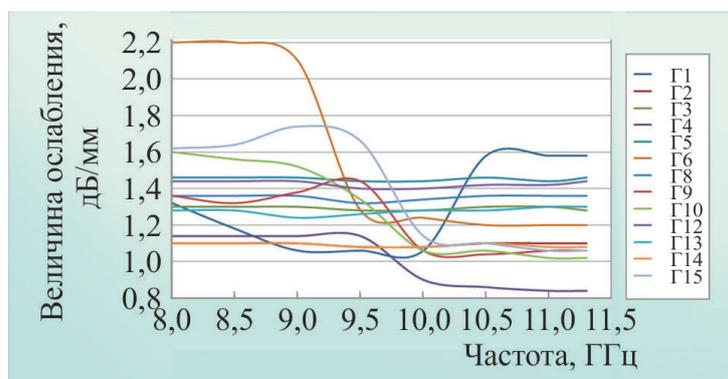


Рис. 7. Величина ослабления стекол серии «Г» в диапазоне 8..11,3 ГГц

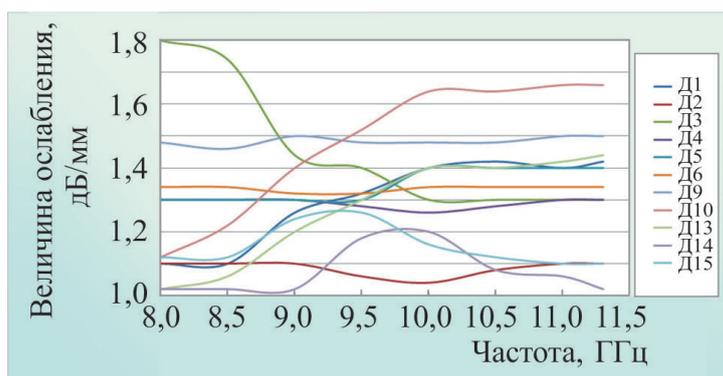


Рис. 8. Величина ослабления стекол серии «Д» в диапазоне 8..11,3 ГГц

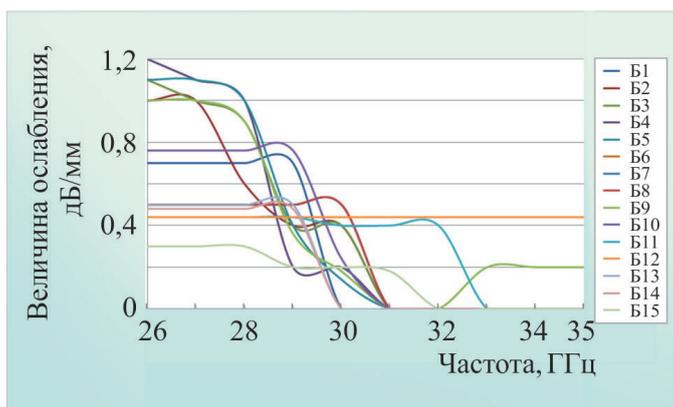


Рис. 9. Величина ослабления стекол серии «Б» в диапазоне 26..35 ГГц

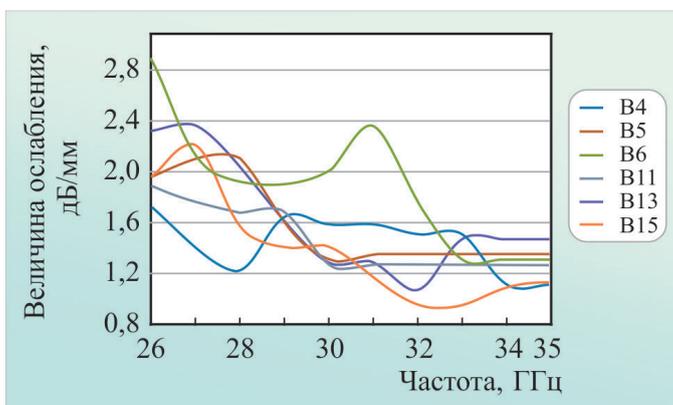


Рис. 10. Величина ослабления стекол серии «В» в диапазоне 26..35 ГГц

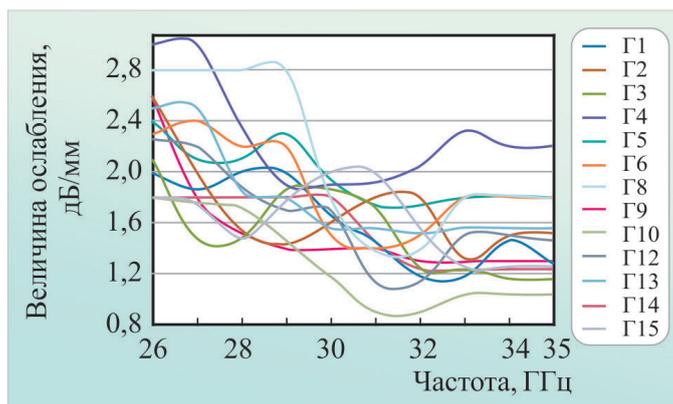


Рис. 11. Величина ослабления стекол серии «Г» в диапазоне 26..35 ГГц

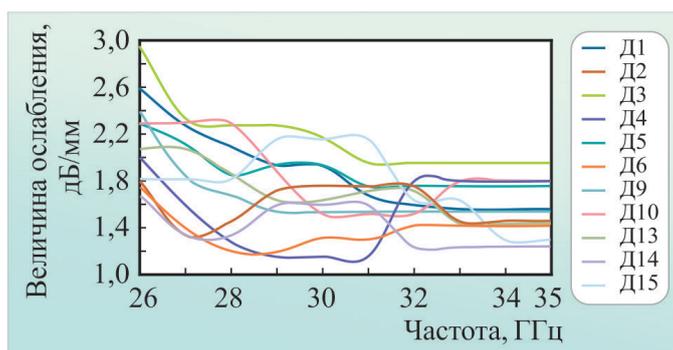


Рис. 12. Величина ослабления стекол серии «Д» в диапазоне 26..35 ГГц

Таким образом, на основе систем $R_2O-BaO-TiO_2-SiO_2$, $RO-R_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ и $R_2O-RO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ выполнен синтез опытных стекол, представлены результаты определения их величины ослабления в диапазонах 8...11,3 и 26...35 ГГц. Последующие совместные исследования, выполняемые сотрудниками Белорусского государственного технологического университета и НИУ «Ядерных проблем» БГУ, будут направлены на выявление влияния химического состава опытных стекол на комплекс их физико-химических, электрофизических и радиозащитных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртовник, И. Г. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И. Г. Гуртовник, В. И. Соколов, Н. Н. Трофимов, С. И. Шалгунов. – Минск, 2007. – 307 с.
2. Григорьев, О. А. Электромагнитные поля и здоровье человека / О. А. Григорьев // Энергия: экологические проблемы. – 1999. – № 5. – С. 3 – 5.
3. Рябоконт, И. Ю. Разработка элементов системы защиты от СВЧ-излучений персонала радиотехнического комплекса с использованием радиопоглощающих материалов: дисс. канд. техн. наук: 05.26.01 / И. Ю. Рябоконт // Охрана труда и пожарная безопасность. – Севастополь: СПИ, 1990. – 24 с.
4. Аппен, А. А. Химия стекла / А. А. Аппен. – М.: Химия, 1974. – 360 с.
5. Гуляян, Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гуляян. – Владимир: Транзит-ИКС, 2015. – 711 с.
6. Станек, Я. Электрическая варка стекла / Я. Станек. – М.: Легкая индустрия, 1979. – 248 с.
7. Елизаров, А. С. Электрорадиоизмерения / А. С. Елизаров. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 320 с.

Статья поступила 7 апреля 2017 г.,
после переработки – 10 января 2018 г.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

ВЛИЯНИЕ ЭМИ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ, МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КЛЕТКАХ

К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

Представлены результаты экспериментальных исследований биологического действия микроволнового излучения на биохимические процессы, моделирующие реакции в клетках, находящихся в состоянии окислительного стресса.

КС: окислительные процессы в клетках; перекисное окисление липидов; липосомы; апоптоз; цитохром с; структурные перестройки в мембранах; микроволновое излучение крайне высокой частоты, низкой интенсивности; окислительный стресс; хемилюминесценция

THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LOW INTENSITY, MICROWAVE RANGE ON OXIDIZING PROCESSES IN CELLS

K. D. Kazarinov, G. G. Borisenko, I. G. Polnikov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS

The results of experimental studies of the biological effect of microwave radiation on biochemical processes simulating reactions in the cells in the state of oxidizing stress are presented.

Keywords: oxidizing processes in the cells; lipid peroxidation; liposomes; apoptosis; cytochrome c; structural rearrangements in membranes; microwave radiation of extremely high frequency, low intensity; oxidizing stress; chemiluminescence

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2017 году научная общественность г. Фрязино отмечала 110-летнюю годовщину со дня рождения академика Н. Д. Девяткова, деятельность которого в последние 30 лет его жизни была тесно связана с изучением биологических эффектов крайне высокой частоты электромагнитного излучения (ЭМИ) и внедрением результатов в клиническую практику. Коллектив ученых и инженеров, возглавляемый академиком Н. Д. Девятковым, был в авангарде магистральных направлений проблемы биологической активности КВЧ-излучения [1]. Этому знаменательному событию и посвящена данная публикация.

ЭМИ в области высоких (ВЧ), сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких (КВЧ) частот нахо-

дит широкое применение в радиотехнических и медицинских приложениях, что приводит к повсеместному и увеличивающемуся присутствию этого вида излучения в окружающей среде и вызывает опасения относительно потенциального воздействия его на здоровье людей. С этой точки зрения ЭМИ, или «электросмог», в настоящее время считается почти таким же по значимости компонентом биосферы, как воздух, почва, вода и загрязняющий шум. Следовательно, необходимы средства защиты от этого воздействия [2–3]. С другой стороны, известен положительный терапевтический эффект и разрабатываются все новые и новые методы лечения различных заболеваний при использовании ЭМИ [4–6]. Таким образом, можно считать, что исследование биологического воздействия ЭМИ на человека является социальным заказом современного общества.

Исследователи особое внимание уделяют ЭМИ в диапазоне частот, соответствующем СВЧ-диапазону для мобильной связи и Wi-Fi. Данные по влиянию ЭМИ данного диапазона на клетки и организм противоречивые [7–8], однако большинство исследователей сходятся на том, что излучение может оказывать неблагоприятное воздействие путем инициирования образования опухолей, неврологических дисфункций [9], а также ухудшает качество спермы [10–11].

На протяжении последних десятилетий различными авторами высказывались предположения относительно результатов наблюдаемых биологических эффектов ЭМИ в ВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах. Избыточное образование свободных радикалов в организме, или окислительный (оксидативный) стресс, вызванный воздействием ЭМИ данных диапазонов частот, в последнее время рассматривается некоторыми авторами как один из основных механизмов биологической активности радио- и микроволн [12–14].

Свободнорадикальные реакции играют важную роль в защите организма от инфекций, в частности в ответе клеток иммунной системы – нейтрофилов и макрофагов на патогены. В ряде исследований показано, что микроволны могут влиять на различные процессы, связанные с развитием окислительного стресса. Как результат: изменение структуры и функции ферментов, в частности усиление активности пероксидаз [15–16], изменение интенсивности свободно-радикальных процессов в клетках и тканях и усиление активации клеток, изменение ответа клеток иммунной системы и модуляция иммунного ответа организма в целом [17–18]. Так, в работе [19] показано, что длительное воздействие на тело крыс массой 180 г (по 2 ч в течение 35 дней) излучения частотой 2,45 ГГц при интенсивности 0,2 мВт/см² (SAR – 0,14 Вт/кг) отрицательно влияло на гистологию мозга, печени, селезенки, почек и яичек. В этих органах было обнаружено статистически значимое увеличение продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), и эти изменения были связаны с ростом концентрации активных форм кислорода.

В отличие от ВЧ и СВЧ, биологическим эффектам КВЧ-излучения (30...300 ГГц) уделялось гораздо меньшее внимание. Это обусловлено тем, что излучение в этом диапазоне не считается повсеместным и люди мало контактируют с ним. К тому же это излучение проникает в тело человека на небольшую глубину от поверхности. Тем не менее, исполнителям приходится контактировать с КВЧ-излучением при его использовании в непосредственной близости от специализированного оборудования [20].

Следует отметить, что именно слабое проникновение КВЧ в глубоко расположенные органы от поверхности тела открывает перспективы для использования КВЧ с целью направленной локальной терапии с минимальными побочными эффектами и повреждениями окружающих тканей. Считается, что воздействие на организм человека происходит при интенсивностях облучения, которые вызывают слабое нагревание ткани, но биохимические механизмы эффектов

облучения не совсем понятны. Любопытно утверждение Германа Швана о невозможности получить существенные нетермические эффекты ЭМП при интенсивности излучения, которое не вызывает заметного нагрева [21].

КВЧ-излучение использовалось для терапевтического лечения различных заболеваний, включая сердечно-сосудистые заболевания, заживление ран, обезболивание и т. д. [22]. Механизмы, с помощью которых КВЧ-излучение способно производить системные эффекты всего организма при локальных воздействиях, где проникновение осуществляется на небольшую глубину, до сих пор недостаточно изучены.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ БИОЭФФЕКТОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Микроволновое излучение усиливает пероксидазную активность цитохрома *c* в мембранах митохондрий

Результаты представленных экспериментов следует отнести к изучению влияния микроволнового излучения на клетки человека, находящиеся в стрессовом состоянии. Известно, что окислительный стресс играет существенную роль при патологических процессах (ишемии, воспалении), токсических воздействиях и т. п. В тканях окислительный стресс приводит к гибели клеток, основным механизмом которой является апоптоз (генетически запрограммированный процесс гибели клетки). Механизмы запуска программы апоптоза, вызванного стрессом, чрезвычайно разнообразны, однако все эти механизмы сходятся на уровне митохондрии и индуцируют выход цитохрома *c* из митохондрий в цитозоль (митохондриально-зависимый апоптоз) [23]. Эта необратимая стадия развития апоптоза приводит к запуску каскада протеолитических ферментов и деградации клетки. Считается, что выходу цитохрома *c* в цитозоль предшествуют перераспределение кардиолипина в мембранах митохондрии и образование комплексов кардиолипин-цитохром *c* (КЦ-комплекс). КЦ-комплекс характеризуется высокой пероксидазной активностью и катализирует накопление гидроперекисей кардиолипина, которые, в свою очередь, необходимы для образования пор во внешней мембране митохондрии и выхода проапоптотических белков (включая цитохром *c*) в цитозоль.

В настоящей работе представлены наши экспериментальные результаты изучения влияния микроволн длиной $\lambda = 7,7$ мм на пероксидазную активность цитохрома *c* и его КЦ-комплекса [24].

Известно, что водорастворимая флуоресцентная молекула Амплекс красный (AR) сравнительно устойчива в буфере и почти не окисляется в присутствии цитохрома *c* или H_2O_2 . Воспроизведенные нами экспериментальные результаты подтверждают это, а также то, что комбинация цитохрома *c* и перекиси водорода вызывает заметное окисление AR. Однако в присутствии липосом, содержащих кардиолипин (т. е. при образовании КЦ-комплексов), степень окисления AR многократно усиливается (рис. 1).

Микроволновое излучение вызывает усиление окисления AR в присутствии цитохрома *c* и H_2O_2 (рис. 2). Это усиление оксидазной активности заметно как в присутствии разных липосом, используемых в нашем эксперименте, так и без них. Однако абсолютная величина эффекта наиболее выражена в присутствии кардиолипина (см. рис. 2).

Таким образом, мы показали, что микроволновое излучение при длине волны $\lambda = 7,7$ мм не влияет (или сравнительно мало влияет) на окислительные процессы, индуцируемые глобулярной формой цитохрома *c*, в то время как оксидазная активность КЦ-комплексов на 1...2 порядка

превышала активность свободного цитохрома *c* и в ещё большей степени усиливалась под действием микроволнового излучения.

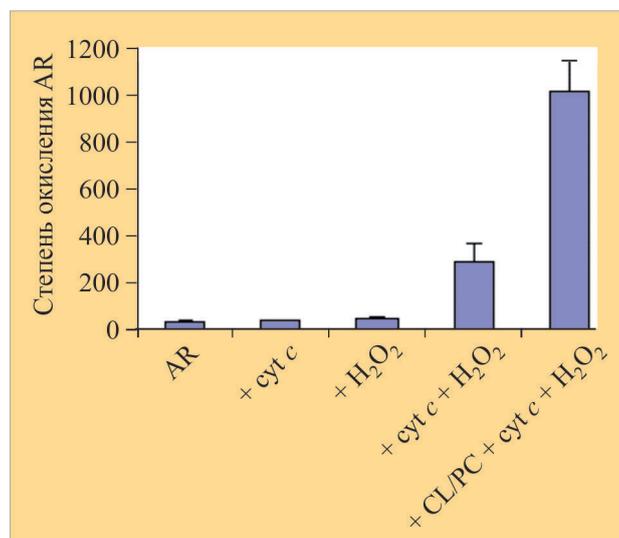


Рис. 1. Степень окисления молекулы AR в присутствии цитохрома *c* (cyt *c*), перекиси водорода, комбинации цитохрома *c* и перекиси водорода, а также липосом, содержащих кардиолипин (CL/PC)

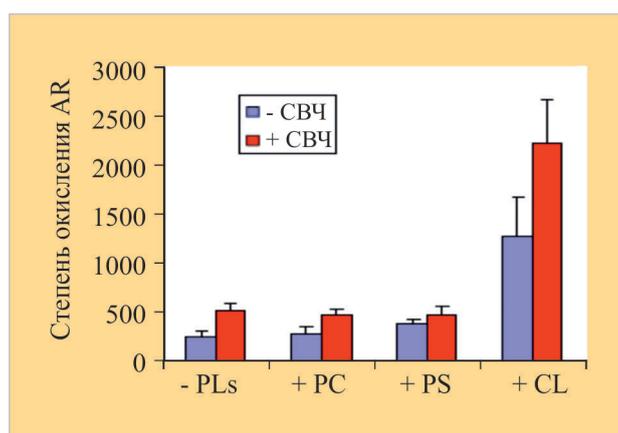


Рис. 2. Влияние микроволнового излучения на степень окисления молекулы AR в присутствии разных липосом и без них

Как было отмечено выше, взаимодействие цитохрома *c* с H₂O₂ играет важную роль при развитии апоптотических процессов в митохондриях. Суть явления заключается в том, что при взаимодействии цитохрома *c* с некоторыми отрицательно заряженными липидами (как, например, кардиолипин) наблюдается увеличение пероксидазной активности у комплекса анионный липид-цитохром *c*, и связано это с тем, что усиливается взаимодействие ионов железа гема с H₂O₂.

КЦ-комплекс представляет интерес с точки зрения взаимодействия с микроволновым излучением. Во-первых, он находится на границе раздела фаз липид-вода и катализирует окислительно-восстановительные реакции в обеих фазах. Следовательно, простое усиление конвекции за счёт поглощения микроволнового излучения водой может повлиять на кинетику ферментативной реакции [25–26]. Во-вторых, белок в КЦ-комплексе находится в состоянии

расплавленной глобулы и, следовательно, может иметь максимумы поглощения в очень широком диапазоне частот [27]. Поглощение микроволнового излучения глобулой может влиять на её конформационное состояние и, следовательно, на каталитическую активность гема.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что КЦ-комплекс является потенциальной мишенью для микроволнового излучения, которое усиливает его пероксидазную активность и может повышать смертность клеток при коинкубации их с индукторами апоптоза. Мы предполагаем, что микроволновая активация КЦ-комплекса может лежать в основе механизма повышения смертности клеток, находящихся в состоянии патологии, под действием этого излучения. Кроме того, активация этого комплекса микроволновым излучением в клетках может повысить чувствительность клеток к апоптотическим (в том числе противораковым) агентам и позволит модулировать ответ клеток на различные воздействия. Это может быть использовано для лечения онкологических заболеваний, инфаркта миокарда и многих других патологий. Аналогичный результат был получен в работе [28], где было показано, что облучение при частоте 8 ГГц ($SAR = 0,350 \text{ Вт/кг}$) и действие индуктора апоптоза (Gemcitabine) увеличивало количество апоптотических клеток лимфомы Беркитта (Raji) и снижало жизнеспособность этих клеток. Это значит, что микроволновое облучение и лечение гемцитабином оказывают синергетическое действие на апоптотическую активность клеток Raji.

2.2. Влияние микроволнового излучения в диапазоне КВЧ на скорость накопления продуктов ПОЛ в мембранах липосом

Рассмотрим возможность окисления биологических мембран в результате структурных перестроек и образования дефектов (пор) в мембранном бислое при микроволновом облучении. В работе [29] показано, что КВЧ-облучение приводит к искажению бислоевой упаковки липидных молекул в модельной биомембране.

Липосомы – это искусственные мембранные частицы, образующиеся при диспергировании фосфолипидов в водной среде и представляющие собой замкнутые бимолекулярные мембранные пузырьки, размеры которых могут формироваться от клеточных до размеров органелл. Возможность задавать химический состав липосом и их внутренней среды делает эти структуры удобным модельным объектом для изучения свойств биологических мембран, а также для доставки лекарственных препаратов к очагам поражения организма.

Ненасыщенные жирные кислоты природных фосфолипидов в присутствии кислорода воздуха окисляются по механизму ПОЛ [30]. Этот процесс протекает по цепному механизму с образованием свободных радикалов и возбужденных продуктов. Скорость ПОЛ в липосомах в отсутствие инициаторов окисления невысока. Однако было показано, что нарушение барьерных свойств искусственных липидных мембран с помощью внешних или внутренних электрических полей приводит к увеличению содержания в них продуктов ПОЛ [31]. Было обнаружено, что КВЧ-облучение суспензии липосом способно нарушать барьерные свойства мембраны за счет образования дефектов при термотропном фазовом переходе углеводородных цепей фосфолипидов. Дело в том, что температура окружающей среды, при которой происходит так называемое «нетепловое» микроволновое облучение биологического объекта, может быть близка к температуре фазового перехода углеводородных цепей фосфолипидов, из которых состоят биологические мембраны. Тогда повышение температуры даже на $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ в процессе

облучения может привести к новому фазовому состоянию фрагмента мембраны, например белок-липидного комплекса, и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом.

Такие дефекты могут являться источником проникновения в клетки индукторов ПОЛ мембран с последующими физиологическими последствиями. Так, в работе [32] было показано, что электропорация искусственных липидных мембран приводит к увеличению содержания в них продуктов ПОЛ. Исследование механизма этого эффекта показало, что накопление продуктов ПОЛ, которое регистрировалось с помощью хемилюминесценции (ХЛ), наблюдалось только в условиях генерации достаточно высокой (пробойной) разности потенциалов на мембране и исчезало в присутствии этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) – комплексона, связывающего ионы Fe^{2+} . Таким образом, было установлено, что при нарушении барьерных функций мембран липосом активация ПОЛ была вызвана попаданием в липосомы ионов Fe^{2+} , присутствующих в следовых количествах в среде.

Такие же эффекты увеличения продуктов ПОЛ были обнаружены при нарушении барьерных функций мембран митохондрий [33].

С этих позиций и исходя из приведенных выше данных, можно оценить результаты экспериментов по изучению действия КВЧ-облучения на процессы ПОЛ в мембранах липосом.

В работе [34] изучалось влияние микроволнового излучения в диапазоне КВЧ на скорость накопления продуктов перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав молекул фосфолипидов.

Использовались различные способы инициирования ПОЛ: УФ-облучение, добавление железоаскорбатной смеси, автоокисление, фотоокисление. Скорость ПОЛ в нашей работе регистрировалась с помощью реакций с 2-тиобарбитуровой кислотой и УФ-спектроскопии, а также путем регистрации сверхслабого свечения (хемилюминесценции).

Результаты наших экспериментов показали, что микроволновое облучение ускоряет процесс накопления продуктов ПОЛ. Следует отметить, что все три способа инициирования ПОЛ оказались достаточно эффективны, и уже через 15 мин протекания железоаскорбатного или фотохимического окисления концентрация продуктов возрастала в несколько раз [34]. Увеличение содержания продуктов ПОЛ в образцах в условиях КВЧ-облучения отчетливо наблюдалось уже при плотностях мощности падающего на объект излучения, не превышающих 1 мВт/см^2 . При плотностях мощности менее $0,2 \text{ мВт/см}^2$ ускорения биохимических реакций выявить не удавалось. Следует также отметить, что эффект КВЧ-излучения наблюдался при всех исследованных длинах волн (8,5...4,0 мм) и величина этого эффекта не менялась в зависимости от длины волны.

Для получения объективных характеристик изучаемых процессов мы сопоставляли результаты, полученные ХЛ-методом, с данными, полученными какими-либо прямыми методами контроля этих биохимических процессов. Так, в нашей работе [35] регистрировались УФ-спектры поглощения растворов липосом после добавления к ним метанола (1:1 по объему). О содержании гидроперекисей и конечных продуктов ПОЛ судили по величине изменения максимумов спектров поглощения на длинах волн $\lambda = 233$ и 268 нм . Кроме того, измерялась концентрация продуктов, реагирующих с 2-тиобарбитуровой кислотой, по изменению оптической плотности в максимуме спектра поглощения на длине волны $\lambda = 535 \text{ нм}$.

Сравнение ХЛ-результатов регистрации продуктов ПОЛ в суспензии липосом с результатами, полученными с помощью приведенных выше методов, дает возможность говорить об анало-

гичном увеличении скорости накопления продуктов ПОЛ после КВЧ-облучения биологического объекта [35] и объективности данных ХЛ-контроля.

Для объяснения наблюдаемого эффекта КВЧ-облучения можно использовать помимо механизма конвективного движения водных растворов, ускоряющего поступление кислорода воздуха и других активаторов реакций ПОЛ к мембранам липосом, механизм нарушения барьерных функций мембран за счет кооперативных структурных фазовых перестроек фосфолипидного бислоя при термализующем действии КВЧ-излучения «нетепловых уровней», которое способствует проникновению внутрь липосом веществ, активирующих ПОЛ мембран.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активация комплекса кардиолипин-цитохром с микроволновым излучением в клетках может повысить чувствительность клеток к апоптотическим (в том числе противораковым) агентам и позволит модулировать ответ клеток на различные воздействия. Это может быть использовано для лечения онкологических заболеваний, инфаркта миокарда и многих других патологий.

Микроволновое излучение в диапазоне КВЧ увеличивает скорость накопления продуктов перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав молекул фосфолипидов липосом – модельных липидных мембран (жидкостных наночастиц). Предложен механизм наблюдаемого эффекта, согласно которому КВЧ-излучение, создавая дефекты в мембранном липидном бислое за счет термотропного действия, обеспечивает проникновение внутрь липосом веществ, стимулирующих ПОЛ в мембранах клеток с соответствующими физиологическими последствиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков, Н. Д.** Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н. Д. Девятков // УФН. – 1973. – Т. 110. – С. 453 – 454.
2. **Kottou, S.** How safe is the environmental electromagnetic radiation? / S. Kottou, D. Nikolopoulos, E. Vogiannis, D. Koulougliotis, E. Petraki // J. Phys. Chem. Biophys. – 2014. – Vol. 4. – 146 p.
3. **Vian, A.** Plant responses to high frequency electromagnetic fields / A. Vian, E. Davies, M. Gendraud, P. Bonnet // Biomed. Research. International. – 2016. Article ID 1830262. – 13 p.
4. **Ордынская, Т. А.** Волновая терапия / Т. А. Ордынская, П. В. Поручиков, В. Ф. Ордынский. – М.: Эксмо, 2008. – 496 с.
5. **Мырзабаева, Н. А.** Применение лазеро- и КВЧ-пунктуры в эрадикационной терапии больных с функциональной диспепсией, ассоциированной с *Helicobacter pylori* / Н. А. Мырзабаева // Терапевтический вестник. – 2009. – № 4 (24). – С. 48 – 49.
6. **Teppone, M.** Extremely high-frequency therapy in oncology / M. Teppone, R. Avakyan // J. Altern. Complement. Med. – 2010. – Nov. 16 (11). – P. 1211 – 1216.
7. **Miyakoshi, J.** Cellular and molecular responses to radio-frequency electromagnetic fields / J. Miyakoshi // Proceed. IEEE. – 2013. – Vol. 101. – P. 1494 – 1502.
8. **Johansson, O.** Disturbance of the immune system by electromagnetic fields – a potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment / O. Johansson // Pathophysiology. – 2009. – Vol. 16. – P. 157 – 177.
9. **Kesari, K. K.** Effect of 3G cell phone exposure with computer controlled 2-D stepper motor on non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway in rat brain / K. K. Kesari, R. Meena, J. Nirala et al. // Cell. Biochem. Biophys. – 2014. – Vol. 68. – P. 347 – 358.
10. **Kesari, K. K.** Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS / K. K. Kesari, J. Behari // Electromagn. Biol. Med. – 2012. – Vol. 31. – P. 213 – 222.

11. **Meena, R.** Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats / R. Meena, K. Kajal, J. Kumar et al. // *Electromag. Biol. Med.* – 2014. – Vol. 33. – P. 81 – 91.
12. **Barteri, M.** Effects of microwaves (900 MHz) on peroxidase systems: a comparison between lactoperoxidase and horseradish peroxidase / M. Barteri, R. De Carolis, F. Marinelli, G. Tomassetti, L. C. Montemiglio // *Electromagn. Biol. Med.* – 2016. – Vol. 35. – P. 126 – 133.
13. **Hou, Q.** Oxidative changes and apoptosis induced by 1800-MHz electromagnetic radiation in NIH/3T3 cells / Q. Hou, M. Wang, S. Wu, X. Ma, G. An, H. Liu, F. Xie // *Electromagn. Biol. Med.* – 2015. – Vol. 34. – P. 85 – 92.
14. **Meena, R.** Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats / R. Meena, K. Kajal, J. Kumar et al. // *Electromagn. Biol. Med.* – 2014. – Vol. 33. – P. 81 – 91.
15. **Marjanovic, A. M.** Cell oxidation-reduction imbalance after modulated radiofrequency radiation / A. M. Marjanovic, I. Pavicic, I. Trosic // *Electromagn. Biol. Med.* – 2015. – Vol. 34. – P. 381 – 386.
16. **Manna, D.** Effect of radiofrequency radiation in cultured mammalian cells: a review / D. Manna, R. Ghosh // *Electromagn. Biol. Med.* – 2016. – Vol. 35. – P. 265 – 301.
17. **Koyama, S.** Effect of a 2.45-GHz radiofrequency electromagnetic field on neutrophil chemotaxis and phagocytosis in differentiated human HL-60 cells / S. Koyama, E. Narita, Y. Suzuki, M. Taki, N. Shinohara, J. Miyakoshi // *J. Rad. Res.* – 2015. – Vol. 56. – P. 30 – 36.
18. **Aly, A. A.** Effects of 900-MHz radio frequencies on the chemotaxis of human neutrophils in vitro / A. A. Aly, M. I. Cheema, M. Tambawala, R. Laterza, E. Zhou, K. Rathnabharathi, F. S. Barnes // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2008. – Vol. 55. – P. 795 – 797.
19. **Chauhan, P.** Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats / P. Chauhan, H. N. Verma, R. Sisodia, K. K. Kesari // *Electromagn. Biol. Med.* – 2017. – Vol. 36 (1). – P. 20 – 30.
20. **Garaj-Vrhovac, V.** Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment / V. Garaj-Vrhovac, G. Gajski, S. Pažanin, A. Sarolić, A. M. Domijan, D. Flajs, M. Peraica // *Int. J. Hyg. Environ. Health.* – 2011. – Vol. 214. – P. 59 – 65.
21. **Schwan, H. P.** Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields: AC-field induced ponderomotive forces / Schwan H. P. // *Br. J. Cancer. Suppl.* – Mar 1982. – Vol. 5. – P. 220 – 224.
22. **Rojavin, M. A.** Medical application of millimetre waves / M. A. Rojavin, M. C. Ziskin // *QJM.* – 1998. – Vol. 91 (1). – P. 57 – 66.
23. **Bergstrom, C. L.** Cytochrome *c* causes pore formation in cardiolipin-containing membranes / C. L. Bergstrom, P. A. Beales, Y. Lv, T. K. Vanderlick, J. T. Groves // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2013. Apr. 16. – Vol. 110 (16). – P. 6269 – 6274.
24. **Борисенко, Г. Г.** Микроволновое излучение усиливает пероксидазную активность цит *c* / Г. Г. Борисенко, К. Д. Казаринов // *Международная научная конференция «Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем». IX съезд Белорусского общественного объединения фотобиологов и биофизиков: сб. статей.* – 2010. – Минск, Беларусь. Часть 2. – С. 52 – 54.
25. **Kazarinov, K. D.** Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation / K. D. Kazarinov, A. V. Putvinsky, V. S. Malinin // *Electricity and magnetism in Biology and Medicine.* Plenum publishing corporation. N.Y. – 1999. – P. 441 – 444.
26. **Казаринов, К. Д.** Изучение действия КВЧ-излучения на скорость биохимических реакций / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // *5-й Международный конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», симпозиум А: «Новые методы и приборы».* Санкт-Петербург. – 2009. – С. 11.
27. **Ptitsyn, O. B.** Protein folding / O. B. Ptitsyn, T. E. Creighton; ed. W. H. Freeman. – 1992. – P. 243 – 300.
28. **Canseven, A. G.** Effects of microwave exposure and Gemcitabine treatment on apoptotic activity in Burkitt's lymphoma (Raji) cells / A. G. Canseven, M. A. Esmekaya, H. Kayhan, M. Z. Tuysuz, N. Seyhan // *Electromagn. Biol. Med.* – 2015. – Vol. 34 (4). – P. 322 – 326.

29. **Крыницкая, А. Ю.** Влияние КВЧ-излучения низкой интенсивности на структурно-динамическое состояние модельных биомембран / А. Ю. Крыницкая, П. П. Суханов, Ю. Э. Седельников // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 4. – С. 1 – 9.
30. **Владимиров, Ю. А.** Свечение, сопровождающее биохимические реакции / Ю. А. Владимиров // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 25 – 32.
31. **Смирнов, А. А.** Необратимое повреждение липидных бислоев мембран в состоянии электрического пробоя / А. А. Смирнов, Д. И. Рощупкин, А. В. Путвинский, Ю. А. Владимиров // Биофизика. – 1981. – Т. 26, № 1. – С. 140 – 141.
32. **Казамапов, В. А.** Хемиллюминесценция при электрическом пробое биологических мембран / В. А. Казамапов, Е. М. Анабердыева, И. Г. Полников, В. С. Шаров, А. В. Путвинский. – М.: АН СССР. Институт радиотехники и электроники. Препринт № 10 (449). – 16 с.
33. **Владимиров, Ю. А.** Электрическая прочность мембран митохондрий / Ю. А. Владимиров, О. М. Парнев, Т. В. Пучкова, З. П. Черемисина, Е. М. Анабердыева, А. В. Путвинский // Биологические мембраны. – 1984. – Т. 1, № 4. – С. 428 – 434.
34. **Андреев, В. Е.** Использование в биохимическом эксперименте явления межфазной конвекции в водных растворах при поглощении КВЧ-излучения / В. Е. Андреев, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – № 2 (490). – С. 35 – 41.
35. **Казаринов, К. Д.** Изучение биологического действия микроволнового излучения с помощью хемиллюминесцентного метода / К. Д. Казаринов, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – № 2 (505). – С. 57 – 71.

Статья поступила 14 ноября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

УСЫЧЕНКО В.Г., СОРОКИН Л.Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. Монография. – М.: Радиотехника, 2017. – 288 с.: ил.

Экспериментальными, аналитическими и численными методами исследуется стойкость сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов и радиоприемных устройств дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн к направленным и случайным импульсным электромагнитным воздействиям различной частоты, длительности и формы. Рассмотрены особенности воздействия сверхширокополосного радиочастотного излучения. Оценена дальность поражения широкополосных и узкополосных радиоприемных устройств излучателями мощных одиночных и периодически следующих электромагнитных импульсов.

Для научных работников, инженеров, конструкторов радиоаппаратуры, к которой предъявляются повышенные требования стойкости к воздействию мощных электромагнитных помех. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

ЭКОНОМИКА

УДК 338

ИННОВАЦИОННО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЙ КЛАСТЕР КАК ЧАСТЬ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

М. В. Чекаданова

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

Дано определение национальной инновационной системы (НИС), приведены сравнительные характеристики четырех мировых моделей НИС, выделены особенности и некоторые задачи НИС РФ и решения в рамках инновационно-территориального радиоэлектронного кластера.

КС: национальная инновационная система, мировая модель, инновационно-территориальный радиоэлектронный кластер

INNOVATIVE-TERRITORIAL RADIOELECTRONIC CLUSTER AS A PART OF THE NATIONAL INNOVATION SYSTEM OF RUSSIA

M. V. Chekadanova

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

The article presents a definition of national innovation system (NIS), comparative characteristics of four world NIS models; the features and some tasks of NIS RF and solutions within the framework of the innovative territorial radioelectronic cluster are highlighted.

Keywords: national innovation system, world model, innovative territorial radioelectronic cluster

Приоритетной задачей экономического развития различных стран является формирование эффективной национальной инновационной системы (НИС). основополагающими для современной концепции НИС являются работы таких зарубежных ученых, как М. Портер, П. Самуэльсон, С. Фримен, Ф. Хайек, а также российских ученых А. И. Анчишкина, В. А. Васина, Л. М. Гохберга, Н. И. Ивановой, Б. Лундвал, Л. Э. Миндели, И. Г. Осадчей, Ю. В. Яковца и др. Как указывает Т. Я. Красноперова, «НИС принято определять как систему взаимосвязанных институтов, которая включает экономических агентов (предприятия, научные организации, вузы, фонды, инвесторы и т. д.), а также общественные ценности и нормы права и предназначена для создания, хранения и передачи знаний, навыков, определяющих новые технологии» [1]. НИС должна быть подчинена основным принципам системы: целостности, выражающейся в единстве и взаимодействии элементов; целенаправленности; оптимальности путем применения наиболее экономичных методов использования ресурсов; иерархичности элементов системы и соподчиненности, исходя из цели и задач; взаимосогласованности (коор-

динации) действий всех элементов системы; эволюционности развития посредством разработки поэтапной стратегии и др.

Для каждой НИС характерны определенная структура, степень ее упорядоченности и институциональные связи, причем конфигурация элементов может иметь свои особенности. НИС должна объединять потенциал государства, организаций научно-технической и образовательной сфер, предпринимательского сектора, финансово-кредитной сферы в целях реализации результатов интеллектуальной деятельности на рынке высокотехнологичной наукоемкой продукции. Исходя из национальных особенностей и экономического потенциала стран, в настоящее время в мире можно выделить четыре модели НИС:

«**Евроатлантическая**» (страны Западной Европы: Великобритания, Германия, Франция и др.) – модель полного инновационного цикла: от возникновения инновационной идеи до массового производства готового продукта.

«**Восточно-азиатская**» (Япония, Южная Корея, Гонконг, Тайвань), в инновационном цикле которой отсутствует стадия формирования фундаментальных идей. Будучи ориентированы на экспорт высокотехнологической продукции, государства Восточной Азии, как правило, заимствуют технологии у других стран.

«**Альтернативная**» (Таиланд, Чили, Турция, Иордания, Португалия и др.). Используется преимущественно в сельскохозяйственных странах, не обладающих значительным потенциалом в области фундаментальной и прикладной наук и не имеющих богатых запасов сырья, технологии переработки, которые могли бы стать основой национальной конкурентоспособности.

«**Тройная спираль**» (США, ряд европейских стран). На практике это выражается в том, что университеты, занимаясь образованием и научными исследованиями, вносят также свой вклад в развитие экономики через создание новых компаний в университетских инкубаторах; бизнес частично оказывает образовательные услуги, а государство выступает как общественный предприниматель и венчурный инвестор в дополнение к своей традиционной законодательной и регулирующей роли. В данной модели ведущее значение отводится университетам, которые превращаются в предпринимательские университеты или университеты промышленного типа, применяя знания на практике и вкладывая результаты в новые образовательные дисциплины [2].

Каждая НИС состоит из субъектов, производящих инновации, и институтов, обеспечивающих инновационные процессы. На основе характеристик последних приведем отличительные особенности моделей НИС (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная характеристика моделей национальных инновационных систем

Характеристика	Модель НИС			
	«Евроатлантическая» (страны Западной Европы: Великобритания, Германия, Франция, Италия)	«Восточно-азиатская» (Япония, Южная Корея, Гонконг, Тайвань)	«Альтернативная» (Таиланд, Чили, Турция, Иордания, Португалия)	«Тройная спираль» (США, отдельные элементы включаются в НИС европейских стран)
1. Ядро модели	Университеты и исследовательские центры	Исследовательские лаборатории при корпорациях	Университеты и технопарки	Наука-государство-бизнес и их взаимодействие
2. Этапы инновационного цикла	Полный инновационный цикл	Отсутствует элемент фундаментальной науки	Практически отсутствуют фундаментальная и прикладная науки	Полный инновационный цикл

Окончание табл. 1

Характеристика	Модель НИС			
	«Евроатлантическая» (страны Западной Европы: Великобритания, Германия, Франция, Италия)	«Восточно-азиатская» (Япония, Южная Корея, Гонконг, Тайвань)	«Альтернативная» (Таиланд, Чили, Турция, Иордания, Португалия)	«Тройная спираль» (США, отдельные элементы включаются в НИС европейских стран)
3. Роль государства	Помощь в коммерциализации, финансирование инновационных проектов; поощрение государственно-частного партнерства в инновационной сфере	Ориентация на заимствование технологий и экспорт высокотехнологичной продукции	Заимствование новых технологий, подготовка кадров и выделение приоритетных сфер	Стимулирование технологического развития и коммерциализации результатов НИОКР
4. Особенности финансирования НИОКР	Активно используются государственные гранты	Расходы частного сектора преобладают	Расходы государства на создание инновационной инфраструктуры, подготовку кадров	Частный сектор плюс государственные расходы. Активно используется венчурный капитал (США)
5. Методы стимулирования инновационной активности	Законодательные (в том числе по охране интеллектуальной собственности), финансовые, налоговые	Создание организационных условий для инновационной активности	Создание организационных условий	Законодательные (в том числе по охране интеллектуальной собственности), финансовые

В Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 года [3] заявлено, что «переход экономики России на инновационный тип развития невозможен без формирования конкурентоспособной в глобальном масштабе национальной инновационной системы и комплекса институтов правового, финансового и социального характера, обеспечивающих взаимодействие образовательных, научных, предпринимательских и некоммерческих организаций и структур во всех сферах экономики и общественной жизни». Складывающаяся в настоящее время НИС РФ имеет следующие отличительные особенности:

1. Ядро модели образуют наука, бизнес и государство (как первый потребитель инноваций). В отличие от зарубежной практики, наука в НИС РФ представлена преимущественно институтами Академии наук РФ и прикладными НИИ и КБ (рис. 1).



Рис. 1. Организации, выполнявшие исследования и разработки, 2014 г., ед. [4]

2. Этапы инновационного цикла: полный цикл.

3. Роль государства: формирование сбалансированного и устойчиво развивающегося сектора исследований и разработок, развитие инновационной структуры, оказание помощи в коммерциализации результатов научной деятельности, финансирование науки и инновационных проектов.

4. Особенности финансирования НИОКР. Наука в России в основном финансируется за счет средств государственного бюджета. При этом доля средств вузов чрезвычайно мала (рис. 2).

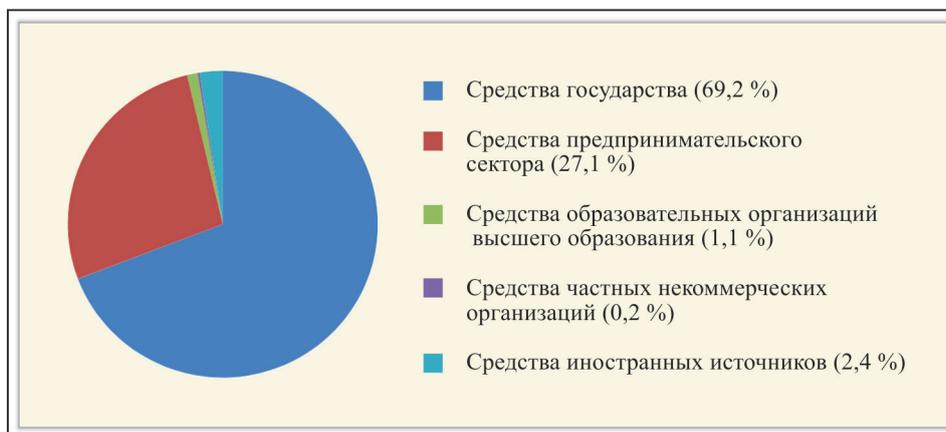


Рис. 2. Структура финансирования науки в России, 2014 г. [4]

5. Методы стимулирования инновационной активности: законодательные (в том числе по охране интеллектуальной собственности), финансовые и налоговые.

Таким образом, инновационная инфраструктура выступает как элемент НИС РФ, который требует формирования и развития. Создание инновационной инфраструктуры предусмотрено не только в рамках деятельности государственных институтов развития¹. Значительная часть инициатив по формированию такой инфраструктуры реализуется отраслевыми федеральными органами исполнительной власти (Минобрнауки России, Минпромторгом России, Минкомсвязи России, Минэкономразвития России) в рамках государственных программ Российской Федерации.

Помимо этого, в целях поддержки инновационной деятельности со стороны государства проведена работа по формированию инновационной инфраструктуры для создания самостоятельной и самостоятельно развивающейся экосистемы инноваций и технологического предпринимательства. Инновационная инфраструктура включает в себя комплекс материально-технических и сервисных объектов: бизнес-инкубаторы, технопарки, центры коллективного пользования, инжиниринговые центры и центры прототипирования, испытательные центры, центры метрологии, сертификационные центры, особые экономические зоны технико-внедренческого типа, инновационные территориальные кластеры, технологические платформы, нанотехнологические центры.

На основе анализа реализации Концепции социально-экономического развития РФ с 2008 г. отмечу, что для создания эффективной национальной инновационной системы необходимо, в том числе, преодолеть фрагментарность инновационной инфраструктуры, поскольку многие ее

¹ОАО «РВК», ОАО «РОСНАНО», Внешэкономбанк, ОАО «МСП Банк», Фонд «ВЭБ Инновации», Некоммерческая организация «Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий» (Фонд «Сколково»), АИФ «Росинфокоминвест», Фонд содействия инновациям, ФГАУ «РФТР», Фонд инфраструктурных и образовательных программ, Фонд перспективных исследований и т. д.

элементы созданы, но не поддерживают инновационный процесс на протяжении всего цикла генерации, коммерциализации и внедрения инноваций.

Решением указанной задачи на уровне Московской области предлагается развитие инновационно-территориального радиоэлектронного кластера (ИТРК) в особой экономической зоне технико-внедренческого типа «Исток» в городском округе Фрязино. В данной модели рассматривается объединение хозяйствующих субъектов (кластер), действующих на инновационной площадке, включающей инструменты технопарка, образовательный кластер и механизм интеграции в мировую науку и мировой рынок инноваций (см. предыдущие статьи автора). Ниже обозначены некоторые задачи развития НИС РФ и их возможные решения в рамках ИТРК (табл. 2).

Таблица 2

Решение задач развития НИС РФ в рамках ИТРК

Задачи развития национальной инновационной системы и технологий	Решение в рамках инновационно-территориального кластера в ОЭЗ «Исток»
Поддержка инновационного бизнеса	Механизмы реализации инноваций: бизнес-инкубатор, центр коллективного пользования, испытательный и сертификационный центр, производственная площадка якорного резидента, преференции ОЭЗ ТВТ
Расширение спроса на инновации в экономике	Внутрикластерное потребление, потребление инновационной продукции в хозяйстве региона, гособоронзаказ
Развитие российского научно-образовательного потенциала и повышение его эффективности	Формирование программ обучения в МИРЭА и филиале с учетом требований участников кластера, программа корпоративного обучения на базе факультетов 3 вузов, прохождение практики на предприятиях, послевузовское трудоустройство
Развитие инновационной инфраструктуры	Функция Управляющей компании – обеспечить работу механизмов организации инноваций (инжиниринговый центр, фонд финансирования инновационных технологий, научно-технический совет, программа «Эврика») и реализации инноваций
Эффективная интеграция в глобальную инновационную систему	ИТРК – площадка обмена информацией и технологиями через членство МИРЭА в международной вузовской системе, межправительственной программе поддержки инновационных предприятий «Эврика», иностранных инвестиций и производителей оборудования, локализующих производство в ОЭЗ
Реализация системы технологических и научно-исследовательских инициатив (проектов), обеспечивающих прорывные позиции России в научно-технологической конкуренции на мировых рынках	Центр трансфера (коммерциализации) технологий как механизм выбора технологии инновационного рыночного продукта, запуска в серийное производство, передачи на рынок и обеспечения его эксплуатации и НТС как экспертный совет проектов и центр выбора сегментов рынка высокотехнологичной продукции и инновационных решений и совет «Эврики»
Формирование новой инновационной культуры в обществе и повышение статуса новатора	Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2014 – 2020 годы [5], детские технопарки «Кванториум» ²

²Детские технопарки «Кванториум» – площадки, где дети в проектном формате решают реальные кейсы и задачи по перспективным естественно-научным и техническим направлениям. Они создаются согласно [6 и 7].

Таким образом, ИТРК можно рассматривать как часть региональной инновационной системы, которая, в свою очередь, является подсистемой государственной ИС РФ и которая включает предприятия и организации регионального значения и организует их инновационное развитие, предоставляя инновационную инфраструктуру для решения, в том числе, задач снижения рисков частных инвесторов и предпринимателей, действующих в наиболее технологически сложных отраслях экономики, повышения эффективности их инвестиций, содействие в получении финансовой и экспертной поддержки.

По результатам прогноза социально-экономического развития РФ можно констатировать: особенность перехода к инновационному сценарию развития состоит в том, что России предстоит одновременно решать задачи резкого сокращения разрыва в уровне технологического развития экономики в целом и создавать условия для обеспечения опережающего прорывного развития в тех секторах, которые определяют ее будущую специализацию в мировом хозяйстве. На взгляд автора, модель ИТРК способна решить указанную задачу в радиоэлектронной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красноперова, Т. Я.** Национальная инновационная система: структура, роль финансовой составляющей / Т. Я. Красноперова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6 (88). – С. 152 – 156.
2. **Андрюшкевич, О. А.** Особенности формирования национальных инновационных систем / Под ред. В. З. Беленького // Анализ и моделирование экономических процессов: сб. ст. – М.: ЦЭМИ РАН. – 2013. – Вып. 10. – С. 24 – 48.
3. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 № 1662-р.
4. **Городникова, Н. В.** Индикаторы науки: 2016: статистический сборник / Н. В. Городникова, Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский и др. – М.: НИУ ВШЭ, 2016. – 304 с.
5. О федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2014 – 2020 годы и внесении изменений в федеральную целевую программу «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы: постановление Правительства РФ от 21.05.2013 № 424 (ред. от 23.10.2014).
6. О реализации Национальной технологической инициативы: постановление Правительства от 18.04.2016 № 317.
7. Федеральная целевая программа развития образования на 2016 – 2020 годы: постановление Правительства РФ от 23.05.2015 № 497.

Статья поступила 25 июля 2017 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.382

ЧИСЛО ВЕТВЯЩИХСЯ ДЕРЕВЬЕВ ГРАФА И ЧИСЛО ИОНИЗИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

И. А. Балыко, А. К. Балыко

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

Показано, что выражения для числа корневых деревьев с помеченными вершинами в теории графов и для коэффициентов ионизации электронов в лавине при ударной ионизации в полупроводнике совпадают.

КС: граф, число ветвящихся деревьев с одним корнем

THE NUMBER OF BRANCHING TREES OF THE GRAPH AND THE NUMBER OF IONIZED PARTICLES IN A SEMICONDUCTOR

I. A. Balyko, A. K. Balyko

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

It is shown that the expressions for the number of rooted trees with labeled vertices in graph theory and for electron ionization coefficients in an avalanche under shock ionization in a semiconductor coincide.

Keywords: graph, the number of branching trees with one root

В работе [1] было получено аналитическое выражение для плотности распределения вероятности числа ионизированных частиц (электронов), вышедших из слоя умножения в полупроводнике. Там же говорилось, что подобное выражение может иметь место и в других областях науки и техники. Многочисленная ионизация частиц при соударениях приводит к размножению частиц и к разветвлению происходящего процесса рождения частиц. Нечто подобное, а именно ветвящиеся деревья, является основой теории графов, которая получила широкое распространение при анализе и синтезе электрических цепей, в том числе и цепей СВЧ. В настоящей работе получено аналитическое выражение для числа корневых ветвящихся деревьев.

Напомним основные определения из теории графов [2]. Графом $\Gamma = \Gamma(X, W)$ называется пара множеств: X – множество вершин; W – множество ребер, соединяющих вершины. Чередующаяся последовательность вершин и ребер называется цепью. Замкнутая цепь, в которой первая и последняя вершины совпадают, называется циклом. Граф Γ называется связным, если любая пара его вершин соединена цепью. Связный граф, не содержащий циклов, называется деревом. Если все вершины пронумерованы, то такое дерево называется деревом с помеченными вершинами. Одна, выделенная из помеченных, вершина дерева называется корнем, а само дерево – корневым.

Пусть n – число помеченных вершин графа, а k – число ребер в корне. Введем обозначения: $r_n(k)$ – число деревьев с k ребрами в корне; r_n – число деревьев с n вершинами.

Для графа с $n = 1$ условимся считать, что $r_1 = r_1(0) = 1$, так же как в математике считается, что $0! = 1$.

Для $n > 1$ имеем

$$r_n = \sum_{k=1}^{n-1} r_n(k).$$

Граф с двумя вершинами ($n = 2$) имеет одно ребро ($k = 1$), а поскольку корнем может быть либо первая, либо вторая вершина, то число деревьев $r_2 = r_2(1) = 2! = \frac{2!}{1!} = 2^{2-1}$.

Для графа с $n = 3$ корень дерева может быть соединен либо с двумя ребрами ($k = 2$), тогда число таких деревьев равно числу вершин $r_3(2) = 3$, либо с одним ребром ($k = 1$), тогда число таких деревьев равно числу сочетаний из 3 по 1, то есть $r_3(1) = 3! = 6$, а общее число таких деревьев

$$r_3 = r_3(1) + r_3(2) = 3! + 3 = \frac{3!}{1!} + \frac{3!}{2!} = 3! \cdot \left(\frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} \right) = 9 = 3^2 = 3^{3-1}.$$

Рассуждая аналогичным образом, определим число деревьев для графов с $n = 4$ (рис. 1, а), $n = 5$ (рис. 1, б), $n = 6$ (рис. 1, в) и т. д.

$$r_4 = \sum_{k=1}^3 r_4(k) = 4! \cdot \left(1 + \frac{1}{2!} \right) + 4! + 4 = 4! + \frac{4!}{1!} + \frac{4!}{2!} + \frac{4!}{3!} = 4! \cdot \left(\frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} \right) = 64 = 4^3 = 4^{4-1},$$

$$r_5 = \sum_{k=1}^4 r_5(k) = 5! \cdot \left(2 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} \right) + 5! \cdot \left(1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{2!} \right) + \frac{5!}{2!} + \frac{5!}{4!} = 5! \cdot \left(\frac{3}{1!} + \frac{4}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} \right) = 625 = 5^4 = 5^{5-1},$$

$$r_6 = \sum_{k=1}^5 r_6(k) = 6! \cdot \left(\frac{6}{1!} + \frac{8}{2!} + \frac{3}{3!} + \frac{1}{(2!)^2} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} \right) = \frac{6!}{5!} \cdot (720 + 480 + 60 + 30 + 5 + 1) = 6^5 = 6^{6-1}.$$

Обобщая полученные выражения, приходим к общей формуле для числа деревьев с n помеченными вершинами и одним корнем $r_n = n^{n-1}$.

Существенно отметить, что отношение $q_n = \frac{r_n}{n!}$ в точности совпадает с коэффициентами $C_n = \frac{n^{n-1}}{n!}$, полученными при рассмотрении ударной ионизации в полупроводнике [1], хотя подсчет числа деревьев графа и числа ионизированных частиц проводится различными способами.

Напомним, что описанный в работе [1] метод расчета вероятности вылета из слоя умножения n электронов основан на том представлении, что каждый акт ионизации атома, производимый одним электроном, представляет собой случайное событие, поэтому вероятность того, что электрон, вошедший в слой умножения, произведет m ионизаций, определяется формулой Пуассона $p_m = u^m e^{-u} / m!$, где u – среднее число ионизаций, совершаемое электроном в слое умножения.

1. $n = 1, m = 0$.

Вероятность вылета одного электрона из слоя равна вероятности того, что он пройдет слой без ионизации: $P(1) = p_0 = e^{-u}$.

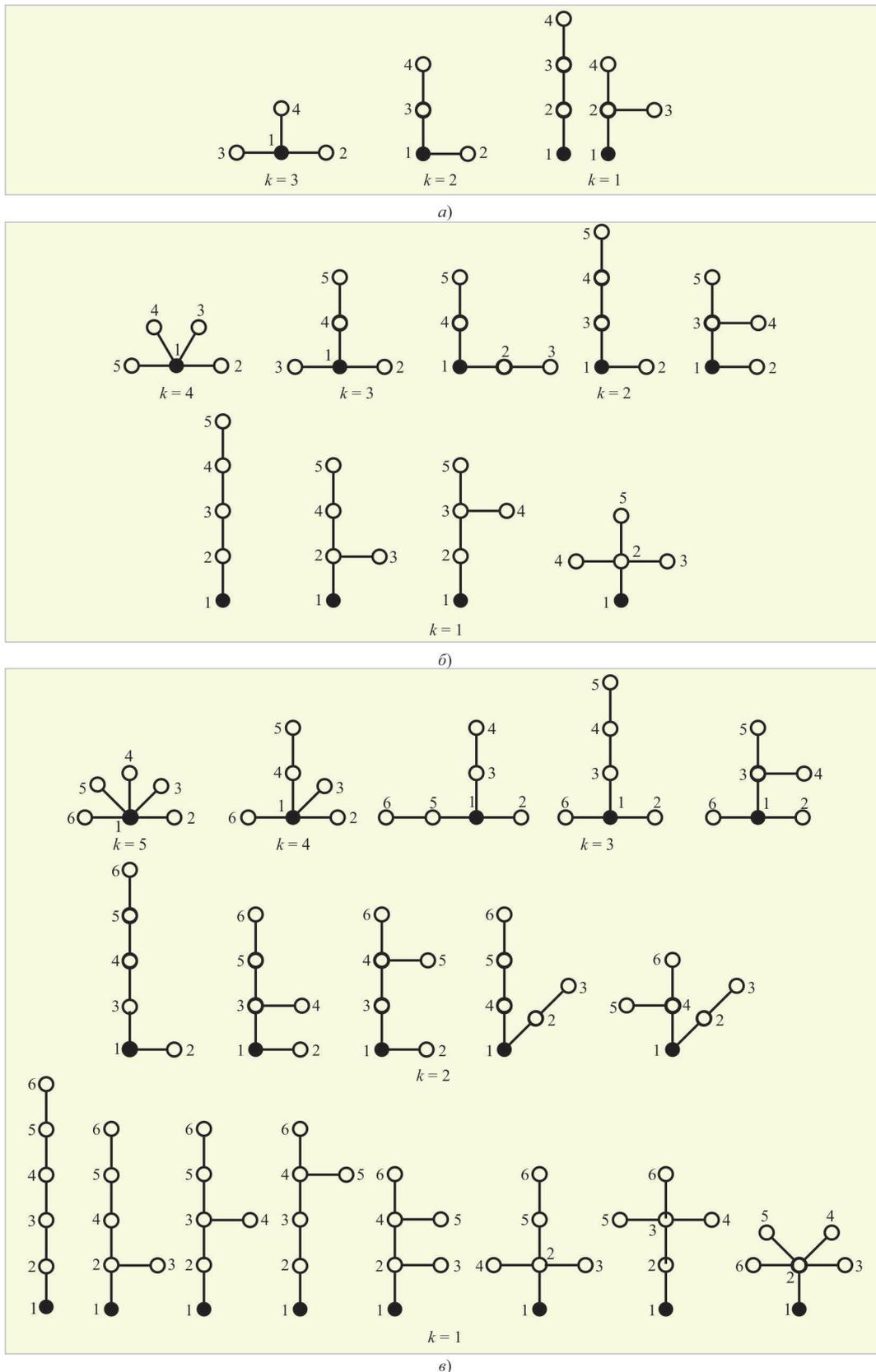


Рис. 1. Корневые деревья с помеченными вершинами

2. $n = 2, m = 1$.

Если электрон совершит в слое умножения одну ионизацию и после этого он и рожденный им электрон пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета двух электронов будет равна $P(2) = p_1 \cdot p_0 = u \cdot e^{-2u}/1!$.

3. $n = 3, m = 2$.

Если первичный электрон совершит в слое умножения две ионизации и после этого он и рожденные при этом электроны пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета трех электронов будет равна $p_2 \cdot p_0^2$; если первичный электрон совершит в слое умножения одну ионизацию и после этого он пройдет слой без ионизации, а рожденный им электрон также совершит одну ионизацию, после которой два электрона пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета трех электронов будет равна $p_1^2 \cdot p_0$. Таким образом, выражение для суммарной вероятности имеет вид $P(3) = p_2 \cdot p_0^2 + p_1^2 \cdot p_0 = u^2 \cdot e^{-3u} \cdot [1/2! + 1/(1!)^2]$.

4. $n = 4, m = 3$.

Начиная с $n = 4$ расчет вероятности существенно усложняется, поскольку появляются различные варианты возможных схем ионизаций.

Если первичный электрон произвел три ионизации и далее этот электрон и рожденные им три электрона пройдут слой без ионизаций, то мы имеем схему ионизаций (рис. 2, а), где знак \times означает ионизацию, а стрелка (\rightarrow) – движение электрона. В этом случае вероятность вылета четырех электронов равна $p_3 \cdot p_0^3$.

Если первичный электрон произвел две ионизации, а рожденный электрон произвел одну ионизацию, то возможны две комбинации схемы (рис. 2, б). В этом случае вероятность вылета четырех электронов равна $2p_2 \cdot p_1 \cdot p_0^2$.

Если первичный электрон произвел одну ионизацию, а рожденный – две ионизации, то схема имеет вид, показанный на рис. 2, в. В этом случае вероятность вылета четырех электронов равна $p_1 \cdot p_2 \cdot p_0^2$.

Наконец, если первичный электрон произвел одну ионизацию, рожденный им – еще одну ионизацию и им рожденный электрон произвел еще одну ионизацию, то такая схема имеет вид, как и на рис. 2, г.

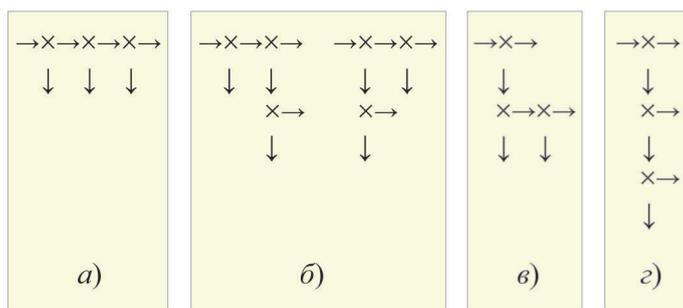


Рис. 2. Схемы ионизаций

Суммируя эти вероятности, получаем

$$P(4) = p_3 \cdot p_0^3 + 2p_2 \cdot p_1 \cdot p_0^2 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_0^2 + p_1^3 \cdot p_0 = u^3 \cdot e^{-4u} \cdot [1/3! + 3/(2! 1!) + 1/(1!)^3].$$

Как уже отмечалось, значения для C_n и q_n совпадают, хотя выражения для них начиная с $n = 4$ разнятся существенно.

В частности,

$$C_4 = 1/1!^3 + 3/(2! \cdot 1!) + 1/3! = 8/3 = 4^3/4!, \quad (1)$$

$$q_4 = 2/1! + 1/2! + 1/3! = 8/3, \quad (2)$$

$$C_5 = 1/(1!)^4 + 6/(2! \cdot 1!^2) + 2/2!^2 + 4/(3! \cdot 1!) + 1/4! = 125/24 = 5^4/5!,$$

$$q_5 = 3/1! + 4/2! + 1/3! + 1/4! = 125/24,$$

$$C_6 = 1/(1!)^5 + 10/(2! \cdot 1!^3) + 10/(2!^2 \cdot 1!) + 10/(3! \cdot 1!^2) + 5/(3! \cdot 2!) + 5/(4! \cdot 1!) + 1/5! = 54/5 = 6^5/6!,$$

$$q_6 = 6/1! + 8/2! + 3/3! + 1/4! + 1/2!^2 + 1/5! = 54/5$$

и т. д.

Возможны и другие выражения для отношения $\frac{n^{n-1}}{n!}$. Так, в работе [2] приводится выражение для числа деревьев $r_n(k)$ с n вершинами и k ребрами у корневой вершины

$$r_n(k) = \frac{1}{k!} \cdot \sum_{j_1+j_2+\dots+j_k=n-1} \frac{n!}{j_1! \cdot j_2! \cdot \dots \cdot j_k!} \cdot r_{j_1} \cdot r_{j_2} \cdot \dots \cdot r_{j_k},$$

где суммирование проводится по всем векторам (j_1, j_2, \dots, j_k) , таким, что $j_1 + j_2 + \dots + j_k = n - 1$.

Отношение $\frac{n!}{j_1! \cdot j_2! \cdot \dots \cdot j_k!}$ — это число способов выбора корня и распределений $n - 1$ остальных вершин по k деревьям с числами вершин j_1, j_2, \dots, j_k , составляющих исходное дерево. Общее число таких деревьев равно $r_{j_1} \cdot r_{j_2} \cdot \dots \cdot r_{j_k}$. Перемножая эти величины, деля на $k!$ и суммируя по всем j_1, j_2, \dots, j_k , получаем требуемую формулу. Деление на $k!$ исключает многократный учет комбинаций из k деревьев, отличающихся их перестановкой.

Для примера вычислим величину $r_4 = \sum_{k=1}^3 r_4(k)$ с помощью приведенной выше формулы. Для трех значений числа вершин в корне дерева ($k = 1, 2, 3$) последовательно получаем

$$r_4(1) = \frac{1}{1!} \cdot \sum_{j_1=3} \frac{4!}{j_1!} \cdot r_{j_1} = \frac{4!}{1!} \cdot \frac{r_3}{3!},$$

$$r_4(2) = \frac{1}{2!} \cdot \sum_{j_1+j_2=3} \frac{4!}{j_1! \cdot j_2!} \cdot r_{j_1} \cdot r_{j_2} = \frac{4!}{2!} \cdot 2 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{1! \cdot 2!},$$

$$r_4(3) = \frac{1}{3!} \cdot \sum_{j_1+j_2+j_3=3} \frac{4!}{j_1! \cdot j_2! \cdot j_3!} \cdot r_{j_1} \cdot r_{j_2} \cdot r_{j_3} = \frac{4!}{3!} \cdot \left(\frac{r_1}{1!}\right)^3.$$

Сумма этих величин дает тот же результат, что и полученный выше:

$$r_4 = \sum_{k=1}^3 r_4(k) = 4! \cdot \left(\frac{r_3}{3! \cdot 1!} + \frac{2 \cdot r_1 \cdot r_2}{1! \cdot (2!)^2} + \frac{r_1^3}{(1!)^3 \cdot 3!} \right) = 4! \cdot \left(\frac{9}{6} + \frac{2 \cdot 2}{4} + \frac{1}{6} \right) = 64 = 4^3 = 4^{4-1}.$$

Для отношений $q_n = \frac{r_n}{n!}$ эта формула принимает вид

$$q_4 = \frac{q_3}{1!} + \frac{2 \cdot q_2 \cdot q_1}{2!} + \frac{q_1^3}{3!}. \quad (3)$$

Для последующих значений n имеем

$$q_5 = \frac{q_4}{1!} + \frac{2 \cdot q_3 \cdot q_1 + q_2^2}{2!} + \frac{3 \cdot q_2 \cdot q_1^2}{3!} + \frac{q_1^4}{4!},$$

$$q_6 = \frac{q_5}{1!} + \frac{2 \cdot q_4 \cdot q_1 + 2 \cdot q_3 \cdot q_2}{2!} + \frac{3 \cdot q_3 \cdot q_1^2 + 3 \cdot q_2^2 \cdot q_1}{3!} + \frac{4 \cdot q_2 \cdot q_1^3}{4!} + \frac{q_1^5}{5!}$$

и т. д.

Видно, что суммы числовых коэффициентов в числителях дробей совпадают с числами горизонтальных строк треугольника Паскаля или, что одно и то же, с биномиальными коэффициентами:

$$\begin{array}{c} 1 \\ 1 \ 1 \\ 1 \ 2 \ 1 \\ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \\ 1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1 \end{array}$$

и т. д.

Объясняется это тем, что индекс j у q_j соответствует разложению числа $n - 1$ на части, число которых, как было показано в работе [1], совпадает с числом соответствующей горизонтальной строки треугольника Паскаля. Например, для $n = 6$ имеем

$$\begin{array}{cccccc} 5 = 4 + 1 = 3 + 1 + 1 = 2 + 1 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 \\ 3 + 2 & 1 + 3 + 1 & 1 + 2 + 1 + 1 \\ 2 + 3 & 1 + 1 + 3 & 1 + 1 + 2 + 1 \\ 1 + 4 & 2 + 2 + 1 & 1 + 1 + 1 + 2 \\ & 2 + 1 + 2 \\ & 1 + 2 + 2 \\ \mathbf{1} & \mathbf{4} & \mathbf{6} & \mathbf{4} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{array}$$

Если подставить в выражение (3) для q_4 значения $q_1 = 1$, $q_2 = 1$, $q_3 = 3/2$, то получим формулу

$$q_4 = \frac{1}{3!} + \frac{5}{2!} = \frac{8}{3},$$

отличающуюся от (1) и (2), но имеющую то же окончательное значение.

Таким образом, получены по крайней мере три различных выражения для отношения $\frac{n^{n-1}}{n!}$, содержащих суммы обратных величин факториалов, что может свидетельствовать об универсальном характере этого отношения.

Остановимся еще на одной задаче, связанной с числовым рядом $q_n = \frac{n^{n-1}}{n!}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Для исследования числовых рядов с бесконечным числом членов $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots)$, к которым, в частности, относятся и распределения вероятностей, широко используются так называемые производящие функции

$$\theta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot x^n,$$

где x – вещественная переменная.

Для многих числовых рядов производящие функции могут быть получены в явном виде. Например, для бесконечной геометрической прогрессии со знаменателем q , общий член которой равен $a_n = q^n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), производящая функция имеет вид $\theta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} q^n \cdot x^n = \frac{1}{1-q \cdot x}$.

Сравнительно просто получить $\theta(x)$ для распределения Пуассона $p_n = \frac{u^n \cdot e^{-u}}{n!}$:

$$\theta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cdot x^n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(u \cdot x)^n}{n!} \cdot e^{-u} = e^{u \cdot (x-1)}.$$

Изучим, можно ли найти в явном виде производящую функцию для ряда $q_n = \frac{n^{n-1}}{n!}$, которая имеет вид $\theta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cdot x^n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-1} \cdot x^n}{n!}$. Для этого рассмотрим экспоненту от производящей

функции $Q(x) = e^{\theta(x)} = e^{q_1 \cdot x} \cdot e^{q_2 \cdot x^2} \cdot e^{q_3 \cdot x^3} \dots = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n \cdot x^n$.

Разлагая каждую экспоненту в произведении в бесконечный ряд и собирая члены с одинаковыми степенями x , получаем

$$\begin{aligned} Q(x) &= \left(1 + \frac{q_1 \cdot x}{1!} + \frac{q_1^2 \cdot x^2}{2!} + \frac{q_1^3 \cdot x^3}{3!} + \frac{q_1^4 \cdot x^4}{4!} + \dots\right) \times \left(1 + \frac{q_2 \cdot x^2}{1!} + \frac{q_2^2 \cdot x^4}{2!} + \dots\right) \times \\ &\times \left(1 + \frac{q_3 \cdot x^3}{1!} + \frac{q_3^2 \cdot x^6}{2!} + \dots\right) \dots = \\ &= 1 + x \cdot \frac{q_1}{1!} + x^2 \cdot \left(\frac{q_1^2}{2!} + \frac{q_2}{1!}\right) + x^3 \cdot \left(\frac{q_1^3}{3!} + \frac{q_1 \cdot q_2}{1! \cdot 1!} + \frac{q_3}{1!}\right) + x^4 \cdot \left(\frac{q_1^4}{4!} + \frac{q_1^3 \cdot q_2}{2! \cdot 1!} + \frac{q_1 \cdot q_3}{1! \cdot 1!} + \frac{q_2^2}{2!} + \frac{q_4}{1!}\right) + \\ &+ x^5 \cdot \left(\frac{q_1^5}{5!} + \frac{q_1^3 \cdot q_2}{3! \cdot 1!} + \frac{q_1^2 \cdot q_3}{2! \cdot 1!} + \frac{q_1 \cdot q_2^2}{1! \cdot 2!} + \frac{q_1 \cdot q_4}{1! \cdot 1!} + \frac{q_2 \cdot q_3}{1! \cdot 1!} + \frac{q_5}{1!}\right) \dots, \end{aligned}$$

где формулы для коэффициентов Q_n имеют вид:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 1, \\ Q_1 &= \frac{q_1}{1!} = 1 = \frac{2^{2-1}}{2!} = q_2, \\ Q_2 &= \frac{q_1^2}{2!} + \frac{q_2}{1!} = \frac{1}{2!} + \frac{2}{2!} = \frac{3}{2} = \frac{9}{6} = \frac{3^{3-1}}{3!} = q_3, \\ Q_3 &= \frac{q_1^3}{3!} + \frac{q_1 \cdot q_2}{1! \cdot 1!} + \frac{q_3}{1!} = \frac{1}{3!} + \frac{2}{2!} + \frac{9}{3!} = \frac{16}{6} = \frac{4^{4-1}}{4!} = q_4, \\ Q_4 &= \frac{q_1^4}{4!} + \frac{q_1^2 \cdot q_2}{2! \cdot 1!} + \frac{q_1 \cdot q_3}{1! \cdot 1!} + \frac{q_2^2}{2!} + \frac{q_4}{1!} = \frac{1}{24} + \frac{1}{2} + \frac{9}{6} + \frac{1}{2} + \frac{16}{6} = \frac{125}{24} = \frac{5^{5-1}}{5!} = q_5, \\ Q_5 &= \frac{q_1^5}{5!} + \frac{q_1^3 \cdot q_2}{3! \cdot 1!} + \frac{q_1^2 \cdot q_3}{2! \cdot 1!} + \frac{q_1 \cdot q_2^2}{1! \cdot 2!} + \frac{q_1 \cdot q_4}{1! \cdot 1!} + \frac{q_2 \cdot q_3}{1! \cdot 1!} + \frac{q_5}{1!} = \frac{6^{6-1}}{6!} = q_6 \end{aligned}$$

и т. д.

В результате получаем выражение для суммы

$$Q(x) = e^{\theta(x)} = q_1 + q_2 \cdot x + q_3 \cdot x^2 + q_4 \cdot x^3 + \dots = \frac{1}{x} \cdot \theta(x).$$

Таким образом, производящая функция $\theta(x)$ для ряда $q_n = \frac{n^{n-1}}{n!}$ находится из решения уравнения $\theta(x) = x \cdot e^{\theta(x)}$ и не может быть выражена в явном виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балько, И. А.** Плотность распределения частиц в полупроводнике в условиях ударной ионизации / И. А. Балько, А. К. Балько // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 110 – 119.
2. **Сачков, В. Н.** Введение в комбинаторные методы дискретной математики / В. Н. Сачков. – М.: Наука, 1982.

Статья поступила 23 октября 2017 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

БАРТЕНЕВ В.Г. Первые отечественные РЛС дальнего обнаружения. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2017. – 128 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; вып. 1289).

Представлена история создания первых отечественных импульсных и когерентно-импульсных радиолокационных станций (РЛС). Во многом это история старейшего отечественного оборонного предприятия – Всероссийского НИИ радиотехники (АО ВНИИРТ), относящаяся к этапам воплощения в жизнь серийных РЛС дальнего обнаружения. Эти этапы охватывают самые трудные годы предвоенного, военного и послевоенного времени, когда созданные до Великой Отечественной войны первые отечественные РЛС РУС-2 на подступах к Москве защищали небо столицы от налетов фашистской авиации. Когда усовершенствованные РЛС РУС-2 продвигались на запад, обнаруживая и выдавая координаты самолетов противника нашей истребительной авиации и зенитной артиллерии, приближая день Победы. Когда возникшая угроза ослепления наших РЛС от применения против них дипольных пассивных помех потребовала от советских ученых создания первых когерентно-импульсных РЛС.

Представленные материалы основываются на архивных документах Министерства обороны РФ, АО ВНИИРТ, мемуарах академика Ю. Б. Кобзарева, генерал-лейтенанта М. М. Лобанова, профессора П. К. Ощепкова и других ученых и специалистов в области радиолокации, а также на материалах личных дел сотрудников, работавших в то время в НИИ-20.

Для широкого круга читателей, интересующихся историей отечественной радиолокации.

ИСТОРИЯ

УДК 621.38(09)

90-ЛЕТНИЙ ЮБИЛЕЙ РОБЕРТА АНДРЕЕВИЧА СИЛИНА

А. К. Балыко

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

THE 90-TH ANNIVERSARY OF ROBERT ANDREEVICH SILIN

A. K. Balyko

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



Роберт Андреевич Силин

1. ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ «ИСТОКА»

13 декабря 2017 г. ведущему научному сотруднику теоретического отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина» доктору технических наук, профессору Роберту Андреевичу Силину исполнилось 90 лет.

Р. А. Силин – выдающийся ученый в области прикладной электродинамики, непревзойденный специалист в области теории замедляющих систем, один из основоположников теории интегральных устройств, создатель теории необыкновенных квазиоптических явлений в периодических структурах.

Р. А. Силин родился в Москве. Его отец, Андрей Петрович, родом из Латвии, из бедной крестьянской семьи. Мобилизованный в армию, он окончил курсы шоферов и был зачислен в латышские бронечасты. В 1917 г. он вместе со своей частью принимал участие во взятии Зимнего дворца. После завершения гражданской войны работал шофером в Московском военном округе и одновременно учился на вечернем рабфаке. После рабфака А. П. Силин окончил химический факультет МВТУ и работал сначала на Березниковском, а с 1932 года на Сталиногорском химическом комбинате. Соавтор монографии «Химия и технология связанного азота» (1934 г.). На протяжении многих лет его неоднократно отмечали на страницах газет «Правда», «За индустриализацию» и в журнале «СССР на стройке». В 1938 году 39-летний заместитель начальника цеха А. П. Силин был арестован по «делу Пятакова» и умер в тюрьме через месяц после ареста. В настоящее время портрет А. П. Силина и выписка о награждении его орденом Трудового Красного Знамени размещены в заводском и городском музеях г. Новомосковска (Сталиногорска) Тульской области.

Мать Левицкая Мария Самойловна родилась в местечке Чернобыль Киевской губернии. Работая оберточницей на конфетной фабрике, М. С. Левицкая в 1914 г. вступила в партию большевиков (РСДРП). После февральской революции ее избрали членом Совета рабочих и солдатских депутатов г. Кременчуг. Во время гражданской войны по распоряжению ЦК Украины вместе с Р. С. Землячкой была отправлена в Крым, в тыл армии белогвардейцев, на подпольную



Начальник отдела и лаборатории
В. С. Лукошков

работу. В 1920 г. приехала в Москву и поступила учиться на рабфак, одновременно работала освобожденным председателем завкома на табачной фабрике Михельсона, которую по предложению М. С. Левицкой переименовали в фабрику «Ява». В 1928 г. была избрана членом Московского комитета ВКП(б). Дважды встречалась и беседовала с Н. К. Крупской. В начале 1934 г. переехала в г. Сталиногорск. Много лет прожила у сына во Фрязино.

От родителей передались Роберту Андреевичу Силину высокие человеческие качества: честность, принципиальность, смелость, неистовая работоспособность, фанатичное стремление к знаниям и беззаветная преданность делу.

После окончания средней школы Р. А. Силин продолжил учебу сначала в Новомосковском химическом техникуме, а затем в МГУ им. М. Ломоносова, который закончил в 1953 году. Его преподавателями в университете были выдающиеся профессора В. В. Мигулин, С. Д. Гвоздовер, В. М. Лопухин, С. П. Стрелков, Р. В. Хохлов и многие другие.

«Исток» предоставил все возможности молодому специалисту для научного роста. Начальник теоретического отдела профессор В. С. Лукошков с уважением

относился ко всем сотрудникам, но с особой теплотой – к молодежи. Новые интересные задачи лавиной рождались у разработчиков, которые за помощью обращались к теоретикам.

Менее чем через десять лет работы, после успешной защиты диссертации, в 1961 году Роберт Андреевич становится старшим научным сотрудником, а через год – начальником лаборатории, сменив А. С. Тагера. На протяжении 20 лет Р. А. Силин руководил теоретической лабораторией, которая после перехода А. С. Тагера преимущественно занималась расчетом и проектированием электродинамических систем. Многие сотрудники предприятия прошли школу Р. А. Силина в качестве сотрудников лаборатории, разработчиков уникальных приборов, дипломников, аспирантов и соискателей ученой степени и благодарны ему за деятельное участие в научной судьбе.

Р. А. Силин является ведущим специалистом страны в области теории электродинамических узлов для вакуумных и твердотельных приборов СВЧ. Мировую известность получили его фундаментальные работы в теории периодических волноводов. Развита и доведена до практических применений теория симметрии периодических волноводов, теория двумерно-периодических систем, обнаружены и исследованы необыкновенные квазиоптические явления в периодических структурах. По его инициативе была начата работа по точному расчету интегральных схем СВЧ, завершившаяся созданием комплекса программ FAGOT.

Под руководством Роберта Андреевича и при его непосредственном участии выполнено более 40 НИР и 3 ОКР, результаты которых использованы при создании более чем 60 изделий электронной техники практически во всех разрабатывающих подразделениях и цехах «Истока». Р. А. Силин один из самых уважаемых теоретиков предприятия.

Научные результаты, полученные Р. А. Силиным, содержатся в 190 статьях в научно-технических журналах, «Большой Советской Энциклопедии», «Физическом энциклопедическом словаре» и энциклопедическом словаре «Электроника». Он автор 22 изобретений. Монография «Замедляющие системы», изданная в 1966 году совместно с В. П. Сазоновым, за прошедшие десятилетия получила мировую известность и широкое признание среди специалистов предприятий и преподавателей институтов, переведена на английский язык и издана за рубежом. Полученные за десятилетия новые результаты дали толчок к изданию в 2002 году Р. А. Силиным новой монографии «Периодические волноводы». Работая над этим фундаментальным научным трудом, Роберт Андреевич описал уникальные явления, происходящие в искусственных диэлектриках, и выпустил научно-популярную брошюру «Необыкновенные законы преломления и отражения». Уникальный «Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств», одним из авторов которого является Р. А. Силин, и его монография «Проектирование интегральных схем СВЧ» служат настольными книгами для разработчиков интегральных схем.



Начальник лаборатории Р. А. Силин

На протяжении многих лет Роберт Андреевич активно участвовал в общественно-научной работе и подготовке научных кадров, являлся членом диссертационного совета «Истока», а также диссертационных советов при Саратовском государственном университете и при ФИРЭ РАН; руководил постоянным научным семинаром по электродинамике при секции по электронике НТО РЭС им. А. С. Попова. Р. А. Силин подготовил к защите 6 кандидатов наук. Его педагогическая деятельность началась еще в 1956 году. Тридцать лет он работал профессором базовой кафедры филиала МИРЭА в г. Фрязино. Им подготовлены и изданы многочисленные курсы лекций по расчету интегральных схем, сборник упражнений и лабораторных работ по этому курсу, пособие по курсовому проектированию, курс лекций по электродинамике и математике.

Роберт Андреевич награжден медалью «За трудовое отличие», его портрет неоднократно украшал Аллею почета предприятия.

Сотрудники «Истока», коллеги и друзья поздравляют Роберта Андреевича с юбилейной датой и искренне восхищаются той неиссякаемой энергией, трудолюбием и настойчивостью, которые присущи ему всегда и во всем. От всего сердца желают ему отличного здоровья, бодрого настроения и счастья в семейном кругу, долгих лет жизни.

2. ВОСПОМИНАНИЯ Р. А. СИЛИНА О ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

«Попал я на «Исток» в 1954 г. по окончании кафедры колебаний физического факультета (физфака) Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В те годы в Советском Союзе бурно развивались радиотехника и электроника. В связи с этим на радиофизическое отделение физфака МГУ только на наш курс из педагогических вузов страны перевели около 60 человек, в основном девушек. Физфак тесно был связан с «Истком». Заведующий кафедрой электроники Самсон Давыдович Гвоздовер по совместительству заведовал аспирантурой «Истока». Студенты его кафедры проходили на предприятии практику, и многие из них оставались здесь работать. Так на «Исток» попали Юрий Дмитриевич Самородов (впоследствии доктор технических наук, начальник НПК-25), Галина Александровна Самородова, Генрих Григорьевич Моносов, Виктор Анатольевич Солнцев (впоследствии доктор технических наук, заведующий кафедрой радиотехники в МИЭМ), Алискер Касумов, Марина Пыхунова (Тычинская) и другие. В то время на работу в «Исток» принимали по несколько сотен молодых специалистов в год. По совету Ю. Д. Самородова я попросился в теоретический отдел, который возглавлял профессор Владимир Сергеевич Лукошков. Он направил меня в лабораторию теоретического отдела.

В 1954 г. в состав отдела входило четыре лаборатории: теоретическая во главе с Петром Васильевичем Романовым, радиофизическая во главе с Борисом Николаевичем Швецовым, электронной оптики во главе со Львом Васильевичем Шубиным и вычислительная во главе с Николаем Дмитриевичем Ивановым.

Вычислительная лаборатория обслуживала сотрудников отдела и была оснащена электроарифмометрами типа «Рейн металл». Их производительность – 2...3 операции в секунду. По мере появления и развития электронной вычислительной техники росли и наши возможности в построении моделей электронных приборов СВЧ. Каждый раз с появлением новой вычислительной машины возникало опасение, а загрузим ли мы ее? Так было, например, с приобретением машины «Урал 1», совершающей 100 операций в секунду, «Урал 2» – 2000 операций и т. д. В результате оказывалось, что этой производительности нам не хватало (аппетит приходит во время еды).

В теоретической лаборатории сначала работало человек 10...15. Группа кандидата технических наук Георгия Иосифовича Рукмана, в которую входили ветеран Великой Отечественной войны Зинаида Дмитриевна Ковтунова, Маргарита Васильевна Решетникова и др., занималась математической статистикой серийного производства электронных приборов. Группа Александра Семеновича Тагера (В. А. Солнцев, Ю. Д. Самородова, Г. Г. Моносов и др.) занималась теорией электронных приборов СВЧ. Кроме того, в лаборатории трудились: ветеран Великой Отечественной войны Николай Андрианович Белинский (расчет резонаторов для клистронов), Янис Янисович Акментыньш (расчет электроники мощных клистронов в обеспечение разработок Савелия Александровича Зусмановского), Александр Андреевич Негирев (расчет штыревых замедляющих систем для ламп бегущей волны – ЛБВ) и мы с Александром Сергеевичем Победоносцевым (расчет резонаторов магнетронов).

Интересны были методы воспитания В. С. Лукошковым молодых специалистов. Во-первых, он требовал, чтобы теоретики трудились в тесном контакте с разработчиками электронных приборов. Так, мы с А. С. Победоносцевым с первых же дней работы связывались с сотрудниками отдела, занимающегося созданием магнетронов (Анатолий Павлович Федосеев, Юлий Альфредович Вецгайлс, Леонид Григорьевич Некрасов, И. В. Соколов, И. Хлебников и др.), и пытались решать их проблемы. Во-вторых, когда В. С. Лукошкова вызывало начальство, он обязательно захватывал с собой того или иного сотрудника, причастного к рассматриваемому вопросу. В частности, запомнился такой случай. К директору предприятия Мстиславу Михайловичу Федорову приехал начальник главка А. А. Сорокин. Они вызвали В. С. Лукошкова, а тот прихватил с собой нас с А. С. Победоносцевым. Обсуждался вопрос производства какого-то магнетрона: процент выхода, количество выпускаемых приборов и их потребность и т. д. Все эти вопросы были совершенно секретными. Толку от нас с А. С. Победоносцевым не было. Однако мы почувствовали себя причастными к большому делу и с утроенной силой взялись за работу.

Г. И. Рукман был очень увлекающимся специалистом. В дальнейшем он возглавил физический отдел, в котором трудились, в частности, Владимир Павлович Тычинский и Анатолий Георгиевич Жуков (впоследствии оба стали докторами технических наук). В. П. Тычинский занимался исследованием параметрических усилителей. В создании их математической модели ему помогал и наш коллектив. Позже он занялся исследованием и разработкой мощных газовых лазеров, создал отдел по разработке лазеров, работал профессором МИРЭА. А. Г. Жуков создавал тепловизоры. После ухода от нас Г. И. Рукмана его группа распалась. М. В. Решетникова стала заведующей аспирантурой при «Истоке», а З. Д. Ковтунова перешла в нашу группу и занялась расчетом замедляющих систем.

С 1955 г. нашу лабораторию возглавит А. С. Тагер. Он занимался теорией электронных приборов. В частности, развил теорию спиральных замедляющих систем для ЛБВ, исследовал



Начальник лаборатории П. В. Романов



Начальник лаборатории
А. С. Тагер

шумовые свойства ЛБВ с целью подавления шумов, совместно с А. С. Победоносцевым разрабатывал теорию приборов типа «О» и «М» миллиметрового диапазона, исследовал характеристики многолучевых приборов и т. д. Совместно с группой сотрудников лаборатории: А. А. Негирев, А. С. Победоносцев, В. А. Солнцев, Г. А. Самородова и др. – на базе лабораторий Михаила Борисовича Голанта и при участии сотрудников отделения 17 А. С. Тагер создал лампу обратной волн (ЛОВ) трехмиллиметрового диапазона длин волн. В дальнейшем разработкой этих ЛОВ занялась лаборатория М. Б. Голанта. В эту лабораторию перешел от нас А. А. Негирев, который возглавил лабораторию по разработке ЛОВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Его приборы покупают даже в США.

А. С. Тагер исследовал как электровакуумные, так и твердотельные (как и В. П. Тычинский) параметрические усилители. В результате ошибки, заключающейся в «неправильной» полярности напряжения, подаваемого на диод, им совместно с сотрудником теоретической лаборатории Анатолием Ивановичем Мельниковым, сотрудником отделения 17 Ахметом Магомедовичем Цебиевым (я писал рецензию на его дипломный проект) и студентом Геннадием Петровичем Кобельковым было сделано открытие лавинного пробоя и изобретен лавинно-пролетный диод (ЛПД). После этого от-

крытия А. С. Тагер создал на предприятии полупроводниковое отделение и перешел в него работать, а руководство теоретической лабораторией передал мне.

Нельзя не отметить работавшего в группе А. С. Тагера талантливого специалиста Анатолия Деомидовича Гладуна, который много лет заведует кафедрой общей физики в Московском физико-техническом институте (МФТИ). В 1972 г. А. С. Тагер вновь вернулся в теоретический отдел, где создал твердотельную лабораторию, в которую перешли Эльза Васильевна Погорелова, Евгений Исаевич Голант, Николай Алексеевич Гусельников и Александр Карпович Балыко.

После ухода А. С. Тагера в полупроводниковое отделение 4 А. С. Победоносцев возглавил группу, занимающуюся электроникой приборов СВЧ. В эту группу входили Игорь Константинович Викулов, исключительно талантливый и скромный Вадим Григорьевич Бороденко и другие. Работа велась в тесном сотрудничестве с работниками вычислительной лаборатории теоретического отдела Верой Алексеевной Морозовой, Натальей Яковлевной Мальковой-Хаимовой, Анной Николаевной Захаровой и с разработчиками приборов Станиславом Васильевичем Королевым, Борисом Викторовичем Сазоновым, Михаилом Ивановичем Лопиным, Юрием Павловичем Мякинковым и другими. В этой же группе занимался исследованием устойчивости электронных потоков Владимир Георгиевич Лейман, ставший потом профессором кафедры общей физики МФТИ. Отличительная черта этой группы – широкое внедрение теории в разработку новых приборов. Ими выполнена большая работа по теоретическому исследованию гибридных приборов типа «О», что позволило существенно повысить КПД приборов и расширить их рабочую полосу частот. Ими также разработаны методики проектирования приборов, мало-

чувствительных к разбросам параметров, и внесен существенный вклад в теорию их допусков. Развита теория многолучевых клистронов и ЛБВ, что позволило существенно опередить зарубежные разработки. В итоге группу сотрудников (А. С. Победоносцев, В. Г. Бороденко, Г. Г. Моносов) перевели в радиофизическую лабораторию отдела, которая, по существу, стала лабораторией электроники.



Лаборатория 111, 1967 г.

Слева направо: Кутенин Борис Павлович, Колосов Юрий Александрович, Лейман Владимир Георгиевич, Ковтунова Зинаида Дмитриевна, Силин Роберт Андреевич, Хапланова Зинаида Ивановна, Самохин Геннадий Сергеевич, Тагер Александр Семенович, Бороденко Вадим Георгиевич, Кирюшин Владимир Павлович

Хотелось бы сказать несколько слов о В. С. Лукошкове. Он создатель нашего отдела, и в том числе нашей лаборатории. К его 100-летию руководители отделения 10 Вилиор Павлович Сазонов, Анатолий Васильевич Галдецкий, Петр Антонович Нартов и сотрудник отделения А. К. Балько издали о нем хорошую книгу, поэтому не буду подробно писать о его научных достижениях. Остановлюсь только на некоторых деталях. Владимир Сергеевич был отличным семьянином, имел семерых детей. Жил он в домике с удобствами на улице. Когда с возрастом жить в таких условиях стало нелегко, он попросил администрацию «Истока» предоставить квартиру в нормальном доме. Ему отказали. Тогда он подал заявление в Минский радиотехнический институт и прошел по конкурсу на должность профессора. Администрация института спохватилась и вернула его назад, предоставив трехкомнатную квартиру, заодно сделав его заместителем научного руководителя «Истока» Николая Дмитриевича Девяткова. Проработав в этой должности некоторое время, он попросил вернуть его в свой отдел и стал ведущим научным сотрудником нашей лаборатории. По-прежнему интересы его лежали в деятельности лаборатории электронной оптики. Сам он имел живой характер. Взбегал по лестнице через одну

ступеньку, будучи болен ишемией сердца. Кончилось это плачевно. После очередного такого подъема он скончался от инфаркта на рабочем месте в нашей лаборатории.



Лаборатория 111, 1967 г.

Сидят: Силин Роберт Андреевич, Хапланова Зинаида Ивановна, Ковтунова Зинаида Дмитриевна.
Стоят: Колосов Юрий Александрович, Самохин Геннадий Сергеевич,
Лукошков Владимир Сергеевич, Кутенин Борис Павлович, Бороденко Вадим Георгиевич,
Лейман Владимир Георгиевич, Викулов Игорь Константинович

После ухода А. А. Негирева из теоретического отдела замедляющими системами заниматься поручили мне. В нашу группу вошли З. Д. Ковтунова и Алла Константиновна Брюхова. Позже пришли два талантливых математика: Иосиф Шоломович Белуга и Геннадий Сергеевич Самохин. Затем из отдела 340, из лаборатории Александра Николаевича Королева, в нашу лабораторию перешел Игорь Павлович Чепурных. Мы развивали метод многопроводных линий для расчета штыревых замедляющих систем. Эта работа велась в тесном контакте с Игорем Ефимовичем Роговиным и его сотрудниками (Лидией Ивановной Пинчук и Ольгой Александровной Аристарховой). Для приборов повышенной мощности была создана теория двумерно-периодических систем. Соответствующие результаты получены для прибора «Альбатрос», создаваемого А. П. Федосеевым, для ЛОВ миллиметрового диапазона, для ряда приборов, создаваемых Майком Ивановичем Хворовым, и для ряда других ИЭТ СВЧ. Как побочный эффект – развита квазиоптика двумерно- и трехмерно-периодических структур, которые в последнее время стали называться метаматериалами. Их исследованию начиная с 2000 г. посвящается много работ в надежде создать человека-невидимку, расширить разрешающую способность оптических приборов и т. д. Нами развита теория симметрии замедляющих систем, которая позволила предсказать ряд свойств, ускользающих от внимания при традиционных методах исследования. На основе метода конечных элементов и проекционных методов создан комплекс программ решения объемных задач электродинамики (замедляющих систем, фильтров,

резонаторов, согласующих устройств и т. п.). Эта программа (основной вклад в нее внес И. П. Чепурных) конкурировала с зарубежными по точности расчета и быстродействию. Результаты расчета по этой программе использовали Ю. Д. Самородов, Валентин Георгиевич Калина, Людвиг Михайлович Борисов, Александр Николаевич Каргин и многие другие.

В связи с началом работ по интегральным схемам СВЧ наш коллектив занялся теорией полосковых линий и устройств на их основе. Лаборатория пополнилась новыми сотрудниками (Валерий Михайлович Красноперкин, Александр Иосифович Гипсман, Фарит Мусович Исмагилов и др.). Создан универсальный пакет прикладных программ по расчету устройств на полосковых линиях в квазистатическом приближении (основной исполнитель – В. М. Красноперкин), методом малых возмущений доказана справедливость квазистатического расчета (А. И. Гипсман) для линий с потерями и для линий на гиротропной подложке. Ранее такое доказательство существовало только для линий в однородной среде. Создана программа расчета высших типов волн в полосковых линиях, а также программа расчета устройств на магнитоэлектрических волнах. В этих работах особенно проявился талант И. Ш. Белуги и Г. С. Самохина. Для решения сингулярных интегральных уравнений И. Ш. Белуга предложил вычленять сингулярную часть, чем существенно упростил расчет, повысив его точность. Г. С. Самохин развил этот метод. Последний хорошо владел вариационными методами вычислений, позволившими решить ряд практически важных задач.

Сотрудник лаборатории ветеран Великой Отечественной войны Владимир Павлович Кирюшин одним из первых в СССР создал лампу обратной волны на спиральной замедляющей системе. Он совместно с Николаем Ивановичем Цемко из лаборатории применений разработал плазмотрон, создал универсальную программу по расчету аксиально-симметричных структур. С помощью этой программы он исследовал сверхразмерные волноводы, спирали на диэлектрических опорах, спирали с экранами, содержащими продольные ребра.

Виктор Васильевич Кулиш занимался теорией лазеров на свободных электронах. Ему принадлежит авторское свидетельство на этот лазер, полученное раньше, чем на эту тему появились статьи в американских журналах. Сейчас он доктор физико-математических наук, директор Киевского института прикладных технологий, академик Украинской академии наук.

Наша лаборатория поддерживала тесные контакты с ведущими вузами страны, в том числе с Московским, Ленинградским, Ростовским, Саратовским и Горьковским университетами. На семинарах лаборатории выступали специалисты сторонних организаций. Неоднократно выступали академики АН СССР Андрей Викторович Гапонов, Рэм Викторович Хохлов и другие.

Последние годы лабораторию возглавляет доктор физико-математических наук Андрей Борисович Пашковский.

Лабораторию с полным правом можно назвать кузницей кадров. Из ее стен вышли доктора наук Михаил Борисович Цейтлин, В. С. Лукошков, Г. И. Рукман, А. С. Тагер (лауреат Ленинской премии), В. А. Солнцев, А. С. Победоносцев (лауреат Государственной премии СССР), Р. А. Силин, А. Д. Гладун, В. Г. Лейман, В. В. Кулиш, А. Б. Пашковский, Г. К. Семин, С. А. Ахманов (последние двое были дипломниками) и кандидаты наук Я. Я. Акментынш, А. К. Балыко (лауреат премии Ленинского комсомола), Анатолий Васильевич Белицкий, И. Ш. Белуга, В. Г. Борошенко, И. К. Викулов, А. И. Гипсман, Аркадий Дмитриевич Деомидов (ветеран Великой Отечественной войны), Ф. М. Исмагилов, Елена Ивановна Исмагилова, В. П. Кирюшин, Юрий Александрович Колосов, В. М. Красноперкин, А. И. Мельников (лауреат Ленинской премии), Г. Г. Моносов, Виктор Степанович Морозов, А. А. Негирев (лауреат Государственной премии СССР),

Э. В. Погорелова, Г. А. Самородова, Г. С. Самохин, Людмила Анатольевна Троицкая, Аркадий Дмитриевич Ходневич и Светлана Александровна Ходневич.

Трудились сотрудники лаборатории увлеченно. Редко уходили с работы раньше 8 часов вечера. Самым трудоспособным был А. С. Тагер. Он уходил часов в 10 вечера. Для эффективной работы договорились, чтобы до обеда не было телефонных звонков и чтобы сотрудники разрабатывающих подразделений приходили обсуждать вопросы лишь после обеда. Примерно в 11 часов делался физкультурный перерыв: бегали вокруг столов, выжимали штангу и т. п. Рекордсменом по штанге был И. К. Викулов. Он толкал ее одно рукой. Ходили вместе на лыжах. Весной, когда утром пригревало солнышко, выходили на работу во вторую смену, а утром бегали на лыжах. Несколько раз целым коллективом выезжали на турбазу «Азгек» около Домбая. В общем, коллектив лаборатории был дружным.

Расскажу о некоторых эпизодах, связанных с моей работой и деятельностью лаборатории.

А. П. Федосеев создавал магнетрон повышенной мощности «Альбатрос». Этот магнетрон имел размеры, существенно превышающие обычные. В нем возникали паразитные колебания. Чтобы подавить их надо знать структуру поля этих колебаний. С этой задачей успешно справился наш коллектив. Спустя некоторое время, когда за эту работу А. П. Федосеев получил Ленинскую премию, он встретил меня и извинился за то, что не включил меня в состав претендентов, хотя у меня не было никаких претензий.

Интересна эпопея, связанная с В. П. Илясовым. До войны он работал в Ленинграде вместе с Алексеевым и Маляровым, изобретателями многорезонаторного магнетрона. В период массовых репрессий он уехал на восток и прожил там до окончания войны. Во время войны англичане усовершенствовали магнетрон, снабдив его связками, которые сделали спектр видов колебаний более разреженным. После войны описание этого магнетрона появилось в журнале «Техника молодежи». Увидев статью, Илясов сказал, что этот магнетрон изобрел он, о чем подал заявку в комитет по делам изобретений. Ему выдали авторское свидетельство и пригласили на «Исток». Далее привожу по памяти рассказ Илясова, описанный в одной из книг, посвященных промышленному шпионажу (забыл ее название и автора).

Автор: «Не могли бы Вы привести пример действий зарубежных разведок?» В.П.: «Могу. Еще до войны я подал заявку на изобретение магнетрона со связками, но авторское свидетельство мне не успели выдать. После войны поехал в комитет по делам изобретений, но заявки там не оказалось. Ее выкрали шпионы. Тогда я восстановил текст заявки и мне выдали авторское свидетельство». Кстати, даже в «восстановленном» описании прибор не работоспособен, так как связки не касались ламелей магнетрона, как это делается в работающих приборах, т. е. претензии Илясова оказались несостоятельными.

После поступления на «Исток» он стал работать в отделе А. П. Федосеева. Увидев «Альбатрос», представляющий объединение нескольких магнетронов, «поставленных» друг на друга, он решил тоже получить магнетрон повышенной мощности, объединив несколько обычных магнетронов, расположенных в одной плоскости. Они нагружались на один волновод. На эту работу ему выделили 2 миллиона рублей. Потратив их за несколько лет и не добившись успеха, он потребовал денег на продолжение работы. Прежде чем выделить деньги, дирекция решила произвести исследование целесообразности работы, подключив ряд специалистов предприятия, включая и нас, теоретиков. Выяснилось, что такой прибор работать не может, так как в предлагаемой конструкции существуют различные виды колебаний, часть из которых не нагружается волноводом. Эти виды колебаний и возбуждаются. При этом магнетрон работает

сам на себя, не давая энергии в нагрузку. В результате денег ему не дали и он уволился, перейдя на работу в институт интроскопии.

Одним из дефектов многих магнетронов служит излучение в катодную ножку. Это создавало помехи другим приборам, приводило к облучению персонала, снижало КПД. Для борьбы с излучением в цепи питания катода создавались фильтры, что усложняло конструкцию. В результате исследования оказалось, что во всем виновата нулевая составляющая электромагнитного поля. Проводники, подводящие питание к катоду, вместе с корпусом магнетрона образуют коаксиальную линию, через которую просачивается поле. Чтобы подавить излучение, надо уменьшить нулевую составляющую. Это было предложено осуществить, сделав равноправными соседние ламели магнетрона. Идею успешно реализовал Леонид Григорьевич Некрасов.



1964 г. Крайние слева: А. М. Цебиев, З. Д. Ковтунова; в середине – Р. А. Силин; крайний справа – А. И. Мельников; третий справа – А. С. Тагер

В шестидесятых годах разрабатывался магнетрон «Биссер» для радиолокаторов с селекцией движущихся целей (разработчики – Л. Г. Некрасов и Ю. А. Вещгайлис). С помощью этого магнетрона позже был сбит самолет-разведчик Пауэрса. Частота колебаний прибора должна быть стабильной. Долго этой стабильности добиться не удавалось. Некоторые образцы оказывались годными, но большинство шло в брак. Созывались совещания у директора (М. М. Федорова), привлекались к работе многие специалисты предприятия. Довелось участвовать и нам. Мы нашли коэффициенты влияния тех или иных размеров анодного блока на собственную частоту колебаний. За эту, по существу, небольшую работу мне вручили медаль «За трудовое отличие», тогда как более серьезные работы начальством никак не оценивались».

3. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ЮБИЛЯРЕ

По случаю полувекового юбилея Роберта Андреевича в родном его теоретическом отделе была выпущена стенная газета, куда каждый сотрудник мог написать свое поздравление или пожелание. Эти поздравления носили и серьезный характер, и были написаны в шуточной форме. При этом никто даже и не думал, что последние могут обидеть юбиляра. Демократизм Роберта Андреевича, его понимание доброй шутки были общеизвестными.

Мы с Е. И. Голантом, в то время молодые сотрудники лаборатории А. С. Тагера, стараясь быть оригинальными, сочинили необычный текст поздравления, синтезированный искусственным интеллектом ЭВМ, в которую были заложены входные параметры уважаемого юбиляра: статьи, отчеты, диссертации, комментарии сотрудников.

«Когда в полосе пропускания ему надоедает копать в невзаимном $2n$ -полюснике, он обычно отправляется любоваться π -видами, открывающимися с верхних этажей двумерно-периодических систем, и заодно половить «высших паразитов». Ловко взбирается он по осям винтовой симметрии, перепрыгивая с одной ветви дисперсионной характеристики на другую. Если закружится голова, то всегда можно прислониться к какой-нибудь магнитной стенке. Для непосвященного здесь темно, как внутри запертого волновода, а ему путь надежно освещают сияющие преломленным светом искусственные диэлектрики. Страх высоты оттесняют непрерывно рождающиеся в его голове формулы типа закона Френеля или многочлена Чебышева. Поднявшись наверх, он перевел дыхание, вышел на регулярную микрополосковую линию и быстро зашагал вперед, умело обходя типовые неоднородности...»

С тех пор прошло ровно 40 лет. Эти годы, на мой взгляд, не изменили ни характера Роберта Андреевича, ни широты его научных интересов, ни поразительного трудолюбия. Те немногие изменения, которые произошли в его жизни за эти годы, скорее коснулись его производственной деятельности. Когда Р. А. Силину исполнилось 60 лет, он сложил с себя полномочия начальника лаборатории, той самой, в которую пришел молодым специалистом еще в 1954 году и в которой все эти годы он работал за одним и тем же столом. Не спеша, но и подолгу не задерживаясь, прошел он поочередно все ступени должностей инженера и научного работника, замедляя ход лишь на короткое время для защиты сначала кандидатской, а затем и докторской диссертаций. Впрочем, эти научные степени для Роберта Андреевича никогда не были самоцелью. Докторскую он защитил, когда был уже всемирно известным ученым с изданной на западе монографией. Да и сам текст диссертации, как мне помнится, он за короткое время составил из вырезок многочисленных своих статей. Его статьи опубликованы в различных журналах, однако Роберт Андреевич наиболее авторитетным научным журналом считал и считает наш родной научно-технический сборник «СВЧ-техника» (ранее он назывался «Электроника СВЧ»). Именно здесь были опубликованы не только более 120 его оригинальных работ, но и многочисленные справочные данные по расчету волноводов и полосковых линий с богатым и удобным для использования графическим материалом. Эта огромная и трудоемкая работа была выполнена Р. А. Силиным, как всегда, скупулезно и ответственно.

Как-то редколлегия стенной газеты теоретического отдела «Резонанс» обратилась ко всем знаменитым нашим теоретикам с одним вопросом: «Кем бы Вы хотели быть, если бы не стали теоретиком?» Ответы были различными и подчас неожиданными. Профессор А. С. Тагер ответил, что он стал бы экспериментатором, профессор В. П. Сазонов – садовником. . . И только профессор Р. А. Силин ответил, что все равно бы стал теоретиком. Вот эта фанатичная преданность мате-

матическим теориям электродинамических систем и восхищает в нем, пожалуй, больше всего. О его неравнодушии к формулам, S -матрицам, четырехполюсникам, симметричным и несимметричным преобразованиям ходят легенды. Порой кажется, что любое явление в природе, да и в жизни человека Роберт Андреевич способен объяснить с помощью преобразований S -матриц. Выдающийся советский физик Я. И. Френкель (руководитель дипломной работы А. С. Тагера) старался в шуточной форме человеческие действия описывать с позиции законов физики; особенно оригинальна была его спиновая теория танцующих пар. Роберт Андреевич того же склада ученый. Впервые открыв монографию Р. А. Силина и В. П. Сазонова «Замедляющие системы», я с удивлением обнаружил, какую огромную роль в электродинамике играет теория симметрии. С ее помощью получают простые объяснения сложнейшие устройства. Роберт Андреевич рассказывал, что теория симметрии завороживала его в университете, когда он изучал квантовую механику. «Только принцип Паули я не совсем понимал, а потому и не применил его в своей научной деятельности», – говорил он. Его монография «Периодические волноводы» содержит 500 страниц. И весь этот объем книги, включающий помимо текста огромное число формул, матриц, результатов расчетов, рисунков, он, согласно требованиям новейшей технологии книгоиздания, набрал на компьютере сам.

Приведем несколько сообщений о работах Роберта Андреевича по исследованию новых явлений в средах: «...в научно-популярной брошюре Р. А. Силина «Необыкновенные законы преломления и отражения» исследуются явления на грани сверхъестественного, а именно среды с необычными волноведущими свойствами. Они, как правило, представляют собой обычный диэлектрик, в который внедрены, например, участки проводников в виде спиралей. Тесно примыкают по свойствам к этим средам так называемые фотонные кристаллы. Это двумерно- или трехмерно-периодические решетки, подобные обычным кристаллам, но сделанные искусственно и имеющие период решетки, существенно превышающий межатомные размеры»; «...изучению закономерностей распространения электромагнитных волн в искусственных кристаллах посвящена работа одного из основоположников этого направления Р. А. Силина, о которой он докладывал на Международной конференции «Бианизотропик» в университете г. Гент (Бельгия)»; «...в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации по обратным волнам... На сессии был заслушан доклад Силина Р. А. об уникальных явлениях распространения волн в так называемых искусственных кристаллах («Успехи физических наук», 2006 г., № 5)»; «...профессор филиала МИРЭА при «Источке» Р. А. Силин принимал участие в Международном семинаре по дифракции, проходившем в северной столице России. Его доклад был посвящен распространению электромагнитных волн в искусственных периодических структурах...» и т. д.

Перечислить все труды ученого просто невозможно. В свои 90 лет Роберт Андреевич вышел на тот уровень в отечественной и мировой науке, когда достаточно назвать его фамилию, чтобы увидеть уважительное, а со стороны молодых сотрудников и восхижительное к нему отношение. Нельзя не отметить, что в повседневной жизни Р. А. Силин – дружелюбный и отзывчивый человек. Однако, если дело касается защиты научных положений, он превращается в гранит, парируя со всей прямоотой своему оппоненту. И в этом также его отличие от более стоворчивых и «политически лояльных» ученых.

В юности Р. А. Силин закончил Новомосковский химический техникум, работал на химическом заводе конструктором. И по сей день он способен доходчиво объяснить технологию изготовле-

ния химического полимера. Затем, после окончания физического факультета МГУ, стал физиком. Теорию колебаний осваивал по лекциям профессора В. П. Стрелкова, к которому сохранил самые теплые чувства. С этими лекциями, аккуратно записанными Робертом Андреевичем, произошел такой эпизод. Как-то он дал посмотреть их мне, и мы оба о том забыли. Лекции пролежали в моем столе почти 15 лет, и я их, волей случая, обнаружил в канун 60-летия Р. А. Силина. Как один из самых дорогих подарков в день рождения, воспринял тогда Роберт Андреевич возврат лекций своего учителя. Без всякого сомнения, Р. А. Силина можно причислить и к математикам: все его статьи и книги испещрены математическими формулами и доказательствами. Он имеет глубокие философские суждения, особенно в области теории поля – его статьи опубликованы в «Большой Советской Энциклопедии», «Физической энциклопедии», энциклопедическом словаре «Электроника».

В последнее время Роберт Андреевич проявляет глубокий интерес к истории. Он записал и обработал удивительные воспоминания своей супруги Анны Алексеевны, частично опубликованные в городской газете «Ключь». Собрал обширный материал по истории Новомосковского химического техникума и завода, что послужило причиной неоднократного приезда к нему местных журналистов. После нескольких лет поиска ему удалось разыскать данные и место захоронения без вести пропавшего во время войны брата Рэма. По крупицам, бережно собирает он публикации об истории нашего предприятия, ученых и сотрудниках и дополняет их собственными воспоминаниями. Но, пожалуй, главная его историческая работа – замечательные воспоминания о своем детстве, юности, учебе в МГУ, сотрудниках, и самое главное – о своих родителях, которые были легендарными личностями.

Р. А. Силин много лет являлся членом диссертационного совета НПП «Исток», руководителем постоянного научного семинара по электродинамике секции по электронике НТО РЭС им. А. С. Попова. Его педагогическая деятельность началась еще в 1956 году и продолжалась много лет на базовой кафедре филиала МИРЭА.

Роберт Андреевич на байдарках прошел по десяткам рек Советского Союза, увлекался велосипедными, а зимой лыжными прогулками, много путешествовал на автомашине, с интересом осваивал азы горнолыжного спорта. Роберт Андреевич безмерно любил свою супругу Анну Алексеевну, вместе с которой они воспитали детей и внуков, а сам юбиляр продолжает воспитывать правнуков.

Статья поступила 17 ноября 2017 г.

**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 публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

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

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2018 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (18 %).
Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (495)465-86-12. Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2018 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.

Переводчик Барабанова Л.В.

Компьютерная верстка Земскова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.3.2018 г.
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"
г. Москва

Усл. п. л. 12,0
Уч.-изд. л. 12,5
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru





Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2018, вып. 1(536), с. 1-98

**Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»**

