



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 3 (554)

2022

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 3(554)

2022

Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2022 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 3(554)

2022

Founded in 1950

Editor-in-chief

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

Editorial staff:

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

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

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

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

- Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А., Бышевский-Конопко О.А., Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Фомин Л.А.* – Тепловое и динамическое излучение в терагерцовом диапазоне при спиновой инжекции током в магнитных переходах..... 6
- Лукашин В.М., Пашковская И.В.* – Эффективный теплоотвод для DA-DpHEMT на основе алмазного покрытия заземляющих отверстий..... 13
- Богданов С.А., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Карпов С.Н., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В., Бакаров А.К., Журавлев К.С., Протасов Д.Ю.* – Цифровые барьеры и их перспективы в развитии мощных полевых транзисторов с двухсторонним донорно-акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн..... 22

Технология и материаловедение

- Парамонов В.С., Лябин Н.А., Осотов О.В., Клименко В.И., Парамонова Г.М., Виноградов К.Ю., Долгих К.О., Чурсин А.Д., Колоколов И.С.* – Опыт и результаты использования АЛТУ «Каравелла» для раскроя припоев изделий СВЧ-техники..... 38
- Воронков О.В., Гаврилов М.М., Кожин С.П., Куприянов З.П., Куприянов П.В., Силаев С.А., Терешкин Е.В.* – Некоторые инженерные аспекты технологии квадратурных АФАР..... 44

Электровакuumные приборы

- Сидоров Д.А., Иванов А.А., Розенталь Р.М.* – Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в спиральной ЛБВ с запаздывающей обратной связью..... 55

Медицинская электроника

- Гусев А.А., Власова И.И., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Изучение морфологического состояния клеток крови после КВЧ-облучения..... 64

Краткие сообщения

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Метод решения систем линейных неоднородных дифференциальных уравнений..... 69

История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Гордое имя «истоковец»..... 73

CONTENTS

Solid-state electronics

- Panas A.I., Chigarev S.G., Vilkov E.A., Byshevskiy-Konopko O.A., Zagorskiy D.L., Doludenko I.M., Fomin L.A.* – Thermal and dynamic radiation in terahertz range during spin current injection in magnetic transitions..... 6
- Lukashin V.M., Pashkovskaya I.V.* – Efficient heat sink for DA-DpHEMT based on diamond coating of grounding holes..... 13
- Bogdanov S.A., Lapin V.G., Lukashin V.M., Karpov S.N., Pashkovskii A.B., Rogachev I.A., Tereshkin E.V., Bakarov A.K., Zhuravlev K.S., Protasov D.Yu.* – Digital barriers and their prospects in the development of high-power field-effect transistors with two-way donor-acceptor doping in the millimeter wavelength range..... 22

Technology and material science

- Paramonov V.S., Lyabin N.A., Osotov O.V., Klimenko V.I., Paramonova G.M., Vinogradov K.Yu., Dolgih K.O., Chursin A.D., Kolokolov I.S.* – Experience and results of using ALTI «Karavella» for cutting solders of microwave technology products..... 38
- Voronkov O.V., Gavrilov M.M., Kozhin S.P., Kupriyanov Z.P., Kupriyanov P.V., Silaev S.A., Tereshkin E.V.* – Some engineering aspects of quadrature AESA technology..... 44

Electrovacuum devices

- Sidorov D.A., Ivanov A.A., Rozental' R.M.* – Experimental observation of mode self-synchronization regimes in a helix TWT with delayed feedback..... 55

Medical electronics

- Gusev A.A., Vlasova I.I., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.* – The study of morphological state of blood cells after EHF irradiation..... 64

News in brief

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A.* – Method for solving systems of linear non-homogeneous differential equations..... 69

History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* –The proud name of «istokovets»..... 73

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.67

ТЕПЛОВОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ СПИНОВОЙ ИНЖЕКЦИИ ТОКОМ В МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ

А. И. Панас¹, С. Г. Чигарев², Е. А. Вилков², О. А. Бышевский-Конопко²,
Д. Л. Загорский³, И. М. Долуденко³, Л. А. Фомин⁴

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

²Фрязинский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

³ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Москва

⁴ИПТМ РАН, г. Черноголовка

Рассмотрен вопрос распределения энергии электронного потока, пронизывающего магнитный переход, между тепловым и динамическим компонентами излучения в терагерцовом диапазоне. Сделано и обосновано предположение о «конкуренции» этих видов излучения. Приведены экспериментальные результаты, полученные при работе спин-инжекционного излучателя, реализованного на базе массива гетерогенных магнитных нанопроволок, которые подтвердили такую возможность.

КС: тепловое излучение, динамическое излучение, терагерцовый диапазон, спиновая инжекция током, магнитный переход

THERMAL AND DYNAMIC RADIATION IN TERAHERTZ RANGE DURING SPIN CURRENT INJECTION IN MAGNETIC TRANSITIONS

A. I. Panas¹, S. G. Chigarev², E. A. Vilkov², O. A. Byshevskiy-Konopko²,
D. L. Zagorskiy³, I. M. Doludenko³, L. A. Fomin⁴

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

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

³FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow

⁴IMTP, RAS, Chernogolovka

The problem of distributing the electron beam energy penetrating a magnetic transition between the thermal and dynamic components by radiation in terahertz range is considered. An assumption about the «competition» of these types of radiation is made and substantiated. Experimental results obtained during the operation of a spin-injection emitter based on an array of heterogeneous magnetic nanowires are presented, which confirmed this possibility.

Keywords: thermal radiation, dynamic radiation, terahertz range, spin current injection, magnetic transition

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается повышенный интерес к освоению ТГц-диапазона, охватывающего частоты от единиц до десятков терагерц [1–3]. Однако его широкому применению во многих областях науки и техники препятствует отсутствие общедоступных, надежных в работе, обеспечивающих стабильные рабочие характеристики и устойчиво работающих в широком температурном диапазоне, включая комнатные температуры, источников и приемников ТГц-диапазона. Поэтому остается актуальным поиск принципиально новых подходов к построению таких устройств. Наиболее перспективными в этом направлении являются работы в области спинтроники – сравнительно нового направления электроники, где электронно-волновое взаимодействие рассматривается с учетом собственного магнитного поля электронов [4–6]. На этой основе возможно создание ряда квантовых генераторов с токовой накачкой, что особенно актуально для ТГц-диапазона. На сегодня в качестве одного из возможных вариантов реализации этого принципа можно рассматривать ТГц-излучатели, использующие механизм спиновой инжекции током в магнитных переходах [7–12].

В экспериментальных исследованиях макетов спин-инжекционных излучателей регистрируемый сигнал фиксируется в диапазоне частот 7...30 ТГц, который частично совпадает с максимумом теплового излучения объекта при температуре его нагрева до ~100 °С. Так как в рабочем режиме через спин-инжекционный излучатель протекает ток до 1 А, который может нагревать излучатель до указанных температур, то в спектре наблюдаемого излучения возможно одновременно регистрировать мощность как теплового, так и динамического излучений. Естественно, что конкретное распределение компонентов излучаемой мощности зависит от эффективности работы спин-инжекционного излучателя. В некоторых случаях [9] динамическое излучение составляет лишь проценты от общей мощности излучения, в других случаях, при более эффективном источнике, тепловое излучение практически не регистрируется [11].

Некоторое подавление теплового излучения при работе спин-инжекционного излучателя можно объяснить природой динамического излучения, которая, как отмечалось в ряде работ [7, 12], определяется как прямыми, так и косыми квантовыми переходами с поглощением фононов. Практически это означает отбор тепла от рабочего тела. Таким образом, поглощение фононов может снижать тепловое действие тока, что в свою очередь может снижать интенсивность теплового излучения и, как следствие, приводить к конкуренции излучательных процессов, обусловленных динамической либо тепловой природой. В данной работе отражены некоторые результаты исследований этих процессов.

2. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Известно [6], что при прохождении тока в магнитном переходе, образованном, как минимум, двумя магнитными слоями наноразмерной толщины, один из которых представляет собой инжектор спин-поляризованного тока, а другой – рабочую область, в которую инжектируются спин-поляризованные электроны, в рабочей области, на расстоянии спиновой релаксации $l = \sqrt{D\tau} \sim 30$ нм от границы раздела слоев, происходит нарушение равновесной спиновой концентрации P , описываемой уравнением

$$\frac{d^2 P}{dx^2} - \frac{j}{j_D l} \frac{dP}{dx} - \frac{P - P_2}{l^2} = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) получено с учетом условия сохранения электрического заряда, $\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$ [7], а также в предположении, что в обеих спиновых подзонах носители тока имеют одинаковые подвижности $\mu_- = \mu_+ = \mu$ и коэффициенты диффузии $D_- = D_+ = D$. Здесь $j_D = enD/l = enl/\tau$ – плотность тока диффузии электронов; τ – время релаксации спинов; n – концентрация электронов в металле; P_2 – равновесная спиновая поляризация рабочей области.

Процесс, описываемый уравнением (1), схематично изображен на рис. 1 [13]. Здесь под действием напряжения внешнего источника V , прикладываемого к магнитному переходу, сквозь него протекает спин-поляризованный ток I , приводящий к нарушению спинового равновесия и, как следствие, к возникновению излучения. На рисунке представлены три зоны: зона I – ферромагнитный инжектор, в котором электроны разделены по спиновым энергетическим подзонам и находятся в состоянии спинового равновесия, так что большая их часть имеет спины, ориентированные параллельно намагниченности инжектора (мажорные электроны), а меньшая часть – антипараллельно (минорные электроны). Подзоны имеют общий равновесный уровень Ферми, а дно подзон раздвинуто по энергии на величину, пропорциональную обменной энергии I_1 . Зона II – рабочая область, с иными, чем у инжектора, магнитными характеристиками. Вследствие этого, здесь часть электронов оказывается в энергетически возбужденном, неравновесном спиновом состоянии. Возникают квазиуровни Ферми $\varepsilon_{F\pm}$, а расщепление дна подзон изменяется пропорционально изменению обменной энергии I_2 . Под действием внешних факторов происходят межзонные переходы спин-флип неравновесных электронов с переворотом спина и возможным излучением кванта энергии $h\nu$. Зона III – область, где после релаксации неуравновешенных спинов устанавливается равновесное спиновое состояние.

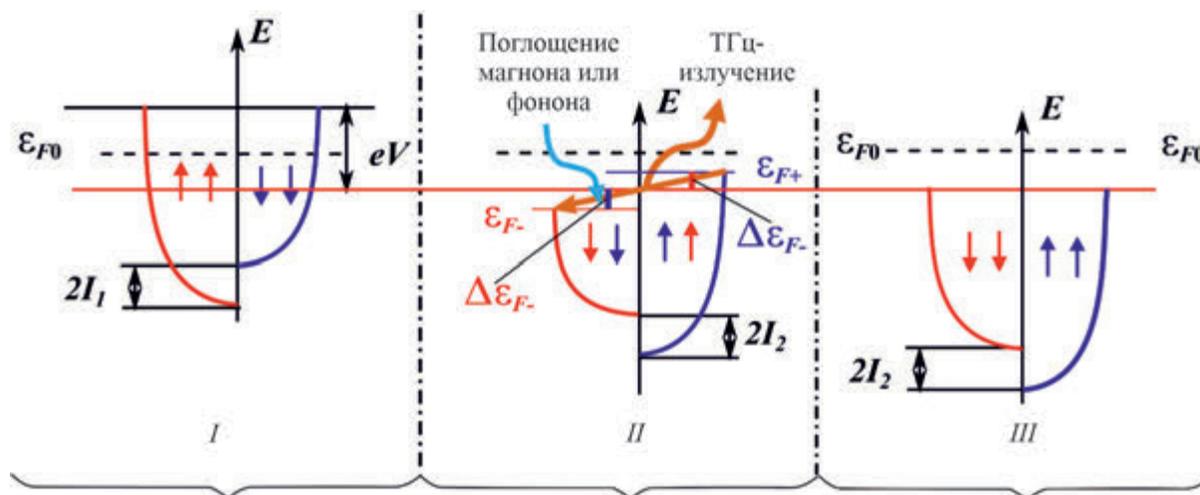


Рис.1. Схема электронных энергетических зон и квазиуровней Ферми:

I – в первом ферромагнетике; II – для неравновесных электронов во втором ферромагнетике;

III – для равновесных электронов во втором ферромагнетике вне области инжекции

Решение уравнения (1) определяет отклонение спиновой поляризации от равновесного состояния $\Delta P = P - P_2$, где P при $j/j_D \ll 1$ можно представить в виде [8]:

$$P(x) = P_2 + \frac{P_1 \cos \varphi - P_2}{j_D} j \exp(-x/l). \quad (2)$$

Здесь P_1 – равновесная спиновая поляризация инжектора; φ – угол между намагниченностями слоев; j – плотность тока; x – координата распространения тока. Соотношение (2) позволяет описать энергетический процесс в магнитном переходе следующим образом [8]:

$$\begin{aligned} h\nu &= (\Delta\varepsilon_{F_+} + \Delta\varepsilon_{F_-}) = (\varepsilon_{F_+} - \varepsilon_{0F_+}) - (\varepsilon_{F_-} - \varepsilon_{0F_-}) = \\ &= \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3} \cdot \left(\left(\frac{1-P}{2} \right)^{2/3} - \left(\frac{1+P}{2} \right)^{2/3} - \left(\left(\frac{1-P_2}{2} \right)^{2/3} - \left(\frac{1+P_2}{2} \right)^{2/3} \right) \right) = \\ &= (\varepsilon_{F_+} - \varepsilon_{F_-}) + 2I_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно (3), спин-инжекционный механизм излучения в рамках принимаемого нами параболического приближения $\varepsilon = p^2/2m$ определяется двумя качественно различными процессами. Так, часть электронов изменяет свою энергию с сохранением импульса. При этом межзонный спин-флип переход электронов связан с обменной энергией $2I_2$, то есть имеют место прямые квантовые переходы. Другая часть электронов изменяет свою энергию в пределах от ε_{F_+} до ε_{F_-} с изменением импульса, то есть имеют место косые квантовые переходы, при которых необходим отбор энергии от среды при поглощении фонона или магнона. Этот процесс может частично поглощать тепло, что отражено на рис. 1.

Для более глубокого понимания «конкуренции» динамического и теплового излучений рассмотрим процесс формирования излучения при спиновой инжекции током в терминах температурного поля. В этом случае магнитный переход можно представить термодинамической системой с двумя степенями свободы. Одна из них связана с нагревом излучателя и количественно определяется соотношением, получаемым из преобразования формулы Планка:

$$T_p = \frac{h\nu_p}{k_B} \frac{1}{\ln\left(A \frac{h\nu_p}{u} + 1\right)}. \quad (4)$$

Здесь h – постоянная Планка; ν_p – частота теплового излучения; k_B – постоянная Больцмана; $A = 8\pi\nu^2/c^2$; u – излучательная способность поверхности исследуемого образца. Другая степень свободы связана с парциальной неоднородностью спинового состояния магнитной системы и определяется соотношением для спиновой температуры [7]:

$$T_s = \frac{h\nu_s}{k_B} \frac{1}{\ln\left(\frac{1-P}{1+P}\right)}. \quad (5)$$

Здесь T_s – спиновая температура; ν_s – частота, определяемая спиновой неоднородностью системы; P – спиновая поляризация.

При сравнении соотношений (4) и (5) можно увидеть их качественную идентичность. В обоих случаях температура прямо пропорционально связана с излучаемой энергией $h\nu$ и обратно пропорциональна излучающей способности, определяемой в (4) и (5) натуральным логарифмом. В первом случае она связана с излучательной способностью u нагретого током излучателя, а во втором случае – с возникновением спиновой нескомпенсированности в магнитном переходе излучателя при спиновой инжекции током, определяемой спиновой поляризацией P . В обоих случаях источником энергии для изменения той или иной температур служит ток, пронизывающий магнитный переход. Единый источник энергии для рассматриваемых процессов служит основанием для идеи о возможной их связи при излучении в одном диапазоне частот $\nu_p \sim \nu_s$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ «КОНКУРЕНЦИИ» ТЕПЛОВОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Эксперименты проводились на макетах спин-инжекционных ТГц-излучателей, реализованных на базе массива нанопроволок (НП) [13], схема которых представлена на рис. 2.

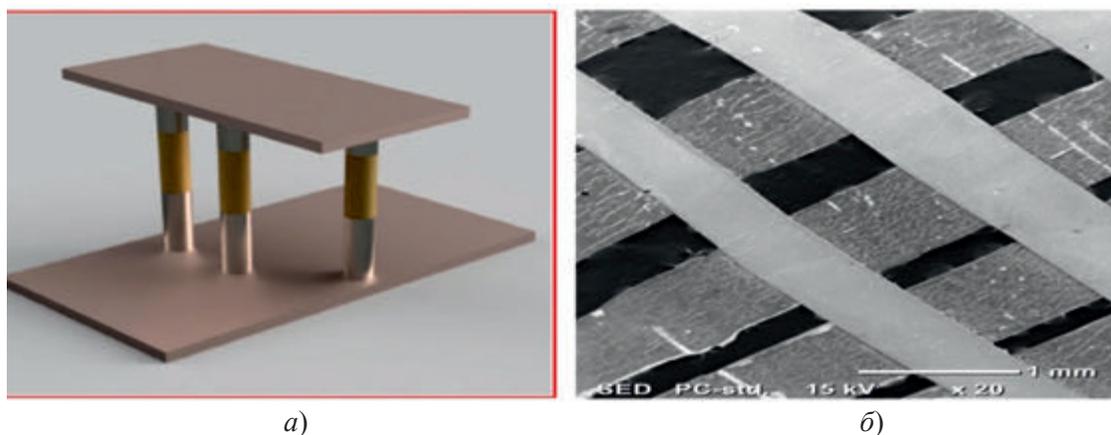


Рис. 2. Схематическое изображение НП с тремя слоями различных металлов между контактными полосками (а); СЭМ-изображение системы контактных полосок (на снимке матрица НП удалена) (б)

Излучатель представлял собой массив многослойных магнитных нанопроволок, образованных слоями Ni/Co или Ni/Fe, выращенных методом матричного синтеза в трековой мембране. Для образования электрической цепи, включающей часть нанопроволок, на поверхности трековой мембраны с обеих сторон наносились медные полосы с периодом ~ 1 мм, ориентированные под углом 90 град, как показано на рис. 2. Собственно излучатель представлял собой полоску шириной, равной указанному периоду (1 мм), вырезанную из общего массива образца. На концах вырезанной полоски наносились контактные площадки, к которым прикладывалось напряжение от источника питания.

Измерения проводились на спектре-анализаторе фирмы Bruker «Vertex 80 V» в диапазоне длин волн 10...25 мкм при разных значениях напряжения (тока). В процессе работы излучателя стабилизируемое напряжение, подаваемое на излучатель, изменялось от 0 до 11 В с шагом 1 В. При напряжении 11 В и более излучатель прекращал работу из-за резкого уменьшения тока ниже стартового значения. При этом температура поверхности излучателя достигала ~ 80 °С.

Результаты измерений показали, что спектры, измеренные при разных напряжениях (токах), имели две разновидности. Так, при значениях напряжений, не превышающих 7 В, и при 11 В интенсивность сигнала в исследуемом диапазоне длин волн с уменьшением длины волны монотонно нарастала до максимального значения при $\lambda \sim 10$ мкм. Такое поведение спектра соответствует характеру кривой Планка для излучения «горячего» тела. При напряжениях в диапазоне 7...10 В наблюдалась концентрация мощности в диапазоне длин волн 15...17 мкм. При этом излучение на длинах волн, соответствующих максимуму теплового излучения на кривой Планка ($\lambda \sim 10$ мкм), имело меньшие значения, чем на $\lambda \sim 16$ мкм. Пороговое значение напряжения (тока), необходимого для возникновения пиковой концентрации мощности, позволило сделать предположение о нетепловой, динамической природе излучения в этом диапазоне λ . В то же время при отсутствии динамического излучения на $\lambda \sim 10$ мкм наблюдался максимум излучения.

Для наглядного наблюдения конкуренции режимов излучения были рассмотрены зависимости интенсивности излучения от напряжения, регистрируемые на двух различных длинах волн (рис. 3).

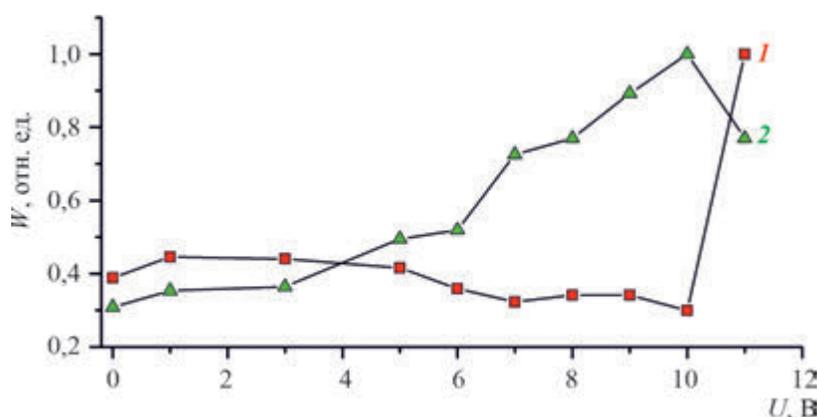


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения от напряжения на излучателе для разных значений длин волн. Кривая 1 соответствует $\lambda = 10$ мкм (максимум кривой Планка для «горячего» тела), кривая 2 соответствует $\lambda = 16$ мкм (максимум динамического излучения)

В качестве переменной величины здесь использовано напряжение, так как его значение на каждом шаге стабилизировалось, при этом ток мог изменяться в небольшом диапазоне значений вследствие изменения сопротивления из-за разогрева массива нанопроволок. При напряжении 11 В из-за структурных изменений нанопроволок их сопротивление росло и значение тока падало до 14 мА, при этом напряжение осталось неизменным. Таким образом, выбор напряжения в качестве переменной величины позволил получить сравнительно монотонно изменяющиеся зависимости интенсивности излучения от напряжения.

Характер изменения интенсивностей теплового (кривая 1) и динамического (кривая 2) излучений показывает, что при изменении напряжения излучателя от 1 до 3 В для обеих длин волн зависимости мощности от напряжения идентичны. Они монотонно растут с ростом напряжения (тока). Однако при превышении напряжения 3 В интенсивность теплового излучения ($\lambda = 10$ мкм) начинает заметно уменьшаться, а динамического – нарастать. При напряжении 11 В динамическое излучение исчезает (ток 14 мА ниже пускового значения), а тепловое – скачком возрастает, приобретая характер, близкий к тепловой кривой Планка. В целом поведение кривых, представленных на рис. 3, имеет зеркально противоположный характер: рост динамического излучения соответствует уменьшению теплового и наоборот. Именно такое поведение кривых и позволяет сделать предположение о конкуренции теплового и динамического излучений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали присутствие в спектре излучателя двух компонентов, связанных с нагревом излучателя током (тепловое излучение) и со спиновой инжекцией током (динамическое излучение). Так как динамическое излучение требует поглощения третьей частицы – фонона, то оно может приводить к некоторому уменьшению нагрева излучателя током. Это можно представить как конкуренцию двух разновидностей излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-03015мк, проект № 20-07-00349 А). Часть работы проведена в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Часть работы выполнена в рамках Госзадания ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. / V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi [et al.] // Rev. Mod. Phys. – 2018. – Vol. 90, No 1. – Art. No 015005.
2. / S. S. Dhillon, M. S. Vitiello, E. H. Linfield [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – Vol. 50, No 4. – Art. No 043001.
3. / F. Hellman, A. Hoffmann, Y. Tserkovnyak [et al.] // Rev. Mod. Phys. – 2017. – Vol. 89, No 2. – Art. No 025006.
4. / A. Kadigrobov, Z. Ivanov, T. Claeson [et al.] // Europhys. Lett. – 2004. – Vol. 67, No 6. – P. 948.
5. **Kadigrobov, A. M.** / A. M. Kadigrobov, R. I. Shekhter, M. Jonson // Low Temp. Phys. – 2012. – Vol. 38, No 12. – P. 1133.
6. / A. M. Kadigrobov, R. I. Shekhter, S. I. Kulinich [et al.] // New J. Phys. – 2011. – Vol. 13, No 2. – Art. No 023007.
7. / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн, Р. Д. Элиот // РЭ. – 2003. – Т. 48, № 9. – С. 1030; / Yu. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, E. M. Epshtein, R. J. Elliott // J. Commun. Technol. Electron. – 2003. – Vol. 48, No 9. – P. 942.
8. / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, А. И. Крикунов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 85, № 3. – С. 192; / Yu. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, A. I. Krikunov [et al.] // JETP Letters. – 2007. – Vol. 85, No 3. – P. 160.
9. / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн // РЭ. – 2010. – Т. 55, № 10. – С. 1211; / Yu. V. Gulyaev, P. E. Zilberman, S. G. Chigarev, E. M. Epshtein // J. Commun. Technol. Electron. – 2010. – Vol. 55, No 10. – P. 1132.
10. **Чигарёв, С. Г.** / С. Г. Чигарёв, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов // РЭ. – 2013. – Т. 58, № 3. – С. 270; / S. G. Chigarev, I. V. Malikov, G. M. Mikhailov // J. Commun. Technol. Electron. – 2013. – Vol. 58, No 3. – P. 238.
11. / Е. А. Вилков, И. Н. Дюжиков, С. В. Зайцев-Зотов [и др.] // РЭ. – 2018. – Т. 63, № 9. – С. 953; / E. A. Vilkov, I. N. Dyuzhikov, S. V. Zaitsev-Zotovetal [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. – 2018. – Vol. 63, No 9. – P. 1015.
12. **Гуляев, Ю. В.** / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, С. Г. Чигарев // РЭ. – 2015. – Т. 60, № 5. – С. 441; / Yu. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, S. G. Chigarev // J. Commun. Technol. Electron. – 2015. – Vol. 60, No 5. – P. 411.
13. / Е. А. Вилков, Г. М. Михайлов, С. Г. Чигарев [и др.] // РЭ. – 2016. – Т. 61, № 9. – С. 844; / E. A. Vilkov, G. M. Mikhailov, S. G. Chigarev [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. – 2016. – Vol. 61, No 9. – P. 995.
14. / Ю. В. Гуляев, С. Г. Чигарев, А. И. Панас [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45, № 6. – С. 27; / Yu. V. Gulyaev, S. G. Chigarev, A. I. Panas [et al.] // Technical Physics Letters. – 2019. – Vol. 45, No 3. – P. 271.

Статья поступила 17 мая 2022 г.

УДК 621.382.323.002

ЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОТВОД ДЛЯ DA-DpHEMT НА ОСНОВЕ АЛМАЗНОГО ПОКРЫТИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ

В. М. Лукашин, И. В. Пашковская

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

Предложена простая эффективная конструкция теплоотвода для DA-DpHEMT на основе алмазоподобного покрытия заземляющих отверстий. В результате трехмерного моделирования распределения температуры показано, что предложенное техническое решение при ширине секций затвора 150 мкм и толщине подложки 100 мкм до двух раз снижает перегрев в канале транзистора. Проанализированы технологические решения, необходимые для введения алмазоподобного теплоотвода в конструкцию транзистора.

КС: гетероструктурный полевой транзистор, заземляющее отверстие, температура канала, алмазоподобное покрытие, полиалмаз

EFFICIENT HEAT SINK FOR DA-DpHEMT BASED ON DIAMOND COATING OF GROUNDING HOLES

V. M. Lukashin, I. V. Pashkovskaya

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

A simple efficient design of a heat sink for DA-DpHEMT based on a diamond-like coating of grounding holes is proposed. As a result of three-dimensional modeling of the temperature distribution, it is shown that the proposed technical solution with a gate section width of 150 μm and a substrate thickness of 100 μm reduces overheating in the transistor channel by up to two times. The technological solutions necessary for the introduction of a diamond-like heat sink into the transistor design are analyzed.

Keywords: heterostructural field-effect transistor, grounding hole, channel temperature, diamond-like coating, polydiamond

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эффективного теплоотвода – одна из основных проблем разработки мощных полевых транзисторов. Особенно чувствительны к этой проблеме полевые транзисторы с InGaAs-каналом, в частности на основе DA-DpHEMT-гетероструктур с селективным донорно-акцепторным легированием, поскольку удельные мощности, выделяемые в их каналах, могут достигать величин в несколько ватт [1]. Проблемам улучшения теплоотвода полевых транзисторов посвящено много работ, например [2, 3], однако по-настоящему эффективный способ улучшения тепловых свойств прибора, кроме уменьшения толщины подложки в транзисторе от стандартных 100 до 25 мкм, пока не был предложен. Уменьшение толщины подложки, в свою очередь, имеет свои существенные минусы – например, существенное уменьшение механической прочности, уменьшение выхода годных и увеличение стоимости транзистора, сложность монтажа.

В этой работе предложен новый способ решения проблемы улучшения теплоотвода – формирование в заземляющих отверстиях дополнительного теплоотводящего элемента из алмазо-

подобного покрытия (АПП), отличающегося от других элементов конструкции транзистора большим коэффициентом теплопроводности. Конструкции, использующие заземляющие отверстия для улучшения теплоотвода, вообще говоря, не раз предлагались ранее [3], однако из-за технологических сложностей при изготовлении распространения не получили. Использование АПП также неоднократно предлагалось. Например, в работе [4] вместо того, чтобы пытаться улучшить отвод тепла из областей его источников только вниз, в направлении подложки, предлагалось осуществить дополнительный отвод тепла от источников вверх. Далее по тепловому мосту этот дополнительный поток тепла отводится на периферию транзистора с последующим переносом тепла через Si-GaAs-подложку в Si-основание на корпусе транзистора. Так как АПП отличаются очень высоким коэффициентом теплопроводности (500...1600 Вт/(м·К)) [5, 6], это решение позволяет обеспечить эффективную передачу тепла от источников на периферию транзистора по тепловым мостам из АПП, тем самым увеличивается эффективная площадь передачи тепла в основание корпуса и практически вдвое снижается перегрев прибора относительно основания корпуса. Однако такое конструктивное решение для поверхностного теплового интерфейса из АПП в транзисторах содержит сложную проблему, возникающую из-за рассогласования постоянных кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения для АПП, гетероструктур и металлов. Для эффективного усиления отвода тепла необходимы большие толщины поверхностного теплового интерфейса на основе АПП (как показали результаты расчетов, ~1...5 мкм). В свою очередь, относительно малые толщины нижележащих слоев могут приводить к разрушению элементов конструкции транзистора (может произойти отрыв шляпки затвора, разрушение слоя Si_3N_4) в результате действия термических напряжений. Также при верхнем тепловом интерфейсе из АПП в конструкции транзистора возникают сильные термомеханические напряжения, и он может не выдержать испытаний в тепле, холоде и при термоциклах.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Как показывают многочисленные попытки улучшения теплоотвода транзистора, для этого достаточно дополнить его конструкцию и включить (встроить) в подложку любой элемент с теплопроводностью, превышающей теплопроводность GaAs (примерно 46 Вт/(м·К) при комнатной температуре). Проблема заключается лишь в том, насколько эффективно будет это решение, насколько оно сложно технологически и не будет ли оно оказывать отрицательное влияние на характеристики транзистора и на свойства согласующих цепей. В полевом транзисторе основной вклад в тепловое сопротивление прибора вносят области, близко (порядка десяти микрон) расположенные относительно областей источников тепла или примерно в областях расположения доменов сильного поля – у стоковых краев секций затвора [7]).

Если рассматривать стандартную топологию мощного транзистора для см-диапазона длин волн, в котором заземляющие отверстия вынесены достаточно далеко от середины областей источников тепла (областей максимального перегрева), то очевидно, что введение любых элементов в заземляющие отверстия (даже введение абсолютно теплопроводящих элементов) не окажет существенного влияния на максимальную температуру в канале транзистора. Ситуация кардинально меняется, если рассмотреть топологию транзисторов, аналогичную иногда используемой для мм-диапазона длин волн (рис. 1).

В конструкции, показанной на рис. 1, группы секций затворов и стоков разделены октаэдрическими секциями металлизации истоков. Под металлизацией секций истоков в гетерострук-

туре сформированы сквозные отверстия с боковыми стенками, покрытыми заземляющей металлизацией. При этом группы секций затворов и стоков, расположенные между заземленными истоками, включают в себя только две секции затворов и стоков. Соответственно в транзисторе с такой конструкцией между двумя заземляющими отверстиями расположены только два источника тепловой мощности.

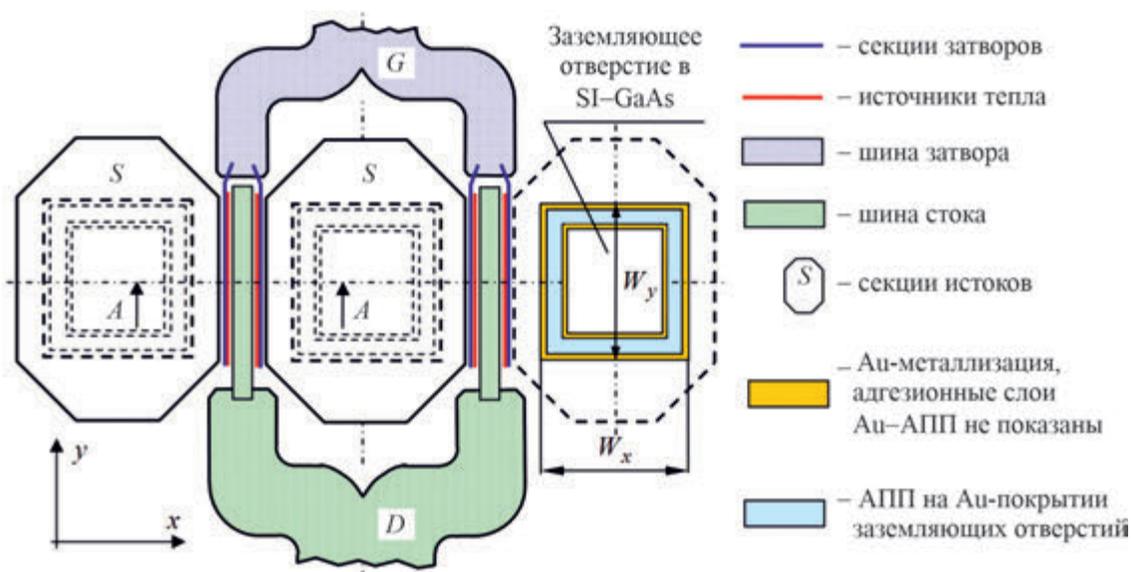


Рис. 1. Схематичный вид сверху на группу секций транзистора мм-диапазона длин волн

Сквозные заземляющие отверстия в гетероструктуре имеют боковые стенки, покрытые слоем Au толщиной 2...5 мкм, что обеспечивает электрический контакт S-секций истоков с основанием корпуса транзистора. Очевидно, что Au-металлизация боковых стенок отверстий обеспечивает не только электрический контакт с основанием корпуса, она же (вместе с областью передачи тепла по SI-GaAs-подложке) может выполнять роль теплового моста между слоем канала и основанием корпуса, но из-за малости коэффициента теплопроводности Au по отношению к АПП эффективность теплового моста из Au не слишком велика.

Введение октаэдрических S-секций заземленных истоков в разрывы всего множества секций затворов и стоков уже само по себе уменьшает плотность источников тепла, что, как показали наши расчеты, приводит к незначительному уменьшению максимальной температуры транзистора T_{\max} . Однако теплоотводящие свойства заземляющих отверстий принципиально можно улучшить, дополнительно введя в них АПП, обладающее большим коэффициентом теплопроводности λ_c , который, согласно [5], более чем на порядок превышает коэффициент теплопроводности SI-GaAs-подложки ($\lambda_{\text{GaAs}} \approx 46 \text{ Вт/(м·К)}$).

На рис. 2 приведен схематичный вид сечения A-A для группы секций транзистора, показанного на рис. 1.

Красные стрелки на рис. 2 показывают направления основных потоков тепла в конструкции транзистора с АПП и заземленными истоками.

Из рис. 2 видно, что при $a \ll H_{\text{GaAs}}$ и $\lambda_c \gg \lambda_{\text{GaAs}}$ можно ожидать, что тепловое сопротивление АПП в направлении оси z при достаточно большой толщине АПП будет существенно меньше

теплового сопротивления SI-GaAs-подложки в том же направлении. В результате этого АПП тепловой мост оказывает сильное шунтирующее влияние на тепловое сопротивление SI-GaAs-подложки в направлении оси z , в результате чего произойдет заметное уменьшение максимальной температуры транзистора. Результаты расчетов подтвердили эти предположения.

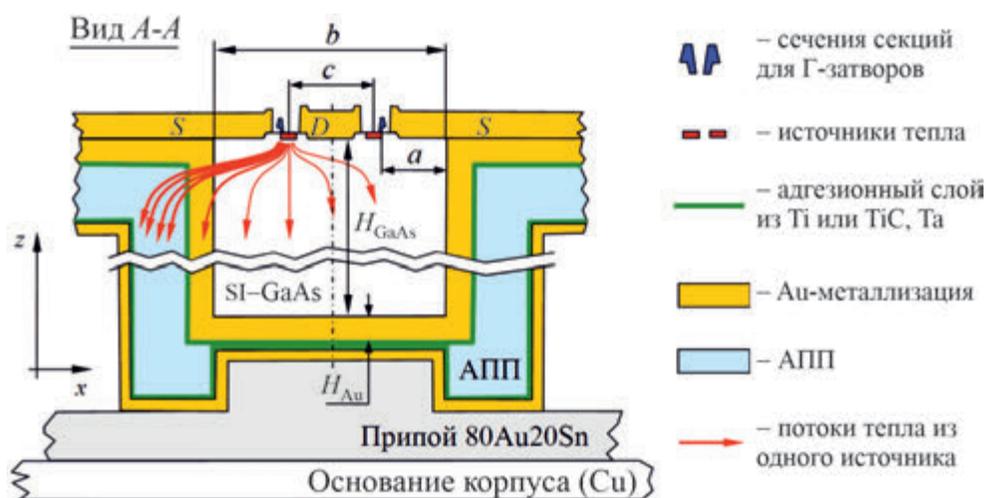


Рис. 2. Схематичный вид сечения $A - A$ для рис. 1

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Для оценки эффективности предложенного решения проводился стандартный тепловой расчёт распределения температуры в транзисторе на основе решения стационарного трёхмерного уравнения теплопроводности. В расчётную модель были включены 8 одинаковых по размерам источников тепла толщиной 0,1 мкм, длиной 0,5 мкм. Вообще говоря, результирующая температура зависит от размеров источника. Однако, в силу линейности рассматриваемой задачи, относительное изменение температуры при введении изменений в конструкцию от размеров источника практически не зависит. Для ширины источников тепла W_Q выбраны три характерные величины, соответствующие ширине секций затвора 50, 100 и 150 мкм, при этом тепловая мощность, выделяемая в источниках, задавалась соответственно равной 50, 100 и 150 мВт, что соответствует удельной мощности 1 Вт/мм. Для всех трех вариантов ширины источников тепла толщина SI-GaAs-подложки в транзисторе H_{GaAs} была выбрана равной 100 мкм.

Размеры заземляющих отверстий $W_x \times W_y$ (рис. 1) выбраны равными 25×30, 25×80 и 25×130 мкм (два последних варианта – близкая к щелевидной форма заземляющих отверстий) при величинах W_Q соответственно равных 50, 100 и 150 мкм, т. е. размер W_y (рис. 1) был выбран на 20 мкм меньше ширины источников W_Q . Как далее будет показано, это примерно тот максимальный размер, когда увеличение отверстия перестаёт сильно влиять на максимальную температуру в канале транзистора.

Два источника тепла расположены на расстоянии 15 мкм между их центрами, причем расположены они как раз между двумя заземляющими отверстиями. Следующая пара источников с таким же расстоянием между центрами расположена со сдвигом на 60 мкм по оси x . В области сдвига, равной 60 мкм, на оси ее симметрии расположено заземляющее отверстие в SI-GaAs-подложке.

Максимальная температура, соответствующая изменениям конструкции транзистора (таким, как введение заземляющих отверстий, введение Au-покрытия заземляющих отверстий или введение АПП заземляющих отверстий), если не оговорено особо, сравнивалась с максимальной температурой для конструкции транзистора, не содержащей заземляющих отверстий между секциями транзистора.

В тепловую модель были введены следующие параметры и характеристики: $T_{\text{осн}} = 0^\circ\text{C}$ – температура основания корпуса; $\lambda_{\text{МП}}$ – задаваемый коэффициент теплопроводности материала покрытия (Au, АПП), который либо заполняет полностью заземляющие отверстия, либо нанесен на боковые стенки заземляющих отверстий; T_0 – расчетная величина максимальной температуры в структуре транзистора при отсутствии заземляющих отверстий, разделяющих секции транзистора; T – расчетная величина максимальной температуры в структуре транзистора при наличии заземляющих отверстий, разделяющих секции транзистора; Δ – коэффициент, показывающий относительное изменение максимальной температуры транзистора в результате ввода изменений в конструкцию транзистора,

$$\Delta = \frac{T - T_0}{T_0 - T_{\text{осн}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Вводимые в конструкцию транзистора изменения: введение заземляющих отверстий, разделяющих секции транзистора, введение покрытия заземляющих отверстий слоем золота и (или) АПП.

Результаты расчетов при ширине источников тепла W_{Q} , равной 50, 100 и 150 мкм, и тепловой мощности, выделяемой в каждом источнике и соответственно равной 50, 100 и 150 мВт, приведены в табл. 1...3.

Таблица 1

**Максимальные температуры транзистора
при $W_{\text{Q}} = 50$ мкм, $Q_{\text{и}} = 50$ мВт, $H_{\text{GaAs}} = 100$ мкм**

Заземляющее отверстие между секциями транзистора			Покрытие		T_0, C	T, C	$\Delta, \%$
Наличие	$W_x \times W_y, \text{мкм}$	$a, \text{мкм}$	Материал (толщина, мкм)	$\lambda_{\text{МП}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$			
Отсутствует	–	–	Отсутствует	–	56,93	56,93	0
Есть	25×30	10	Отсутствует	0	56,93	61,9	8,7
Есть	25×30	10	Отверстие заполнено Au	100	56,93	54,35	-4,5
Есть	25×30	10	Au (5)	100	56,93	56,16	-1,4
Есть	25×30	10	Au (5)	200	56,93	53,65	-5,8
Есть	25×30	10	Au (5)	314	56,93	51,71	-9,2
Есть	25×30	10	АПП (5)	500	56,93	49,52	-13,0
Есть	25×30	10	АПП (5)	1000	56,93	46,13	-19,0
Есть	25×30	10	АПП (5)	1500	56,93	44,27	-22,2

Окончание табл. 1

Заземляющее отверстие между секциями транзистора			Покрытие		T_0, C	T, C	$\Delta, \%$
Наличие	$W_x \times W_y, \text{мкм}^2$	$a, \text{мкм}$	Материал (толщина, мкм)	$\lambda_{\text{МП}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$			
Есть	25×30	10	Отверстие заполнено АПП	1000	56,93	43,88	-23,0
Есть	25×30	10	Au (1) и АПП (5)	200 1500	56,93	44,65	-21,6
Есть	35×30	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	56,93	39,57	-30,5

Таблица 2

**Максимальные температуры транзистора
при $W_Q = 100 \text{ мкм}$, $Q_H = 100 \text{ мВт}$, $H_{\text{GaAs}} = 100 \text{ мкм}$**

Заземляющее отверстие между секциями транзистора			Покрытие		T_0, C	T, C	$\Delta, \%$
Наличие	$W_x \times W_y, \text{мкм}^2$	$a, \text{мкм}$	Материал (толщина, мкм)	$\lambda_{\text{МП}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$			
Отсутствует	–	–	Отсутствует	–	70,28	70,28	0
Есть	25×80	10	Отсутствует	0	70,28	86,99	23,8
Есть	25×80	10	Отверстие заполнено Au	100	70,28	63,10	-10,2
Есть	25×80	10	Au (5)	100	70,28	71,56	1,8
Есть	25×80	10	Au (5)	200	70,28	64,76	-7,9
Есть	25×80	10	Au (5)	314	70,28	60,05	-14,6
Есть	25×80	10	АПП (5)	500	70,28	55,33	-21,3
Есть	25×80	10	АПП (5)	1000	70,28	49,15	-30,1
Есть	25×80	10	АПП (5)	1500	70,28	46,24	-34,2
Есть	25×80	10	Отверстие заполнено АПП	1000	70,28	44,28	-37,0
Есть	25×80	10	Au (1) и АПП (5)	200 1500	–	46,43	-33,9
Есть	35×80	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	–	41,16	-41,4

Таблица 3

**Максимальные температуры транзистора
при $W_Q = 150$ мкм, $Q_n = 150$ мВт, $H_{GaAs} = 100$ мкм**

Заземляющее отверстие между секциями транзистора			Покрытие		T_0, C	T, C	$\Delta, \%$
Наличие	$W_x \times W_y,$ мкм	$a,$ мкм	Материал (толщина, мкм)	$\lambda_{МПР},$ Вт/(м·К)			
Отсутствует	–	–	Отсутствует	–	78,04	78,04	0
Есть	25×130	10	Отсутствует	0	78,04	105,08	34,6
Есть	25×130	10	Отверстие заполнено Au	100	78,04	67,52	-13,5
Есть	25×130	10	Au (5)	100	78,04	81,5	4,9
Есть	25×130	10	Au (5)	200	78,04	71,57	-8,3
Есть	25×130	10	Au (5)	314	78,04	64,76	-17,0
Есть	25×130	10	АПП (5)	500	78,04	58,27	-25,3
Есть	25×130	10	АПП (5)	1000	78,04	50,38	-35,4
Есть	25×130	10	АПП (5)	1500	78,04	46,93	-39,9
Есть	25×130	10	Отверстие заполнено АПП	1000	78,04	44,26	-43,3
Есть	25×130	10	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	47,02	-39,7
Есть	35×150	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	41,45	-46,9
Есть	35×130	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	41,92	-46,3
Есть	35×110	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	45,01	-42,3
Есть	35×90	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	48,68	-37,6
Есть	35×50	5	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	55,61	-28,7
Есть	41×130	2	Au (1) и АПП (5)	200 1500	78,04	38,38	-50,8

Из результатов расчётов видно следующее:

1. Удаление материала подложки в области отверстий для заземления истоков и расположение заземляющих отверстий между секциями транзистора приводит к заметному увеличению максимальной температуры транзистора. Этот результат объясняется уменьшением площади подложки, через которую тепло отводится в основание корпуса. Нежелательное увеличение максимальной температуры T , приводящее к положительным величинам коэффициента Δ (соответствующие этому случаю величины в табл. 1...3 показаны голубым шрифтом), становится большим при последовательном увеличении ширины источников тепла W_Q от 50 до 150 мкм.

При $W_o = 150$ мкм показатель изменения максимальной температуры транзистора Δ достигает самой большой положительной величины, 34,6 % (см. табл. 3), что говорит о существенном увеличении максимальной температуры в транзисторе.

2. Формирование Au-металлизации в заземляющих отверстиях изменяет ситуацию в лучшую сторону – в результате происходит не увеличение, а уменьшение максимальной температуры в транзисторе: на 6...8 % при коэффициенте удельной теплопроводности Au-покрытия 200 Вт/(м·К) и на 9...17 % при 314 Вт/(м·К). Этот результат достигается за счет большего коэффициента теплопроводности Au-металлизации по отношению к коэффициенту теплопроводности GaAs и достаточно большой толщины Au-металлизации.

3. Формирование АПП в заземляющих отверстиях существенно улучшает теплоотвод: происходит значительное уменьшение максимальной температуры в транзисторе. При различных ширинах источников тепла показатель изменения максимальной температуры транзистора Δ становится равным -22...-50 % , причем $|\Delta|$ возрастает с увеличением ширины источников W_o ! Значение $\Delta = -40$ % получено при достаточно большой толщине Si-GaAs-подложки в транзисторе ($H_{\text{GaAs}} = 100$ мкм), что важно для увеличения его механической прочности.

4. ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

Для формирования АПП на Au-металлизации стенок заземляющих отверстий, при обеспечении достаточно низкой температуры процесса (≤ 300 °С), подходит метод магнетронного напыления углерода либо метод плазмохимического осаждения из газовой фазы [5]. Для нанесения АПП используют CVD (*chemical vapor depositions*) процесс, основанный на разложении углеводородов в смеси с водородом и последующем осаждении алмаза на нагретую подложку [6]. Рабочая смесь газов диссоциирует в вакуумной камере под действием СВЧ-плазмы, давление газа в камере – 30...100 Торр, скорость осаждения – 10...20 мкм/ч. Характерный температурный коэффициент линейного расширения алмаза составляет $(9...15) \cdot 10^{-7}$ (°С)⁻¹, что почти на порядок меньше аналогичного коэффициента для золота, $14 \cdot 10^{-6}$ (°С)⁻¹. По этой причине контакт АПП с Au осуществляется через промежуточный адгезионный слой с высоким сродством к углероду, образующий с ним высокоадгезионные соединения в вакууме или в инертной атмосфере. В качестве адгезионного слоя могут быть использованы, например, титан, тантал, карбид титана, которые наносятся методом ионно-лучевого или магнетронного распыления в вакууме.

В частности, для металлизации из монеля 82Ni18Cu, часто используемого вместо золота, при его толщине 0,3...0,8 мкм оптимальными оказались адгезионные слои из титана или карбида титана толщиной 0,05...0,1 мкм [8]. Формирование необходимой топологии АПП на нижней поверхности транзистора, например вскрытие окон в слое АПП для нанесения на АПП второго слоя Au и обеспечения контакта припоя с этим слоем (см. рис. 2), может быть проведено методом локального реактивного ионного травления АПП в кислородной плазме.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что формирование АПП в заземляющих отверстиях полевых транзисторов для миллиметрового диапазона длин волн может оказаться очень эффективным и, в зависимости от топологии прибора, до двух раз уменьшить максимальную температуру в канале транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием, эффективно работающие при нулевом смещении на затворе / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин Х. [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 5 – 14.
2. **Воробьев, А. А.** Моделирование теплового режима мощных транзисторов и МИС и новый метод монтажа кристаллов / А. А. Воробьев, Е. В. Воробьева, А. В. Галдецкий // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 37–41.
3. **Воробьев, А. А.** О возможности создания эффективного теплоотвода мощных СВЧ-транзисторов с помощью структуры со стоп-слоем / А. А. Воробьев, А. В. Галдецкий // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 42 – 54.
4. Поверхностный тепловой интерфейс для мощных арсенидгаллиевых гетероструктурных полевых транзисторов / А. Б. Пашковский, И. В. Куликова, В. Г. Лапин [и др.] // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, вып. 2. – С. 252 – 257.
5. **Ланин, В.** Алмазоподобные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности / В. Ланин, Е. Телеш // Силовая электроника. – 2008. – № 3. – С. 120 – 124.
6. **Ральченко, В.** CVD-алмазы. Применения в электронике / В. Ральченко, В. Конов. // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58 – 67.
7. Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах / П. В. Бережнова, В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, А. К. Ратникова // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 4 (492). – С. 21 – 24.
8. **Ланин, В. Л.** Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш. – Минск: Издательский центр БГУ, 2007.

Статья поступила 11 июля 2022 г.

УДК 621.382.323.029.64

**ЦИФРОВЫЕ БАРЬЕРЫ И ИХ ПЕРСПЕКТИВЫ
В РАЗВИТИИ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
С ДВУХСТОРОННИМ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

**С. А. Богданов¹, В. Г. Лапин¹, В. М. Лукашин¹, С. Н. Карпов¹, А. Б. Пашковский¹,
И. А. Рогачёв¹, Е. В. Терёшкин¹, А. К. Бакаров², К. С. Журавлев², Д. Ю. Протасов²**

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

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

Проведены теоретические исследования псевдоморфных гетероструктур с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры. Показано, что введение цифровых потенциальных барьеров позволяет на 30...40 % увеличить всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте их в область сильного поля. Кроме того, обнаружен эффект локализации горячих электронов верхних уровней в областях расположения цифровых потенциальных барьеров. Показано, что этот эффект также существенно увеличивает всплеск дрейфовой скорости. Проведена оптимизация конфигурации систем чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs. В оптимизированной гетероструктуре локализация электронов в канале оказывается выше, а величина всплеска дрейфовой скорости при расчётах как с учетом, так и без учёта локализации горячих электронов в областях расположения цифровых потенциальных барьеров приближается к теоретическому пределу для используемой модели – максимальной величине всплеска дрейфовой скорости в нелегированном объёмном материале канала.

КС: цифровые барьеры, горячие электроны, полевой транзистор, гетероструктура, всплеск дрейфовой скорости электронов, коэффициент усиления

**DIGITAL BARRIERS AND THEIR PROSPECTS
IN THE DEVELOPMENT OF HIGH-POWER FIELD-EFFECT TRANSISTORS
WITH TWO-WAY DONOR-ACCEPTOR DOPING
IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE**

**S. A. Bogdanov¹, V. G. Lapin¹, V. M. Lukashin¹, S. N. Karpov¹, A. B. Pashkovskii¹,
I. A. Rogachev¹, E. V. Tereshkin¹, A. K. Bakarov², K. S. Zhuravlev², D. Yu. Protasov²**

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

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk

Theoretical studies of pseudomorphic heterostructures with bilateral donor-acceptor doping and systems of alternating thin layers of AlAs/GaAs forming additional digital potential barriers have been carried out. It is shown that the introduction of digital potential barriers makes it possible to increase the electrons drift velocity overshoot by 30...40 % when they fly into the region of a strong field. In addition, the effect of localization of hot electrons of the upper levels in the areas of the location of digital potential barriers was found. It is shown that this effect also significantly increases the electrons drift velocity overshoot. Optimization of the configuration of systems of alternating thin layers AlAs/GaAs is performed. In the optimized heterostructure, the localization of electrons in the channel turns out to be higher, and the magnitude of the electrons drift velocity overshoot when calculating both with and without taking into account the localization of hot electrons in the areas of digital potential barriers is approaching the theoretical limit for the model used – the maximum value of the electrons drift velocity overshoot in the unalloyed bulk material of the channel.

Keywords: digital barriers, hot electrons, field-effect transistor, heterostructure, electrons drift velocity overshoot, gain

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная тенденция развития мобильных технологий – повышение пропускной способности беспроводных каналов передачи данных, что непосредственно связано с освоением полевыми транзисторами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн и повышением линейности приемопередающих трактов на их основе. В настоящее время активно разрабатывается 6G стандарт связи, который является будущим мобильных сетевых технологий с уникальными характеристиками. Он требует появления эффективных усилителей мощности с низким уровнем интермодуляционных искажений, работающих в районе 300 ГГц. Активное продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано в основном с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. В то же время одним из основных недостатков мощных нитридгаллиевых приборов является высокий уровень нелинейности, и он до сих пор не устранён. В миллиметровом диапазоне длин волн полевые транзисторы на основе AlGaIn–GaIn-гетероструктур демонстрируют крайне впечатляющие характеристики [1 – 3] и продвинулись почти до терагерц [4]. Однако промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 ГГц пока выглядит достаточно проблематичным. Кроме того, существует высокая вероятность того, что традиционные транзисторы на гетероструктурах на основе GaIn без появления принципиально новых технических решений достигли своего максимума в плане максимальных рабочих частот [5, 6]. Поэтому пока при длинах волн менее 2 мм для изготовления полевых транзисторов и усилителей на их основе в основном используются метаморфные гетероструктуры и гетероструктуры на основе фосфинидиновых подложек [7, 8]. Главной особенностью таких гетероструктур является узкозонный канал на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с молярным содержанием индия $x = 0,8$ и выше. По усилительным характеристикам такие структуры в настоящее время не имеют конкурентов, однако узкая запрещённая зона канала приводит к низким пробивным напряжениям приборов на их основе и соответственно малым удельным выходным мощностям. В то же время есть ещё один перспективный путь продвижения вверх по частотному диапазону – использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием [9]. Данный технический приём позволил резко увеличить как удельную мощность полевых транзисторов, так и их коэффициент усиления [10, 11]. Далее будет продемонстрировано, что такие структуры имеют ещё один существенный ресурс для улучшения характеристик и в плане мощных приборов в принципе могут составить конкуренцию традиционным метаморфным гетероструктурам и гетероструктурам на основе фосфинидиновых подложек.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ

С точки зрения физики главная идея донорно-акцепторного легирования гетероструктур состоит в том, чтобы за счёт создания резких $p-i-n$ потенциальных барьеров с двух сторон канала двойной псевдоморфной гетероструктуры (DpHEMT) существенно увеличить степень локализации электронов в канале и уменьшить поперечный пространственный перенос электронов между слоями гетероструктуры. Это позволит увеличить как саму дрейфовую скорость электронов [12], так и её всплеск при влёте электронов в область сильного поля (под затвор транзистора) [13, 14].

Степень локализации электронов в канале гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT), а следовательно, и величина всплеска дрейфовой скорости сильно зависят как от величины разрыва зон на границах гетероструктуры, так и от потенциального профиля дополнительных $p-i-n$ -барьеров [15, 13]. Высота барьера гетероперехода ограничена выбором

гетеропары, а резкость дополнительных $p-i-n$ -барьеров как технологическими ограничениями по поверхностной плотности доноров в n^+ -дельта слое, так и тем, что с увеличением этой плотности за счёт кулоновского взаимодействия увеличивается интенсивность рассеяния электронов в канале и падает их подвижность.

Дополнительно увеличить степень локализации электронов в канале DA-DpHEMT можно путем замены однородных материалов как в спейсере между каналом и n^+ -дельта слоем, так и в нелегированном промежутке между дельта слоем и тонким p^+ -слоем на систему чередующихся тонких слоев AlAs (2...5 монослоев) и GaAs (3...6 монослоев) [16, 17]. По аналогии с цифровым кодом, потенциальный профиль, обусловленный такой короткопериодной сверхрешеткой AlAs/GaAs, назовём цифровым барьером. В определённой мере сходная идея использовалась в работе [18], правда, там изготавливался всего один дополнительный барьер за счёт включения в состав гетероструктуры слоя AlAs толщиной 2 нм. Как будет показано далее, сильно выраженные квантовые эффекты позволяют назвать такие гетероструктуры Q-DpHEMT.

При оптимизации цифровых барьеров в Q-DpHEMT-структуре, появляется возможность управлять разрешёнными состояниями в короткопериодной сверхрешётке, что может являться дополнительным механизмом повышения всплеска дрейфовой скорости электронов в таких гетероструктурах. В чистом AlAs X -долина находится намного ниже Γ -долины, поэтому слой AlAs является высоким потенциальным барьером для электронов Γ -долины и одновременно потенциальной ямой для электронов X -долины. Таким образом, существует вероятность заполнения электронами состояний именно в X -долине широкозонного AlAs и соответственно резкого увеличения интенсивности рассеяния. При использовании AlAs толщиной до трех монослоев, элементарная оценка собственных значений энергий электронов в X -долине в глубокой квантовой яме по формуле

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* a^2} n^2,$$

где \hbar – постоянная Планка; m^* – эффективная масса электрона; a – ширина квантовой ямы; n – номер квантового уровня, даже при эффективной массе электрона, равной массе свободного электрона, дает энергию первого квантового уровня около 0,5 эВ. В то же время энергии разрешённых состояний в короткопериодной сверхрешётке примерно соответствуют энергиям уровней в соответствующей квантовой яме. Таким образом, короткопериодная сверхрешётка AlAs/GaAs представляет собой материал с совершенно новыми свойствами, позволяющими управлять зонной структурой за счет изменения толщин слоев AlAs и GaAs, пусть и дискретно с шагом в один монослой. Даже если ширина барьера AlAs возрастет до пяти монослоев, энергия уровня в квантовой яме будет выше 150 мэВ и переходы на такие состояния начнутся заметно позже, чем переходы из Γ -долины в L -долину в канале. Поэтому вероятность того, что такой механизм переходов сможет существенно повлиять на нелокальный разогрев электронов, достаточно мала.

Для оценки эффективности использования цифровых барьеров были проведены теоретические исследования трёх типов гетероструктур: традиционной псевдоморфной гетероструктуры с двухсторонним легированием (DpHEMT), используемой в большинстве современных транзисторов; гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми барьерами, разработанной в АО «НПП «Исток» им. Шокина» совместно с ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН и изготовленной в ИФП СО РАН (табл. 1), использованной в работе [17] и позволившей получить транзисторы с очень высоким (по сравнению с элементарными оцен-

ками) усилением (Q-DpHEMT); DA-DpHEMT-гетероструктуры с усреднёнными и идентичными рассматриваемой Q-DpHEMT по мольному составу характеристиками слоёв AlGaAs (табл. 2) (гетероструктура с донорно-акцепторным легированием).

Таблица 1

Слой структуры	Концентрация примеси	Толщина
GaAs SI-подложка ($D = 76$ мм)	–	–
GaAs-буфер	Не легируется	450 нм
Сверхрешетка $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As} / \text{GaAs}$	12 периодов, не легируется	5,7/5,3 нм
$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	Не легируется	100 нм
Нижний акцепторный слой $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As:Be}$	$2,55 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $3,82 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	15 нм
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	8 ML
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	3,5 ML
Нижний $\delta\text{:Si}$ (1)	$6,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $N_D - N_A = 2,18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
GaAs	Не легируется	6 ML
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	6 ML
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	3 ML
Слой канала $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$	$x = 0,22$	10 нм
GaAs	Не легируется	3 ML
AlAs	Не легируется	2 ML
GaAs	Не легируется	4 ML
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	3,5 ML
Верхний $\delta\text{:Si}$ (2)	$9,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $N_D - N_A = 5,64 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
GaAs	Не легируется	6 ML
AlAs	Не легируется	3 ML
GaAs	Не легируется	6 ML
$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	Не легируется	3 нм
GaAs	Не легируется	6 ML
AlAs	Не легируется	3 ML

Окончание табл. 1

Слой структуры	Концентрация примеси	Толщина
Верхний акцепторный слой $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As:Be}$	$4,83 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $3,86 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	8 нм
Подзатворный слой $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	Не легируется	20 нм
Характеристики структуры		
Концентрация электронов n_s (300 К)	$4,73 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	
Подвижность электронов μ (300 К)	5780 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	
Концентрация электронов n_s (77 К)	$4,81 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	
Подвижность электронов μ (77 К)	13540 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	

Примечание. ML – один атомный монослой.

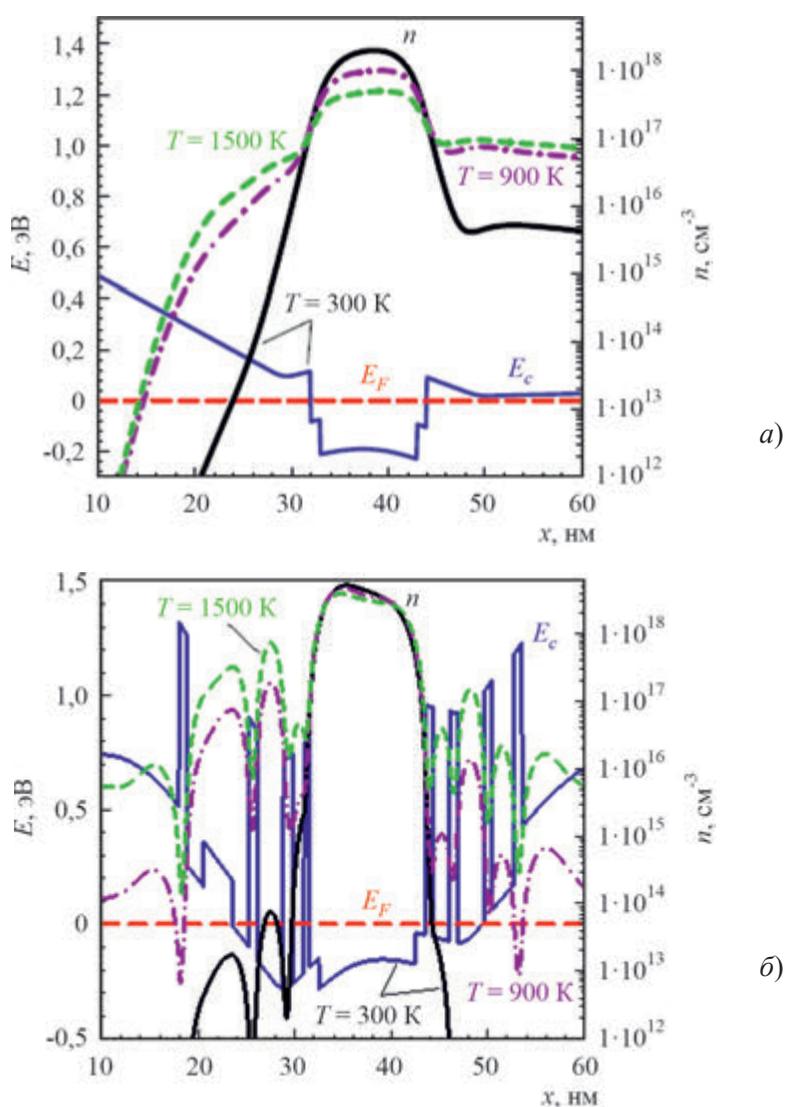
Таблица 2

№	Состав слоя	Концентрация примеси	Толщина, нм
1	Буфер	–	–
2	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	–	100
3	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As:Be}$	$2,55 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	15
4	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	–	3,6
5	GaAs	–	0,9
6	$\delta\text{:Si}$ (1)	$6,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
7	GaAs	–	1,5
8	$\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$	–	3,1
9	GaAs	–	0,9
10	$\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}$	–	10
11	GaAs	–	0,9
12	$\text{Al}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$	–	2,3
13	GaAs	–	0,9
14	$\delta\text{:Si}$ (2)	$9,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
15	GaAs	–	1,5
16	$\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$	–	2,3
17	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	–	3,0
18	$\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$	–	2,3
19	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As:Be}$	$4,83 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	8,0
20	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	–	20,0

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Расчёт проводился на основе феноменологической модели [13, 14], предназначенной для анализа нелокального разогрева электронов в транзисторных гетероструктурах с идеализированным (бесконечно длинным) затвором при возможном сильном размерном квантовании в направлении, перпендикулярном поверхности структур, и гидродинамическим описанием динамики электронов. Естественно, такая простая модель не позволяет учесть ряд тонких моментов, например изменение интенсивности рассеяния, связанное с квантованием электронов в широком диапазоне энергий, и отличие интеграла перекрытия волновых функций в узкой квантовой яме от объёмных. Однако в рамках объёмных механизмов рассеяния она позволяет рассчитывать всплеск дрейфовой скорости электронов в зависимости от параметров гетероструктуры. На рис. 1 приведены зонные диаграммы и распределения концентрации носителей по структуре для всех трёх случаев при разных температурах электронного газа. Барьеры на границе тонких гетеропереходов предполагались идеальными с высотой 1,04 эВ, то есть рассматривается предельный случай идеальной барьерной решётки.

Рис. 1. Зонные диаграммы и распределения концентрации электронов при разных температурах электронного газа (см. также с. 28):
a – ДрНЕМТ; *б* – Q-ДрНЕМТ



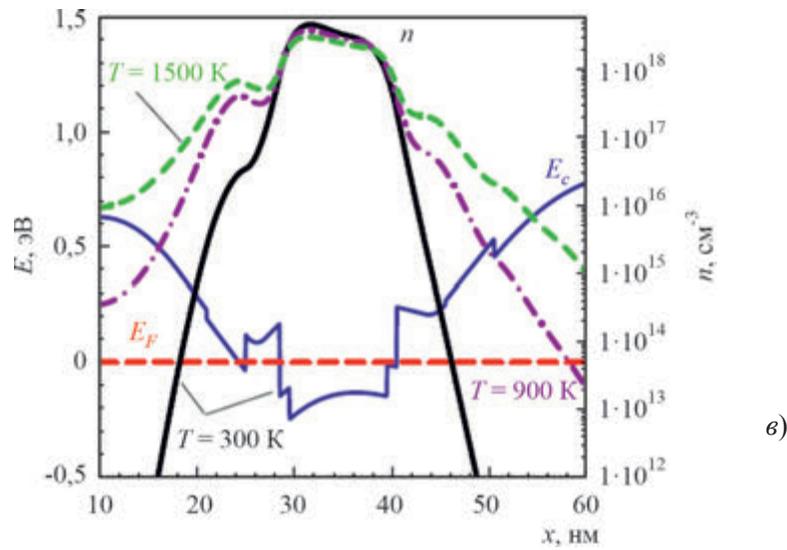


Рис. 1. Зонные диаграммы и распределения концентрации электронов при разных температурах электронного газа:

в – DA-DpHEMT

Видно, что распределения концентрации электронов довольно разные и в случае появления цифровых барьеров локализация электронов в канале выражена гораздо сильнее.

Чтобы наглядно продемонстрировать актуальность этих различий, на рис. 2 приведен расчёт всплеска дрейфовой скорости электронов от времени при их влёте в область сильного поля для различных вероятностей нахождения электронов в широкозонном $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -барьере. В данном случае при решении системы гидродинамических уравнений, описывающих транспорт электронов, вероятность нахождения электронов вне канала не определялась из решения самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона, а просто задавалась. Видно, что величина всплеска дрейфовой скорости электронов при влёте в область сильного поля сильно зависит от числа электронов, находящихся в широкозонном материале. Так, всего при 10 % вероятности нахождения электронов в широкозонном материале величина всплеска дрейфовой скорости падает в 1,5 раза.

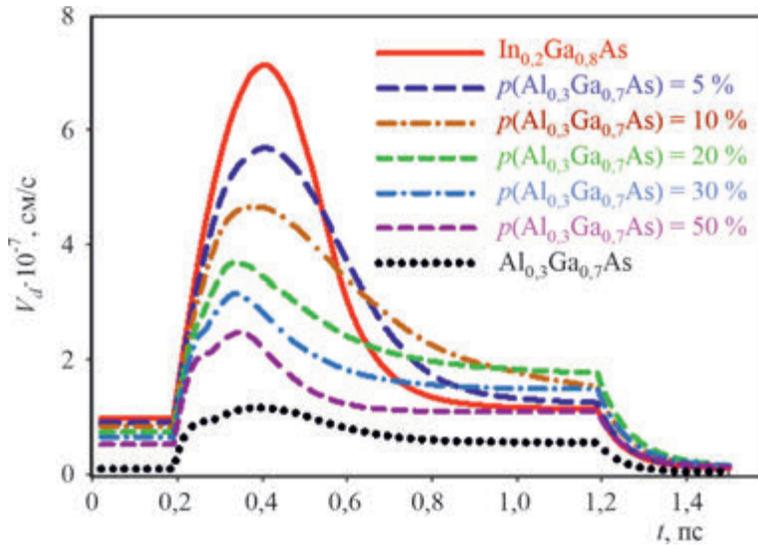


Рис. 2. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при их влёте в область сильного поля для различных вероятностей нахождения электронов в широкозонном $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -барьере

Для оценки конкретного эффекта влияния локализации на дрейфовую скорость электронов был проведен расчёт всплеска дрейфовой скорости электронов при включении сильного поля во всех трёх случаях. Следует отметить, что введение цифровых барьеров в используемую гетероструктуру (см. рис. 1, б) было чисто технологическим решением. Естественно ожидать, что дальнейшая оптимизация структуры может улучшить результаты. Поэтому расчеты проводились ещё для двух структур: структуры, соответствующей рис. 1, б с введенными в широкий промежуток между барьерами дополнительными двумя слоями AlAs (рис. 3, Q-DpHEMT-1), и этой же структуры, но с промежутками между AlAs-барьерами не по шесть монослоёв GaAs, а по четыре монослоя (Q-DpHEMT-2).

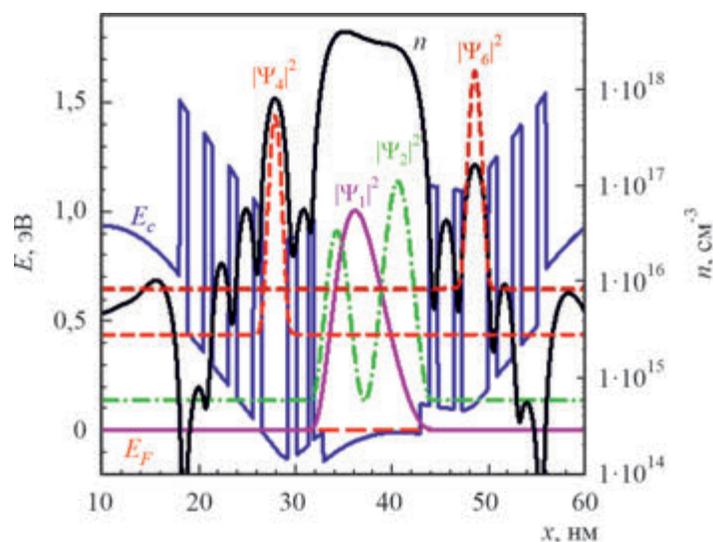


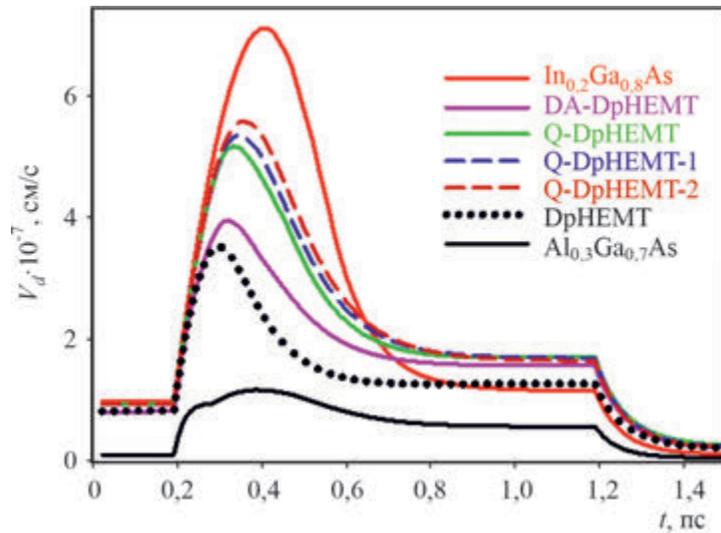
Рис. 3. Зонная диаграмма Q-DpHEMT-1-структуры с дополнительными потенциальными барьерами при температуре электронного газа 1500 К (в расчётах учитывалось двадцать уровней размерного квантования, волновые функции третьего и пятого уровней локализованы в яме, их квадраты модулей не показаны, чтобы не загромождать рисунок)

Моделировался отклик дрейфовой скорости и вероятности нахождения электронов в широкозонном материале на подаваемый во времени импульс электрического поля с амплитудой, примерно равной средней величине поля под затвором транзистора мм-диапазона длин волн (рис. 4). Задавалось, что в течение 0,2 пс электроны движутся в поле с напряжённостью 1 кВ/см, затем подается импульс амплитудой 20 кВ/см с длительностью 1 пс, а потом дрейф электронов продолжается в электрическом поле напряженностью 1 кВ/см. Как показали проведенные ранее исследования [5, 19], качественная картина для подобных гетероструктур слабо зависит от амплитуды импульса, по крайней мере, в диапазоне 10...30 кВ/см.

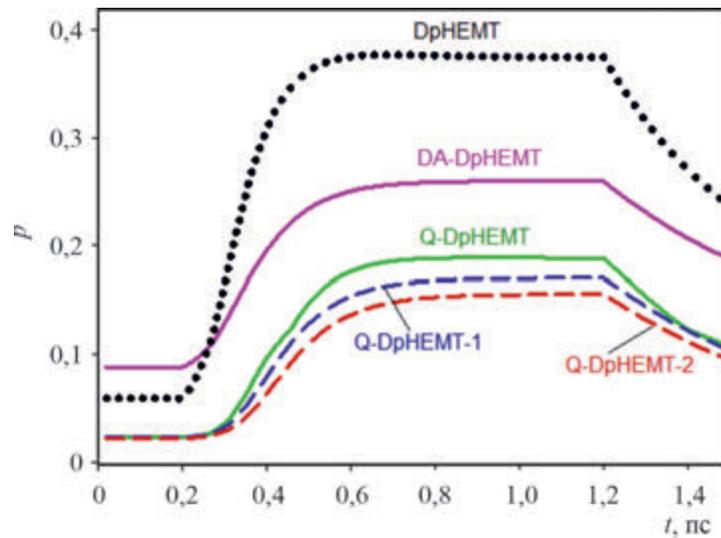
Видно, что дрейфовая скорость электронов в гетероструктуре с цифровыми барьерами, даже расставленными заведомо не оптимальным образом, может быть на 30...40 % больше, чем в гетероструктуре без цифровых барьеров. Соответственно примерно на столько же должны вырасти и рабочие частоты транзистора. В свою очередь это может привести к росту коэффициента усиления транзистора почти в 2 раза (примерно на 3 дБ).

Данный эффект частично позволяет объяснить очень высокие коэффициенты усиления, полученные на разработанной структуре в работах [16, 17]. Введение дополнительных цифровых

барьеров и уменьшение расстояния между ними увеличивают всплеск дрейфовой скорости электронов.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости дрейфовой скорости электронов (а) и вероятности их нахождения в широкозонном материале (б) от времени при влёте в область сильного поля для рассматриваемых гетероструктур

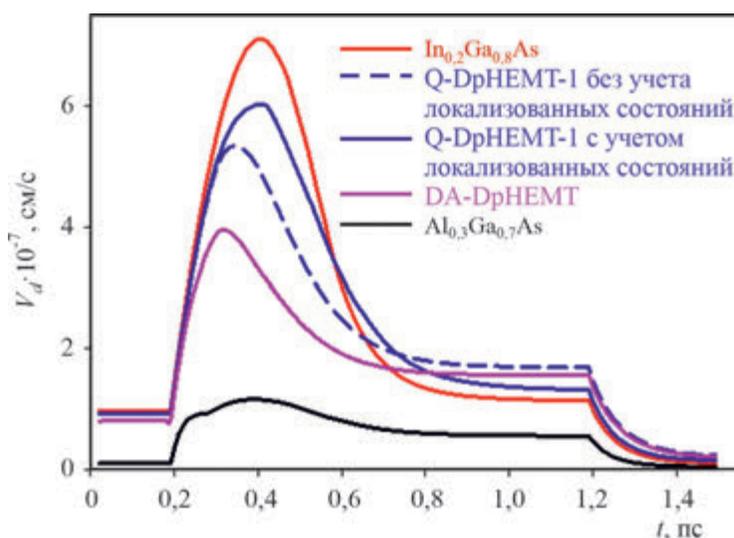
Рассматриваемые структуры Q-DpHEMT-1 и Q-DpHEMT-2 имеют одну интересную особенность. Для изготовления гетероструктур с достаточно резкими донорно-акцепторными барьерами в δ -слоях должна быть достаточно высокая поверхностная плотность доноров. Для этого слои GaAs-матрицы вокруг δ -слоя должны быть достаточно толстыми (не менее трех монослоёв), иначе, как в эксперименте [17], подвижность электронов будет падать. Это приводит к тому, что в почти идеальной сверхрешётке образуются «зазоры», в которых локализуются электронные состояния (верхние двумерные квантовые подзоны), и связано это не столько с на-

рушением строгой периодичности, а с увеличением расстояния между барьерами. Для структур Q-DpHEMT-1 и Q-DpHEMT-2 это четвёртый и шестой квантовые уровни. На них электроны жёстко локализованы вне канала в области цифровых барьеров (см. рис. 4), а их волновые функции в области канала практически равны 0. Таким образом, интеграл перекрытия между ними и волновыми функциями электронов в канале на первых уровнях мал. Соответственно мал и матричный элемент перехода электронов на эти уровни для любых механизмов рассеяния.

Это должно приводить к ещё одному крайне интересному и полезному для разработки СВЧ-транзисторов эффекту. Так как квантовые уровни с локализованными в короткопериодных сверхрешетках AlAs/GaAs электронными состояниями находятся довольно высоко, то при движении электронов в слабом поле в состоянии, близком к термодинамическому равновесию с низкой температурой электронного газа, эти уровни не заполнены. Влетев под затвор транзистора, электрон попадает в область сильного поля. За время пролёта под коротким затвором транзистора мм-диапазона (а этот пролёт является практически баллистическим [20]) электроны на уровнях с локализованными в короткопериодных сверхрешетках AlAs/GaAs электронными состояниями переходить практически не будут (время пролета небольшое, матричный элемент перехода мал, а значит, и вероятность перехода мала). Что в свою очередь должно резко уменьшить вероятность рассеяния в широкозонном материале. Крайне незначительное количество перешедших электронов будет дрейфовать из-под затвора в сильном тянущем продольном поле и не окажет существенного влияния на движение электронов в яме. В дальнейшем эти электроны или непосредственно уйдут в контакт стока, или, разогревшись, перейдут в канал через другие долины. Это позволит избежать блокирования переноса электронов в многослойных гетероструктурах [21].

Результаты расчёта всплеска дрейфовой скорости как с учётом заселенности по всем уровням, так и с учетом этого эффекта (уровни с локализованными состояниями в расчётах просто не учитывались) приведены на рис. 5. Видно, что в расчете с учётом этого эффекта вероятность нахождения электронов в широкозонном материале значительно уменьшается, а величина всплеска дрейфовой скорости соответственно заметно увеличивается. Таким образом, это может быть дополнительным механизмом увеличения рабочих частот в транзисторах на основе структур с цифровыми барьерами.

Рис. 5. Зависимости дрейфовой скорости электронов (а), а также вероятности их нахождения в широкозонном материале (б) от времени при влёте в область сильного поля для гетероструктуры Q-DpHEMT-1 с учетом и без учета локализованных состояний (см. также с. 32)



а)

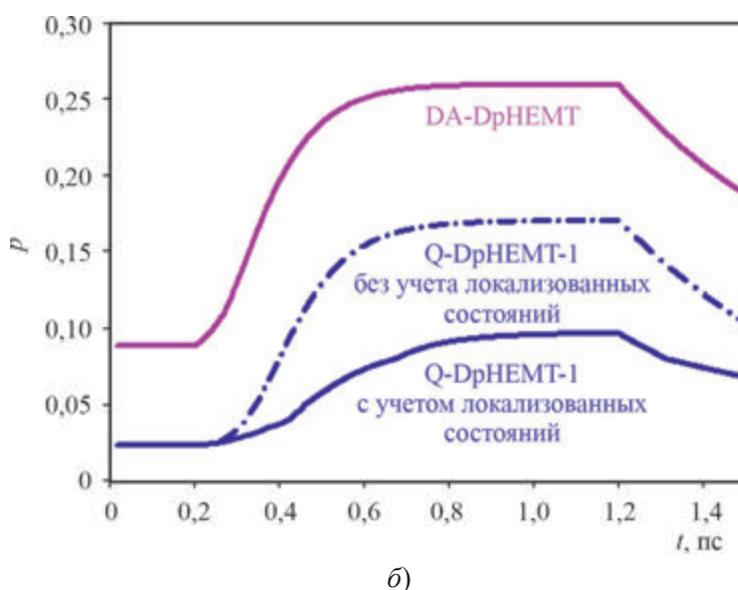


Рис. 5. Зависимости дрейфовой скорости электронов (а), а также вероятности их нахождения в широкозонном материале (б) от времени при влёте в область сильного поля для гетероструктуры Q-DpHEMT-1 с учетом и без учета локализованных состояний

При расчёте гетероструктур, как обычных, так и с цифровыми слоями, общепринята модель резкого гетероперехода, и эти представления неоднократно подтверждались экспериментально, например [22]. Однако для создания строго вертикального барьера требуется бесконечное электрическое поле, что в принципе невозможно. Поэтому можно предположить, что на размерах одного монослоя барьер не является строго вертикальным (граница размыта).

Для барьера толщиной в три монослоя эффект размытия границы барьера в один монослой можно смоделировать за счет снижения высоты барьера и его расширения до четырех монослоев. Для оценки размытия на два монослоя, что является заведомо предельным случаем, рассматривался барьер шириной в пять монослоев. При этом для оценки максимального влияния отклонения границы барьера от вертикальной высота барьера уменьшалась обратно пропорционально увеличению его ширины. Таким образом, оценка влияния размытия границ барьера на величину всплеска дрейфовой скорости электронов осуществлялась для двух гетероструктур типа Q-DpHEMT-1, но с цифровыми барьерами, толщина которых была увеличена с трех до четырех монослоев (Q-DpHEMT-1 4ML) и до пяти монослоев (Q-DpHEMT-1 5 ML). Результаты расчётов приведены на рис. 6.

Видно, что увеличение толщины барьеров за счёт размытия с трех до пяти монослоев слабо (около 5 %) уменьшает всплеск дрейфовой скорости электронов, а увеличение до четырех монослоев в масштабах рисунка вообще практически не видно.

Полученные результаты позволяют предположить, что даже с учётом размытия барьеров модификация гетероструктур цифровыми барьерами на практике будет достаточно эффективна.

Вопрос с большими промежутками между цифровыми барьерами в области донорного легирования может быть решён достаточно простым образом. Дельта слой можно разбить на два, одновременно уменьшив размер GaAs-матрицы, например, до двух монослоев с каждой

стороны, а между ними вставить барьер – три монослоя AlAs. Если уменьшить расстояние и между другими барьерами до четырех монослоев GaAs, то получится практически идеальные короткопериодные сверхрешетки (Q-DpHEMT-3), рис. 7.

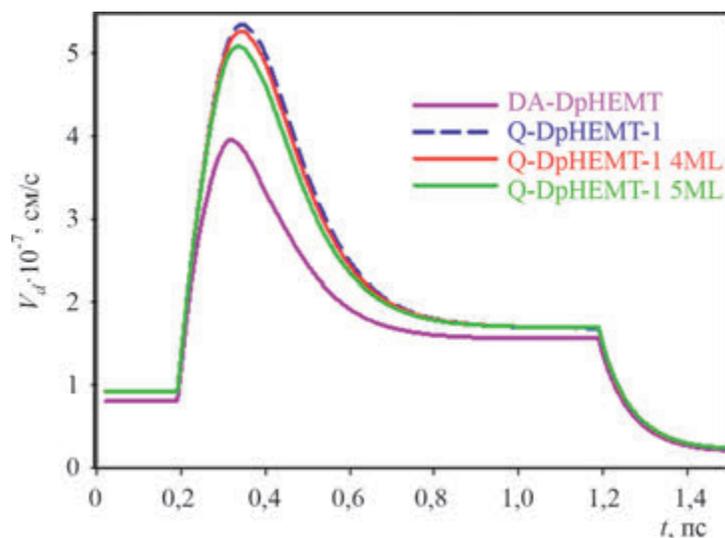


Рис. 6. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени при влёте в область сильного поля структур с усреднёнными характеристиками (DA-DpHEMT), Q-DpHEMT-1 4ML с толщиной AlAs в четыре монослоя, Q-DpHEMT-1 5 ML с толщиной AlAs в пять монослоев (высоты барьеров уменьшены обратно пропорционально их ширине, расчёт без учёта локализованных состояний)

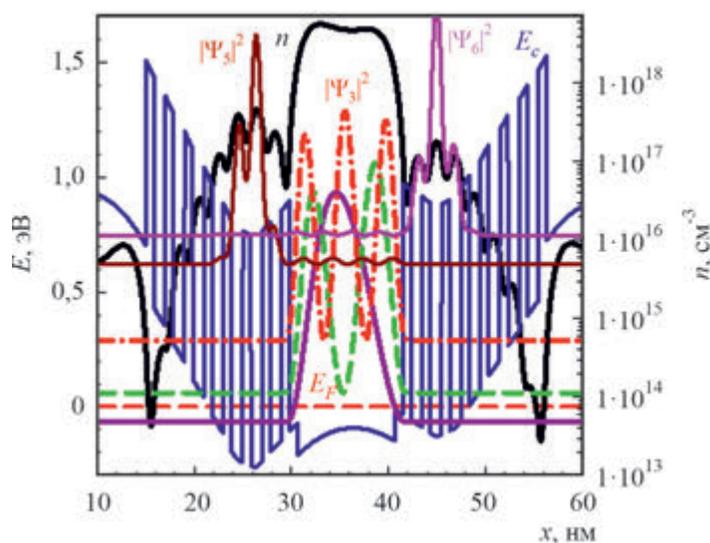


Рис. 7. Зонная диаграмма структуры с идеальными сверхрешетками (четвертый уровень не показан, чтобы не загромождать рисунок)

В такой структуре электроны локализованы в канале ещё сильнее, чем в предыдущей, а существенная делокализация начинается только с пятого уровня с энергией более 0,6 эВ, которая заметно больше энергии междолинного зазора в узкозонном канале.

В результате всплеск дрейфовой скорости в такой структуре (рис. 8) как с учётом, так и без учёта локализованных в сверхрешётках состояний заметно растёт по сравнению со всеми рассмотренными ранее случаями и приближается к теоретическому пределу для данной модели – всплеску дрейфовой скорости в объёмном материале канала.

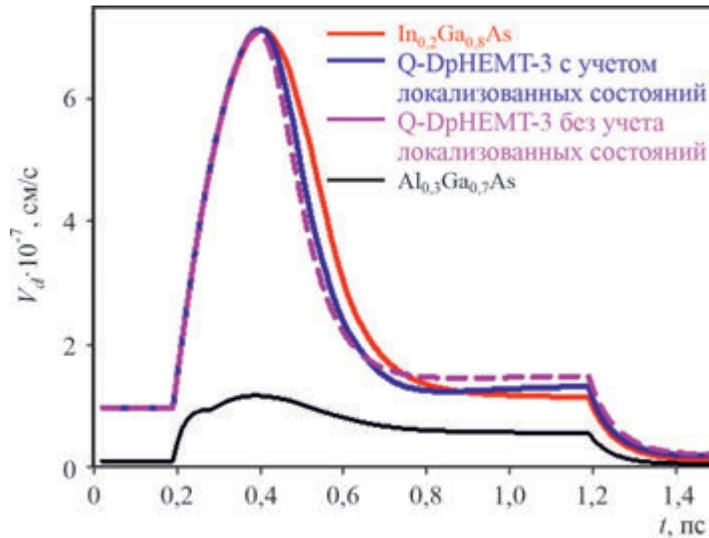


Рис. 8. Всплеск дрейфовой скорости электронов в структуре с идеальными сверхрешётками

Следует отметить ещё одну особенность рассматриваемой структуры Q-DrHEMT-3. Расстояния между заполненными в равновесном состоянии первым ($E_1 = -0,0646$ мЭв) и вторым ($E_2 = 0,0617$ мЭв) уровнями, а тем более третьим ($E_3 = 0,2889$ мЭв) и четвертым ($E_4 = 0,5798$ мЭв) очень велики, существенно больше энергии оптического фотона. Поэтому данный механизм рассеяния должен быть подавлен. Возможно, будут частично подавлены и другие механизмы рассеяния. Это должно дополнительно увеличить всплеск дрейфовой скорости, а значит, дополнительно увеличить рабочие частоты полевых транзисторов на основе таких гетероструктур.

Используемая модель позволяет оценивать гетероструктуры по величине всплеска дрейфовой скорости электронов, учитывая лишь влияние параметров гетероструктуры на вероятность нахождения электронов в канале. Она не учитывает изменение величины всплеска из-за других факторов, как, например, влияние на рассеяние электронов расстояний между квантовыми подзонами, расстояния от уровня Ферми до верхних долин узкозонного канала, рассеяние на шероховатостях границы и т. д.

В качестве примера, можно привести зависимости всплеска дрейфовой скорости от ширины квантовой ямы в структуре с идеальной решёткой (рис. 9).

Из рисунка видно, что в данной модели от ширины ямы величина всплеска дрейфовой скорости практически не зависит. С одной стороны – это как бы ещё один большой плюс для структур с цифровыми барьерами. Однако правильно на данный вопрос может ответить лишь эксперимент или более точный расчёт.

С учётом полученных результатов по всплеску дрейфовой скорости можно сделать следующие элементарные оценки. Экспериментальные транзисторы в [16, 17] на частоте 94 ГГц имели мало-сигнальный коэффициент усиления (MSG) более 9 дБ (аппроксимация измерений до 67 ГГц).

При этом транзистор имел пробивное напряжение затвор – сток около 34 В, напряжение перекрытия около 3,5...4,0 В. Уменьшение длины затвора с 0,14...0,12 мкм до 0,05 мкм с соответствующим утонением структуры должно привести к увеличению коэффициента усиления на 8...10 дБ. Оптимизация структуры (за счёт увеличения всплеска дрейфовой скорости под затвором прибора) может дать ещё не менее 3 дБ. Дополнительное увеличение коэффициента усиления (не менее чем на 1 дБ) должны дать отработка технологии формирования контактов и оптимизация топологии транзистора. Переход с 3-мм диапазона длин волн в район 1 мм, в свою очередь, должен уменьшить коэффициент усиления примерно на 10 дБ. Даже если предположить, что реальный коэффициент усиления будет вдвое меньше MSG, то в итоге такой прибор может иметь MSG не менее 8...10 дБ на частоте 300 ГГц, то есть быть в принципе вполне работоспособным как в малосигнальном режиме, так и в режиме большого сигнала.

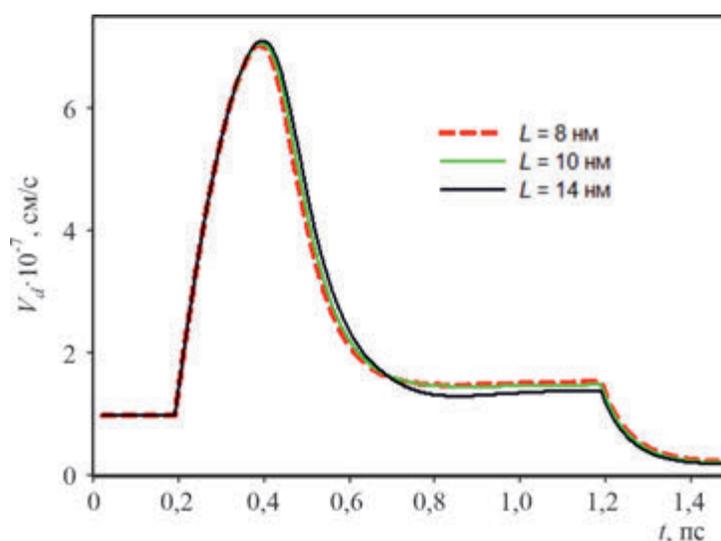


Рис. 9. Всплеск дрейфовой скорости электронов в структуре с идеальной решёткой и квантовой ямой канала различной ширины. Расчёт без учета локализованных состояний

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, введение цифровых барьеров по краям канала с высокой подвижностью в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием существенно увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте их в область сильного поля.

Полученные результаты в принципе позволяют ответить на основной вопрос работ [16, 17]: откуда берется избыточное усиление в транзисторах на разработанной гетероструктуре по сравнению с проведенными ранее оценками? С учётом результатов этих работ и приведенных выше расчётов, простые оценки показывают, что при укорочении длины затвора транзистора до 0,05 мкм оптимизация структур с цифровыми барьерами может позволить транзисторам на их основе работать на частотах вплоть до 300 ГГц при сохранении довольно высоких уровней удельной мощности, в разы превосходящих удельную мощность современных транзисторов с каналом на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, с высоким молярным содержанием индия.

Полученные результаты показывают, что использование цифровых барьеров в гетероструктурах

с донорно-акцепторным легированием является весьма эффективным способом улучшения транзисторных гетероструктур. Приборы на таких структурах могут иметь коэффициент усиления до двух раз выше при сохранении неизменными других высоких параметров, например удельной мощности. Полевые транзисторы на таких структурах по ряду параметров могут составить достойную конкуренцию приборам на основе нитрида галлия и транзисторам с каналом на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, с высоким молярным содержанием индия, особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present [Online] / H. Wang [et al.]. – Available: https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html (Jul. 2019).
2. Demonstration of constant 8 W/mm power density at 10, 30, and 94 GHz in state-of-the-art millimeter-wave N-polar GaN MISHEMTs / B. Romanczyk [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – Jan. 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 45 – 50. – DOI: 10.1109/TED.2017.2770087.
3. N-polar GaN/AlN MISHEMT with f_{\max} of 204 GHz for kband applications / Nidhi S. Dasgupta, S. Keller, J. S. Speck and U. K. Mishra // IEEE Electron Device Lett. – Dec. 2011. – Vol. 32, No 12. – P. 1683 – 1685. – DOI: 10.1109/LED.2011.2168558.
4. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with f_T/f_{\max} of 454/444 GHz / Y. Tang [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Jun. 2015. – Vol. 36, No 6. – P. 549 – 551. – DOI: 10.1109/LED.2015.2421311.
5. Всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия / С. А. Богданов, А. А. Борисов, С. Н. Карпов [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 4 (551). – С. 16 – 24.
6. Transient electron transport in wurtzite GaN, InN and AlN / B. E. Foutz, S. K. O'Leary, M. S. Shur, L. F. Eastman // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85, No 11. – P. 7727 – 7734. – DOI: 10.1063/1.370577.
7. A review of technologies and design techniques of millimeter-wave power amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello [et al.] // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – Jul. 2020. – Vol. 68, No 7. – P. 2957 – 2983. – DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792.
8. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process / X. Mei [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Apr. 2015. – Vol. 36, No 4. – P. 327 – 329. – DOI: 10.1109/LED.2015.2407193.
9. New heterostructures for higher power microwave DA-pHEMTs / K. S. Zhuravlev [et al.] // Advances in Microelectronics: Reviews, 2019. – Vol. 2. – Barcelona, Spain: IFSA. – P. 251 – 288.
10. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
11. Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рHEMT транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.
12. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рHEMT-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / Д. Ю. Протасов, Д. В. Гуляев, А. К. Бакаров [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 6. – С. 77 – 84. – DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45770.17098.
13. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT / А. Б. Пашковский, С. И. Новиков, В. Г. Лапин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 17. – С. 103 – 110. – DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46577.17372.
14. Нелокальная динамика электронов в транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / А. Б. Пашковский, А. С. Богданов, В. М. Лукашин, С. И. Новиков // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 3. – С. 210 – 225. – DOI: 10.31857/S0544126920030059.

15. / И. С. Василевский, А. Н. Виниченко, Н. И. Каргин // 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения: Тез. докладов. 24.05.2017. – С. 28 – 29.
16. Millimeter wave donor-acceptor doped DpHEMT / Andrey B. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. – jan. 2021. – Vol. 68, issue 1. – P. 53 – 56.
17. DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн / С. А. Богданов, С. Н. Карпов, В. Г. Лапин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2 (549). – С. 19 – 31.
18. Увеличение подвижности электронов в HEMT гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs / А. Н. Виниченко, В. П. Гладков, Н. И. Каргин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 12. – С. 1660 – 1665.
19. Локализация электронов верхних долин в узкозонном канале – возможный дополнительный механизм увеличения тока в DA-DpHEMT / А. Б. Пашковский, С. А. Богданов // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45, вып. 20. – С. 11 – 14. – DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48385.17925.
20. Comparative potential performance of Si, GaAs, GaInAs, InAs submicrometer-gate FETs / A. Cappy, B. Carnez, R. Fauquembergues [et al.] // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1980. – Vol. 27, No 11. – P. 2158 – 2160.
21. **Мартынов, Я. Б.** Отрицательная дифференциальная проводимость в широкозонных гетероструктурах, вызванная пространственным поперечным переносом электронов / Я. Б. Мартынов // Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2-5 июня 2019: сб. тр. конф. – С. 54 – 57.
22. Гетероструктуры InGaAlAs/InAlAs для электроабсорбционного модулятора / Д. В. Гуляев, Д. А. Колосовский, Д. В. Дмитриев [и др.] // Письма в ЖТФ. – В печати.

Статья поступила 16 августа 2022 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.378.325

ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛТУ «КАРАВЕЛЛА» ДЛЯ РАСКРОЯ ПРИПОЕВ ИЗДЕЛИЙ СВЧ-ТЕХНИКИ

В. С. Парамонов, Н. А. Лябин, О. В. Осотов, **В. И. Клименко**, Г. М. Парамонова,
К. Ю. Виноградов, К. О. Долгих, А. Д. Чурсин, И. С. Колоколов

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

Показана возможность применения автоматизированных лазерных технологических установок «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе импульсных лазеров на парах меди в технологии микрообработки фольговых материалов толщиной 0,01...0,3 мм. Проведены расчеты, исследованы режимы лазерной микрообработки и разработаны технологии для группы припоев, используемых для соединения и герметизации деталей и узлов в ИЭТ. Разработаны методы очистки зоны лазерной обработки. Определены основные технологические направления по прецизионной микрообработке материалов толщиной до 0,3 мм для ИЭТ.

КС: лазерные технологические установки, прецизионная микрообработка, лазеры на парах меди

EXPERIENCE AND RESULTS OF USING ALTI «KARAVELLA» FOR CUTTING SOLDERS OF MICROWAVE TECHNOLOGY PRODUCTS

V. S. Paramonov, N. A. Lyabin, O. V. Osotov, **V. I. Klimenko**, G. M. Paramonova,
K. Yu. Vinogradov, K. O. Dolgih, A. D. Chursin, I. S. Kolokolov

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

The possibility of using automated laser technological installations «Karavella-2» and «Karavella-2M» based on pulsed copper vapor lasers in the technology of micromachining foil materials 0.01...0.3 mm thick is shown. Calculations were carried out, laser micromachining modes were studied and technologies were developed for a number of solders used to connect and seal parts and assemblies in ETP. Methods of cleaning the laser treatment zone have been developed. The main technological directions for precision micromachining of materials up to 0.3 mm thick are determined for ETP.

Keywords: laser technological installations, precision micromachining, copper vapor lasers

Развитие электронной промышленности, с дальнейшей миниатюризацией и повышением качества электронных компонентов, а также применением новых материалов, выдвигает все более жесткие требования к надежности и конкурентоспособности выпускаемых изделий. Что, в свою очередь, диктует создание новых технологий и технологических процессов. Особое признание получили лазерные технологии по микрообработке ИЭТ.

За период 2008 – 2012 гг. в НПП «Исток» были разработаны автоматизированные лазерные технологические установки (АЛТУ) «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе импульсных лазеров на парах меди (ЛПМ) с длинами волн излучения в видимой желто-зеленой области спектра

($\lambda = 0,51$ и $0,58$ мкм), со средней мощностью до 10 Вт и высокими частотами следования импульсов излучения (14...16 кГц). АЛТУ «Каравелла-2М» отличается от «Каравелла-2» лишь рабочим полем горизонтального координатного стола XY. Поле стола «Каравелла-2» – 100×100 мм, стола «Каравелла-2М» – 200×200 мм [1]. Внешний вид технологических установок приведен на рис. 1, структурная схема – на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М»

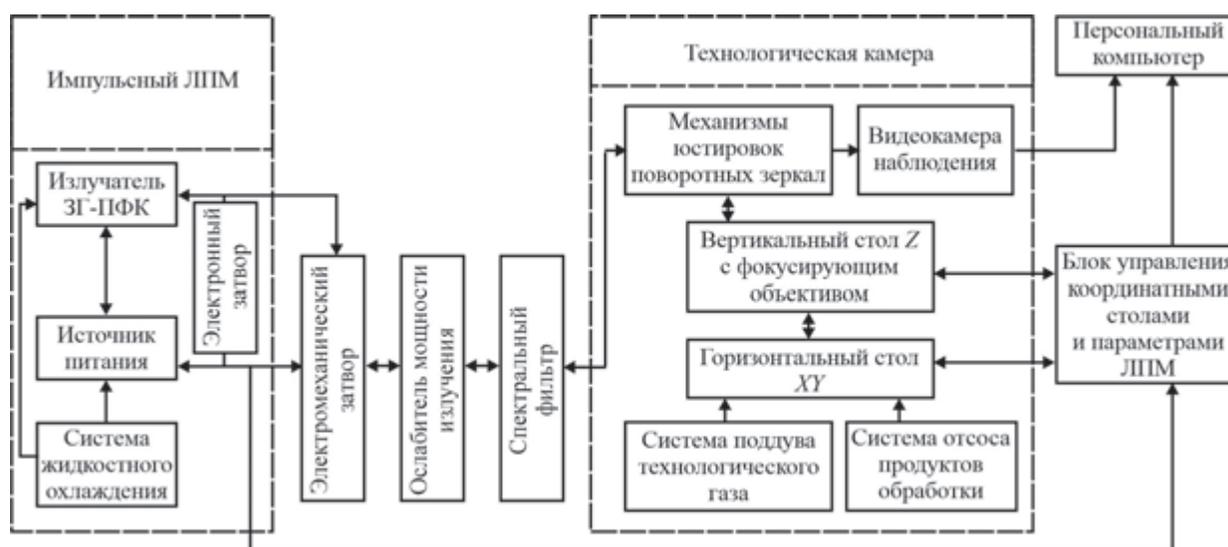


Рис. 2. Структурная схема АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М»

Режущим инструментом в АЛТУ является сфокусированное пятно излучения диаметром 10...20 мкм с плотностью пиковой мощности $10^{10}...10^{11}$ Вт/см², что позволяет производить обработку преимущественно в испарительном режиме и малыми порциями. По сравнению с традиционными методами обработки, включая и электроэрозионную (ЭЭО), производительность лазерной микрообработки фольговых материалов (0,01...0,3 мм), особенно сложной конфигурации, на АЛТУ на порядок выше и, кроме того, обеспечивается высокое качество реза: зона термического воздействия ≤ 5 мкм, шероховатость поверхности ≤ 2 мкм.

Технологии лазерной микрообработки разрабатывались практически одновременно с созданием АЛТУ «Каравелла» и внедрением в производство ИЭТ, и в первую очередь вакуумной и твердотельной СВЧ-техники. В производстве изделий вакуумной и твердотельной СВЧ-техники АО «НПП «Исток» большое место занимают припои, предназначенные для соединения и герметизации отдельных деталей и узлов. Многолетний практический опыт изготовления прецизионных деталей на вышеописанных АЛТУ показал, что для эффективной микрообработки припоев (20...100 мкм) достаточно мощности излучения ЛПМ до 5 Вт при дифракционном качестве пучка.

На первом этапе исследований по микрообработке проводился расчет пороговой плотности пиковой мощности испарения $q_{и}$ для большой группы материалов, используемых в качестве припоев и широко применяемых в современном производстве ИЭТ. К ним относятся высокотеплопроводные сплавы драгметаллов на основе меди, золота, серебра и другие. Расчеты проводились по формуле, используемой во многих технологических работах и учитывающей основные теплофизические и оптические свойства материалов [2]:

$$q_{и} = \frac{kT_{и}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\delta\tau}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности (для серебра $k_{Ag} = 429$ Вт/(м·К); для золота $k_{Au} = 318$ Вт/(м·К)); $T_{и}$ – температура испарения ($T_{и,Ag} = 2485$ К; $T_{и,Au} = 3080$ К); A – коэффициент поглощения ($A_{Ag} = 0,05$; $A_{Au} = 0,15$); δ – коэффициент температуропроводности ($\delta_{Ag} = 1,65 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $\delta_{Au} = 1,28 \cdot 10^{-4}$ м²/с); $\tau = 10^{-8}$ с – длительность импульса лазерного излучения (по полувысоте).

Подставляя эти данные в приведенную формулу, получаем значение расчетной пороговой импульсной (пиковой) плотности мощности:

$$q_{и,Ag} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2, \\ q_{и,Au} = 0,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2.$$

С другой стороны, экспериментальное значение пиковой плотности мощности излучения определяется по формуле:

$$q_{и} = \frac{P_{ср}}{f\tau S}, \quad (2)$$

где $P_{ср}$ – средняя мощность лазерного излучения; f – частота следования импульсов; τ – длительность импульсов излучения; $S = \pi d^2/4$ – площадь пятна сфокусированного пучка излучения (d – диаметр пятна).

По формуле (2), зная пороговую пиковую плотность мощности излучения ($1,5 \cdot 10^9$ и $0,5 \cdot 10^9$ Вт/см²), определяем минимальную среднюю мощность излучения ЛПМ, которая необходима для микрообработки материалов из серебра и золота: $P_{ср,Ag} = q_{и,и} f \pi d^2/4 = 0,2$ Вт, $P_{ср,Au} = 0,06$ Вт, где $f = 15 \cdot 10^3$ Гц; $\tau = 10 \cdot 10^{-9}$ с; $d = 10$ мкм.

Расчетные данные для меди, золота и серебра представлены в таблице.

Пороговые значения плотности мощности и средней мощности излучения

Материал	Температура испарения $T_{и}$, К	Коэффициент поглощения A	Коэффициент теплопроводности k , Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности δ , см ² /с	Пороговая плотность мощности $\rho_{и}$, Вт/см ²	Пороговая средняя мощность ЛПМ $P_{ср}$, мВт, при $d = 10$ и 20 мкм	
Cu	2840	0,368	401	1,17	0,25	30	120

Окончание таблицы

Материал	Температура испарения $T_{\text{и}}$, К	Коэффициент поглощения A	Коэффициент теплопроводности k , Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности δ , см ² /с	Пороговая плотность мощности $\rho_{\text{п}}$, Вт/см ²	Пороговая средняя мощность ЛПМ $P_{\text{ср}}$, мВт, при $d = 10$ и 20 мкм	
Au	3080	0,15	317	1,28	0,5	60	240
Ag	2485	0,045	429,5	1,74	1,6	190	750

Оптимизация режимов обработки проводилась по следующим параметрам: мощности лазерного излучения, фокусному расстоянию ахроматического объектива, скорости обработки, длинам волн лазерного излучения, числу проходов.

В результате большого количества экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения микрообработки металлических материалов в испарительном режиме с минимумом жидкой фазы и соответственно с высоким качеством необходимо иметь в обрабатываемом световом пятне диаметром 10...20 мкм плотность пиковой мощности на 1-2 порядка больше порогового уровня, т. е. $\rho = 10^{10} \dots 10^{11}$ Вт/см². При обработке с таким уровнем плотности мощности фольговых материалов с толщиной, сопоставимой с шириной реза (10...50 мкм), разлетающиеся в результате микровзрывов из зоны воздействия излучения пары и капли металла практически не встречают преград и полностью удаляются из этой зоны.

Оперативность изготовления деталей из припоев, большая номенклатура размеров (от 0,4 до 150 мм), сложные конфигурации деталей, малая толщина и хрупкость материала потребовали в свою очередь разработки и изготовления специальных оправок (рис. 3 и 4).

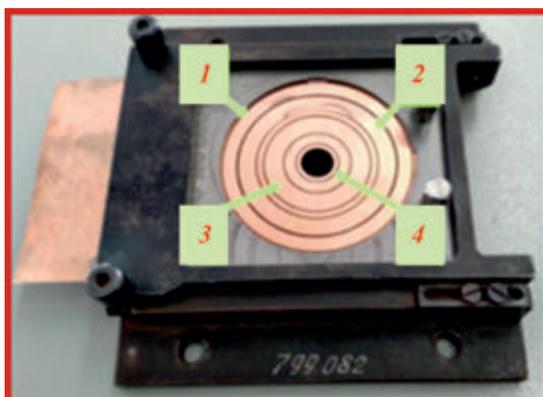


Рис. 3. Пример одновременного изготовления нескольких номиналов деталей из припоя ПЗлМ35В толщиной 0,05 мм:

1 – размеры кольца припоя 50×60 мм; 2 – 38×50 мм;
3 – 21×34 мм; 4 – 10×13,5 мм

В процессе лазерной обработки по линии реза деталей имеет место образование шлаков и окислов. Поэтому детали из припоев перед пайкой подвергаются химической очистке. В высокотемпературных припоях после химической очистки оставалась зона окисления от термического воздействия лазерного излучения. Последующий отжиг в восстановительной среде при 500...750 °С полностью удаляет окислы в зоне реза.

Примеры раскроя различных припоев на АЛТУ «Каравелла» приведены на рис. 5.

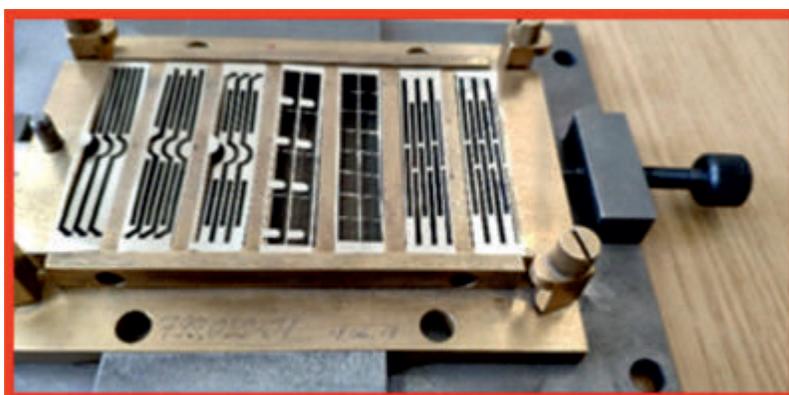
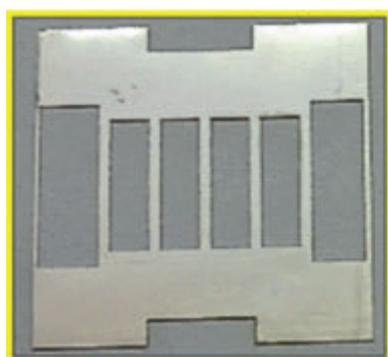


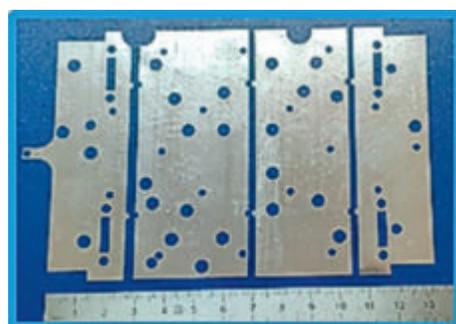
Рис. 4. Оправка для раскроя припоев из олова-золота ПЗЛО80 толщиной 0,025 и 0,03 мм



Серебряные припои: ПСр72В,
ПСрМП68, ПСрМП65
(0,05...0,1 мм)



Золотые припои: ПЗлМ35В,
ПЗлМН81,5В (0,05 мм)



Деталь из материала ПОС-61,
состоящая из 4 частей

Рис. 5. Примеры раскроя различных припоев на АЛТУ «Каравелла» (см. также с. 43)

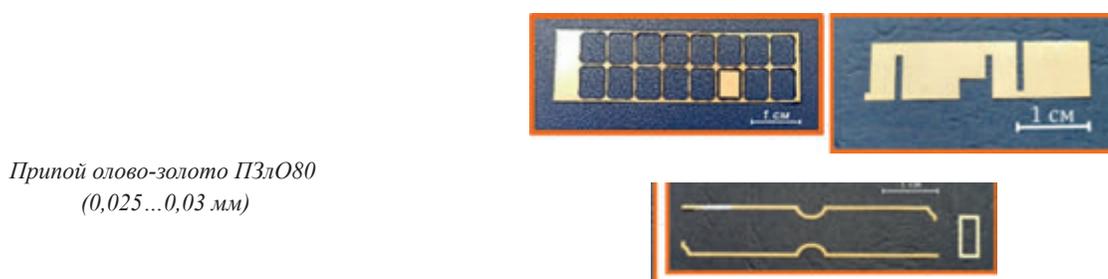


Рис. 5. Примеры раскроя различных припоев на АЛТУ «Каравелла»

Лазерный раскрой припоев показал следующие преимущества по сравнению с традиционными способами:

- отказ от дорогостоящих штампов и ручного раскроя;
- возможность раскроя деталей любой сложной конфигурации, малых размеров (0,4×0,4 мм) и единичных партий (1...10 шт.);
- оперативность в обеспечении НИОКР, серийных и мелкосерийных поставок;
- исключение отдельных операций и переходов по сравнению с ЭЭО;
- экономия материалов за счет оптимального кроя.

В процессе практической работы на промышленных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» были определены направления по применению импульсного излучения ЛПМ со средней мощностью до 10 Вт в технологии лазерной микрообработки и для других фольговых материалов ИЭТ: пленочных покрытий из серебра и золота; материалов из меди, молибдена, нержавеющей стали, константана, бериллиевой бронзы, вольфрама, вольфрам-рения, никеля, алюминия и др. толщиной 0,1...0,3 мм; поликристаллического алмаза и кремния толщиной 0,1...0,5 мм; сапфира толщиной 0,3 и 0,5 мм; маркировки и гравировки с высоким разрешением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А. Г. Прецизионная лазерная обработка материалов / А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин. – М.: Физматлит, 2017. – 416 с.
2. Вейко В. П. Физико-технические основы лазерных технологий: Опорный конспект лекций по курсу. Раздел: Лазерная микрообработка. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 110 с.

Статья поступила 10 июня 2022 г.

УДК 621.396.677.494.002

НЕКОТОРЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ КВАДРАТУРНЫХ АФАР

О. В. Воронков¹, М. М. Гаврилов¹, С. П. Кожин¹, З. П. Куприянов²,
П. В. Куприянов¹, С. А. Силаев¹, Е. В. Терешкин¹

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

²АО «НПК «Тристан», г. Москва

Рассматриваются технические аспекты применения квадратурной модуляции в современных активных фазированных антенных решетках на СВЧ. Осуществляется сравнение параметров коммутируемых дискретных аттенюаторов и фазовращателей с измеренными характеристиками квадратурного модулятора. Отмечаются преимущества последнего по точности при существенно меньших габаритах. Проводится компьютерное моделирование влияния точности установки фазы при реализации сложных типов амплитудно-фазового распределения сигналов в апертуре антенны, необходимого для формирования диаграмм направленности с малым уровнем боковых лепестков. Рассматриваются схемотехнические и технологические вопросы создания квадратурных АФАР. Делаются выводы о целесообразности построения схем диаграммообразования современных высококачественных АФАР на основе квадратурной модуляции несущей.

КС: СВЧ, АФАР, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков, квадратурная модуляция, амплитудно-фазовое распределение, точность установки фазы, LTCC-микромодули SMD

SOME ENGINEERING ASPECTS OF QUADRATURE AESA TECHNOLOGY

O. V. Voronkov¹, M. M. Gavrilo¹, S. P. Kozhin¹, Z. P. Kupriyanov²,
P. V. Kupriyanov¹, S. A. Silaev¹, E. V. Tereshkin¹

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

²JSC «RPC «Tristan», Moscow

The technical aspects of quadrature modulation application in modern microwave active electronically scanned arrays are considered. The parameters of the switched discrete attenuators and phase shifters are compared with the measured characteristics of the quadrature modulator. The advantages of the latter in terms of accuracy with significantly smaller dimensions are noted. A computer simulation of the influence of phase setting accuracy is carried out when implementing complex types of amplitude-phase distribution of signals in the antenna aperture, necessary for forming directional patterns with a low level of side lobes. Circuitry engineering and technological issues of creating quadrature AESAs are considered. Conclusions are drawn about the expediency of constructing diagrams of modern high-quality AESAs on the basis of the carrier quadrature modulation.

Keywords: microwave, AESA, directional pattern, side-lobe level, quadrature modulation, amplitude-phase distribution, phase setting accuracy, LTCC-micromodules of SMD

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность электронного безынерционного формирования диаграммы направленности (ДН) антенн на СВЧ, осуществляемого посредством технологии активных фазированных антенных ре-

шеток (АФАР), является мощнейшим драйвером развития современной радиоэлектроники. Это важное качество позволяет в ряде применений отказаться от механических приводов, ограничивающих быстродействие и надежность радиоэлектронных средств СВЧ. Технология АФАР дает также дополнительные технические «бонусы», делающие ее безальтернативной:

- перераспределение функций мощного, как правило, вакуумного приемопередатчика между множеством твердотельных приемопередающих модулей (ППМ);
- возможность быстрого синтеза сложных ДН, в т. ч. с пространственным подавлением помеховых сигналов и т. п.

В настоящее время за рубежом и у нас в стране построена целая индустрия АФАР преимущественно для военных и специальных приложений. Широкому внедрению указанной технологии как в военную технику, так и в научные, производственно-технические и прочие коммерческие проекты препятствует ее высокая стоимость. Тем не менее, уже известны примеры создания коммерческой радиоэлектронной продукции по технологии АФАР. В первую очередь речь идет о спутниковых абонентских терминалах двусторонней широкополосной связи и базовых станциях сетей сотовой связи последних поколений [1, 2]. Перспективы развития рынков в этой области грандиозны, но это касается прежде всего аппаратуры низкого и среднего ценового сегмента. В военной технике и радиоэлектронной аппаратуре двойного назначения стоимость также имеет значение.

Другим важным фактором является необходимость улучшения характеристик ДН АФАР. Определяющим параметром здесь является минимальное отклонение амплитудно-фазового распределения сигналов в апертуре антенны от заданного. В свою очередь, этот параметр обеспечивается точностью установки фазы и амплитуды в ППМ АФАР.

Целью настоящей публикации является исследование инженерных аспектов снижения стоимости, повышения качественных параметров формирования амплитудно-фазового распределения сигналов ППМ и соответствующего расширения областей применения современных АФАР.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

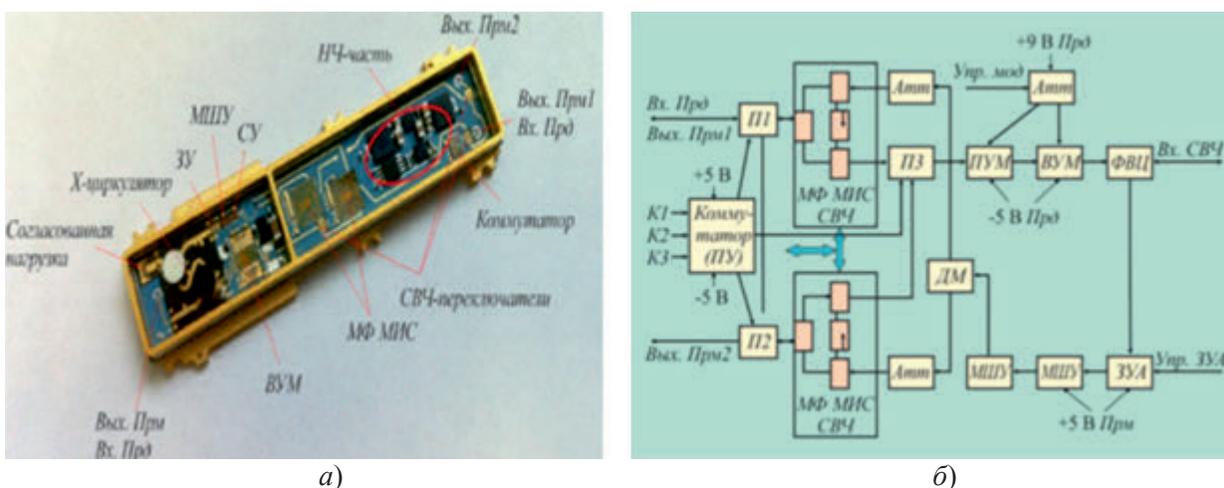
Основной вклад в стоимость АФАР вносят ППМ. Это обусловлено тем, что ППМ – наиболее функционально нагруженные и многочисленные элементы АФАР, обеспечивающие мощность, чувствительность, точность и другие основные тактико-технические характеристики аппаратуры назначения. Рассмотрим конструкцию и схему ППМ современной АФАР (рис. 1), представленного в ряде литературных источников [3, 4].

Рассмотрение указанного ППМ позволяет установить основные инженерные аспекты, определяющие его стоимость:

- высокотехнологичные СВЧ чип-компоненты на материалах группы A_3B_5 ;
- многослойная многофункциональная печатная плата на LTCC;
- термосогласованный гермокорпус с функциями отвода тепла, ввода/вывода СВЧ- и НЧ-сигналов.

Наибольшую площадь среди чип-компонентов ППМ АФАР имеют ступенчатые многорядные аттенюаторы и фазовращатели, используемые для формирования ДН антенны. Требуемая площадь обусловлена физикой работы приборов, основанной на коммутации отрезков линии передачи либо единичных фиксированных аттенюаторов. Это, как правило, распределенные электродинамические структуры, в которых не обойтись без волновых длин и элементов согласования волновых сопротивлений [5, 6]. Стоимость GaAs чип-компонентов СВЧ прямо пропорциональна

их площади. Более того, требуемая точность и монотонность целевых параметров требует объединения исполнительных и управляющих устройств в единой многофункциональной монолитной интегральной схеме (МФ МИС).



а) б)

Рис. 1. Современный ППМ АФАР:

а – конструкция модуля; б – схема модуля

Второй важной составляющей стоимости ППМ является многослойная СВЧ-плата на основе LTCC. Ее значительная площадь в рассматриваемом модуле обуславливает такую же значительную конструктивно-технологическую сложность и соответствующий вклад в стоимость ППМ.

Третья составляющая – гермокорпус. С учетом применяемых высокотехнологичных композитных материалов, СВЧ- и НЧ-вводов, а также технологии герметизации, его стоимость также становится заметной долей в общих затратах на производство ППМ.

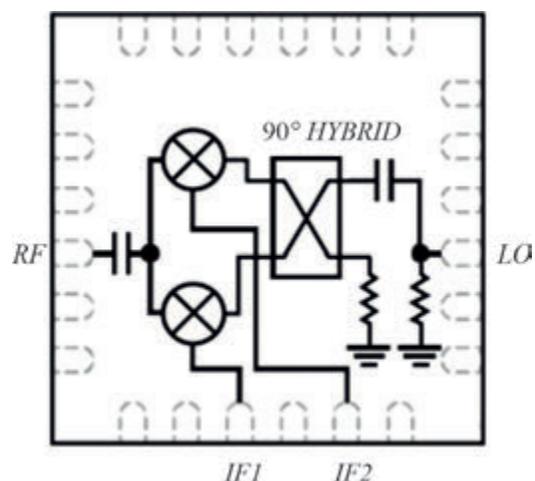
Понятно, что проведенная выше оценка касается только технических аспектов стоимости ППМ, что делает ее относительной и умозрительной. Также понятно, что необходимые операции технологического цикла изготовления модуля: сборочные, отбраковочные, испытательные, приемосдаточные – вносят еще и свою лепту. Точный расчет стоимости не является предметом настоящей публикации, но и так очевидно, что применение ППМ такого конструктивно-технологического исполнения является узкоцелевым.

Таким образом, представленное в дальнейшем изложении рассмотрение различных инженерных аспектов построения ППМ, способствующих снижению его себестоимости, представляется актуальным.

3. ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИЕ ЧИП-КОМПОНЕНТЫ

Альтернативой описанного выше способа формирования в АФАР необходимого амплитудно-фазового распределения сигналов является построение диаграммообразующих цепей ППМ на основе принципа квадратурной амплитудной модуляции. Векторная модуляция несущей с помощью управляемого изменения амплитуд квадратурных составляющих сигнала давно известна и широко используется в технике связи [7]. В зарубежной литературе это называется I/Q -модуляцией, что является полным синонимом русского термина «квадратурная амплитудная модуляция» [8, 9]. Современные квадратурные модуляторы (КМ) СВЧ-сигнала строятся аналогично квадратурному смесителю, по схеме, показанной на рис. 2.

Рис. 2. Схема квадратурного модулятора СВЧ



Площадь кристалла таких приборов на порядок меньше рассматриваемых выше дискретных аттенюаторов и фазовращателей, что продемонстрировано на рис. 3.

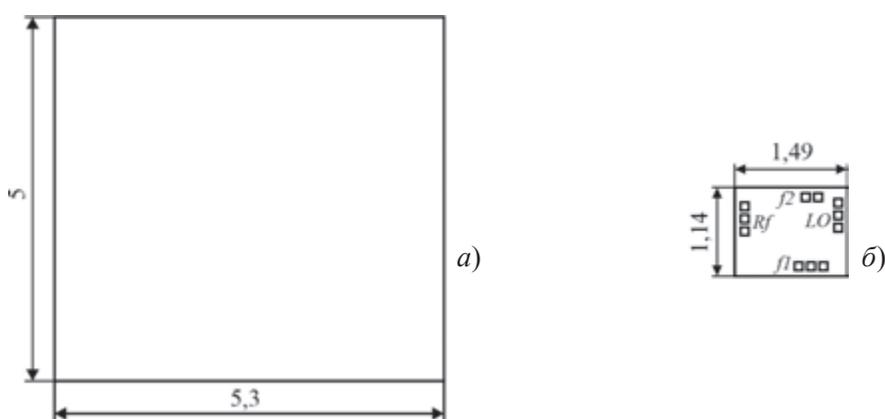


Рис. 3. Сравнение площадей диаграммообразующих чип-компонентов ППМ X-диапазона:

a – МФ МИС; *б* – квадратурный модулятор

В каталогах и технических документах фирм-производителей квадратурных смесителей и модуляторов СВЧ подробно описаны их характеристики в режиме преобразования на промежуточную частоту и обратно. Проблема состоит в том, что в тех же документах отсутствуют параметры, характеризующие работу квадратурного модулятора в режиме модуляции несущей видеосигналом.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАДРАТУРНОГО МОДУЛЯТОРА

Измерение параметров КМ СВЧ в режиме управления постоянным током было проведено на установке, схема и внешний вид которой приведены на рис. 4.

КМ на специальной оправке измерялся векторным анализатором цепей в режиме «на проход». Управление амплитудой и фазой выходного сигнала КМ по входам «I» и «Q» осуществлялось посредством четырехканального 12-разрядного цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

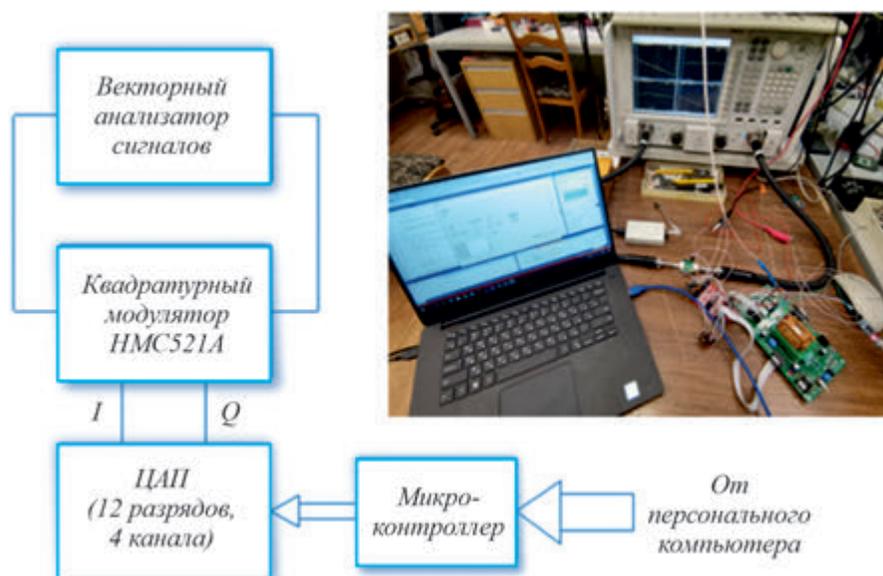


Рис. 4. Схема и внешний вид
стенда для измерения параметров КМ X-диапазона

Известно выражение, описывающее отношение мгновенных значений сигнала на выходе КМ [10] (1):

$$F_{\varphi}(t_1) = \frac{2A \sin(\omega T_0 + \varphi) \cos(\omega t_1)}{2A \cos(\omega T_0 + \varphi) \cos(\omega t_1)}, \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; φ – фаза сигнала; ω – круговая частота гармонических колебаний; t_1 – произвольный временной интервал; T_0 – начальное время.

Сумма мгновенных значений сигнала на выходе КМ, равноотстоящих от T_0 на произвольный временной интервал t_1 , получена с помощью известных формул [11] и описывается выражением

$$F_I(t_1) + F_Q(t_1) = A \sin(\omega T_0 + \varphi) \cos(\omega t_1) + A \cos(\omega T_0 + \varphi) \cos(\omega t_1). \quad (2)$$

При работе КМ в режиме модуляции несущей видеосигналом преобразование на промежуточную частоту и обратно не происходит. Подача постоянных уровней сигнала на I - и Q -входы КМ позволяет изменять фазовые и амплитудные параметры сигнала на выходе. Для обеспечения сдвига фазы в диапазоне от 0 до 360 град к управляющим входам КМ должны быть приложены как положительные, так и отрицательные противофазные сигналы.

Реализованная на персональном компьютере программа позволяет управлять уровнями сигнала на I - и Q -входах КМ как отдельно, так и совместно. Значения, рассчитанные с помощью соотношения (3), транслируются с помощью микроконтроллера на четырехканальный 12-разрядный ЦАП.

$$\begin{cases} I_I = \frac{2^n (\sin \varphi + 1)}{2}, \\ I_Q = \frac{2^n (\cos \varphi + 1)}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

где I_I – ток на синфазном входе КМ; I_Q – ток на квадратурном входе КМ. Ниже представлены результаты проведенных экспериментов (рис. 5).

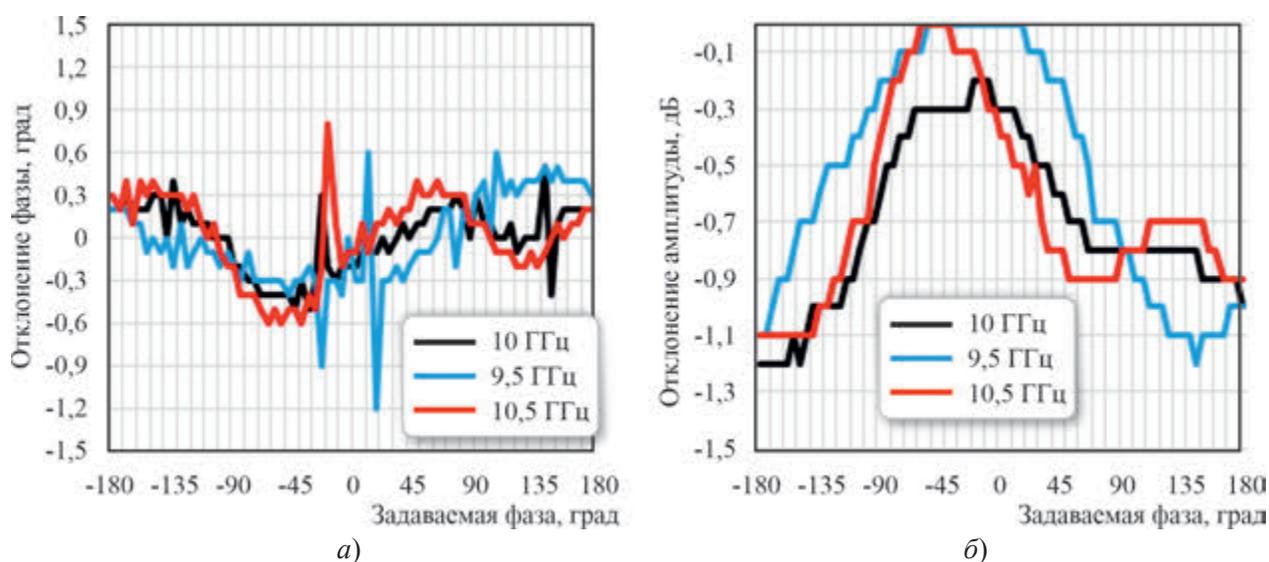


Рис. 5. Зависимости ошибки отклонения фазы СВЧ-сигнала от заданной (а) и паразитное отклонение амплитуды сигнала от теоретического нулевого значения (б)

Представленные на рис. 5, а экспериментальные кривые являются зависимостями отклонения измеренного значения фазы от заданного, в соответствии с выражением (3). Кривые, показанные на рис. 5, б, иллюстрируют паразитное отклонение амплитуды сигнала за счет изменения вносимых потерь при управлении фазой КМ.

С помощью КМ также оказалось возможным в некоторых пределах управляемо изменять амплитуду сигнала при несущественном изменении фазы. На рис. 6, а показаны результаты работы КМ в режиме ослабления амплитуды сигнала для различных частот. На рис. 6, б – результаты измерения отклонения фазы при работе КМ в режиме ослабления сигнала. КМ обеспечивает ослабление сигнала до 10 дБ при паразитном изменении фазы сигнала менее чем на 5 град. Это полезное качество, упрощающее формирование сложных ДН АФАР на передачу.

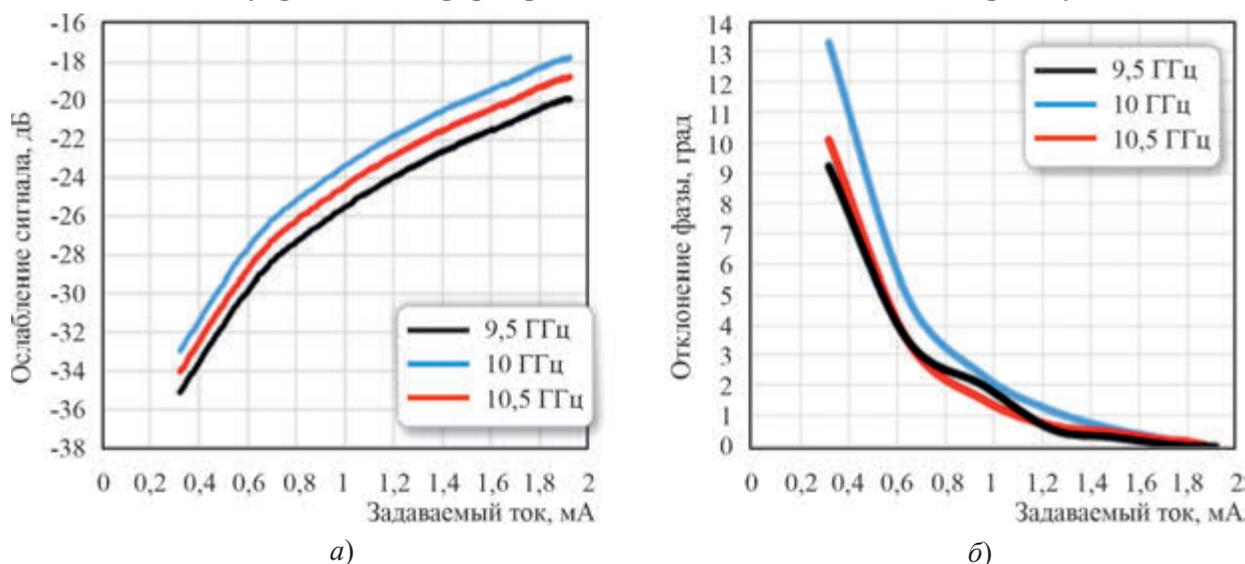


Рис. 6. Зависимости изменения амплитуды сигнала в КМ (а) и паразитного отклонения фазы сигнала (б) от тока управления

Рассчитанные по результатам эксперимента значения среднеквадратичного отклонения (СКО) фазы и амплитуды СВЧ-сигнала с выхода КМ от номинальных сведены в таблицу.

Параметр	Частота, ГГц		
	9,5	10	10,5
СКО фазы, град	0,33	0,23	0,3
СКО амплитуды, дБ	0,42	0,29	0,34

Видно, что точность установки фазы сигнала при рассматриваемом способе диаграммообразования существенно, более чем на порядок, превышает уровень, достигнутый дискретными СВЧ-фазовращателями ведущих мировых производителей [12, 13]. Это представляется крайне важным при формировании ДН, особенно в сложных случаях амплитудного распределения, необходимых для снижения уровня боковых лепестков (УБЛ).

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Для оценки влияния точности установки фазы в ППМ на ДН было принято предположение, что модель АФАР представляет собой эквидистантную линейную антенную решетку, состоящую из 100 изотропных излучающих элементов, которые расположены друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны. В качестве исследовательского критерия было использовано понятие среднего УБЛ диаграммы направленности [14, 15]. Этот параметр, определяющий общую помехозащищенность устройства, особенно актуален в сложной сигнальной обстановке, характеризующейся наличием большого количества различных источников радиоизлучения с произвольных направлений. Расчет ДН производился методом Монте-Карло для 100 реализаций случайной величины фазовой ошибки. В рамках модели заданной АФАР рассчитывалось семейство ДН для каждой реализации и определялся средний УБЛ. На рис. 7 представлены графики зависимости среднего УБЛ от СКО ошибки установки фазы для трех типов амплитудных распределений.

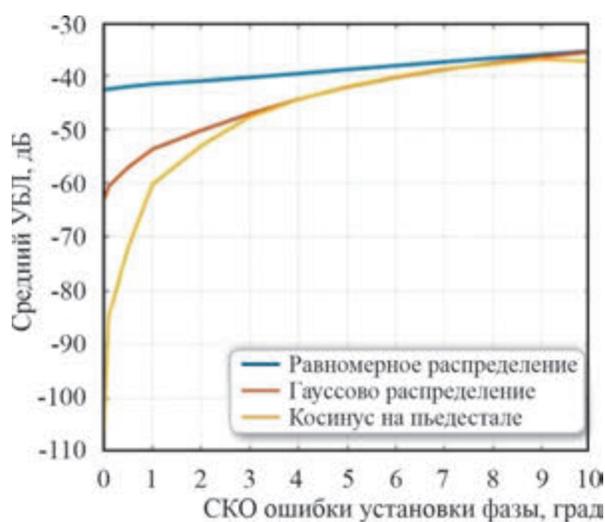


Рис. 7. Зависимость среднего УБЛ от СКО ошибки установки фазы для некоторых амплитудных распределений

Как видно из графика, ошибка установки фазы влияет на все исследуемые амплитудные распределения. На равномерное распределение влияние относительно небольшое, но при использовании сложных амплитудных распределений и СКО установки фазы <1 град наблюдается существенное спадание кривых соответствующих зависимостей. Это и есть самый интересный участок характеристики с точки зрения создания высококачественных АФАР с низким УБЛ [15].

6. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

Существенным отличием КМ от дискретных фазового и амплитудного модуляторов является то, что он может осуществлять высококачественную векторную модуляцию только сигнала определенной мощности, не менее 12...15 дБм. Это означает, что его использование возможно только в трактах передатчика и гетеродина, работающих в режиме насыщения. Регулировать амплитуду сигнала в приемном тракте таким образом невозможно.

Структурная схема ППМ на основе КМ, свободная от указанного недостатка, показана на рис. 8. Ее основное отличие от схемы, представленной ранее на рис. 1, б, состоит в том, что преобразование принимаемого сигнала на первую промежуточную частоту (ПЧ1) производится уже внутри ППМ. Это осуществляется за счет быстрой коммутации режимов приема и передачи в блоки задающих генераторов (БЗГ) и соответствующей попеременной работы ППМ в этих двух режимах. Управление амплитудой принимаемого сигнала осуществляется дискретным аттенюатором на ПЧ1.

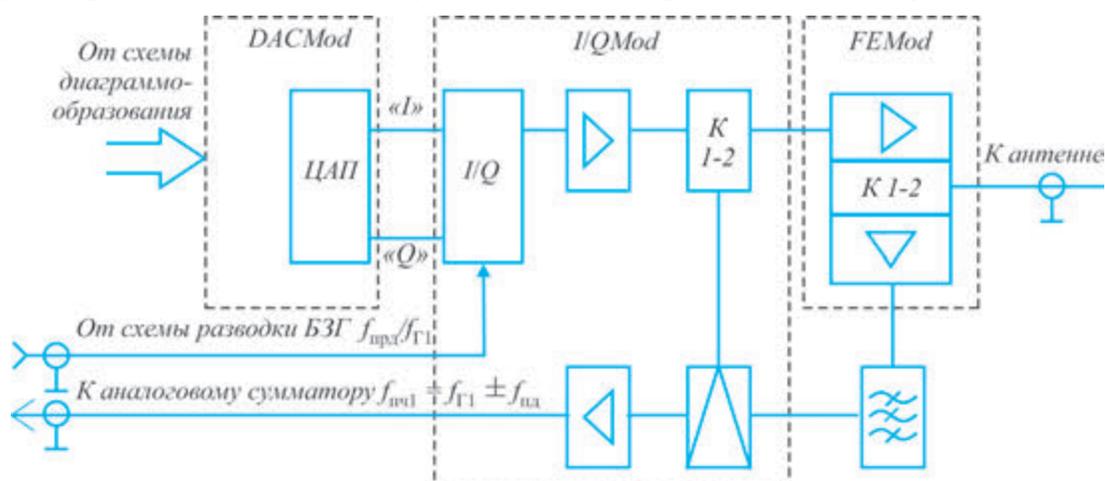


Рис. 8. Структурная схема ППМ на основе КМ

Пунктиром на схеме показан один из возможных вариантов декомпозиции схемы ППМ в несколько функционально и конструктивно законченных микромодулей:

- антенный модуль (*FEMod*);
- *I/Q*-модуль (*I/QMod*);
- модуль ЦАП (*DACMod*).

7. ЛТСС-МИКРОМОДУЛИ

Существенное уменьшение габаритных размеров чип-компонентов схемы диаграммообразования позволяет отказаться от общей ЛТСС-платы ППМ. Представляется целесообразным объединение функционально связанных чип-компонентов ППМ в гибридные ЛТСС-модули, как показано на рис. 9.

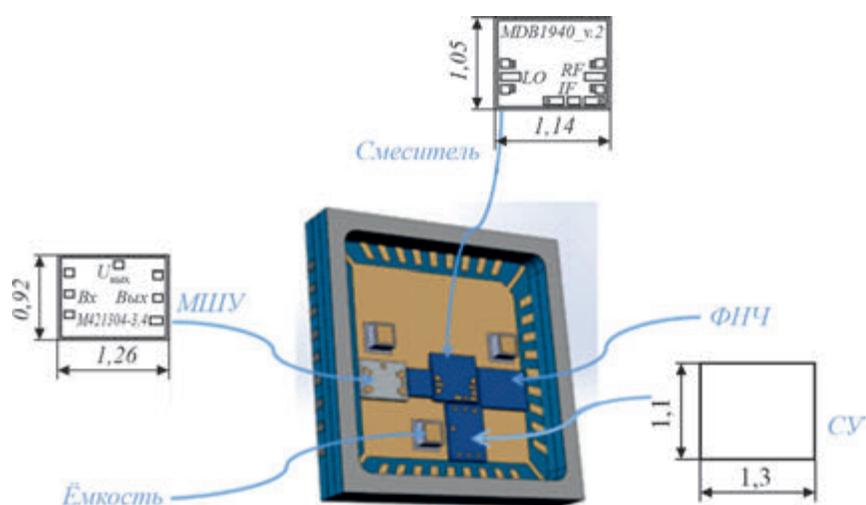


Рис. 9. Проект
LTCC-микромодуля

Такой подход позволяет существенно уменьшить как суммарную площадь многослойной LTCC-платы, так и дополнительно разделить ее на конструктивно законченные гибридно-интегральные SMD-компоненты. Важно отметить, что SMD-модули на основе LTCC могут быть достаточно эффективной защитой чип-компонентов СВЧ, находящихся во внутреннем миниатюрном герметизированном объеме.

Технология SMT на современном этапе является одной из наиболее отработанных для промышленного производства радиоэлектронных устройств СВЧ в диапазонах частот вплоть до 40 ГГц [16, 17]. Совершенствование применяемых материалов подложек, припоев и самих SMD-компонентов позволяет обеспечивать высокую надежность устройств СВЧ и стойкость к внешним воздействующим факторам. По сведениям российских производителей SMT печатных плат на высокочастотных СВЧ-ламинатах, они соответствуют условиям применения в составе бортовой аппаратуры, в т. ч. воздушного базирования.

Современные многослойные комбинированные (СВЧ+НЧ) печатные платы обеспечивают несколько конструктивных вариантов теплоотвода от SMD-компонентов, электромагнитной экранировки и защиты от негативного воздействия окружающей среды [18, 19]. При этом все технологические процессы производства печатных плат и монтажа SMD-компонентов являются групповыми или автоматизированными. Последнее крайне важно при серийном и массовом производстве СВЧ-аппаратуры, т. к. обеспечивает прекрасную повторяемость параметров.

8. КОРПУС ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

При наличии общего корпуса АФАР, описанная выше SMT-технология с применением LTCC-микромодулей позволяет отказаться от герметизации ПППМ. Это связано с тем, что чип-компоненты и так находятся в герметичных микромодулях LTCC, а сама печатная плата SMT герметизации не требует. Места паяных соединений защищаются от воздействия внешней среды, а сами линии передачи СВЧ и НЧ могут быть расположены во внутренних слоях многослойной печатной платы.

Такая технология защиты ПППМ от климатических ВВФ отвечает требованиям длительной эксплуатации даже без внешнего корпуса аппаратуры АФАР. Проблемы могут возникать только в самых жестких условиях – в тропиках. Ну а для временной защиты чип-компонентов ПППМ до установки их в корпус АФАР данная технология подходит как нельзя лучше.

Один из возможных конструктивных вариантов реализации ППМ квадратурной АФАР в 3-см диапазоне, в соответствии со структурой, приведенной ранее на рис. 8, показан на рис. 10.

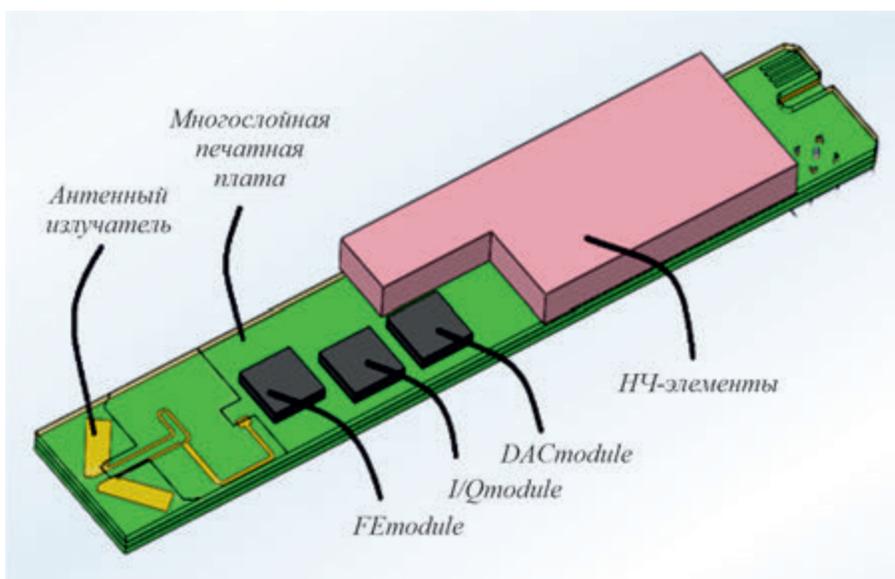


Рис. 10. ППМ квадратурной АФАР в 3-см диапазоне

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье инженерные аспекты применения квадратурной модуляции в системах диаграммообразования современных АФАР позволяют сделать следующие основные выводы:

- открывается перспектива существенного снижения материалоемкости GaAs чип-компонентов схемы диаграммообразования – одной из основных составляющих формирования стоимости ППМ АФАР;
- появляется возможность многократного уменьшения габаритов LTCC-компонентов ППМ и выполнения их в виде гибридно-интегральных герметичных SMD-микромодулей;
- становятся реальными изготовление ППМ по SMT-технологии на основе многослойных комбинированных СВЧ-ламинатов и интеграция с излучателем;
- удастся кардинально улучшить точность установки фазы сигнала на выходе ППМ, что позволяет перейти на новый качественный уровень диаграммообразования АФАР, особенно в случае сложных амплитудно-фазовых распределений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Divaydeep Sikri. Multi-beam phased array with full digital beamforming for SATCOM and 5G / Divaydeep Sikri, Rajanik Mark Jayasuriya // Farnborough. – UK, 2019.
2. Козел, В. М. Особенности технологии Beam Forming в сетях 5G / В. М. Козел. – Минск, 2020.
3. Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, В. А. Жерновенков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1.
4. Приемопередающие модули АФАР СВЧ-диапазона / Под ред. А. А. Борисова. – М.: Курс, 2022. – 200 с.
5. Кочемасов, В. Н. Твердотельные СВЧ-фазовращатели. Ч.1 / В. Н. Кочемасов, В. А. Шадский // Электроника НТБ. – 2017. – № 1.

6. **Кочемасов, В. Н.** Твердотельные СВЧ-фазовращатели. Ч. 2 / В. Н. Кочемасов, В. А. Шадский // Электроника НТБ. – 2017. – № 2.
7. **Мацькин, С. В.** Использование квадратурных модуляторов в передающем тракте активной фазированной антенной решетки X-диапазона / С. В. Мацькин, А. В. Гурковский, В. О. Фролов // Software Journal: Theory and Application. ISSN 2311-6749. – 2018.
8. **Pratik, D.** Patel digital beamforming using quadrature modulation algorithm / D. Pratik // International Journal of Engineering Research and Development. – 2012. – Vol. 4. – Issue 5.
9. **Патент № 2010147783/08А РФ.** Цифровой способ и устройство определения мгновенной фазы принятой реализации гармонического или квазигармонического сигнала: № 2463701С2, 10.10.2012 / Колотушкин Р. И.
10. **Бронштейн, И.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Бронштейн, К. Семендяев. – Физматгиз, 1962.
11. <https://www.qorvo.com/products/p/TGP2109>.
12. <https://www.analog.com/ru/products/hmc647.html>.
13. **Мищенко, Е. Н.** Средняя диаграмма направленности и способ снижения среднего уровня боковых лепестков цифровой антенной решетки / Е. Н. Мищенко, С. Е. Мищенко, Н. В. Шацкий // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 5. – URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.7>.
14. **ГОСТ Р 55787-2013.** Устройства для радиосвязи, радиовещания и телевидения антенно-фидерные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.
15. **Меркулова, Ж. В.** Компенсация амплитудно-фазового разброса в цифровой антенной решётке / Ж. В. Меркулова, В. И. Орешкин, В. К. Цветков // Естественные и технические науки. – 2017. – № 5 (107). – С. 185 – 188.
16. **Liam Devlin.** Корпуса для микросхем на миллиметровых волнах / Liam Devlin // СВЧ-электроника. – 2020. – № 3. – С. 32 – 34.
17. **Tim Smith.** Технологии корпусирования – ключ к использованию антенных решеток мм-волн / Tim Smith, Cameron Staton, Bill Rhyme // СВЧ-электроника. – 2020. – № 3.
18. **Хайрнасоев, К.** Определение эффективных параметров теплоотводящих слоев в многослойных печатных платах / К. Хайрнасоев // Электроника. – 2018. – № 6. – С. 136 – 139.
19. **Нань Цзян.** Эффективный отвод тепла в печатных платах для силовой электроники // Производство электроники. – 2013. – № 1. – С. 116 – 119.

Статья поступила 17 июня 2022 г.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632, 621.373.13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ РЕЖИМОВ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МОД В СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Д. А. Сидоров¹, А. А. Иванов^{2,3}, Р. М. Розенталь^{2,3}

¹АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород

²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

В работе экспериментально продемонстрировано существование режимов самосинхронизации мод, при которых происходит генерация последовательностей коротких импульсов в ЛБВ с запаздывающей обратной связью.

КС: ЛБВ с запаздывающей обратной связью, режим самосинхронизации мод, генерация последовательностей коротких импульсов

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF MODE SELF-SYNCHRONIZATION REGIMES IN A HELIX TWT WITH DELAYED FEEDBACK

D. A. Sidorov¹, A. A. Ivanov^{2,3}, R. M. Rozental'^{2,3}

¹JSC «RPE «Salut», Nizhny Novgorod

²IAP RAS, Nizhny Novgorod

³FSAEI HE «National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod»

The paper experimentally demonstrates the existence of mode self-synchronization regimes, in which sequences of short pulses are generated in a TWT with delayed feedback.

Keywords: TWT with delayed feedback, mode self-synchronization regimes, generation of short pulse sequences

1. ВВЕДЕНИЕ

В физике лазеров получил широкое применение механизм генерации ультракоротких импульсов, основанный на эффекте пассивной синхронизации мод [1, 2]. Указанный эффект реализуется при установке в резонатор лазера нелинейного элемента (амплитудного фильтра), поглощающего излучение малой амплитуды и прозрачного для излучения большой интенсивности. В результате возникает синхронизация мод резонатора, при которой излучение лазера представляет собой

периодическую последовательность ультракоротких импульсов высокой мощности. Как показано в работах [3–6], данный метод генерации импульсов может быть использован в СВЧ-электронике. При этом генератор должен состоять из активного элемента (электронного усилителя) и нелинейного насыщающегося поглотителя, включенного в цепь обратной связи.

Вместе с тем в физике лазеров достаточно давно известен и эффект самосинхронизации мод, при котором генерация последовательностей импульсов возможна без применения дополнительных элементов [7–9]. В СВЧ-электронике впервые режимы самосинхронизации мод были теоретически обнаружены в модели лазера на свободных электронах с высокодобротным резонатором [10]. Предположение о существовании режимов самосинхронизации мод в черенковских ЛБВ с запаздывающей обратной связью впервые было сделано в работе [11]. Наконец, в работе [12] представлены теоретические исследования релятивистской ЛОВ с отражениями, в которой получены режимы периодической генерации импульсов, которые можно интерпретировать как режимы самосинхронизации мод.

В данной работе экспериментально продемонстрировано существование режимов самосинхронизации мод, при которых происходит генерация последовательностей коротких импульсов в ЛБВ с запаздывающей обратной связью.

2. ПРИНЦИП САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ЛБВ

Будем полагать, что в ЛБВ организована цепь обратной связи с достаточно большим коэффициентом передачи. Известно, что расстояние между собственными частотами такого генератора определяется выражением

$$\Delta f = \frac{1}{T(f)}, \quad T(\omega) = \frac{L}{V_{gr}(f)} + \frac{l}{v_{gr}(f)}, \quad (1)$$

где L и l – длины замедляющей системы и цепи обратной связи; $V_{gr}(f)$ и $v_{gr}(f)$ – соответствующие групповые скорости волны, которые в общем случае зависят от частоты.

Для случая слабой зависимости групповой скорости волны от частоты сигнала спектр частот можно считать эквидистантным, так что

$$\Delta f = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

В ЛБВ с цепью обратной связи возможны различные сценарии возникновения автомодуляционных режимов. В том числе и режима, при котором одновременно возбуждается несколько собственных частот [11, 13]. Если при этом фазы различных колебаний связаны определенным соотношением, то имеет место режим синхронизации мод.

Следуя работе [14], рассмотрим в качестве примера генерацию $2n + 1$ собственных мод с одинаковыми амплитудами A_0 . Будем полагать, что фазы мод φ_k связаны следующим соотношением:

$$\varphi_k - \varphi_{k-1} = \varphi_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Тогда амплитуда суммарной волны запишется в виде

$$A(t) = \sum_{k=-n}^n A_k(t), \quad A_k(t) = A_0 e^{i[(\omega_0 + k\Delta\omega)t + k\varphi_0]}, \quad (4)$$

где ω_0 – частота центральной моды, которая выбирается в качестве несущей частоты. Для простоты будет полагать значение $\varphi = 0$ и перепишем выражение (4) в следующем виде:

$$A(t) = a(t) e^{i\omega_0 t}, \quad a(t) = \sum_{k=-n}^n A_0 e^{ik\Delta\omega t}. \quad (5)$$

Из последнего выражения видно, что при условии $\Delta\omega \ll \omega_0$ функцию $A(t)$ можно считать гармоническим колебанием на частоте ω_0 , амплитуда которого зависит от времени по закону $a(t)$.

Рассмотрим случай $n = 2$, когда происходит синхронизация 5 мод. Для удобства выберем значения $\omega_0 = 2\pi$, $\Delta\omega = 0,1\omega_0$. На рис. 1, *a...d* построены зависимости от времени сигнала каждой из этих мод. Благодаря выполнению условия синхронизации (3), данные моды интерферируют друг с другом, в результате чего в суммарном сигнале образуются равномерно отстоящие друг от друга волновые пакеты (рис. 1, *e*).

Расстояние между волновыми пакетами составляет величину $T = 2\pi/\omega_0$, а ширина пакета по полувысоте $\tau \approx 2\pi/(2n+1)\Delta\omega = 1/\Delta F$, где ΔF – полная ширина спектра генерации. Максимальная интенсивность волновых пакетов в простейшем случае пропорциональна квадрату числа генерируемых мод, в силу чего синхронизация мод может использоваться для получения последовательностей коротких импульсов с большой пиковой мощностью.

При учете реальной формы распределения спектральных линий (например, когда модовый спектр имеет гауссово распределение) получаются более сложные выражения для длительности и амплитуды генерируемых импульсов (см. [14]). Однако качественный вид решения в виде периодической последовательности импульсов не претерпевает существенных изменений.

Отметим, что получение в ЛБВ импульсов с пиковой мощностью, значительно превышающей мощность в режиме стационарной генерации, обсуждалось ранее в целом ряде работ. Так, в работе [15] экспериментально зарегистрированная максимальная мощность усиленных коротких импульсов на порядок превосходила рабочую мощность ЛБВ. В дальнейшем этот эффект получил теоретическое объяснение в работе [16], где отмечалось, что существенное увеличение мощности в импульсе по сравнению с мощностью монохроматического сигнала связано с аккумулярованием в коротком импульсе энергии электронов, нелинейно взаимодействующих с ним в течение достаточно большого промежутка времени. Подобный эффект достаточно ярко проявляется в том числе и в режиме синхронизации мод в системе ЛБВ с насыщающимся поглотителем в цепи обратной связи [5]. Наконец, в работе [17] было показано, что при определенных условиях пиковая мощность усиливаемого в ЛБВ импульса может многократно превосходить даже среднюю мощность электронного потока.

Вместе с тем для реализации рассмотренных эффектов наиболее существенной проблемой является выполнения условия (3), т. е. обеспечение фиксированной разности фаз между генерируемыми модами. Одним из известных механизмов, в том числе реализованных в СВЧ-технике, является использование так называемого «насыщающегося» поглотителя, который сильно поглощает сигналы с малой амплитудой, при этом практически полностью пропускает сигналы с большой амплитудой. В отечественной литературе получил также распространение термин «экспандер» [18].

При определенных условиях включение такого элемента в цепь обратной связи позволяет обеспечить преимущество сфазированных осцилляций мод, дающих последовательность мощных коротких импульсов на выходе системы. В то же время существуют достаточно серьезные препятствия в создании насыщающихся поглотителей СВЧ-диапазона, способных работать со значительными уровнями мощности.

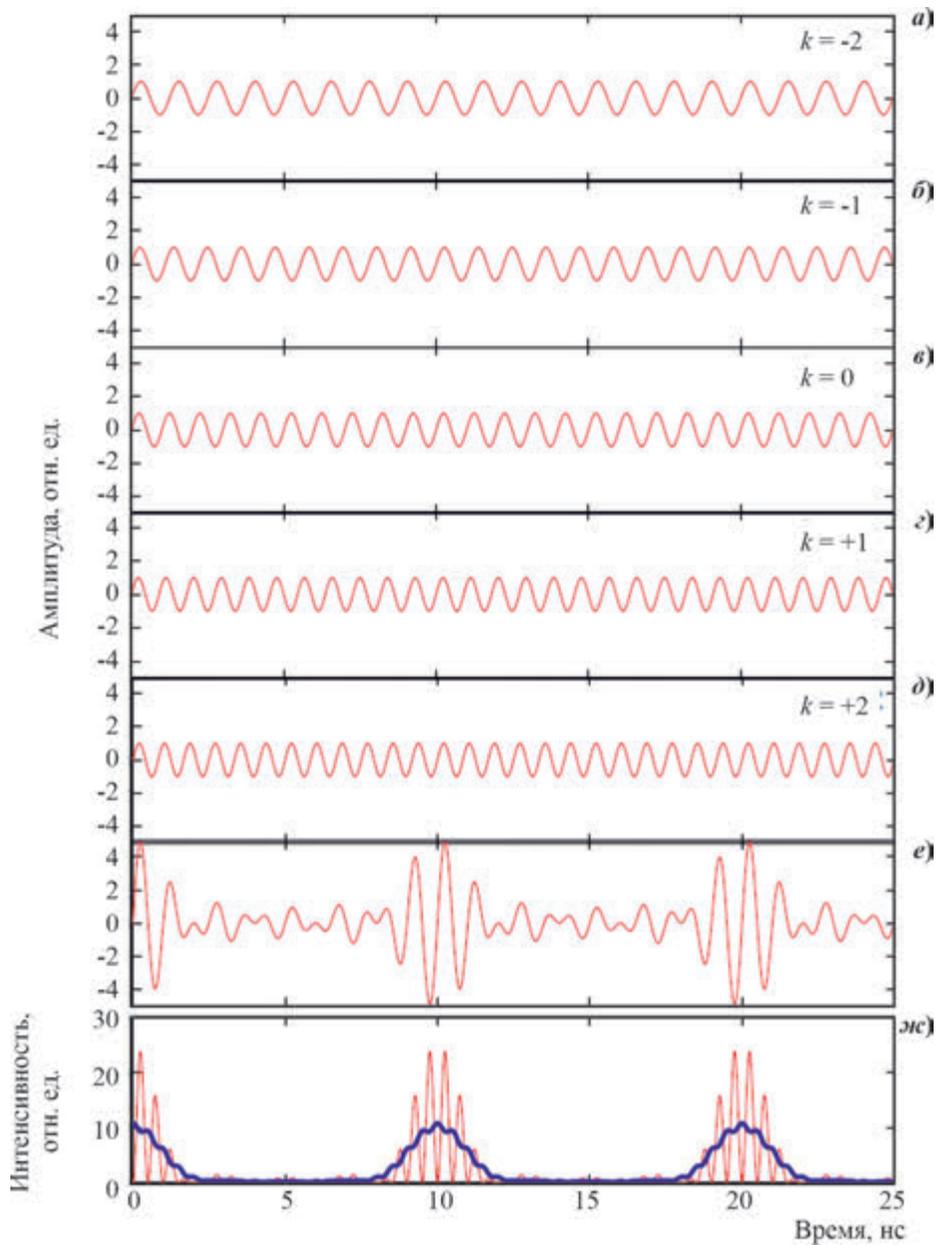


Рис.1. Иллюстрация принципа синхронизации мод с эквидистантным спектром:
a...d – зависимости сигнала от времени для пяти мод с величиной отстройки от несущей частоты $k\Delta\omega$; *e* – зависимость от времени суммарного сигнала; *жс* – зависимость от времени интенсивности суммарного сигнала (сплошная утолщенная линия – сплаженное значение интенсивности)

В работе [10] при исследовании модели СВЧ-генератора с распределенным взаимодействием были обнаружены режимы генерации последовательностей коротких импульсов. Было показано, что при определенных параметрах возникает ситуация, когда часть собственных мод генератора попадает в зону поглощения, определяемую отрицательным значением активной части электронной восприимчивости. Предположительно, за счет нелинейной связи между возбуждаемыми

частотами в системе возникает «встроенный» насыщающийся поглотитель, который и обеспечивает связь между фазами отдельных колебаний и формирование на выходе последовательности импульсов.

Следует отметить, что, хотя ЛБВ усиливает все частоты, находящиеся в полосе усиления, при замыкании цепи обратной связи часть мод не возбуждается из-за неправильной фазировки. При рассмотрении линейной теории генератора с цепью обратной связи временной инкремент данных частот оказывается отрицательным, что и дало название данной области «зона поглощения». В нелинейной теории данный эффект наглядно проявляется в зависимости стартовых условий ЛБВ-генератора от набега фазы в цепи обратной связи [11].

Учитывая, что используемая модель может быть использована в том числе для описания динамики ЛБВ с цепью обратной связи, представляет интерес экспериментальное исследование возможностей получения режимов самосинхронизации мод.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ

Для исследования был выбран макет спиральной ЛБВО S -диапазона, аналогичный исследованной в работе [19]. Коэффициент усиления в линейном режиме составлял до 35 дБ, выходная мощность – до 10 Вт. Для получения нестационарных режимов генерации часть выходного сигнала через регулируемый аттенуатор подавалась на вход лампы. Диапазон изменения глубины обратной связи $S = -40 \dots -6$ дБ. Форма выходного сигнала регистрировалась цифровым осциллографом с шириной полосы 12 ГГц и частотой дискретизации 50 миллиардов выборок в секунду.

По мере увеличения глубины обратной связи в системе последовательно происходило самовозбуждение генератора и переход к режимам периодической автомодуляции при $S \approx -30$ дБ (рис. 2, *a*). Период автомодуляции составлял около 8 нс, что было близко к значению суммарного времени прохода сигнала по ЛБВ и цепи обратной связи. При дальнейшем увеличении глубины обратной связи в выходном сигнале появлялась достаточно большая постоянная составляющая, на фоне которой происходили периодические выбросы (рис. 2, *b*). Далее возникала область, в которой происходило обострение формы данных выбросов (рис. 2, *в*). Наконец, еще большее увеличение глубины обратной связи приводило к расширению выбросов (рис. 2, *г*) и последующей хаотизации колебаний при $S \approx -6$ дБ (рис. 2, *д*).

Наибольший интерес вызвал режим с наиболее короткой длительностью выбросов, составляющей около 3 нс (рис. 2, *в*). Если предположить, что данный режим обусловлен эффектом синхронизации мод, то соответствующая ширина спектра колебаний должна составлять ~ 300 МГц. Вместе с тем полная ширина спектра в данном режиме составляла $\sim 1,5$ ГГц. Было сделано предположение, что в данном случае имеет место двухполосная нестационарная генерация. Для проверки этой гипотезы была выполнена цифровая фильтрация сигнала, в котором были выделены только высокочастотные спектральные компоненты. Полученный при этом сигнал представлен на рис. 3, *б*.

Хорошо видно, что отфильтрованный сигнал представляет собой последовательность импульсов длительностью $\sim 2,5$ нс по полувысоте, что хорошо соответствует ширине спектра, составляющей ~ 400 МГц по уровню -3 дБ. Таким образом, с высокой долей вероятности можно утверждать, что в высокочастотной области имеет место эффект самосинхронизации мод.

Основной вклад при этом, согласно представленному на рис. 3, б спектру, обеспечивают 5 мод. Для подтверждения когерентности полученных импульсов была построена функция автокорреляции:

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) A(t - \tau) dt, \quad (7)$$

где T – время реализации, на котором вычисляется указанная функция.

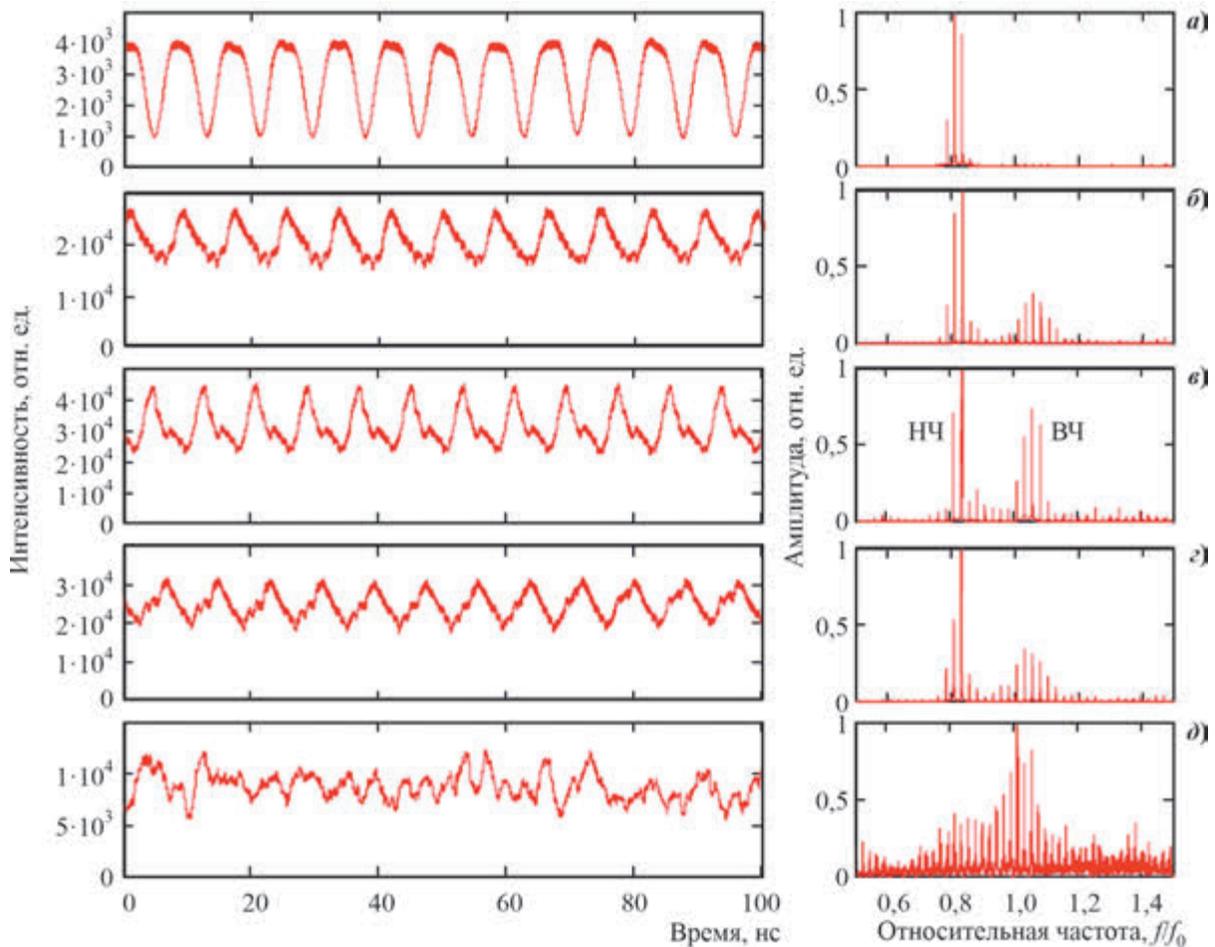


Рис. 2. Экспериментальные зависимости интенсивности выходного сигнала от времени и спектры излучения по мере увеличения глубины обратной связи

Из рис. 3, в видно, что модуль автокорреляционной функции принимает единичное значение с периодом, равным периоду следования импульсов, что является подтверждением когерентности генерируемых импульсов, т. е. стабильности разности фаз между генерируемыми частотами. Отметим, что аналогичные последовательности хорошо коррелированных импульсов были получены в недавних экспериментах с гирорезонансной ЛБВ, где эффект синхронизации мод достигался за счет использования насыщающегося поглотителя в цепи обратной связи [6].

Следует отметить, что в настоящее время остается неясной область оптимальных параметров ЛБВ с запаздывающей обратной связью, в которой могут достигаться импульсы минимальной длительности при максимизации их пиковой мощности. Однако можно надеяться, что экспери-

ментальная демонстрация режимов самосинхронизации окажет стимулирующее действие на дальнейшие теоретические исследования в этом направлении.

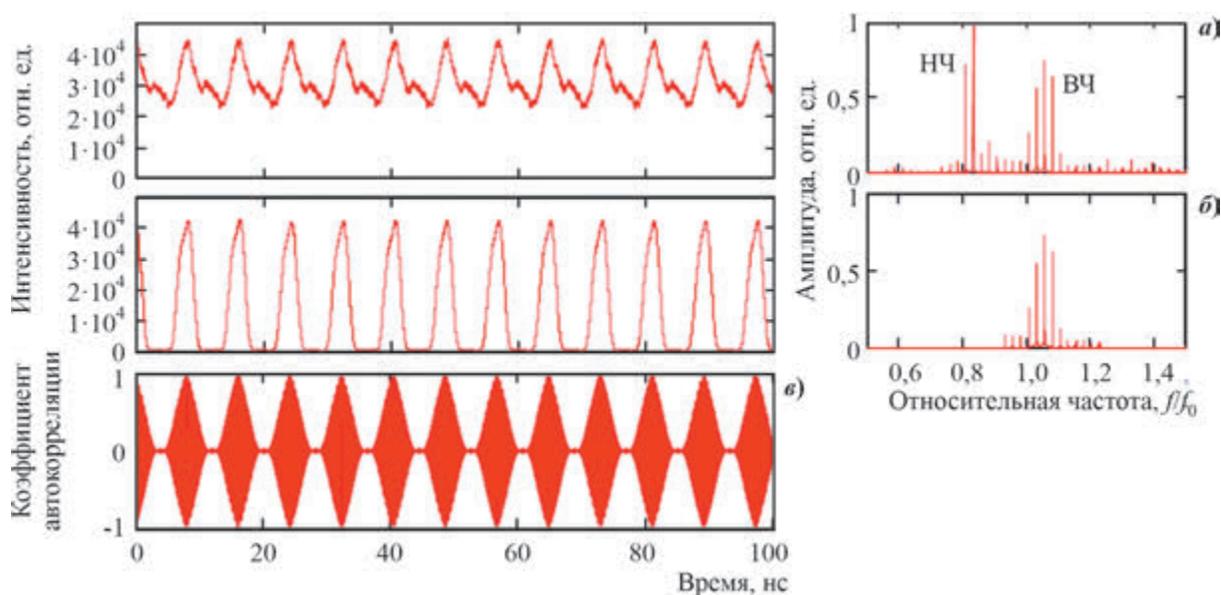


Рис. 3. Экспериментальная зависимость интенсивности выходного сигнала от времени и спектры излучения до цифровой фильтрации (а) и после исключения низкочастотных компонентов спектра (б), а также автокорреляционная функция отфильтрованного сигнала (в)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили принципиальную возможность получения режимов самосинхронизации мод в ЛБВ с цепью обратной связи. Хотя данный режим получен на фоне паразитной генерации в другой полосе частот, можно ожидать, что эта проблема может быть решена путем установки полосового частотного фильтра в цепи обратной связи. Дальнейшие исследования в этой области могут быть связаны с поиском возможностей получения импульсов меньшей длительности, что требует синхронизации большего числа мод. Также представляет очевидный интерес задача увеличения пиковой мощности импульсов, решение которой связано с поиском параметров, обеспечивающих оптимальные режимы работы усилителя и «встроенного» насыщающегося поглотителя.

Следует отметить, что генерация эквидистантного спектра частот микроволнового и терагерцового диапазонов со стабильным значением разности фаз (т. н. «частотные гребенки») представляет практический интерес для целого ряда приложений. К примеру, в работе [20] был предложен новый метод рефлектометрии плазмы с использованием излучения с гребенчатым спектром. В настоящее время данный метод развивается сразу несколькими научными группами [21–24].

Использование частотных гребенок позволяет существенно улучшить функциональные возможности в спектроскопии (чувствительность, разрешающую способность, скорость получения данных и др.), что отражено в работах [25–28]. Можно ожидать, что увеличение мощности подобного излучения позволит освоить методы нелинейной спектроскопии, которая активно развивается в последние годы на основе монохроматических источников [29, 30].

Работа выполнена в рамках государственного задания (договор № 0030-2021-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Haus, H. A.** Mode-locking of lasers / H. A. Haus // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – Vol. 6, No 6. – P. 1173 – 1185.
2. **Крюков, П. Г.** Лазеры ультракоротких импульсов / П. Г. Крюков // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 2. – С. 95 – 119.
3. **Cutler, C. C.** The Regenerative pulse generator / C. C. Cutler // Proceedings of the IRE. – 1955. – Vol. 43, No 2. – P. 140 – 148.
4. **Манькин, И. А.** Импульсные автоколебательные процессы в ЛБВ-генераторе с внешней обратной связью / И. А. Манькин, В. Г. Школьников // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30, вып. 1. – С. 111 – 115.
5. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в лампе бегущей волны с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи / Н. С. Гинзбург, Г. Г. Денисов, М. Н. Вилков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 17. – С. 44 – 52.
6. *K α* -band 100-kW subnanosecond pulse generator mode-locked by a nonlinear cyclotron resonance absorber / N. S. Ginzburg, S. V. Samsonov, G. G. Denisov [et al.] // Physical Review Applied. – 2021. – Vol. 16, No 5. – Art. No 054045.
7. **Морозов, В. Н.** Самосинхронизация типов колебаний в инжекционном ПКГ на GaAs / В. Н. Морозов, В. В. Никитин, А. А. Шеронов // Письма в ЖЭТФ. – 1968. – Т. 7, вып. 9. – С. 327 – 330.
8. **Магдич, Л. Н.** Нестационарные явления в лазере с взаимодействующими модами / Л. Н. Магдич // ЖЭТФ. – 1968. – Т. 53, вып. 3(9). – С. 802 – 807.
9. Самосинхронизация мод в ОКГ на рубине в режиме свободной генерации / А. Н. Бондаренко, Г. В. Кривошеков, В. М. Семибаламут [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. – 1971. – Т. 14, № 10. – С. 1615 – 1616.
10. **Гинзбург, Н. С.** Конкуренция и кооперация мод в лазерах на свободных электронах / Н. С. Гинзбург, М. И. Петелин // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1994. – Т. 2, № 6. – С. 3 – 26.
11. **Рыскин, Н. М.** Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью / Н. М. Рыскин // Изв. вузов. Радифизика. – 2004. – Т. 47, № 2. – С. 129 – 142.
12. **Тотьменинов, Е. М.** Генерация последовательности мощных ультракоротких микроволновых импульсов на основе эффекта сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны с отражателями на концах пространства взаимодействия / Е. М. Тотьменинов, В. В. Ростов // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47, вып. 1. – С. 51 – 54.
13. **Жидков, А. П.** Исследование сверхширокополосного генератора хаоса сантиметрового диапазона на основе ЛБВ / А. П. Жидков // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2014. – Т. 22, № 6. – С. 42 – 48.
14. **Звелто, О.** Принципы лазеров / Пер. под нач. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 720 с.
15. **Стрюков, Ю. А.** Радиоимпульсный рефлектометр пикосекундного диапазона / Ю. А. Стрюков, П. В. Миляев // Радиотехника. – 1983. – № 5. – С. 33 – 36.
16. **Манькин И. А.** Усиление коротких импульсов в ЛБВ / И. А. Манькин, В. Г. Школьников // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31, вып. 5. – С. 945 – 950.
17. **Гинзбург, Н. С.** Об особенностях усиления коротких электромагнитных импульсов при распространении вдоль стационарных электронных потоков / Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, А. С. Сергеев // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, вып. 23. – С. 8 – 15.
18. **Манькин, И. А.** Сверхширокополосные сигналы в СВЧ-системах. Ч. III. Нестационарная электроника. Генерирование сложных сигналов в ЛБВ (по данным отечественной и зарубежной печати за 1949 – 1984 гг.): Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ / И. А. Манькин, В. Г. Школьников. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1985. – Вып. 6 (1083).

19. Генерация широкополосного шумоподобного излучения с малой неравномерностью спектра на основе спиральной ЛБВО с запаздывающей обратной связью / А. А. Иванов, Р. М. Розенталь, М. Н. Вилков, Н. С. Гинзбург // Электронная техника. Сер. I. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2. – С. 80 – 86.
20. A novel, multichannel, comb-frequency Doppler backscatter system / W. A. Peebles, T. L. Rhodes, J. C. Hillesheim [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Vol. 81, No 10. – Art. No 10D902.
21. Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD / T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2018. – Vol. 89, No 10. – Art. No 10H118.
22. **Zhang, B.** Development of a frequency comb sweep microwave reflectometer in the linear device PANTA / B. Zhang, S. Inagaki, Y. Kawachi // Plasma and Fusion Research. – 2019. – Vol. 14. – art. No 1201131.
23. Design of a variable frequency comb reflectometer system for the ASDEX Upgrade tokamak / T. Happel, W. Kasparek, P. Hennequin [et al.] // Plasma Science and Technology. – 2020. – Vol. 22, No 6. – Art. No 064002.
24. Plasma characterization using a silicon-based terahertz frequency comb radiator / S. Razavian, J. Han, B. Jamali [et al.] // IEEE Sensors Letters. – 2020. – Vol. 4, No 9. – Art. No 3501304.
25. Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard / Y. D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 15, No 3. – P. 322 – 330.
26. High-resolution terahertz spectroscopy with a single tunable frequency comb / A. S. Skryl, D. G. Pavelyev, M. Y. Tretyakov, M. I. Bakunov // Optics Express. – 2014, Dec. 29. – Vol. 22 (26). – P. 32276 – 32281.
27. Enhanced dynamic nuclear polarization via swept microwave frequency combs / A. Ajoy, R. Nazaryan, K. Liu [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 115, No 42. – P. 10576 – 10581.
28. Molecular detection for unconcentrated gas with ppm sensitivity using 220-to-320-GHz dual-frequency-comb spectrometer in CMOS / C. Wang, B. Perkins, Z. Wang, R. Han // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. – 2018. – Vol. 12, No 3. – P. 709 – 721.
29. **Hübers, H. W.** High-resolution terahertz spectroscopy with quantum-cascade lasers / H. W. Hübers, H. Richter, M. Wienold // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 125, No 15. – Art. No 151401.
30. Sub-terahertz high-sensitivity high-resolution molecular spectroscopy with a gyrotron / G. Y. Golubiatnikov, M. A. Koshelev, A. I. Tsvetkov [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2020. – Vol. 10, No 5. – P. 502 – 512.

*Статья поступила 13 апреля 2022 г.,
после переработки – 9 июня 2022 г.*

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КЛЕТОК КРОВИ ПОСЛЕ КВЧ-ОБЛУЧЕНИЯ

А. А. Гусев¹, И. И. Власова¹, И. Г. Полников², К. Д. Казаринов²

¹ФГБУ ФНКЦ ФХМ ФМБА России, г. Москва

²ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Изучалось действие КВЧ-излучения на клетки цельной крови человека в присутствии бактерий *E.coli* с помощью световой микрофотографии с цифровой камерой. Получены экспериментальные результаты, свидетельствующие об изменении морфологического состояния нейтрофилов после КВЧ-облучения в зависимости от степени их активности.

КС: микроволновое излучение, нейтрофилы крови человека, морфология клетки, бактерии E.coli, микроскоп с цифровой камерой, КВЧ-диапазон

THE STUDY OF MORPHOLOGICAL STATE OF BLOOD CELLS AFTER EHF IRRADIATION

A. A. Gusev¹, I. I. Vlasova¹, I. G. Polnikov², K. D. Kazarinov²

¹FSBI FRCC PCM FMBA of Russia, Moscow

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

The effect of EHF radiation on human whole blood cells in the presence of *E.coli* bacteria was studied using light microphotography with a digital camera. Experimental results were obtained, indicating a change in the morphological state of neutrophils after EHF irradiation, depending on the degree of their activity.

Keywords: microwave radiation, human blood neutrophils, morphology of the cell, E-coli bacteria, microscope with a digital camera, EHF-range

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение биологической чувствительности микроволнового излучения КВЧ-диапазона началось более 50 лет тому назад в НПО «Исток» группой инженеров и научных работников совместно с представителями медицинских учреждений под руководством академика Н. Д. Девяткова [1]. Были отмечены экспериментальные и теоретические результаты изучения биологических эффектов КВЧ-излучения на различных уровнях организации живых организмов, предложены методы лечения в клинической практике, основанные на использовании КВЧ-облучения [2]. Эта работа продолжается и по сей день в различных учреждениях медико-биологического профиля. Актуальность направлению последние годы добавляет большой интерес научно-технического сообщества к развитию коммуникационных сетей 5G, которое предполагает

повышение плотности микроволнового излучения в среде обитания человека. Представители общественности развитых стран задаются вопросом, могут ли микроволновые излучения повлиять на здоровье людей [3]? Появились указания на то, что КВЧ-излучение повышает температуру кожи человека, способствует пролиферации клеток, окислительным и воспалительным процессам. Ученым предлагается приложить дальнейшие усилия для изучения воздействия микроволнового излучения на здоровье человека. При этом медики утверждают, что действующим фактором на биологический объект может оказаться не только незначительное повышение его температуры, но и так называемый «нетепловой эффект» излучения микроволн. Опубликованные результаты исследований не предоставляют необходимой информации для оценки опасности воздействия или же интерпретации вопроса о нетепловых эффектах [4]. Экспериментальные исследования преследуют цель определить механизм, провоцирующий появление медицинской патологии под действием микроволнового излучения. Статистические исследования помогают определить связь между воздействием микроволнового излучения и проявлением заболеваний среди населения. Факты биологической чувствительности микроволнового излучения, несмотря на их предварительный и противоречивый характер, демонстрируют характер многоуровневых взаимодействий излучений и биообъектов, приводящих к микробиологическим, неврологическим, воспалительным, репродуктивным и онкологическим заболеваниям [5].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Большинство исследований указывает на окислительные эффекты микроволнового излучения в биологических системах. 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 [6]. В предыдущей работе мы изучали влияние микроволнового излучения на активацию нейтрофилов в образцах цельной крови [7]. Данную работу можно рассматривать как продолжение предыдущей, мы посвятили её исследованию влияния микроволнового излучения на структурные изменения нейтрофилов в образцах цельной крови. Сравнение степени активации нейтрофилов в образцах крови проводили с помощью характеристики морфофункциональных признаков активации нейтрофилов на мазках крови.

В соответствии с протоколами, утвержденными Федеральным медико-биологическим агентством России, венозную кровь собирали от здоровых доноров с 3,8%-ным цитратом натрия в качестве антикоагулянта. Объем любых добавок к крови в наших экспериментах составлял не более 10 % от общего объема образца. К 300 мкл свежей крови добавляли опсонизированный зимозан в концентрации 0,6 мг/мл или бактерии (50 миллионов/мл). После смешивания кровь делили на КВЧ-облучаемые и контрольные образцы, каждый в 2-мл пробирках Эппендорфа. Контрольный образец инкубировали без какой-либо обработки при комнатной температуре. Термошейкер TS-100 (Biosan, Riga, Latvia) использовался для постепенного нагрева образцов крови (125 мкл).

Для морфометрического анализа мазки размещали на слайдах, фиксировали раствором May-Grünwald, а затем окрашивали пятнами Романовского. Все окрашенные мазки были обследованы под микроскопом (Motic BA223), оснащенным цифровой камерой 3CCD KYF32. Обработка изображения выполнялась с использованием системы анализа изображения на основе ПК (MECOS-C, Россия) в полуавтоматическом режиме, позволяющей оператору контролировать

идентификацию изображения ячейки. На каждом слайде подсчитывали не менее 1000 клеток, чтобы получить относительное количество морфологически нормальных и измененных нейтрофилов.

Нейтрофилы выделяли из свежей крови здоровых доноров с использованием цитрата натрия в качестве антикоагулянта. Выделение клеток проводили с использованием центрифугирования на градиенте плотности фикола-урографин (плотность смеси – 1,078 г/см³, центрифугирование – 20 мин, 400 g), лизиса оставшихся эритроцитов дистиллированной водой и двукратной отмывки нейтрофилов раствором Хенкса, не содержащим Ca²⁺ и Mg²⁺. Осаждение клеток осуществляли с помощью центрифугирования в течение 10 мин при 400 g.

Нейтрофилы ресуспендировали в плазме крови, полученной от этого же донора в концентрации 2,5·10⁶ кл/мл. Далее проводили инкубацию с бактериями контрольной пробы и пробы облученной. Мы оценивали влияние КВЧ-излучения на клетки крови, характеризуя морфологические изменения клеток при концентрации бактерий 50 миллионов/мл. Световые микрофотографии свидетельствуют о том, что добавление бактерий в кровь вызывало активацию нейтрофилов и, в меньшей степени, моноцитов (данные не показаны), но не влияло на эритроциты и тромбоциты.

Морфологически нормальный нейтрофил представляет собой сферическую клетку с сегментированным ядром и равномерно распределенную цитоплазматическую нейтрофильную грануляцию (рис. 1, а – без активации). При активации, клетки нейтрофилов подвергаются изменению, становясь более аморфными, образуются цитоплазматические вакуоли и наблюдается набухание ядер с потерей ядерной сегментации. Мы считали нейтрофилы высокоактивными, если они содержали 2-3 крупные вакуоли диаметром 3...5 мкм в цитоплазме или много вакуолей диаметром 1...3 мкм (чтобы вакуоли покрывали 10...40 % клеточной цитоплазмы). Слабо активированные нейтрофилы содержат 2...4 вакуоли в цитоплазме диаметром 1...2 мкм (вакуоли покрывают 1...10 % клеточной цитоплазмы). Интактные нейтрофилы не имеют вакуолей в цитоплазме или содержат одну небольшую вакуоль диаметром менее 1 мкм (менее 1 % клеточной цитоплазмы).

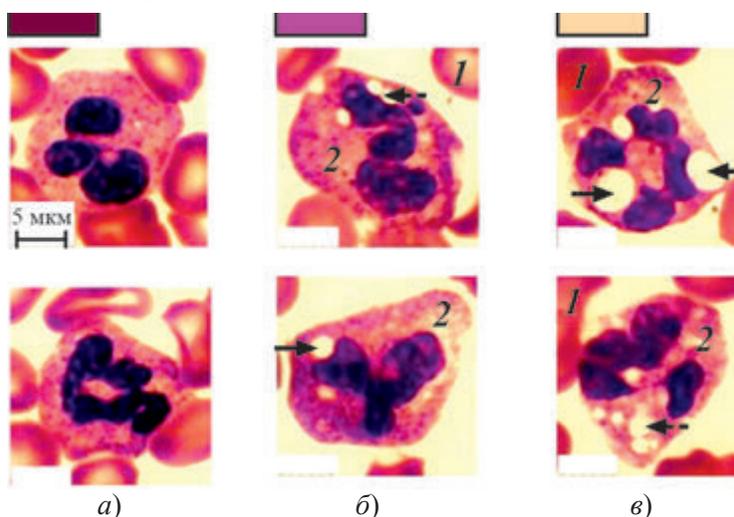


Рис. 1. Иллюстрация (пояснения в тексте) нейтрофилов различной степени активации в образцах цельной крови. Стрелками обозначены вакуоли разного размера (светлые образования сферической формы):

- а – нейтрофилы без активации; б – нейтрофилы слабой степени активации;
- в – высокоактивированные нейтрофилы

Без добавления к суспензии нейтрофилов *E. coli* как контрольные, так и облученные образцы были неповрежденными (см. рис. 1, *а*). Через 15 мин после добавления бактерий в обоих образцах наблюдались морфологические изменения, характерные для активированных нейтрофилов, но количество интактных нейтрофилов и нейтрофилов с морфологическими признаками слабой и сильной активации различалось по двум образцам (см. рис. 1, *б, в*). Из рис. 2 следует, что более половины нейтрофилов ($55 \pm 2,5$ %) были неповрежденными в контрольном образце, а процент сильно активированных клеток был низким ($6,5 \pm 1,1$ %). Напротив, в облученных образцах активированные нейтрофилы содержали более 80 % клеток ($40,5 \pm 2,2$ %) слабо активированных и $41,6 \pm 2,5$ % высокоактивных нейтрофилов, а количество интактных клеток было низким ($17,9 \pm 1,7$ %) – см. рис. 2.

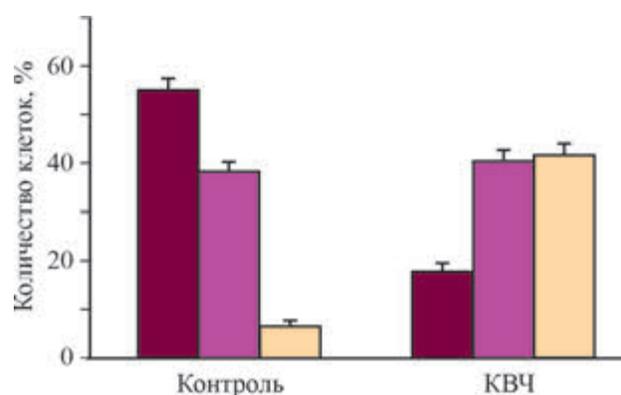


Рис. 2. Распределение неактивированных, слабо активированных и сильно активированных нейтрофилов по двум группам необлученных (контроль) и КВЧ-облученных клеток (КВЧ). Обозначения цветов в соответствии со степенью активации клеток приведены на рис. 1.

Важно отметить, что КВЧ-излучение не влияет на морфологические свойства тромбоцитов в образцах цельной крови. Как обычно в цитратной крови, отдельные тромбоциты или группы из нескольких тромбоцитов, контактирующих друг с другом, наблюдались как в контроле, так и в облученных образцах (на рисунке не показаны). Никаких признаков активации не наблюдалось в тромбоцитах после КВЧ-облучения в течение 15 мин.

Работа выполнялась в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в результате выполненной экспериментальной работы по изучению действия КВЧ-излучения на клетки цельной крови человека в присутствии бактерий *E. coli* с применением световой микрофотографии с цифровой камерой было обнаружено изменение морфологического состояния нейтрофилов после их облучения микроволнами, и это изменение зависело от степени активности клеток. Также было обнаружено, что КВЧ-излучение не влияет на морфологические свойства тромбоцитов в образцах цельной крови. Таким образом, предложен действенный высокочувствительный диагностический метод световой микрофотографии, позволяющий оценивать даже слабые изменения морфологического состояния клеток крови.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков, Н. Д.** / Н. Д. Девятков // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, № 9. – С. 1882 – 1890.
2. Миллиметровые волны в медицине и биологии // Сб. научн. тр. ИРЭ АН СССР. – 1989.
3. Factors affecting risk perception of electromagnetic waves from 5G network base stations / Tae Hwan Koh, Jae Wook Choi, Myungsoon Seo [et al.] // Bioelectromagnetics. – October 2020. – Vol. 41, issue 7. – P. 487 – 567.
4. **Myrtill Simkó.** 5G wireless communication and health effects – a pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz / Myrtill Simkó, Mats-Olof Mattsson // J. Environ. Res. Public Health. – 2019 Sep 13. – 16 (18). – 3406.
5. **Di Ciaula A.** Towards. 5G communication systems: Are there health implications? / Di Ciaula A. Towards // Int. J. Hyg. Environ. Health. – 2018. – № 221 (3). – С. 367 – 375.
6. 2016. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation / I. Yakymenko, O. Tsybulin, E. Sidorik [et al.] // Electromagn. Biol. Med. – Vol. 35. – P. 186 – 202.
7. Изучение механизма действия микроволнового излучения в КВЧ-диапазоне на клетки цельной крови / К. Д. Казаринов, И. И. Власова, Е. В. Михальчик // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1. – С. 52 – 59.

Статья поступила 11 июля 2022 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 51

МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

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

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

Предложен метод решения систем линейных неоднородных дифференциальных уравнений, при использовании которого решение представляется в явном виде. Метод справедлив для систем некоторых типов дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами и уравнений в частных производных. Приведен вывод волнового уравнения Шредингера.

КС: система линейных неоднородных дифференциальных уравнений, явный вид решения, волновое уравнение Шредингера

METHOD FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR NON-HOMOGENEOUS DIFFERENTIAL EQUATIONS

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

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

A method for solving a system of linear non-homogeneous differential equations is proposed using which the solution is represented in an explicit form. The method is valid for systems of some types of differential equations with variable coefficients and partial differential equations. The derivation of the Schrödinger wave equation is given.

Keywords: a system of linear non-homogeneous differential equations, the solution explicit form, Schrödinger wave equation

Решение систем дифференциальных уравнений – одна из фундаментальных проблем самой математики и прикладных задач математики во многих областях техники, включая и СВЧ-технику. Известно большое число методов решения дифференциальных уравнений [1 – 6], однако интерес к ним с годами не иссякает, возможно, потому, что такой интерес присущ ко всем разделам математики. Примеров тому много, но самый знаменательный – теорема Пифагора: в прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. За многие столетия математики получили 45 различных доказательств теоремы Пифагора, причем, если первые доказательства еще понятны любому школьнику, то дальнейшие доказательства становились настолько сложными, что для них необходимы более глубокие знания математики, но, тем не менее, эти доказательства интересны для развития математики, а их авторы получали международные премии и ученые степени.

В настоящей статье предлагается метод решения системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений, который отсутствует в известных авторам монографиях и учебниках [1 – 6].

Рассмотрим сначала самую простую систему из двух дифференциальных линейных неоднородных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{dx_1}{dt} + a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 = f_1(t), \quad (1a)$$

$$\frac{dx_2}{dt} + a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 = f_2(t). \quad (1б)$$

Продифференцируем первое уравнение (1а) по времени t и заменим в нем $\frac{dx_2}{dt}$ из уравнения (1б), а затем переменную x_2 из уравнения (1а). В результате получим дифференциальное неоднородное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + a_0 \cdot x_1 = f(t), \quad (2)$$

в котором коэффициенты $a_1 = a_{11} + a_{22}$ и $a_0 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, а функция $f(t) = \frac{df_1}{dt} + a_{12} \cdot f_2 - a_{22} \cdot f_1$.

Для решения уравнения (2) широко используется метод вариации постоянных [1 – 6]. Сначала решается характеристическое уравнение

$$\lambda^2 + a_1 \cdot \lambda + a_0 = 0, \quad (3)$$

определяются его корни λ_1 и λ_2 , и решение уравнения (2) записывается в виде

$$x_1(t) = C_1(t) \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2(t) \cdot e^{\lambda_2 t}, \quad (4)$$

где $C_1(t)$ и $C_2(t)$ – варьируемые функции. Выражение (4) подставляется в формулу (2), отсюда получается система двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{dC_1}{dt} \cdot e^{\lambda_1 t} + \frac{dC_2}{dt} \cdot e^{\lambda_2 t} = 0, \quad (5a)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{dC_1}{dt} \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 \cdot \frac{dC_2}{dt} \cdot e^{\lambda_2 t} = f(t). \quad (5б)$$

Система (5) решается методом Крамера относительно производных функций. Два полученных дифференциальных уравнения интегрируются, и, таким образом, определяются функции $C_1(t)$ и $C_2(t)$. После их подстановки в (4) получаем решение дифференциального уравнения (2). Заметим, что в этом методе окончательное решение не представимо в явном виде, поскольку на перечисленных этапах необходимо решать дифференциальные уравнения.

Перейдем теперь к изложению сути предлагаемого метода.

Запишем уравнение (2) с использованием найденных корней характеристического уравнения (λ_1 и λ_2) в виде системы двух дифференциальных уравнений первого порядка [7]:

$$\frac{dx_1}{dt} - \lambda_2 \cdot x_1 = y_1(t), \quad (6a)$$

$$\frac{dy_1}{dt} - \lambda_1 \cdot y_1 = f(t). \quad (6б)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (6б) получается в явном виде [1 – 6]:

$$y_1(t) = e^{\lambda_1 t} \cdot \int f(t) \cdot e^{-\lambda_1 t} + y_0 \cdot e^{\lambda_1 t}, \quad (7)$$

где y_0 – постоянная интегрирования.

Обозначим функциональное преобразование

$$F[u(t), \alpha] = e^{\alpha t} \cdot \int u(t) \cdot e^{-\alpha t}, \quad (8)$$

тогда $y_1(t) = F[f(t), \lambda_1] + y_0 \cdot e^{\lambda_1 t}$.

Без ущерба для дальнейшего изложения метода положим $y_0 = 0$.

В результате из уравнения (6а) получаем окончательное выражение в явном виде для неизвестной функции $x_1(t)$:

$$x_1(t) = F[y_1(t), \lambda_2] = F[F[f(t), \lambda_1], \lambda_2]. \quad (9)$$

Подставляя эту функцию в уравнение (1а), получим выражение в явном виде и для второй неизвестной функции $x_2(t)$.

Таким образом, исходная система двух уравнений (1) решена в явном виде.

Отметим, что предлагаемый метод применим для решения системы N линейных неоднородных дифференциальных уравнений с N неизвестными функциями. Кроме того, метод справедлив в случае, когда характеристическое уравнение имеет кратные корни, и для систем дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами порядка выше первого.

В отличие от метода вариации постоянных, предлагаемый метод может быть использован и для решения систем некоторых типов уравнений с переменными коэффициентами. К таким уравнениям, в частности, относится уравнение Эйлера.

Метод применим также к решению некоторых уравнений второго порядка в частных производных. Рассмотрим волновое уравнение, описывающее изменение скалярного потенциала φ в пространстве и во времени с постоянной скоростью v :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0. \quad (10)$$

Переносим два последних слагаемых в правую часть и применяя к полученной разности квадратов предложенный метод, получим систему двух дифференциальных уравнений

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \beta, \quad (11a)$$

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial \beta}{\partial z} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}. \quad (11b)$$

В простейшем случае функции β и φ могут быть связаны между собой линейной зависимостью $\beta = \lambda \cdot \varphi$. Умножая первое уравнение системы (11) на λ и складывая его со вторым уравнением, получим

$$\frac{2 \cdot \lambda}{v} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \Delta \varphi + \lambda^2 \cdot \varphi, \quad (12)$$

где $\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}$ – неполный лапласиан.

Умножив правую и левую части уравнения (12) на постоянную величину $i \cdot \frac{v}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right)$, где i – мнимая единица, получим

$$i \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = i \cdot \frac{v}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right) \cdot (\Delta \varphi + \lambda^2 \cdot \varphi).$$

Для мнимой λ , используя выражение для кинетической энергии: $E = \frac{m \cdot v^2}{2} = i \cdot \frac{v \cdot \lambda}{2} \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right)$, получаем $i \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1}{2 \cdot m} \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \Delta \varphi + E \cdot \varphi$.

Считая кинетическую энергию E равной потенциальной энергии U , приходим к известному уравнению Шредингера [8]:

$$i \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1}{2 \cdot m} \left(\frac{h}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \Delta \varphi + U \cdot \varphi.$$

Заметим, что вывод уравнения Шредингера, выполненный классиками квантовой механики, также не строг. «Во многих университетских курсах стремятся «вывести» уравнение Шредингера, однако на самом деле это уравнение ниоткуда не выводится, а образует основу квантовой теории. Поэтому мы предпочитаем его постулировать», – писал один из основателей отечественной школы квантовой механики [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Понтрягин, Л. С.** Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – М.: Наука, 1965.
2. **Эльсгольц, Л. Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1965.
3. **Анго, А.** Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1967.
4. Сборник задач по курсу высшей математике / Под ред. Г. И. Кручкович. – М.: Высшая школа, 1973.
5. **Карташев, А. П.** Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления / А. П. Карташев, Б. Л. Рождественский. – М.: Наука, 1976.
6. **Тихонов, А. Н.** Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М.: Наука, 1980.
7. **Балько, И. А.** Метод решения некоторых обыкновенных линейных дифференциальных уравнений / И. А. Балько, А. К. Балько // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 49 – 54.
8. **Блохинцев, Д. И.** Основы квантовой механики // Д. И. Блохинцев. – М.: Высшая школа, 1961.

Статья поступила 6 июня 2022 г.

ИСТОРИЯ

УДК 9

ГОРДОЕ ИМЯ «ИСТОКОВЕЦ»

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

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

THE PROUD NAME OF «ISTOKOVETS»

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

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

По данным архива отдела кадров НПП «Исток», который несколько последних лет возглавляет полковник в отставке Александр Иванович Сахаров, общее число сотрудников, работавших на «Истоке» (НИИ-160, НИИ ЭТ, опытном заводе, заводе «Рений», НПО «Исток», ФГУП «Исток», АО «НПП «Исток» им. Шокина), приближается к 60-ти тысячам человек. Каждый из них с гордостью считал и считает себя «истоковцем». В последних номерах научно-технического сборника мы рассказали всего лишь о 100 тружениках нашего славного предприятия, в основном ученых, имеющих ученую степень, или лауреатах научных премий. Мы и дальше будем продолжать развивать историю «Истока» и публиковать очерки, рассказы, интервью и воспоминания о великой роли сотрудников предприятия в укреплении обороноспособности любимой нашей Родины, памятуя слова дорогого и любимого нами ветерана Великой Отечественной войны, лауреата Государственной премии Российской Федерации, кандидата технических наук Александра Михайловича Храпко: «Надо рассказывать о выдающихся «истоковцах», ученых, инженерах, рабочих. То, что было сделано ими, будет удивлять не одно поколение. В их самоотверженной работе была истинная сила народа. Каждый из них достоин пусть не каменного, но хотя бы словесного памятника».



СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПЕРЕГОНОВ

27 июля 2022 года исполнилось 90 лет ведущему научному сотруднику НПП «Исток», кандидату технических наук, лауреату премии Совета Министров СССР, почётному радисту СССР, изобретателю СССР, заслуженному конструктору Российской Федерации Перегону Сергею Александровичу.

Очарованный радиоэлектроникой*

Е. И. Черненко, кандидат технических наук,
доцент филиала МИРЭА

Сначала был одноламповый приёмник. За поворотом ручки следовал лёгкий щелчок в динамике, освещалась шкала, а внутри приёмника неторопливо разгорались малиновым накалом радиолампы. Мальчишки послевоенной поры зачарованы были радио. В отличие от механически самоочевидных устройств, вроде патефона, швейной машинки или стенных ходиков, чудом было то, что из малинового свечения радиоламп может выходить человеческая речь или музыка...



С. А. Перегонов

С чего начинается призвание? Наверное, вот с этого детского удивления. По словам Сергея Александровича Перегонова, в шестом классе школы его очаровала электронная лампа.

А между тем рядом жили ребята, которые собирали своими руками действующие радиоаппараты. И Серёжа принялся делать по описанию в журнале «Радио» свой первый одноламповый приёмник. До окончания в 1950 г. десятилетки радиоловительство оставалось тропкой в сад реальных чудес. Разумеется, сомнений в выборе будущей профессии не было ни малейших. Но поступая с серебряной медалью в МЭИ, неожиданно оказался не на радиотехническом факультете, а на электровакуумном. Сперва огорчился, но потом урезонил себя и родителей доводом, что глубокое знание электронных приборов – основа для овладения любой радиотехникой...

И вот минули они, прекрасные московские студенческие годы, заполненные истовым освоением практически двух специальностей: электроники СВЧ по программе курса и радиотехники экстерном... Работу по распределению получил в подмосковном Фрязине, в «номерном» НИИ-160, который был головным предприятием СВЧ-электроники в Союзе. И попал Сергей в Центральное бюро применения (ЦБП) электровакуумных приборов. О такой удаче можно было только мечтать: это же как раз стык между электроникой и радиотехникой.

То были годы, когда стремительно совершенствовалась радиолокация, наращивая свою мощь по сравнению с уровнем, достигнутым во время второй мировой войны. Необходимость повышения помехоустойчивости, селекции движущихся целей и наведения на эти цели управляемых ракет ставили перед электроникой СВЧ новые и новые задачи...

*Статья была опубликована в «Информационном бюллетене «Истока» в 2012 г.

Не будет преувеличением сказать, что тогда от результатов работы фрязинского НИИ-160 (позже получившего наименование «Исток») зависел успех в незримом сражении с Западом. В ЦБП Сергею Перегонову довелось курировать новейший на ту пору класс СВЧ-приборов – лампы бегущей волны, выступая арбитром между электронщиками и радистами. В процессах разбирательства приходилось глубоко вникать в существо работы тех и других... В конце 50-х одной из серьезнейших проблем использования ЛБВ в радиолокационных системах стала нестабильность фазовых характеристик этой лампы. От снижения этой нестабильности зависела возможность выделения низколежачих целей на фоне отражений от земной поверхности. Беда была в том, что электронщики не имели технических средств для измерений этого параметра, а радисты, чувствуя нестабильность фазы, что называется, на собственной шкуре, не владели возможностью как-то на нее влиять... В ЦБП была открыта специальная НИР по исследованию фазовой нестабильности ЛБВ, и молодой инженер стал ее научным руководителем.

Известно: самый лучший мастер своего дела бессилен без хорошего инструмента. И Сергей Перегонов взялся за создание фазоизмерительной установки. Вот где сгодился опыт радиолюбительства! Как хороший столяр для начала отлаживает свой фуганок, так он творил установку, которая чувствовала влияние на фазовые характеристики ЛБВ даже такого слабого фактора, как магнитное поле Земли. Шутили, что он может теперь исследовать «влияние Луны на рост телеграфных столбов». К тому времени он уже возглавил лабораторию, и ее молодежный коллектив с энтузиазмом проводил обследование десятка типов отечественных ЛБВ, обеспечивая радистов информацией об их фазовых характеристиках, а электронщиков – действенными предложениями по совершенствованию ламп. В 1964 г. по материалам этих работ Сергей Александрович защитил кандидатскую диссертацию. В начавшейся же вскоре вьетнамской войне американцы ощутили далеко не академические ее результаты: советские зенитные ракетные комплексы легко били даже «Фантомы», низко стелющиеся ради маскировки над джунглями.

А Перегонов жаждал новой задачи – вровень с только что выполненной. И такая задача возникла. Еще в 1959 г. группа сотрудников «Истока» во главе с А. С. Тагером создала первый полупроводниковый СВЧ-прибор – генератор на лавинно-пролетном диоде (ГЛПД). Разумеется, он был тут же глубоко засекречен. Но в 1964 г. американцы опубликовали статью некоего Риды, который теоретически предсказывал то, что уже практически было осуществлено в СССР. Стоило американцам предложения Риды реализовать, приоритет фрязинцев польхнул бы синим пламенем. Первооткрывателям разрешили опубликовать их результаты в открытой печати (журнал «Успехи физических наук»). Результаты же были такие: миниатюрный приборчик с низковольтным питанием выдавал мощность около 5 мВт на частоте 10 ГГц. Правда, он «шумел» при этом так, что не годился ни в качестве гетеродина в СВЧ-приёмниках, ни в качестве задающего генератора в СВЧ-передатчиках... Нужно быть энтузиастом и провидцем типа молодого Сергея Перегонова, чтобы разглядеть возможность создания на основе этого «русского чуда» радиостанции для направленной, т.е. скрытной, связи.

Высокие шумы ГЛПД и сильная зависимость частоты от температуры являются его органическим свойством, и невозможно было бы ожидать от электронщиков улучшения этих характеристик. Но Сергей Александрович предложил такое построение дуплексного СВЧ-приёмопередатчика, которым «убивалось» даже не два, а минимум четыре «зайца». Согласно его проекту, каждый из двух приёмопередатчиков содержал один СВЧ-генератор, являющийся одновременно и выходным каскадом передатчика, и гетеродином приёмника (это обеспечивало солидную экономию для батареи питания).

В 1965 г. по этим предложениям в лаборатории Перегонова всего за полгода была проведена опытно-конструкторская разработка «Кит». Созданная радиостанция имела габариты небольшой книги (217×142×36 мм – 1,1 дм³) при массе 1,5 кг (включая автономное питание) и потребляемой мощности 1,5 Вт. Испытания показали уверенную связь в секторе углов 17° на дальности более 2 км. Но при этом требовалась прямая видимость. Поэтому из возможных потребителей «Кита» предполагались военные моряки, т.к. на море такая видимость обеспечена.

Генеральный директор «Истока» С. И. Ребров встретился с начальником связи ВМФ адмиралом Г. Г. Толстоуцким. Выяснилось, что у моряков как раз остро стояла проблема связи между кораблями, движущимися группой в пределах прямой видимости. Корабельные УКВ-радиостанции имели круговые диаграммы излучения и, как следствие, большие мощности (до десятков ватт) для обеспечения связи в 20...30 км. В то же время самолеты радиоразведки противника могли обнаруживать это излучение за сотни километров, что демаскирует отряд и препятствует свободному радиообмену между кораблями. Единственным реальным средством внутриэскадренной связи оставались сигнальные прожекторы, которые бессильны в условиях дождя, тумана, задымленности и демаскируют корабли ночью.

Испытания «Кита» были проведены осенью 1965 г. в ходе учебных стрельб на Черноморском флоте. Так как по программе учений расстояние между кораблями не превышало 2,5 км, связь проверялась на этой дальности. Качество связи было хорошим и устойчивым, несмотря на сильную качку. Радиоразведка же могла обнаруживать излучение «Кита» на расстояниях не более 500 м! Пожелания моряков свелись к увеличению дальности связи минимум до 10 км и обеспечению автоматического поиска вызова по азимуту и частоте.

Осенью 1968 г. на Балтийском флоте были успешно проведены испытания новой перегоновской радиостанции «Кит-1», получившей после принятия на вооружение ВМФ шифр Р-622. При работе с мостика корабля она обеспечивала дальность до 20 км. При связи между кораблем и шлюпкой расстояние надежной связи уменьшалось до 5...6 км.

В это же время появилось сообщение о разработке фирмой «Сильвания» аналогичной по назначению СВЧ-системы направленной связи для американских ВМС. Она имела примерно равные с Р-622 возможности, но была больше нашей радиостанции по объему и массе примерно в 50 раз. Тут и речи не шло об использовании «Сильвании» на шлюпках. Только в 80-х годах у американцев появятся близкие аналоги наших «Китов».

Выиграв качество в соревновании с американцами, главный конструктор Перегонов решал уже вопросы количественные. Нужно было наладить серийный выпуск Р-622. На опытном заводе «Истока», предприятии электронной промышленности, в 1971 г. начали выпуск чисто радиотехнической продукции. Это обернулось немалыми трудностями как для главного конструктора радиостанции, так и для генерального директора НИИ. Тем не менее, вслед за разработкой системы внутриэскадренной связи для ВМФ С. А. Перегонов принялся за разработку низовой малоканальной радиорелейной линии «Радан».

В то время для обеспечения связи на уровне село – район и на уровне район – область ЦНИИС МС разработал 12-канальную аппаратуру уплотнения с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), которая работала по кабелям на расстоянии до 30 км. Замена кабельных линий радиорелейками типа «Радан» обещала существенный экономический эффект и ускоряла ввод. Опыт использования ГЛПД в радиостанции Р-622 был здесь совершенно бесценным. Однако потребовалось выполнить значительный объем работ, включая многомесячную опытную экс-

платацию, чтобы оптимально решить вопросы совмещения разрабатываемой РРС с аппаратурой ИКМ, особенно с учетом невысокой квалификации обслуживающего персонала низовых сетей.

Разработку «Радана» в лаборатории Перегонова вела практически та же группа инженеров, которая создавала Р-622. И как прежде, аппаратура выполнялась на базе волноводных СВЧ-элементов. Но часть лаборатории была занята совершенно новым и перспективным делом – схемотехникой гибридно-интегральных микросхем. Перегонов видел великолепные возможности этого направления и сумел убедить руководство «Истока» в необходимости на предприятии соответствующей технологической базы. Вскоре успехи оказались весьма существенными. Были созданы в микрополосковом исполнении СВЧ-генераторы, преобразователи частоты, переключатели, полосовые фильтры и т. п. В 1974 г. лаборатория Перегонова была преобразована в радиоэлектронный отдел, целью которого поставлено было создание на основе ГИС СВЧ не только сложных комплексированных узлов и модулей для радиоаппаратуры, но и собственной «истоковской» микроэлектронной радиоаппаратуры средней степени сложности с законченными функциональными возможностями.

Сам Сергей Александрович вскоре вынужден был отказаться от руководства новым отделом. Возрастающий груз чисто административных хлопот становился все большей помехой для решения творческих задач. Над душой Перегонова «висели» освоение Р-622 в серийном производстве, назревающие работы по совершенствованию этой радиостанции с использованием гибридно-интегральных технологий, а также по аналогичному совершенствованию низовых РРС и в недалекой перспективе – их серийное освоение производством.

Однако новый отдел, похоже, становился «инструментом» в замыслах генерального директора Реброва. Как раз в эти годы, после угона предателем Беленко в Японию советского истребителя, стало совершенно очевидно, что наша авионика, содержащая в своих блоках еще... электронные лампы, отстает от уровня нашей же авиации. Американские эксперты признали доставшийся им советский самолет и его двигатель шедеврами! Разработчики авиационной радиоаппаратуры в сложившейся ситуации все валили на электронщиков: мол, отстает у нас элементная база. Но это было неправдой. И Ребров вышел в правительство с предложением силами «Истока» срочно разработать соответствующие времени бортовой радиолокатор для «Сухих» и МиГов, а также активную головку самонаведения для ракет класса «воздух – воздух» по типу той, которую начали разрабатывать американцы по проекту AMRAAM. Идеи Реброва нашли в правительстве поддержку.

В мировой практике это называется вертикальной интеграцией. Такие гиганты, как «Хьюз», «Хьюлет-Паккард», «Самсунг», производящие в единой технологической «вертикали» все – от кремниевой пластины для интегральных схем до готового компьютера, демонстрируют могучий потенциал этой интеграции. Отсутствие необходимости взаимных согласований, как и возможности несогласий между электронщиками и радистами, которые были свойственны советской системе, способствуют быстрому и качественному решению возникающих проблем.

Но скоро сказки сказываются, не так скоро создается новая, тоже порой сказочная техника... В порядке же эпилога этой нашей истории скажем, что и бортовой радиолокатор, и головка самонаведения на «Истоке» были успешно созданы к середине 80-х годов. Для бортового радиолокатора С. А. Перегонов с сотрудниками разработали блок аналогового приемника. В серийном производстве были выпущены 3 тыс. комплектов Р-622, и ими оснащены несколько сотен боевых кораблей. Сергей Александрович Перегонов разработал радиостанцию «Эрстед», более легкую, чем Р-622, и обеспечивающую, кроме всего прочего, возможность связи при высадке

морского десанта. К сожалению, из-за начавшихся перемен в стране серийного выпуска ее не последовало. Выпущена была только небольшая головная партия, показавшая при натурных испытаниях прекрасные результаты.

Также успешно была завершена и разработка низовых РРС типа «Радан-2» нового поколения, выполненных полностью на интегральных схемах, включая СВЧ-тракт. В 1984 г. начали серийное производство. В министерском приказе при этом отмечено: «Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации сельских радиорелейных систем показал, что радиооборудование комплексов «Радан» обладает в сравнении с отечественными аналогами лучшими эксплуатационными и экономическими характеристиками. Поэтому целесообразно производить развитие сельской радиорелейной сети связи страны на базе РРС «Радан». За период 1980 – 2002 гг. выпущено 2500 комплексов «Радан», что, по самым скромным подсчетам, обеспечивает связью не менее 4 млн абонентов. За создание и внедрение РРС «Радан» Перегонов С. А., Калинычев Ю. А. и Кулаков А. А. стали лауреатами премии Совета Министров СССР. Труды Сергея Александровича были также отмечены орденом Трудового Красного Знамени. Приоритеты на его изобретения защищены десятками авторских свидетельств.

Сергей Александрович отмечает свой большой Юбилей. Но жажда реальных свершений осталась доминантной чертой его характера. Наиболее значительным вкладом его усилий в разработку систем связи за время с 1980-го является разработка РРС, действующих в режиме с кодовым разделением каналов (CDMA) и позволяющих организовывать сети типа «точка – много точек». Разработка РРС проводилась по заказу Государственного центра компьютерных технологий (ГЦКТ), который является идеологом данной системы. Было разработано два варианта РРС «Венец» на рабочие частоты 2,5 и 3,5 ГГц с общим числом телефонных каналов до 60, способных работать по 8 направлениям при дальности до 30 км. Обладающие повышенной помехо- и криптоустойчивостью, эти комплексы не уступают лучшим зарубежным аналогам, а отечественные аналоги вообще отсутствуют.

Под конец рассказа о Сергее Александровиче добавим, что он вовсе не являет собой образец эдакого сухаря от науки. Конечно, наука и техника – в его жизни главное. Но всех, кто сталкивался с Перегоновым, поражала не только его эрудиция. Он обаял своей добротой, остроумием. Очень много сил он отдавал людям, будучи избранным депутатом Фрязинского горсовета.

А если ко всему этому добавить, что в молодые годы он с блеском участвовал в знаменитой фрязинской команде – чемпионе КВН и до сих пор сохранил юность души, то портрет дорогого нашего Юбиляра Сергея Александровича Перегонова будет выглядеть во всей своей красе.

Слова о юбиляре

Сотрудники АО «НПП «Исток» им. Шокина», коллеги из НПК-7

Дорогой Сергей Александрович!

Наступил памятный день и торжественный момент для всех, кто шёл вместе с Вами эти, к сожалению, так быстро промелькнувшие годы.

Вы по праву относитесь к плеяде тех, кто зложил первые камни в основание «Истока», кто воздвиг его могучее здание, кто сделал его достойным представителем советской науки.

Можно много и долго перечислять Ваши заслуги и достижения. Мы же, Ваши близкие соратники и сподвижники, вспомним другое, возможно даже сокровенное.

Вспомним, как мы каких-то 50...60 лет назад собирались в Вашей (нашей) лаборатории и в Вашем (нашем) отделе, как с большой радостью и желанием помогали Вам закладывать в то время актуальнейшие основы применения приборов СВЧ, а затем «отшлифовывали крайугольные камни» интегральных схем и других элементов электроники СВЧ для применения их в отечественной радиолокации, как рады были, когда Ваши многолетние научные успехи завершились защитой кандидатской диссертации.

Любящим Вас коллективом, а не любить Вас было невозможно, вспомним, как приятно и полезно нам было работать вместе с Вами. Вы знали, как поставить эксперимент, как интерпретировать его результаты, где и когда опубликовать результаты работы, чтобы они стали известными и услышанными на всю страну. Все, кто вместе с Вами создавал новое в отечественной радиоэлектронике, всегда чувствовали Вашу поддержку и Ваше заинтересованное участие.

Маяком для нас было у Вас и другое – Вы постоянно показывали, как должен жить человек, которому всё интересно в мире. В техническом плане Вы убеждали нас, как важно с высокой точностью выточить на станке детали или разработать многоярусную гибридную интегральную схему; собрать быстро и основательно макет прибора, который зримо и наглядно представит, как будет выглядеть в будущем готовый прибор или созданная в Вашей умнейшей голове радиолокационная система, какие многочисленные функции она будет осуществлять.

Тягу к познанию окружающего мира Вы передавали всем, кто жил и работал вместе с Вами. На своем автомобиле Вы исколесили всю центральную Россию. Вместе со своей любимой супругой Ниной Михайловной, ведущим специалистом лаборатории незабвенного Александра Николаевича Королева, Вы посетили все старинные русские города, все памятные места России и Советского Союза. Затем на вечерах отдела Вы с увлечением делились впечатлениями о замечательных русских пейзажах, о ставших милыми нашему сердцу многочисленных исполнинских отечественных реках и мелких речушках, лесах и перелесках, озерах и озерцах. И это богатство необъятной нашей России делало внутренне богатым Вас, Вашу жизнь, а вместе с Вами и нас, Ваших сотрудников и соратниц. Вы не только сами любовались окружающим миром, Вы стремились донести эти чувства до всех нас. Огромное Вам спасибо!

Вы одним из первых во Фрязино стали снимать любительские кинофильмы. Ваши изыскания в этом направлении искусства вошли в историю славной фрязинской команды КВН, недолго, но звучно гремевшей на наш родной Советский Союз. И не только снимать фильмы, но и делать их настоящими произведениями искусства. Вы первый, возможно даже в стране, переделали свою любительскую кинокамеру в широкоэкранную, одним из первых внедрили цвет в любительскую практику. И сочетание любви к искусству с тягой к техническому творчеству сделали Ваши успехи в этой области достоянием всех.

В год своего Юбилея Вы достойно перелистываете страницы Вашей жизни, наполненной решением интересных для Вас и полезных для России технических проблем. У нас нет сомнений, что эта Ваша жизненная повесть будет продолжаться и дальше не менее яркой, плодотворной и интересной.

Будьте здоровы! Радуйтесь каждому новому дню, каждому лучику солнца, каждой капле дождя, каждой улыбке окружающих Вас людей!

В этом был и пусть остается источник Вашего долголетия!

Доктор технических наук Валентин Георгиевич Калина

После открытия сотрудниками НИИ-160 («Истока») нового физического явления в полупроводниках и создания на его основе лавинно-пролетных диодов (ЛПД) молодой директор предприятия С. И. Ребров (37 лет) в 1966 г. принял решение образовать на предприятии новую структурную единицу – отдел 330. Начальником отдела был назначен молодой ученый Сергей Александрович Перегонов (34 года), а научным руководителем отдела – соавтор открытия, ученый-теоретик, доктор технических наук Александр Семенович Тагер (40 лет). Основная задача отдела 330 состояла в создании и освоении технологии полупроводниковых диодов, разработке диодов СВЧ (ЛПД, варакторов, $p-i-n$ -диодов) и генераторов на их основе, а также СВЧ-узлов и аппаратуры для РЛС.

Однако еще в 1954 году в Москве был образован НИИ-35 (НИИ «Пульсар»), который уже занимался разработкой полупроводниковых приборов. Попутно скажу, что в НИИ-35 из НИИ-160 перешла плодотворно работающая группа ученых и инженеров, и в их числе легендарный, поскольку его бюст установлен на входе в НИИ «Пульсар», кандидат технических наук Александр Васильевич Красилов, известный в нашей стране тем, что он в НИИ-160 вместе со своей дипломницей Сюзанной Мадоян создал практически в то же время, что и американцы, биполярный транзистор, и в отличие от американцев, с устойчиво стабильными параметрами, что было очень важно в то время в противоборстве СССР и США. Директор НИИ-160 С. И. Ребров со свойственной ему энергией на всех уровнях отстаивал интересы своего предприятия. В результате получилось, что два ведущих предприятия МЭП СССР начали чуть ли не враждовать, что, конечно, не нравилось министру А. И. Шокину. Кроме того, и внутри отдела 330 выявились разногласия. Имевший в стране научный авторитет профессор А. С. Тагер больше тяготел к теоретическим изысканиям, а радиоэлектронщика от бога С. А. Перегонова тянуло к разработке радиолокационной системной аппаратуры. В конце концов Сергей Александрович был назначен руководителем другого подразделения – отдела 270, свойственного именно его устремлениям. В это же время защитой своей докторской диссертации в 1968 году я, видимо, привлек к себе внимание С. И. Реброва, и он предложил мне, совершенно не по профилю моей научной работы, возглавить сектор 4, созданный на базе отдела 330. Не буду вдаваться в подробности, скажу только, что в 1972 г. произошла очередная реорганизация. Профессор А. С. Тагер вернулся в свой родной теоретический отдел, а руководителем отделения 4 был назначен Георгий Александрович Крысов. Мне пришлось временно покинуть «Исток» и перейти в НИИ «Циклон».

Кандидат технических наук Борис Иванович Москалев

Сергей Александрович не просто «генератор идей», а «генератор», не имеющий времени простоя. Многие попадали под его влияние, многие «питались» его идеями. С. А. Перегонов был руководителем нескольких коллективов, решавших разнообразные задачи. И везде ему удавалось найти то единственное, неповторимое, общее, что спаивало, казалось бы, разнородный конгломерат пестрых вопросов теории, разработки, конструирования, технологии, изготовления и внедрения в комплексную научно-техническую проблему. И, уловив эти черты нового комплексного решения, Сергей Александрович заражал своим энтузиазмом сотрудников, перекачивал в них свои идеи, организовывал эксперименты, их проверку, обобщения, всегда без излишнего администрирования, просто силой убеждения и доброго отношения к человеку и безграничной любви к научному поиску.

В Сергее Александровиче подкупает негаснущий интерес ко всему. В частности, он был активным кино- и фотолобителем. В 70-е годы на Всесоюзном конкурсе в Ленинграде получил диплом за свои фильмы, на Всероссийском киноконкурсе Общества охраны памятников культуры опять был первым. И во многих других областях человеческой деятельности Сергей Александрович всегда старался быть первым среди равных.

Кандидат технических наук Александр Карпович Балыко

Впервые я познакомился с Сергеем Александровичем в 1975 году. В то время мне было 25 лет, и я решил поступить в аспирантуру при НПО «Исток». Мой начальник лаборатории профессор А. С. Тагер, плодотворно работавший с аспирантурой, неожиданно воспротивился этому. Однако после недолгих наших препирательств: с его стороны («кандидатом можно стать и без аспирантуры») и моих («аспиранты могут летать на самолете за полцены, для меня поездки домой в Хабаровск – это очень существенно»), мои доводы все-таки перевесили.

На вступительный экзамен по специальности он пригласил, как я понимаю, двух своих друзей: Сергея Александровича Перегонова – начальника отдела 270 и Александра Александровича Шеногина – начальника отделения 8. На экзамене я очень волновался, так что на оба дополнительных вопроса С. А. Перегонова о работе генераторов СВЧ ответил, как потом мне сказал А. С. Тагер, просто неправильно. Выйти из неловкого положения помог мне тогда А. А. Шеногин. В результате члены комиссии все-таки поставили мне необходимую положительную оценку. Позднее, по рекомендации А. С. Тагера, я проштудировал книгу С. А. Перегонова (в соавторстве с М. В. Колосовым) о генераторах СВЧ. Тем не менее, на протяжении многих лет, постоянно общаясь с Сергеем Александровичем, я всегда ощущаю некий душевный трепет. В целом же добрые отношения ко мне обоих экзаменаторов и, конечно, А. С. Тагера до сих пор остаются в моей памяти.

Много раз мне приходилось присутствовать на различных семинарах и НТС предприятия с участием С. А. Перегонова, и я всегда с интересом вслушивался в вопросы, которые задавал Сергей Александрович. В тонкостях построения РЛС я разбирался слабо, но глубину озвученных С. А. Перегоновым проблем всегда понимал.

Длительный период Сергей Александрович был членом диссертационного совета при «Истоке», председателем которого был наш незабвенный академик Н. Д. Девятков, а я – ученым секретарем совета. Совет работал с 1988 г. до смерти Н. Д. Девяткова (2001 г.). В эти годы, к сожалению, молодежь устремилась в юристы, экономисты, психологи, а у молодых специалистов технических специальностей почему-то исчезло желание быть учеными, в том числе «остепененными». Николай Дмитриевич Девятков и заведующая аспирантурой при «Истоке» Наталья Анемподистовна Свешикова прилагали, прямо скажем, большие усилия, чтобы привести к защите диссертаций хотя бы тех сотрудников, которые окончили аспирантуру в советское время. Дважды в год всеми уважаемый академик собирал в своем кабинете потенциальных кандидатов вместе с их руководителями и призывал к надлежащему завершению их научной работы. С благодарственными словами к Н. Д. Девяткову и Н. А. Свешиковой – этим двум благожелателям пополнения «Истока» кандидатами и докторами наук, отмечу, что за 13 лет в нашем совете было рассмотрено 25 диссертаций. При этом в урну для голосования членами совета (Г. А. Алыбиным, В. Н. Батыгиным, А. В. Ваиновским, С. А. Зайцевым, С. С. Зыриным, С. Н. Ивановым, А. Н. Королевым, Г. А. Крысовым, А. Д. Митягиным, В. П. Сазоновым, Н. Д. Урсу-

ляком, И. М. Стародубовым, С. А. Перегоновым, С. Е. Рожковым) не было опущено ни одного «черного шара». Уникальный результат! Конечно, личность нашего академика в этом была определяющей, но и присутствие в совете мудрых, преданных науке, высоко порядочных отечественных ученых, таких, как Сергей Александрович Перегонов, досконально разбирающихся в сущности представленных диссертационных работ, играло существенную роль.

Четыре года, с 1996 по 2000, мы с Сергеем Александровичем были депутатами Фрязинского городского Совета. Каждую неделю один, а то и два раза мы участвовали в заседаниях Совета, которые иногда длились по шесть часов. Сергей Александрович был среди нас старейшим, самым мудрым и самым уважаемым человеком. Городские проблемы его волновали и как простого фрязинца, и как представителя КПРФ.

И сегодня меня восхищает его неумная энергия истинного творца науки. За период с 1987 по 2017 годы им выполнено 9 НИР и 13 ОКР, среди которых комплекс связи с кодовым разделением каналов; когерентная радиорелейная линия связи в различных частотных диапазонах и многие другие.

Здоровья, жизненного и научного долголетия Вам и Вашим родным и близким, дорогой и уважаемый наш Сергей Александрович!

ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ МЯКИНЬКОВ



Ю. П. Мякинков

Прошло чуть более 90 лет со дня рождения выдающегося ученого «Истока», начальника крупного отдела, кандидата технических наук, лауреата Ленинской премии Юрия Павловича Мякинкова.

Его родители Павел Афанасьевич и Анна Осиповна были крестьяне. Однако из-за бедности они вынуждены были уходить в отхожие промыслы – работали на плотках, баржах, коммерческих пароходах. В одной из таких поездок 3 июля 1929 года родился у них прямо «на Волге» мальчик, которого назвали Юрием и зарегистрировали в ближайшем населенном пункте – городе Вольске Саратовской области. После нескольких лет скитаний по стране семья возвратилась в родное село Владимирской области, где Юрий в 1947 году закончил 10 классов. Письменный экзамен по немецкому языку он сдавал в стихах, а золотую медаль не получил из-за грамматической ошибки в выпускном сочинении, написанном также в стихах.

В родном селе Красно он повстречал и свою будущую супругу Ольгу Семеновну. После окончания школы они вместе поехали в г. Горький (Нижний Новгород), где Юрий поступил в Государственный университет (ГГУ) на радиофизический факультет, а Ольга – в Педагогический институт на факультет иностранных языков.

Глубокие знания, полученные в ГГУ у выдающихся советских ученых и преподавателей А. А. Андропова, В. И. Гапонова, М. Т. Греховой, Г. С. Горелика, В. С. Троицкого, В. Л. Гинзбурга и других, не только способствовали развитию одаренного юноши, но и породили в нем интерес к физическим исследованиям в относительно новой области техники – электронике СВЧ.

В 1953 г. после окончания с отличием университета Юрий Павлович был распределен во Фрязино на уже хорошо известное в научных кругах предприятие НИИ-160 («Исток»). По воле судьбы талантливый молодой специалист оказался в лаборатории В. А. Афанасьева (впоследствии доктора технических наук, лауреата Ленинской премии, Героя Социалистического Труда), который стал не только его начальником, но и руководителем его научной работы по исследованию свойств ламп бегущей волны (ЛБВ).

В середине 50-х годов прошлого столетия для разработки электронных приборов, позволяющих существенно увеличить дальность действия радиолокационных станций, на «Истоке» на базе подразделений, возглавляемых Владимиром Александровичем Афанасьевым, Анатолием Павловичем Федосеевым и Игорем Ефимовичем Роговиным, был создан отдел 190 во главе с Верой Ивановной Мнойн. В этом отделе была организована лаборатория под руководством Ю. П. Мякинкова, к тому времени уже хорошо зарекомендовавшего себя при разработке широкополосных ЛБВ малой мощности в диапазоне частот 0,9...10 ГГц. Немногим позднее Юрий Павлович в ученом совете «Истока» защитил кандидатскую диссертацию.

Под руководством и при непосредственном участии Ю. П. Мякинкова были разработаны первые отечественные пакетированные, с магнитной периодической фокусирующей системой ЛБВ («Таймыр-2» и др.), с повышенным КПД. Им достигнуты значительные успехи в миниатюризации изделий средней мощности, созданы миниатюрные ЛБВ для радиорелейных станций «Электроника – Связь», уникальные конструкции ЛБВ для первого советского спутника связи, изделий специального назначения, в том числе и для комплексов С-400. Созданы новые, сверхмаломощные космические ЛБВ, которые явились основой для построения знаменитых в СССР спутников связи «Горизонт» и «Молния». Только на базе приборов Ю. П. Мякинкова стало возможным существование телевидения в СССР – нашей огромной по размерам стране. Десятки разработанных им ЛБВ были переданы в серийное производство на завод «Рений» и на заводы в другие города СССР. Он автор 30 научных трудов и 15 изобретений.

За выдающиеся заслуги перед отечественной наукой и техникой Ю. П. Мякинков в 1966 г. был удостоен Ленинской премии.

Его оптимизм, умение видеть перспективу, непрерывное стремление к новому служили прекрасной опорой для коллектива его лаборатории, отдела и НПК-8. Его исключительное трудолюбие, высокая ответственность, страстность и увлечение работой заражали всех, кто с ним работал. Его тонкий и проницательный ум, широкая эрудиция, готовность обсуждать, а зачастую и поддерживать любую фантастическую идею объединяли вокруг него таких же, как и он, сотрудников-энтузиастов.

Юрий Павлович Мякинков ушел из жизни 27 сентября 1997 года.

Сотрудники «Истока» хранят добрую память о замечательном человеке, уникальном ученом, одном из основателей новых научных и производственных направлений в отечественной СВЧ-электронике.

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ КОТЮРГИН

Е. А. Котюргин – кандидат технических наук, лауреат Ленинской премии (1984 г.), на протяжении многих лет плодотворно работавший в одной из самых трудоемких областей электронного приборостроения – технологии. Евгений Алексеевич первым на «Истоке» был удостоен высокого звания «Заслуженный технолог Российской Федерации».



Е. А. Котюргин

Е. А. Котюргин родился 5 января 1931 года в г. Котельнич Кировской области. После окончания в 1953 г. Ленинградского технологического института им. Ленсовета и года «странствий» в 1954 г. был принят на работу на бурно развивающееся предприятие в городе Фрязино, на котором проработал 56 лет, пройдя путь от инженера-технолога до главного технолога самого крупного подразделения «Истока» – НПК-2.

Уже в начале трудовой деятельности молодому специалисту доверили решать весьма важную и актуальную проблему, связанную с высоковольтной короной, возникающей вокруг керамического изолятора СВЧ-приборов. В короткие сроки Евгений Алексеевич с блеском решил поставленную перед ним задачу. Он изобрел простой и широкодоступный способ ликвидации короны, который на порядок увеличил срок службы СВЧ-приборов.

Глубокие знания, высокая эрудиция, огромное трудолюбие и беззаветная преданность отечественной науке и технике выдвинули Е. А. Котюргина в число самых перспективных молодых технологов предприятия. Под его руководством ставились и успешно решались задачи сварки металлов в твердом состоянии. Много творческих усилий было приложено Евгением Алексеевичем для получения новых композиционных систем для катодов приборов СВЧ. Особую признательность среди ученых и разработчиков получили его работы по созданию систем с молибденом и глубокому исследованию взаимодействия молибдена с двухэлементными сплавами. Эти работы на протяжении нескольких десятилетий не имели аналогов за рубежом, а их технология изготовления, основанная на порошковой металлургии, явилась крупным достижением советской школы катодников.

Им был разработан изящный способ сварки металлической фольги по цилиндрической поверхности катода.

В своих технологических работах Евгений Алексеевич широко применял новые методы: масс-спектральный анализ и ультразвуковой контроль.

После защиты кандидатской диссертации в 1972 году Евгений Алексеевич принял руководство крупной технологической лабораторией. В короткие сроки ему удалось сделать лабораторию носителем передовых идей технологии сварки металлов и керамики.

За крупные достижения в области диффузионной пайки в 1984 году Евгений Алексеевич Котюргин был удостоен Ленинской премии.

Последующие работы Е. А. Котюргина в большей части были связаны с применением в электронике СВЧ методов диффузионной пайки и сварки. В 80-е годы новые проблемы перед технологами встали в связи с широким применением в технологии изделий электронной техники металло-керамики. Появилась необходимость в простой и надежной технологии соединения металло-керамических изделий с основным металлом электровакуумных приборов СВЧ – медью, которая отличается особыми свойствами в вакууме. Евгений Алексеевич дал физическое объяснение некоторым видам диффузии металлов и предложил новый технологический способ получения высокопрочных диффузионных соединений. Для эффективной реализации этих технологий под его руководством были созданы уникальные полуавтоматические технологические установки. Одной из важных черт Евгения Алексеевича являлось то, что он всегда стремился создать такие условия работы сотрудни-

ков в технологических процессах, при которых их контакт с химически активными веществами был бы минимальным.

Другой привлекательной чертой Е. А. Котюргина являлось стремление к новому, желание исследовать и внедрить такие технологические методы, которые никто в мире еще не применял. Достижения «Истока» в области диффузионной сварки и пайки материалов внедрены на все предприятия отрасли.

В поворотный для «Истока» период, связанный с разработкой уникального изделия, Евгений Алексеевич становится главным технологом НПК-2. Он первым в стране разработал технологический процесс изготовления круглых дисков диаметром 20 см с плоскостностью по всей поверхности, не превышающей 0,08 мм. Примерно в это же время «Исток» начинает усиленно развивать твердотельное направление электроники СВЧ. Разработка СВЧ твердотельных изделий поставила новые задачи: создание гибридной интегральной технологии, технологии сборки модулей и обеспечение их надежности в процессе эксплуатации. В должности главного технолога подразделения Евгений Алексеевич большое внимание уделял организации структуры и расширению функций всех технологических служб, внедрению компьютерной техники при создании конструкторской и технологической документации, координации деятельности технологов отдельных направлений и многим другим проблемам.

Е. А. Котюргин – автор более 50 научных трудов и 40 изобретений.

В 2010 году Евгений Алексеевич ушел с руководящей должности, но остался работать в родном коллективе, начальником которого стал один из его учеников – кандидат технических наук Геннадий Федосеевич Корепин.

За время своей работы Евгений Алексеевич завоевал непререкаемый авторитет у разработчиков приборов и технологов «Истока» и других родственных нам предприятий и опытных заводов. Сотрудники различных предприятий страны приезжали на «Исток», чтобы привлечь Е. А. Котюргина к решению своих насущных технологических проблем. Пытливость, настойчивость, разносторонность знаний Е. А. Котюргина были хорошо известны на предприятии. Евгений Алексеевич активно помогал молодым сотрудникам найти свой путь в науке. На протяжении многих лет он входил в жюри конкурсов, конференций, выставок молодых ученых и специалистов «Истока».

Глубокое уважение сотрудников Е. А. Котюргин сыскал не только своими профессиональными знаниями, но и высокими человеческими качествами: доброжелательностью, надежностью, простотой в общении, развитым чувством ответственности за порученное дело. Это привлекало к нему людей. У него было много друзей. Творческих сил придавало Евгению Алексеевичу общение с природой, работа в саду, интерес к книгам, искусству. Евгений Алексеевич был образцовым семьянином. Его искренней любовью и заботой были согреты супруга, сын, дочь, внуки, родственники.

Е. А. Котюргин скоропостижно скончался 24 января 2011 года.

Память о нем не меркнет в сердцах «истоковцев».

КАРЛ ГЕОРГИЕВИЧ СИМОНОВ

Карл Георгиевич Симонов – легендарный сотрудник «Истока». Будучи еще молодым специалистом, он успешно защитил кандидатскую диссертацию в 1969 году, после этого был назначен старшим научным сотрудником и затем начальником лаборатории крупного научного подразделения «Истока», НПК-1. Доктор технических наук, член президиума Академии наук

прикладной радиоэлектроники, первый на «Источе» стал заслуженным изобретателем РСФСР, имеет почетное звание лауреата Государственной премии Российской Федерации и является почетным гражданином городского округа Фрязино.

Государственную премию К. Г. Симонову вручал Президент Российской Федерации В. В. Путин 11 апреля 2000 года в Георгиевском зале Кремля.



Вручение Государственной премии

– Мое детство прошло в городе Телави Грузинской ССР. Здесь я родился 28 сентября 1937 г. Наш город прогремел на всю страну после фильма «Мимино». В нем, если помните, была такая комическая сцена, когда главный герой фильма пытался дозвониться в Телави, а попал в Тель-Авив.

Основным детским увлечением был футбол. Родители пытались приобщить меня к искусству, отдали в музыкальную школу. Занятия я обычно прогуливал, бежал на футбольное поле, где папки с нотами становились штангами для ворот. «Доигрался» до того, что оказался в одной футбольной команде спортивной школы г. Телави с Гиви Чохели. Болельщики со стажем помнят эту звезду советского футбола, игрока тбилисского «Динамо» и сборной СССР.

Родители мои были, как раньше говорили, простыми советскими тружениками. Отец работал главным бухгалтером на промышленном предприятии в городе Ахмета, в 29 километрах от Телави. В годы Великой Отечественной войны завод целиком работал на нужды фронта. Мать работала фармацевтом в аптеке, позднее стала домохозяйкой. Родители прилагали все усилия для того, чтобы я получил хорошее образование. И самому мне нравилось учиться, особенно хорошо давались математика, физика, химия. Благодаря такому настрою, я не только окончил

школу с серебряной медалью, но и поступил в Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех). Между прочим, в нашей семье я оказался единственным «технарем», мои родные брат и сестра стали знаменитыми врачами Грузии.

– Поступить в один из престижнейших в Советском Союзе институт было очень непросто, тем более юноше из небольшого грузинского города. Учиться в МФТИ, основанном лауреатом Нобелевской премии, академиком Петром Леонидовичем Капицей, мечтал едва ли не каждый советский школьник, увлеченный техническими науками.

– Действительно, можно сказать, что мне в какой-то мере повезло, ведь абитуриенты Физтеха были такими же, как и я, хорошо подготовленными выпускниками школ со всей нашей необъятной страны. Но, как говорится, удача сопровождает сильнейших. На тот момент в числе сильнейших оказался и я, о чем мне приятно сейчас вспоминать. Годы учебы кратко можно охарактеризовать так: шесть лет жизни, до предела заполненной лекциями, семинарами, лабораторными, коллоквиумами, самостоятельными работами, позднее – научно-техническими конференциями, одним словом, стремлением к получению новых знаний. Когда пришло время выбирать специальность, я выбрал электронику. Сейчас трудно сказать, почему именно электронику, но это оказалось правильным решением. Для студентов выбранной мной специальности начиная с четвертого курса практические занятия и учеба по специальным предметам проходили на «Истоке», в то время он именовался «почтовый ящик номер 17». А читали нам лекции знаменитые фрязинские ученые: Савелий Александрович Зусмановский, Валериан Лонгинович Герус, а заведующим кафедрой был Николай Дмитриевич Девятков. Этих легендарных ученых я не просто имел возможность видеть, я общался с ними, учился у них. На пятом курсе наша студенческая группа только один день занималась в Физтехе, а остальные пять дней проводила во Фрязино. Моим первым наставником стал С. А. Зусмановский. Дипломную работу я готовил тоже на «Истоке». На это, ставшее уже родным, предприятие я и был распределен после окончания в 1962 году МФТИ. Основным направлением моей деятельности практически с первых дней были мощные и сверхмощные электровакуумные приборы и ускорительная техника.

Из всей довольно обширной моей научной и производственной работы хочу выделить изобретательскую деятельность. Не скрою, огромное наслаждение я получаю, когда возникающая в моем мозгу новая идея постепенно выкристаллизовывается в заявку на изобретение и патент. Но самое главное в изобретательстве – это когда идея становится явью, превращается в работающий прибор, да еще и с уникальными характеристиками. Первое свое изобретение я сделал в 1968 году. Профессор С. А. Зусмановский, как когда-то и мои родители, помог мне поверить в свои собственные силы, всячески поощрял мою новаторскую деятельность, мое кипучее желание что-то открыть такое, чего никто до меня не делал. Я всегда буду боготворить этого большого души человека.

Теперь в моем послужном списке 30 авторских свидетельств СССР и 22 патента Российской Федерации, а также почетные звания «Заслуженный изобретатель РСФСР» и «Лучший изобретатель Миноборонпрома России». Моей путеводной звездой стал «Исток». Совершенно уникальное предприятие, на котором органично сочетаются наука и производство. Задумал прибор – можно его воплотить в жизнь. И все это происходит на твоих глазах, что немаловажно. Я патриот «Истока» и везде, где только можно, рассказываю о его успехах. Мое любимое детище – электронные отпаянные пушки. Это совершенно новый класс приборов.

– Карл Георгиевич, извините меня за то, что прерываю Ваши воспоминания. Хочу рассказать историю, о которой мне поведал главный инженер «Истока», лауреат Ленинской премии В. Н. Батыгин. В 2000 году к юбилею Московской области в Администрации Подмосковья решили издать всеобъемлющую иллюстрированную книгу о крупных достижениях предприятий и жителей области. Наше предприятие предложило несколько своих первоклассных работ, в том числе и Ваши разработки уникальных электронных отпаянных пушек. Через какое-то время прочитав контрольный экземпляр книги пригласили Виталия Николаевича. Его возмущению не было предела! Оказалось, что в книге все упоминание об электронике убрали и оставили небольшой абзац: «В легендарном фрязинском НПО «Исток» освоили выпуск пушек, надежно поражающих быстро летящие объекты потенциального противника», снабдив фотографией пушки времен Великой Отечественной войны.

– Я слышал об этой истории. Естественно, что мои электронные пушки работают на совершенно другом принципе, чем снарядные времен Великой Отечественной войны. Мои пушки формируют внутри электровакуумного прибора и выводят в атмосферу или иную газовую среду мощный поток заряженных частиц – электронов. В создании электронных отпаянных пушек АО «НПП «Исток» им. Шокина» имеет мировой приоритет. На основе этих пушек в АО «МРТИ РАН», НИЦ «Харьковский физико-технический институт» и НИЦ «Курчатовский институт» созданы компактные установки для изучения воздействия электронных пучков на различные объекты. Одна из установок была поставлена в США, в одну из крупнейших фирм – «ЗМ».

Результаты выполненных работ по пушкам нашли отражение в моей монографии «Электронные отпаянные пушки», опубликованной под редакцией Героя Социалистического Труда академика Н. Д. Десяткова.

За создание электронной отпаянной пушки на Всемирном салоне изобретений, научных исследований и промышленных инноваций «Брюссель – Эврика-94» я награжден специальным Призом Международного жюри – Ассоциации изобретателей Польши и Золотой медалью с отличием. Кроме того, Союз изобретателей Румынии и Комиссия изобретателей при Румынской академии присвоили мне звание «Заслуженный изобретатель 1-го класса Румынии».

Другое направление моих исследований – сверхмощные клистроны. «Исток» держит приоритет в России в этом направлении электронного приборостроения. На основе сверхмощного клистрона КИУ-15М в НИЦ «Курчатовский институт» был создан исследовательский нейтронный комплекс «Факел», в котором одновременно эксплуатировались шесть сверхмощных клистронов, а в АО «Московский радиотехнический институт РАН» был создан ускорительный центр, на котором стерилизуется широкая номенклатура медицинских изделий прямо в транспортных упаковках – обычных коробках. Кроме того, на основе сверхмощных клистронов КИУ-15М созданы два ускорительных комплекса для «Института ядерной химии и технологии» в Польше (г. Варшава).

В 2014 – 2016 гг. была создана сверхмощная цепочка усилительных клистронов специального назначения, содержащая сверхмощный клистрон КИУ-257 и мощный предусилительный клистрон «Вакуум-17-1-2» для РФЯЦ ВНИИЭФ г. Саров.

Для ускорительной техники был создан мощный предусилительный клистрон КИУ-37 в S-диапазоне частот, который нашел широкое применение в ускорительных центрах России, Белоруссии, Украины, Армении.

Созданные на «Истоке» мощные и сверхмощные клистроны, инжекторы электронов и окна ввода СВЧ-мощности в ускоритель применены более чем в 30 ускорительных комплексах важного научного и прикладного назначения.

Третье направление моих работ – электровакуумные приборы, впервые созданные в мире, предназначенные для специальных применений.

Существенный вклад в проведение этих работ внесли сотрудники лаборатории, НПК-2, НПК-1, отдела 150 и других подразделений АО «НПП «Исток» им. Шокина», без участия которых невозможно было бы выполнение этих проектов, за что я приношу им глубокую благодарность.

Одна из разработок К. Г. Симонова позволила решить важную государственную задачу во время проведения чемпионата мира по футболу, когда в инспекционно-досмотровом комплексе компании Smits Heimann, установленном на стадионе «Спартак» (г. Москва) для инспекции транспортных средств, въезжающих на территорию стадиона, вышел из строя основной прибор – ускоритель фирмы Varian Medical Systems (США) перед началом чемпионата мира по футболу и комплекс перестал функционировать. Тогда был применен ускоритель, созданный в городе Фрязино на «Истоке», надежная работа которого решила проблему безопасности при проведении чемпионата мира по футболу.

В настоящее время К. Г. Симонов является научным руководителем поисковой НИР «Алазани», целью которой является исследование путей создания базового сверхмощного клистрона в S-диапазоне частот с диодной магнетронной пушкой с выходной импульсной мощностью до 15 МВт. Конструктивное выполнение базового клистрона в дальнейшем позволит получить сверхбольшие импульсные мощности (30...50 МВт) при существенно пониженных анодных напряжениях. Следует отметить, что настоящая работа является прорывной, изделия не имеют аналогов в мире, предлагаемые конструктивные решения защищены патентами РФ К. Г. Симонова (патентообладатель АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

Кроме того, в настоящее время К. Г. Симонов является главным конструктором ОКР по разработке сверхмощного усилительного клистрона в S-диапазоне частот с выходной импульсной мощностью 20 МВт, предназначенного для создания линейных ускорителей электронов нового поколения.

Отметим также, что Карл Георгиевич с 2000 г. является ученым секретарем научно-технического совета (НТС) НПП «Исток» и много лет был заместителем председателя НТС г. Фрязино.

– Карл Георгиевич, ученые Вашего уровня, как правило, имеют свои научные школы, массу учеников...

– *Вы знаете, в своей довольно продолжительной научной жизни я оказался все же ученым-одиночкой. Несмотря на то, что много лет на «Истоке» руковожу лабораторией, воспитать плеяду молодых ученых, как, скажем, лауреаты Ленинской премии А. С. Тагер и М. Б. Голант, мне как-то не удалось, да, впрочем, я к этому и не особенно стремился.*

Мой опыт преподавания ограничивается двухгодичным чтением лекций по электровакуумным приборам СВЧ в Московском институте электронного машиностроения (МИЭМ). Потом, когда я понял, что преподавание отнимает уйму времени, отвлекает от научной деятельности, я решил оставить это занятие. Правда, был еще один небольшой эпизод в моей преподавательской жизни. Сразу после окончания института я читал математику на курсах при отделе кадров «Истока». И многие из моих учеников, надо признать, успешно сдали вступительные экзамены в вузы.

Тем не менее, я могу со всей ответственностью и многолетним трудовым опытом высказать пожелания молодым людям, начинающим свой путь ученого.

Прежде всего, надо быть влюбленным в науку, получать истинное наслаждение от всего нового, что удалось получить твоему уму-разуму. Влюбленные, как известно, часов не наблюдают. Это значит, надо быть готовым всю жизнь работать и днем и ночью. Вспоминаю себя в молодые годы. В советское время поначалу на «Истоке» не хватало вычислительной техники – ЭВМ. Академик Николай Дмитриевич Девятков договорился с руководством Фрязинского отделения ИРЭ и мне разрешили работать на ЭВМ «БЭСМ – 2М», правда, с одним условием: все работы проводить ночью, когда сотрудники ФИРЭ отдыхали, поскольку днем протолкнуться к ЭВМ было просто не возможно. Около полугода мне приходилось жертвовать ночным сном, но получаемые от расчетов результаты были для меня столь интересными, что о сне я просто иногда забывал.

О своей работе и своей жизни я готов рассказывать долго, но понимаю, что пора остановиться. Тем не менее, хочу несколько слов сказать о своей семье, поскольку семья для меня – источник творческих сил и вдохновения. Со своей супругой, Варварой Ивановной, я познакомился в 1963 году, расписались в 1967 г. Она тоже работала на «Истоке». У нас сын, Георгий, внучка и три внука.

В заключение хотим сослаться на слова первого заместителя генерального директора ФГУП «НПП «Исток» Александра Николаевича Королева, высказанные в статье, посвященной 75-летию со дня рождения К. Г. Симонова (газета «Ключь» № 39, 4 – 10 октября 2012 г.): «Уважаемый Карл Георгиевич! Коллектив ФГУП «НПП «Исток» гордится Вами. Ваши научные достижения получили международное признание. От имени коллектива «Истока» желаю Вам крепкого здоровья, семейного благополучия и дальнейших творческих успехов!»

ВЛАДИСЛАВ ПАВЛОВИЧ БЕЛЯЕВ



В. П. Беляев

Для города Фрязино предприятие «Исток» с момента его возникновения является градообразующим. Почти 15 тысяч сотрудников работало на нем в конце 80-х годов прошлого столетия.

Одним из ведущих специалистов, своим трудом поддерживавшим высокий научный потенциал «Истока», был В. П. Беляев. Кандидат технических наук, начальник отделения квантовых приборов (НПК-3) Владислав Павлович отдал более 30 лет жизни организации и развитию коллектива разработчиков квантовых приборов, разработке и выпуску лазеров самого различного применения: в медицине (для хирургических операций, лечения онкологических заболеваний), косметологии, в оптической локации, для рихтовки железнодорожных путей, для обработки металлов. Останкинская телевизионная башня строилась с применением лазерного визира, разработанного в отделе, руководимом В. П. Беляевым; при строительстве плотины Чиркейской ГЭС на реке Сулак в Дагестане использовался лазерный прибор, определяющий деформацию плотины при заполнении водохранилища.

За выдающиеся достижения конструктор многих разработок, руководитель отделения Владислав Павлович Беляев был дважды (1968 и 1980 г.) награжден Государственной премией СССР, орденом и медалями.

Родился В. П. Беляев в 7 марта 1930 года в г. Опочка Калининской (Тверской) области в семье военного. Поэтому детские годы его прошли в военных гарнизонах Дальнего Востока, в городах Хабаровске, Комсомольске-на-Амуре, в постоянных переездах и привыкании к новой обстановке. Тем не менее, способности позволили ему с отличием окончить школу и успешно поступить в Московский энергетический институт (МЭИ). Здесь он тоже проявил себя не только в учебе, но и в общественной, и в спортивной жизни: был членом бюро ВЛКСМ института, принимал участие во всех спортивных мероприятиях. После окончания института в 1955 г. по специальности «Электронные приборы» Владислав Павлович был направлен на работу в НИИ-160. Через три года он стал начальником лаборатории, еще через два года – начальником цеха 35, через год – начальником цеха 43, а еще через два года – начальником отдела 300, ставшим позднее (1967 г.) научно-производственным комплексом (НПК-3).

Многие завистники тогда считали, что такую карьеру молодой начальник сделал из-за того, что учился в МЭИ с С. И. Ребровым, а затем и жил с ним на одной лестничной клетке. Возможно, это и сыграло какую-то роль, но далеко не главную.

Владислав Павлович всегда очень много работал. В институте досконально изучал пройденный лекционный материал, ответственно относился к семинарским заданиям, качественно выполнял все лабораторные работы. На предприятии с огромным интересом «вгрызался» в научные проблемы, не игнорируя при этом производственные задания. За годы трудовой деятельности им было написано более сотни научных статей, две книги, созданы более 30 изобретений. Ведя большую научную работу, он неизменно принимал участие в крупных международных конференциях: в 1963 г. – в Париже, в 1965 г. – в Белграде, в 1968 г. – в Майами, в 1969 и 1971 г. – в Вашингтоне, в 1970 г. – в Киото (Япония). В 1966 году он защитил кандидатскую диссертацию.

Владислав Павлович руководил большим коллективом. Численность НПК-3 доходила до 450 человек. В руководимом им коллективе выросли три доктора наук (А. В. Бакуменко, В. И. Масычев, Н. А. Лябин), около полутора десятка кандидатов наук, среди них лауреат Государственной премии РФ Е. И. Каневский, лауреаты Государственной премии СССР Д. Я. Ашкенази, Я. А. Юхвидин, В. С. Алейников, В. И. Былкин, Ю. А. Турутин; С. А. Плешанов, И. И. Самарцев, Ю. В. Печенин, Г. М. Хапланов, В. П. Тычинский; лауреат Государственной премии СССР Е. Н. Покровский; М. С. Долманов, несколько десятков ведущих инженеров, сотни инженеров, десятки техников и высококвалифицированных рабочих.

Что двигало Владиславом Павловичем в трудном и хлопотном деле становления научных кадров? Он всегда считал, что только образование может быть надежной базой в развитии современного общества. Он был большим реалистом и хорошо знал материальную цену как затратам на полное и высшее настоящее образование – это большая часть опыта, дорого оплачиваемая обществом, так и вероятности выигрыша за счет образования.

В жизни он не был склонен к резким «руководящим» действиям, предпочитал незаметными изменениями отношения руководителя к работнику достигать достаточно высокой эффективности труда. Ему часто удавалось таким методом компенсировать разрушительное действие различных «перестроек» сверху. Он любил дисциплину и порядок и, в какой-то мере, считал себя исполнителем воли государства. Но порядок не был для него самоцелью. Многие знали, что в нем всегда жила мечта о великой конверсии. Эта мечта привела его в лазерную медицину и применение лазеров в народном хозяйстве (мелиорация, строительство, металлообработка). Благодаря ему, эти направления в свое время стали доминирующими в тематике НПК-3.

В. П. Беляев награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалями «За трудовое отличие», «За доблестный труд» и «Ветеран труда».

В. П. Беляев ушел из жизни 8 апреля 1991 года в расцвете творческих сил.

Дочь В. П. Беляева, Ирина, окончила филиал МИРЭА при «Иостоке», двадцать лет работала в отделе А. С. Тагера и позднее – в отделе Н. А. Гусельникова, затем – на предприятии «Исток-аудио» (генеральный директор И. И. Климачев), где и продолжает свою научную и творческую деятельность. Именно Владислав Павлович в 1971 г. предложил переименовать НИИЭТ в «Исток».

В. П. Беляев был не только ученым своей эпохи, он был ее создателем и по мере сил воздействовал на эту эпоху, стараясь сделать жизнь советского человека лучше. Память о дорогом Владиславе Павловиче Беляеве будет оставаться, пока бьются наши сердца.

ИЛЬЯ МАРКОВИЧ БЛЕЙВАС



И. М. Блейвас

Исполнилось 90 лет со дня рождения Ильи Марковича Блейваса.

И. М. Блейвас родился 23 декабря 1931 года в городе Орша. В 1953 году с отличием окончил Киевский политехнический институт (КПИ) и вместе со своими однокурсниками пополнил коллектив ведущего отечественного предприятия электроники СВЧ – «Иостока». На начальном этапе научной деятельности широкую известность Илье Марковичу принесли исследования в области специализированных аналоговых ЭВМ. Еще в период преддипломной практики, которую он проходил в теоретическом отделе, начальник отдела Владимир Сергеевич Лукошков, равнодушный к пытливым молодежи, активно поддержал интерес молодого сотрудника в поиске путей создания автоматической установки для решения задач электроники. К чести талантливого и трудолюбивого инженера эта задача была в короткие сроки успешно решена. Разработанная и изготовленная группой И. М. Блейваса установка включала в себя все последние достижения отечественной счетно-решающей техники и на протяжении нескольких лет являлась единственной не только в СССР, но и в мире. Созданный ими автоматический траектограф проводил вычисление и вычерчивание траекторий заряженных частиц, движущихся в электрических и магнитных полях, и позволил существенно облегчить труд теоретиков, сократить сроки на разработку электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ.

Продолжая работать в этом направлении, Илья Маркович уже в 1961 году защитил кандидатскую диссертацию и практически в это же время возглавил лабораторию, сотрудники которой активно занимались поиском новых физических процессов для создания аналоговых и аналогово-цифровых устройств. Последующие годы продемонстрировали бурное развитие этого направления. В 1969 году И. М. Блейвас систематизировал результаты, полученные им и его коллегами, собрал материалы и первым в нашей стране выпустил альбом «Специализированные вычислительные машины для решения задач электродинамики» с многочисленными фотографиями и таблицами параметров вычислительных машин. Этот альбом по настоящее время уникален и имеет непреходящую историческую ценность.

Появление цифровых вычислительных машин несколько снизило интерес к аналоговым уст-

ройствам. Правда, многие теоретики с трудом воспринимали новую, в то время еще ненадежную, технику. Но глубокая научная интуиция подсказала Илье Марковичу великое будущее цифровых ЭВМ. Он без колебаний оставляет столь близкие ему траектографы и становится одним из самых активных пропагандистов цифровых машин. Для эффективного использования новой техники необходимо было разрабатывать машинные методы проектирования приборов СВЧ. У истоков этого направления на «Истоке» стояли доктора и кандидаты наук В. С. Лукошков, В. П. Сазонов, А. С. Тагер, А. С. Победоносцев, Р. А. Силин, И. М. Блейвас, Ф. М. Михайлус, С. А. Зайцев, А. Н. Королев, А. В. Потапов, А. Н. Захарова и многие другие.

И здесь Илья Маркович проявил присущую ему научную смелость. Он ставит перед собой сложнейшую задачу – создать надежный инструмент для решения трехмерных задач с помощью ЭВМ типа БЭСМ-6 и организует ее решение крупными силами математиков и программистов не только «Истока», но и ряда научных институтов, в том числе из Сибирского отделения АН СССР. Разработанное им «детище» – компилирующая система КСИ БЭСМ на протяжении многих лет служила основой для расчета тонких эффектов в электронно-оптических системах и системах формирования электронных пучков. Активными помощниками Илье Марковичу в поиске эффективных машинных методов расчета были Э. М. Зелинский и В. М. Красноперкин, а в проведении многочисленных исследований – И. И. Галицкая, Р. А. Хомич, Т. С. Власова. В этот период широта научных интересов И. М. Блейваса удивляла и восхищала многих. Совместно с Т. А. Воронченковой и П. А. Нартовым он проводил глубокие изыскания по моделированию и оптимизации магнитных фокусирующих систем ЭВП, усовершенствовал метод Монте – Карло для решения задач в трехмерной области. Одним из первых на предприятии сформулировал группе своих сотрудников: В. М. Ипполитову, В. Г. Шишкину, Л. М. Свириной, А. Г. Чурсину, А. И. Гипсману, С. А. Дубровиной – широкий круг задач по использованию методов планирования экспериментов для оптимизации различных узлов ЭВП. Многие из этой группы позднее защитили кандидатские диссертации.

Чуть позже Илья Маркович с захватывающим интересом «внедрился» в область тепловых задач, понимая практически безграничное здесь поле деятельности для теоретиков. Им с М. И. Захаровым и З. И. Хаплановой выполнено огромное число тепловых расчетов как электровакуумных, так и твердотельных приборов. Он с интересом работал с А. И. Деомидовым над решением растровых задач, а с Е. С. Евтифеевой – над проблемами лечения с помощью лазерного излучения. Многие из его бывших сотрудников стали кандидатами наук. И хотя зачастую диссертации они защищали уже не под его руководством, толчком к научному поиску, без сомнения, послужило им общение с очень увлеченным и столь же трудолюбивым И. М. Блейвасом.

Простотой в общении Илья Маркович быстро располагал к себе молодых сотрудников. Этому же способствовали и еще ряд качеств ученого. Он старался мыслить стратегически, предвидеть развитие научных направлений на пять, а то и десять лет вперед и доходчиво объяснять эти перспективы молодым специалистам. В этом он был близок к своему другу А. С. Тагеру.

Идеи и планы постоянно переполняли Илью Марковича. При этом, видя огромный объем задач и ограниченность сил, он развивал максимальную активность в направлении научной корпорации, проявив себя выдающимся организатором. Его знали и высоко ценили во многих научных коллективах страны, а собранное им со всей страны «хозяйство» – программное обеспечение всегда производило грандиозное впечатление. Постановка некоторых крупных работ в других институтах была стимулирована исключительно его усилиями.

Внешне И. М. Блейвас был строг со своими сотрудниками. Он очень ценил рабочее время, тре-

бовал четкости и порядка. Однако в его лаборатории всегда царила добрая атмосфера. Правда, в повседневных заботах редко удавалось поговорить с начальником по душам. Зато такая возможность появлялась на новогодних и тематических вечерах, которые проводились часто в дружном коллективе теоретиков. Илья Маркович любил посещать эти вечера. Находясь в непринужденной обстановке, в окружении заботливых сотрудниц его лаборатории, он позволял себе сбросить на время привычную собранность, уйти от разговоров на научно-производственные темы к чисто житейским. Не имея пристрастия к спиртному, он тем не менее всегда был на вечерах весел и разговорчив. Илья Маркович обладал живым и красивым языком, поэтому слушать его можно было долго, не уставая. Однако в нем, на редкость, уживалось и другое важное качество. Он был прекрасным слушателем, с искренним интересом внимающим рассказчику. Беседа с ним доставляла истинное удовольствие, каких бы мелочей она ни касалась. Он был одним из интереснейших полемистов на научных и общественных семинарах. Основой тому служили его глубокие знания в различных областях.

Несмотря на большую производственную нагрузку, Илья Маркович находил время для преподавания в филиале МИРЭА. Он искренне любил молодежь и всеми силами стремился подготовить новые кадры для родной электроники СВЧ, которой сам отдал всю свою не очень долгую жизнь.

И. М. Блейвас ушел из жизни 13 октября 1995 г.

Илья Маркович искренне любил «Исток» и город науки Фрязино.

Светлая память о нем согревает наши сердца.

ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ САВЕЛЬЕВ



В. С. Савельев

Виктор Сергеевич Савельев родился 16 июля 1930 года в г. Щелково Московской области.

Выпускник Московского энергетического института (1956 г.). Талантливый специалист в области электронной техники. Кандидат технических наук (1969 г.). Лауреат Государственной премии СССР (1980 г.). В его активе более 50 научных работ и 24 изобретения. 30 лет Виктор Сергеевич проработал в НПК-17 «Исток». Он был подлинным патриотом своего подразделения, уникальным ученым, активным общественным деятелем.

Воспоминания о нем родных, друзей и сотрудников, в большинстве своем написанные сразу после его трагической кончины 6 ноября 1985 года, еще раз напоминают нам о выдающемся ученом и прекрасном человеке В. С. Савельеве.

Вера Сергеевна Кускова, сестра В. С. Савельева

Детство Виктора выпало на трудное для всех нас время. В начале войны отец был эвакуирован вместе с заводом в Свердловск. Мама работала. Вся ответственность по дому легла на Виктора. Он был наш старший брат. Жили мы в деревне, и дел хватало. Надо было заготавливать дрова, обрабатывать огород, готовить нам обед, да и смотреть за нами. Младшему из нас было 3 года. Виктор и сам-то в то время был еще мальчишкой в 11 лет. В учебе он был очень способный. Учился всегда на отлично. Его первая учительница предлагала перевести его в 5-й класс, минуя 4-й, но мама не согласилась. На протяжении всей своей жизни он никогда не требовал для себя никаких благ и считал, что всего нужно добиваться только своим трудом. Он не давал списы-

вать, всегда сердился, но с удовольствием объяснял. Объяснял так, чтобы человек мог понять и объяснить другому. Виктор очень любил спорт, занимался волейболом, штангой, но предпочтение отдавал гимнастике. Любил стихи, особенно В. Маяковского. Любил живопись и, используя каждую свободную минуту, рисовал.

**Сергей Александрович Перегонов,
кандидат технических наук, лауреат премии Совета Министров СССР,
главный научный сотрудник НПК-7**

Нас было четверо: Миша Брусков, Витя Савельев, Коля Антипов и я. Мы были молоды, рады жизни вообще и тому, что учились в Московском энергетическом институте (МЭИ), в частности. Витя выделялся среди нас своей серьезностью, внешним обликом, серьезным отношением к учебе и общественным делам. Брови его всегда были сдвинуты, голос всегда убеждающе требователен. Жили мы «колхозом». Дежурили в комнате парами по очереди. Мы с Колей, как люди городские, супы готовили пожирше, так что ложка никак не «стояла». На что Витя шуточно замечал: «Опять крупинка за крупинкой бегаёт с дубинкой». Хорошо помню, что Витя любил рисовать. Нашу комнату он украшал своими картинами, причем написанными всегда маслом, что неизменно обеспечивало нам лишний плюс к оценке санитарного состояния комнаты.

После окончания МЭИ вместе с ним пришли на «Исток». Творческая судьба у нас складывалась примерно одинаково: оба мы стали кандидатами технических наук, оба стали лауреатами, но долговременной дружбы почему-то не получилось. У каждого из нас образовались семьи, появились новые друзья, новые интересы. Но к Вите, я всегда питал и питаю любовь и уважение, памятуя о нашей совместной студенческой жизни.

**Иван Иванович Бродуленко, начальник НПК-17,
кандидат технических наук, лауреат Ленинской премии,
почетный гражданин г. Фрязино, ветеран Великой Отечественной войны**

Виктор Сергеевич прошел жизненный путь с честью и достоинством. В тяжелые послевоенные годы он, сын рабочего, с отличием закончил Щелковский электровакuumный техникум и Московский энергетический институт (МЭИ). Работу над дипломным проектом выполнял в нашем НПК-17. Здесь же и остался работать после окончания МЭИ. Без отрыва от производства закончил аспирантуру и успешно защитил кандидатскую диссертацию.

Без преувеличения скажем, что самая «тонкая» электронная техника нашего подразделения создавалась под руководством и при непосредственном участии Виктора Сергеевича. Большой вклад В. С. Савельев внес в развитие отечественной электроники малых мощностей в самом коротковолновом участке СВЧ-диапазона. Уникальные приборы, созданные замечательным ученым, мы вправе называть «савельевскими». Я всегда восхищался и поражался его умением раскрывать тайны электронных приборов сверхмалых размеров, сверхтонких технологических процессов, неясных, запутанных и чрезвычайно сложных физических явлений. Но, главное, что Виктор Сергеевич никогда не останавливался на достигнутом. Он всегда был нацелен на создание научно-технического задела, используя при этом всю мощь, которую отвела природа вакуумной и твердотельной электронике. Он автор многих научных трудов и изобретений, вписавших яркие страницы в историю развития нашего предприятия и всей отечественной электроники.

**Михаил Борисович Голант, начальник отдела НПК-17,
доктор технических наук, лауреат Ленинской, двух Государственных
премий СССР и Государственной премии Правительства РФ,
ветеран Великой Отечественной войны**

Как ученому, Виктору Сергеевичу Савельеву пришлось заниматься несколькими, достаточно отличающимися друг от друга направлениями, но в каждом из них его деятельность оставила глубокий след. Он занимался приборами с широким диапазоном электронной перестройки – и эти приборы нашли широкое применение. Он осваивал миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны – и успехи в создании этих приборов, в наиболее трудном для освоения диапазоне, обязаны ему, его фантазии, усилиям, энергии. Он сделал огромный шаг в разработке качественно новых электронно-оптических систем. Он является создателем нового метода контроля качества катодов, выводящего эту проблему из, казалось бы, тупиковых трудностей. Позднее, перейдя к полупроводниковым приборам, он и здесь нашел свой путь.

Память о Викторе Сергеевиче Савельеве – прекрасном человеке и великом труженике, крупном ученом не может угаснуть или поблекнуть с годами.

**Лариса Анатольевна Парышкуро, начальник отдела НПК-17,
Герой Социалистического Труда, почетный гражданин г. Фрязино**

Виктор Сергеевич Савельев отличался, прежде всего, высокими человеческими качествами: он никогда не уходил от ответственности и брал на себя самые трудные вопросы как в работе, так и в жизни. Из года в год рос его авторитет как ученого. Его глубокая порядочность была твердым фундаментом того непростого дела, которому он посвятил свою жизнь. Особенно трогательна была его преданность семье, забота о ней. Он был человеком, на которого можно было положиться во всем – и в радости и в горе.

**Владимир Петрович Савченко, начальник отдела НПК-17,
доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии
Российской Федерации, Глава г. Фрязино с 1994 по 2001 годы**

Будучи молодым специалистом НПК-17, я у Виктора Сергеевича учился многому: спокойствию и терпению, наступательности в своих решениях и действиях, стремлению вникнуть в производственную и жизненную ситуации и провести детальный ее разбор. Скромность в быту и честность делали Виктора Сергеевича неформальным лидером сотрудников и коммунистов НПК-17.

Мне очень повезло, что я в своей жизни повстречал такого человека, как Виктор Сергеевич Савельев.

Юрий Алексеевич Журавлев, заместитель начальника НПК-17

Какой бы стороны деятельности Виктора Сергеевича мы не касались, везде в наибольшей степени привлекала его скромность, какая-то особенная внутренняя добросовестность и постоянная готовность прийти на помощь делом, советом, личным участием. Он обладал тем гармонично зрелым разумом, который в народе попросту называют мудростью.

**Сергей Иванович Варгузов,
экс-председатель Щелковского районного Совета депутатов**

В середине 70-х годов, после окончания МЭИ, я устроился на работу в теоретический отдел «Истока», в лабораторию Александра Семеновича Тагера, который предложил мне заняться теоретическими исследованиями работы полупроводниковых генераторов СВЧ и вскоре познакомил меня с выдающимися сотрудниками НПК-17, работавшими в этом направлении, кандидатами технических наук Александром Андреевичем Негиревым, Александром Михайловичем Алексеенко, Виктором Сергеевичем Савельевым, Всеволодом Николаевичем Лебедевым, Владимиром Михайловичем Доличем. Правда, позднее, я непосредственно более тесно взаимодействовал с такими же, как и я, молодыми специалистами из лабораторий этих ученых: Виталием Мякинковым, Игорем Новосельцем, Виталием Голубцовым, Александром Федоровым, Вячеславом Ледовым и другими.

Виктор Сергеевич всегда проявлял большой интерес к моим результатам. Он усаживал рядом со мной своих молодых инженеров и в простой располагающей к взаимодействию беседе, тем не менее внимательно глядя на меня из-под своих очков, старался «докопаться» до сути решаемой мной теоретической задачи. Конечно, я робел перед его взглядом, но все же старался не уронить авторитет теоретика. К сожалению, в коллективе А. С. Тагера я проработал неполных десять лет, решив перейти на общественную работу сначала в Щелковский горком КПСС, а затем в Щелковский районный Совет депутатов. Но память о сотрудниках «Истока», в их числе и о безвременно ушедшем от нас после трагического случая Викторе Сергеевиче Савельеве, я до сих пор бережно храню.

ЛЕВ НИКОЛАЕВИЧ ВАГИН

В 50-е годы прошлого века разработчики радиолокационных станций (РЛС) столкнулись с трудной проблемой: для переключения работы РЛС с передачи на прием сигналов СВЧ необходимы были переключатели, которые, во-первых, имели бы малое время переключения, а во-вторых, выдерживали бы большие мощности. Всесторонние исследования сотрудников «Истока» показали, что практически всем требуемым параметрам удовлетворяли так называемые «импульсные водородные тиратроны». Преимуществом водорода, как наиболее легкого газа, является большая подвижность ионов, что существенно снижало время переключения приборов. Однако для промышленного освоения этих приборов необходимы были новые идеи, особенно в части увеличения срока службы переключателей, работающих в сверхнапряжённых условиях.

В этот переломный для разработчиков период на предприятие пришел молодой специалист Л. Н. Вагин, которому и было доверено разобраться, какими должны быть конструкции мощных импульсных водородных тиратронов. Именно с этой непростой задачи начался период расцвета его творческой активности. Лев Николаевич со свойственной ему тщательностью разобрался в физических явлениях работы приборов и пришел к выводу, что основным элементом, снижающим сроки работы переключателей, является оксидный катод. При этом он предложил и использовал новые методы по исследованию разрушения поверхности катода в накаливаемом состоянии, определению потерь мощности на катоде, влияния длительности импульса на эмиссию оксидного катода в разряде. Изобрел оригинальное устройство для измерений температуры катода (авторское свидетельство № 132723, 1962 г.). Результаты глубоких исследований Л. Н. Вагина с сотрудниками позволили провести существенное усовершенствование катодов и на порядок увеличить сроки

службы водородных тиратронов. Это привело к расширению области применения импульсных тиратронов. Они стали использоваться в ускорителях заряженных частиц, в лазерной технике, в устройствах индукционного нагрева и в навигационной технике.

В 1962 году Лев Николаевич успешно защищает кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование работы оксидного катода в импульсном газовом разряде с целью улучшения параметров мощных водородных тиратронов». Даже одной этой работы хватило бы Л. Н. Вагину, чтобы навсегда увековечить свое имя в истории развития отечественной электроники СВЧ.

Но и после защиты он продолжает активно работать в выбранном направлении. Много исследует, пишет, изобретает. Результаты своих исследований о причинах выхода из строя мощных переключателей на водородных тиратронах и по оптимальному выбору режимов работы катодов в тиратронах он публикует в журналах «Радиотехника и электроника», «Журнал технической фи-зики», «Электроника», «Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ» и других научных изданиях. Итогом огромной научной работы Льва Николаевича стала книга «Импульсные водородные тиратроны» (в соавторстве с Таисией Борисовной Фогельсон и Лией Николаевной Бреусовой). Одна из последних больших научных работ Л. Н. Вагина была связана с пространственно-временным модулятором света на структуре «фотопроводник – жидкий кристалл» для отображения динамической информации на экран группового пользования.

Своим примером работать много, творчески и эффективно Лев Николаевич сумел создать вокруг себя немногочисленный, но сильный коллектив, в котором все сотрудники были искренне увлечены своей работой. Ему довелось работать с видными учеными и организаторами научно-производственной деятельности С. И. Ребровым, Н. Д. Девятковым, И. В. Лебедевым, В. В. Бакакиной, Д. Я. Ашкенази, Т. Б. Фогельсон, И. М. Олиховым и многими другими.

Новые грани таланта Л. Н. Вагина раскрылись в научно-педагогической деятельности. С 1963 года начинается важный период в его жизни. Он приходит работать преподавателем в только что открывшийся на территории предприятия втуз и работает в нем без перерыва практически до самых последних дней жизни (сначала совместителем, а позднее и штатным преподавателем). Педагогическая деятельность Льва Николаевича не может не вызывать восхищения. Широта его творческих интересов распространяется на многие области науки и техники, охватить которые,



Дипломницы с преподавателями филиала МИРЭА
(слева направо: К. И. Алмазов-Долженко, Д. А. Ковтунов, Л. Н. Вагин, Ю. А. Гордеева,
А. К. Балыко, В. А. Иовдальский, О. Г. Агеева, Р. А. Силин, М. В. Львова, Ю. А. Ганюшина)

казалось, не под силу одному человеку. За почти полувековую деятельность он преподавал без малого 20 дисциплин по различным областям электроники СВЧ и квантовой электроники.

За полстолетия институт выпустил более 5000 инженеров. Практически все студенты, закончившие «истоковский» институт, который в разное время назывался втуз и филиал МЭИ, а в настоящее время – филиал МИРЭА, в той или иной мере соприкоснулись с педагогической деятельностью Л. Н. Вагина. На протяжении нескольких десятилетий Лев Николаевич был руководителем специальности «Электронные приборы», а позднее и специальности «Полупроводниковые приборы».

Высокий, всегда подтянутый и опрятно одетый, немногословный, но всегда открытый для студентов и преподавателей, он являл собой пример педагога с большой буквы. Студенты искренне уважали и любили Льва Николаевича – одного из лучших преподавателей филиала МИРЭА.

Лев Николаевич Вагин умер 29 декабря 2010 года, прожив чуть более восьмидесяти лет. Свою основную миссию видел в беззаветном служении науке, родному предприятию «Исток» и родному филиалу МИРЭА при «Источе».

Память о выдающемся ученом и человеке Льве Николаевиче Вагине останется в сердцах фрязинцев различных поколений.

БОРИС ФЕДОРОВИЧ ГОРБИК

Исполнилось 75 лет главному технологу АО «НПП «Исток» им. Шокина» Борису Федоровичу Горбику, на протяжении многих лет славно работающему в одной из самых трудоемких областей СВЧ-приборостроения.

Б. Ф. Горбик родился 22 июня 1947 года. После окончания в 1970 г. Пермского государственного университета им. М. Горького он был распределен на бурно развивающееся предприятие в г. Фрязино, на котором проработал более 50 лет, пройдя путь от инженера-технолога до начальника отдела главного технолога – главного технолога крупнейшего в стране предприятия электроники СВЧ.

Работать Борис Федорович начал в отделении, где разрабатывались полупроводниковые СВЧ-приборы, которое возглавляли в разные годы доктора технических наук В. Г. Калина, Г. А. Крысов и лауреат Ленинской премии А. С. Тагер, кандидаты технических наук С. А. Перегонов и лауреат Ленинской премии К. Г. Ноздрин.

Молодому специалисту практически сразу доверили решать весьма важную и актуальную проблему, связанную с разработкой целого ряда полупроводниковых приборов, в том числе и нового перспективного прибора, который составлял конкуренцию лавинно-пролетным диодам. Позднее ведущим инженером и начальником лаборатории Б. Ф. Горбиком был разработан уникальный технологический процесс изготовления диодов и впервые в нашей стране созданы диоды Ганна на фосфиде индия, позволяющие получить генерацию сигнала СВЧ на частоте 94 ГГц в непрерывном режиме.



Б. Ф. Горбик

Опытный и прогрессирующий начальник лаборатории был замечен директором завода «Рений» И. М. Панасом, который предложил Борису Федоровичу должность заместителя главного инженера завода. Научную работу ему пришлось отложить и погрузиться в новую область его деятельности – производство изделий электронной техники. При непосредственном участии заместителя главного инженера завода, а затем главного технолога «Истока» Б. Ф. Горбика на предприятии освоено в серийном производстве более 60 изделий электронной техники, разработан ряд новых высококачественных технологических процессов, внедрена система автоматизированной подготовки технологической документации, разработан инвестиционный проект многофункционального комплекса для выпуска твердотельных субмодулей для отечественных АФАР.

Привлекательной чертой Б. Ф. Горбика является стремление к новому, желание исследовать и внедрить новые технологические методы. При нем в родном ему НПК-4 под руководством докторов технических наук А. М. Темнова и В. Г. Лапина были разработаны новые технологические процессы изготовления уникальных по своим функциональным возможностям полупроводниковых приборов СВЧ – полевых транзисторов и монолитных интегральных схем на их основе. Достижения «Истока» в этой области общепризнаны как в нашей стране, так и за рубежом.

В период 2006 – 2007 гг. при участии Б. Ф. Горбика разработан и внедрен комплекс мероприятий по качественному улучшению производства атомно-лучевых трубок на парах цезия для системы ГЛОНАСС.

Пытливость, настойчивость, разносторонность знаний Бориса Федоровича хорошо известны на предприятии. Он не только сам активно работает на научном поприще – он автор 30 научных трудов и 5 изобретений, но и активно помогает молодым сотрудникам найти свой путь в науке и производстве.

За заслуги перед отечественной электроникой Б. Ф. Горбик награжден медалью «В память 850-летия Москвы» и медалью им. Сергея Ивановича Реброва «За большой вклад в создание СВЧ-приборов и устройств».

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

Сотрудники предприятия сердечно поздравляют Бориса Федоровича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и новых успехов в любимой его области – технологии изделий СВЧ.

Статья поступила 6 июня 2022 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 опубликования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 и дается общим списком в конце статьи.

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

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

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

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

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

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.9.2022 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 12,5
Уч.-изд. л. 13,0
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
9 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а,
корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2022, вып. 3(554), с. 102

Подписной индекс 36292

