



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (552)

2022

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(552)

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 «НПП «Пульсар», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

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

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

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(552)

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 «RPC «Pulsar», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

- Карушкин Н.Ф., Обухов И.А.* – Источники излучения на лавинно-пролетных диодах в миллиметровом диапазоне длин волн. Часть I..... 6
- Лукашин В.М.* – Особенности формирования Г- и Т-затворов в DA-DpHEMT..... 20
- Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Фёдоров Н.А., Терешкин Е.В., Медянкова Е.В.* – Гибридная интегральная схема генераторного модуля СВЧ-диапазона..... 33

Радиоэлектронные устройства

- Скобелин А.А.* – Требования к характеристикам временных измерений пространственно разнесенных квантовых стандартов частоты. Предложения по реализации прибора для сравнения шкал времени космических аппаратов..... 39
- Драч В.Е., Кондратов Д.А., Шмелькова А.А.* – Перспективные конструкции фрактальных антенн..... 55
- Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Фомина Г.В., Иовдальский В.А., Карасёв Н.С., Смирнова А.А.* – Совершенствование установки для измерения температурного коэффициента частоты диэлектрических резонаторов..... 64

Медицинская электроника

- Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Микроволновое излучение повышает чувствительность онкологических клеток к апоптотическим стимулам..... 70

Краткие сообщения

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – О физических константах..... 77

История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – «Исток» – кузница выдающихся отечественных ученых..... 81

CONTENTS

Solid-state electronics

- Karushkin N.F., Obukhov I.A.* – Sources of radiation based on IMPATT diodes in millimeter wavelength range. Part I..... 6
- Lukashin V.M.* – The features of Γ - and T-gates formation in DA-DpHEMT..... 20
- Goryunov I.V., Iovdalskiy V.A., Fyodorov N.A., Tereshkin E.V., Medyankova E.V.* – Hybrid integrated circuit for microwave generator module..... 33

Radioelectronic devices

- Skobelin A.A.* – Requirements for characteristics of time measurements of spatially divided atomic frequency standards. Proposals for the implementation of the device for comparing the time scales of space vehicles..... 39
- Drach V.E., Kondratov D.A., Shmelkova A.A.* – Advanced fractal antenna designs..... 55
- Kolomin V.M., Rybkin V.N., Fomina G.V., Iovdalskiy V.A., Karasev N.S., Smirnova A.A.* – Upgrading the installation for measuring the temperature coefficient of frequency of dielectric resonators..... 64

Medical electronics

- Borisenko G.G., Polnikov I.G., Kazarinov K.D.* – Microwave radiation increases the sensitivity of oncological cells to apoptotic stimuli..... 70

News in brief

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A.* – About physical constants..... 77

History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – «Istok» – a forge of outstanding domestic scientists..... 81

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДАХ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Часть I

Н. Ф. Карушкин¹, И. А. Обухов²

¹НИИ «Орион», г. Киев, Украина

²НПП «Радиотехника», г. Москва

Приводятся результаты работ по созданию генераторов, усилителей, умножителей частоты высокой кратности электромагнитных волн миллиметрового диапазона на кремниевых лавинно-пролетных диодах.

КС: лавинно-пролетный диод, генератор, усилитель, умножитель частоты, миллиметровый диапазон, синхронизация

SOURCES OF RADIATION BASED ON IMPATT DIODES IN MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

Part I

N. F. Karushkin¹, I. A. Obukhov²

¹Scientific Research Institute «Orion», Kiev, Ukraine

²Scientific-Industrial Company «Radiotechnika», Moscow

This article presents the results of the work in the field of creating the generators, amplifiers, frequency multipliers with high multiplicity of electromagnetic waves in the millimeter range based on silicon IMPATT diodes.

Keywords: IMPATT diode, generator, amplifier, frequency multiplier, millimeter wavelength range, synchronization

1. ВВЕДЕНИЕ

14 декабря 2021 года исполнилось 95 лет со дня рождения Александра Семёновича Тагера, который вместе с сотрудниками НПО «Исток» А. И. Мельниковым, Г. П. Кобельковым и А. М. Цебиным впервые в мире получил генерацию СВЧ-колебаний на лавинно-пролетном диоде (открытие № 24, приоритет от 27.10.1959). За рубежом первое сообщение об аналогичном результате появилось только в 1965 г.

Это открытие стало основой создания нового класса полупроводниковых СВЧ-приборов. Идеи А. С. Тагера до сих пор стимулируют исследователей в области СВЧ-электроники.

Успехи полупроводниковой электроники сверхвысоких частот открывают широкие возможности для разработки оптимальных схем и конструкций источников излучения миллиметрового

диапазона длин волн, обеспечивающих высокую стабильность частоты и фазы электромагнитных колебаний [1]. Большие перспективы связаны с использованием синхронизированных диодных генераторов, которые находят применение в приемопередающих модулях активных фазированных антенных решеток, когерентных радиолокационных станциях малой мощности и т. д. [2, 3].

Применение режима внешней синхронизации полупроводниковых генераторов решает задачу создания выходных каскадов передатчиков с высоким коэффициентом усиления, низким уровнем частотного шума и уровнем выходной мощности, соответствующим максимальному энергетическому режиму. Уровень частотного шума и стабильность частоты выходного сигнала соответствуют параметрам синхронизирующего сигнала. Это обстоятельство позволяет создавать высокостабильные источники мощности с минимальными фазовыми шумами в миллиметровом диапазоне длин волн, в том числе и в коротковолновой его части, где построение высокодобротных резонаторов весьма затруднено. Режим синхронизации во многих случаях предпочтительнее режима пассивного усиления, в котором максимальная выходная мощность достигается при малом усилении, не превышаемом обычно 5-6 дБ [4–7].

Из теории колебаний известно, что при воздействии на автоколебательную систему внешней периодической силы с частотой, близкой к частоте системы, при определенных энергетических соотношениях происходит захватывание или синхронизация автоколебаний вынужденными колебаниями [3]. При этом представляет интерес возможность синхронизации системы не только сигналом, близким по частоте к свободным автоколебаниям генератора, но и сигналом с существенно более низкой или более высокой частотой.

Полосой синхронизации Δf_c называют разность между частотами захваченных колебаний, на которых происходит срыв режима синхронизации

$$\Delta f_c = (m/n)(f_{c.в} - f_{c.н}), \quad (1)$$

где $f_{c.в}$, $f_{c.н}$ – верхняя и нижняя частоты внешнего воздействия, на которых наблюдается срыв синхронизации; m и n – натуральные числа, не имеющие общего множителя.

Режим, соответствующий $m = n = 1$, называется гармоническим захватыванием; режим, соответствующий $m = 2, 3, \dots, n = 1$, ультрагармоническим захватыванием, или умножением частоты; режим, соответствующий $n = 2, 3, \dots, m = 1$, субгармоническим захватыванием, или делением частоты.

Количественной мерой эффективного захватывания частоты генератора f_r в одночастотном приближении ($m = n = 1$) служит коэффициент синхронизации

$$K_c = (\Delta f_c / f_r) \sqrt{K_{зп}}, \quad (2)$$

где $K_{зп} = \sqrt{P_r / P_c}$ – коэффициент усиления синхронизированного генератора при малой P_c ; P_c – мощность синхронизирующих колебаний; P_r – мощность, генерируемая активным элементом в автономном режиме.

Относительная полоса синхронизации генераторов СВЧ может быть представлена в виде

$$\Delta f_c / f_r = (k / Q_n) (1 / \sqrt{K_{зп}}), \quad (3)$$

где Q_n – нагруженная добротность генератора; k – коэффициент, зависящий от параметров работы активного элемента и резонансной системы генератора.

Очевидно, что простейшим способом повышения эффективности процесса захватывания частоты генератора является снижение Q_n . Хотя реализация этого способа не вызывает трудностей, его

исполнение может принципиально ограничиваться как требованиями к добротности резонатора, связанными с необходимостью обеспечения того или иного режима работы активного элемента, так и требованиями к его нагрузке, оптимальной с энергетической точки зрения.

Генератор, синхронизированный сигналом с угловой частотой или манипуляцией, можно рассматривать как синхронизированный усилитель. Такие усилители на полупроводниковых диодах применяются в многоканальных системах связи с частотным разделением каналов, в системах управления ракет и системах опознавания воздушных и наземных объектов. Серьезным достоинством усилителей такого класса является возможность более полного использования энергетического потенциала активных элементов и ряд других преимуществ, таких, как слабая зависимость мощности выходного сигнала от уровня входного сигнала, простота схемы и конструкции вследствие отсутствия необходимости обеспечения устойчивости к самовозбуждению, меньшая чувствительность к изменению температуры и питающих напряжений.

Усилители позволяют использовать активные диодные структуры с распределенными параметрами. Если сравнивать синхронизированные генераторы на различных активных элементах, то устройства на лавинно-пролетных диодах (ЛПД) обладают большими выходными СВЧ-мощностями и высоким уровнем шума. Известно, что синхронизация генератора высокостабильным сигналом позволяет снизить уровень его частотных шумов. Степень подавления частотных шумов генератора синхронизирующим высокостабильным сигналом можно приблизительно оценить соотношением [8]

$$\frac{\bar{\varepsilon}^2(F)}{\bar{\varepsilon}_0^2(F)} = \frac{4F^2}{\Delta f_c + 4\Delta f^2 + 4F^2}, \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}^2(F)$, $\bar{\varepsilon}_0^2(F)$ – среднеквадратичное значение девиации частоты автономного генератора и сигнала на выходе синхронизированного генератора соответственно; F – величина отстройки частоты от несущей; Δf – расстройка частоты сигнала синхронизации генератора.

Для анализа и проектирования синхронизированных генераторов, как и других пассивных и активных устройств СВЧ, широко применяется метод эквивалентных схем, в рамках которого реальная колебательная система с распределенными параметрами может быть представлена в виде соединения простых элементов (отрезков линий передачи, диафрагм, штырей и т. д.) с хорошо известными частотными характеристиками. Такое представление допустимо и при рассмотрении синхронизированных генераторов на дискретных элементах с сосредоточенными параметрами, являющихся сравнительно узкополосными по частоте.

2. КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И УСИЛЕНИЯ СВЧ-МОЩНОСТИ

Для увеличения надежности радиоэлектронной аппаратуры в СВЧ-диапазоне проводится корпусирование полупроводниковых структур (рис. 1). Диодная p^+p-n-n^+ -структура 1 монтируется внутри рубиновой втулки 2 на позолоченном медном штифте 3 и соединяется с крышкой 4 при помощи золотой плющены 5.

Использование широко применяемых в сантиметровом диапазоне длин волн металло-керамических диодных корпусов в миллиметровом диапазоне становится проблематичным из-за больших значений емкости C_k и индуктивности L_k корпуса, получения однородных тонких стенок керамической втулки и необходимости соединения её торцов с металлическими частями

корпуса методом пайки [9]. Эти обстоятельства не позволяют реализовать требуемые значения сосредоточенных параметров корпуса и минимизировать омическое сопротивление корпуса r_m (рис. 2).

Рис. 1. Конструкция корпусированного ЛПД

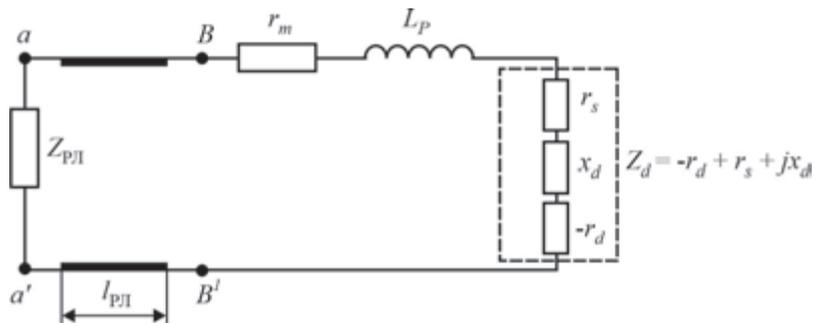
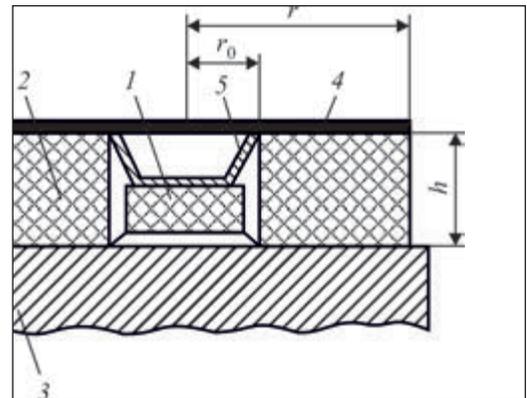


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения корпусированного ЛПД, в которой диэлектрическая втулка представляется радиальной линией $l_{рл}$

Кроме того, геометрические размеры диэлектрической втулки становятся соизмеримыми с длиной волны. В этом случае предлагается рассматривать втулку как радиальную линию, трансформирующую свой входной импеданс $Z_{рл}$ к клеммам включения полупроводниковой структуры. Величина и характер импеданса определяются условиями распространения волн в радиальных линиях с учетом геометрии и диэлектрической проницаемости втулки корпуса [10]. Полное сопротивление трансформатора импеданса $R_{п}$ должно быть минимальным и удовлетворять условию $R_{п} \ll r_{нд}$, где $r_{нд} = -r_d + r_s + r_m$ – вещественная часть импеданса полупроводниковой структуры с учетом сопротивления потерь растекания структуры r_s , омического сопротивления элементов включения полупроводниковой структуры в СВЧ-цепь и сопротивления элементов корпуса диода r_m (рис. 2). Абсолютная величина отрицательного дифференциального сопротивления ЛПД r_d в миллиметровом диапазоне составляет 2-3 Ом.

Входной импеданс радиальной линии определяется выражением [11]

$$Z_{рл} = -j \left(\frac{120h}{2r\sqrt{\epsilon}} \right) \text{Ctg}(x, y), \quad (5)$$

где h – высота втулки; r – внешний диаметр втулки; ϵ – диэлектрическая проницаемость; $\text{Ctg}(x, y)$ – большой радиальный котангенс; $x = (2\pi/\Lambda)\sqrt{\epsilon}r$, $y = (2\pi/\Lambda)\sqrt{\epsilon}r_0$; Λ – длина волны; r_0 – внутренний диаметр втулки.

В работе [12] приводятся расчетные зависимости величины входной проводимости радиальной линии в сечении aa' при изменении её внешнего диаметра. Изменяя диаметр диэлектрической

втулки при заданной высоте h , можно получить на клеммах полупроводниковой структуры необходимую для реализации параллельного резонанса величину реактивной проводимости.

Основным частотно-избирательным узлом СВЧ-цепи генератора на ЛПД является корпусированный диод с резонансной трансформацией импеданса к полупроводниковой структуре. Запасенная энергия в такой СВЧ-системе сосредоточена в основном в области корпусированного диода, и обобщенная добротность системы оказывается минимальной.

В широкодиапазонных СВЧ-устройствах (генераторах с перестройкой, синхронизированных генераторах, сумматорах мощностей) добротность корпусированного резонансного диода следует уменьшать, но необходимо соблюдать условие: величина модуля отрицательного сопротивления должна превосходить суммарную величину сопротивления потерь в СВЧ-цепи.

Создание корпусированных ЛПД в диапазоне 30...180 ГГц может быть обеспечено применением диэлектрических втулок корпусов на основе промышленных часовых рубиновых камней, металлизированных по торцам (таблица) [13].

Частотный диапазон, ГГц	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм
30 – 40	1,2	0,75	0,35
50 – 60	0,9; 0,8	0,5	0,3
70 – 120	0,5	0,2	0,15
120 – 180	0,4	0,2	0,15

В области частот более 180 ГГц также применяются принципы резонансной трансформации импеданса ЛПД, однако конструктивное выполнение корпусов требует специального решения, обеспечивающего достижение резонансных частот в указанном диапазоне [14].

Торцы рубиновых втулок металлизуют вакуумным напылением слоев хрома и золота толщиной 0,1 и 1,0 мк соответственно. Втулки монтируют на основание теплоотвода методом термокомпрессионной сварки. Рис. 3 иллюстрирует принципы включения корпусированных резонансных ЛПД в СВЧ-конструкции, выполненные на разных типах линий передачи: волноводно-коаксиальный переход (*а*), полный волновод (*б*), диэлектрический волновод (*в*), микрополосковая линия (*г*), несимметричная щелевая линия (НЩЛ) с перекрытием в волноводе (*д*). Исследования показали, что корпусированный лавинно-пролетный диод может рассматриваться как полупроводниковый прибор с амплитудно-частотными зависимостями импеданса и энергетических характеристик.

Изменение параметров в широких пределах возможно путем изменения диаметра диэлектрической втулки и крышки корпуса. Перемещение корпусированного диода совместно с его теплоотводящим основанием вдоль оси диода и перпендикулярно к направлению распространения волны в линии передачи позволяет изменять основные параметры диода в процессе настройки устройства, т. е. производит одновременно настройку диода и всего устройства в целом. Такая комплексная настройка выполнима в электродинамических конструкциях с различными линиями передачи.

Высокочастотные источники мощности (см. рис. 3), работающие в моногармоническом режиме на основной частоте, обычно характеризуются низкой добротностью, т. к. не содержат специальных стабилизирующих устройств, в частности резонаторов. В связи с этим стабилизационные и спектральные характеристики этих источников низки, и они, как правило, не находят применения

в качестве задающих генераторов, генераторов приемных устройств и т. д. В то же время низкая добротность является важным фактором при создании широкодиапазонных генераторов в режиме внешней синхронизации.

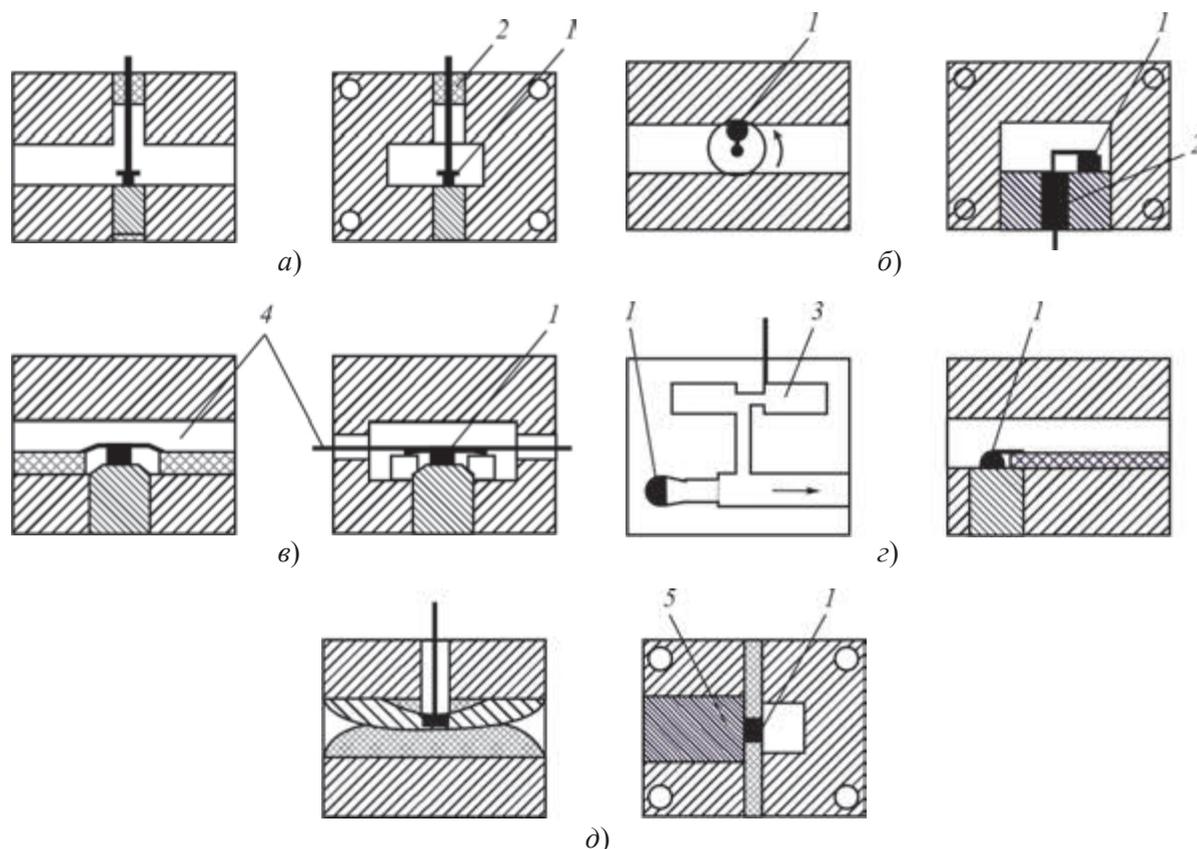


Рис. 3. Схема включения ЛПД в различные линии передачи:

- a* – волноводно-коаксиальная; *б* – волноводная; *в* – диэлектрический волновод;
г – микрополосковая линия; *д* – НЩЛ с перекрытием в волноводе;
 1 – ЛПД; 2 – поглощающая нагрузка; 3 – микрополосковый фильтр питания;
 4 – экран с выводами питания; 5 – теплоотвод

Рассмотренные принципы корпусирования полупроводниковых диодов позволяют создавать и оптимизировать высокочастотную цепь генератора для достижения наилучших энергетических, диапазонных и спектральных характеристик. Задача сводится к проектированию электродинамической конструкции и способов установки в ней корпусированного диода, при которых достигается максимальный диапазон перестройки при изменении мощности задающего генератора синхронизации.

Рассмотрим наиболее распространенную конструкцию генератора, основанную на применении волноводно-коаксиального сочленения (рис. 4). Коаксиальная линия с волновым сопротивлением W_k может быть смещена относительно центра волновода с волновым сопротивлением W_d на величину Δ . В коаксиальной линии установлен корпусированный диод 1, смонтированный на теплоотводящем основании, и антипаразитная нагрузка 2. Выход генератора соединен при помощи циркулятора с нагрузкой и источником синхронизирующего сигнала.

Полная эквивалентная схема рассматриваемой конструкции генератора приведена на рис. 5.

Параметры эквивалентной схемы определяются в результате экспериментального и теоретического исследования крестообразных волноводно-коаксиальных конструкций [15].

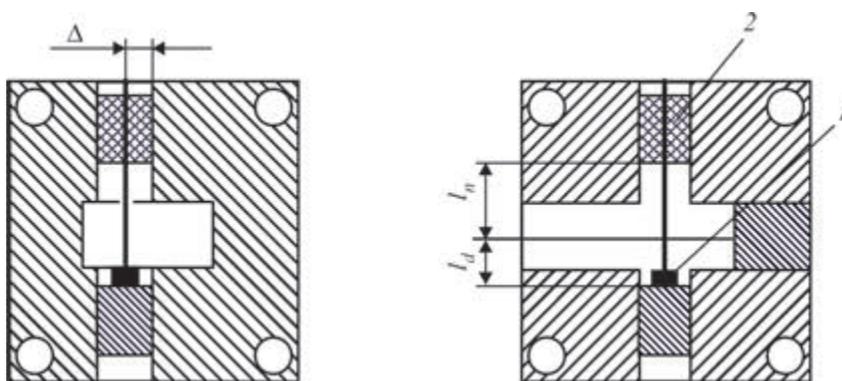


Рис. 4. Конструкция генератора, выполненного на волноводно-коаксиальном сочленении

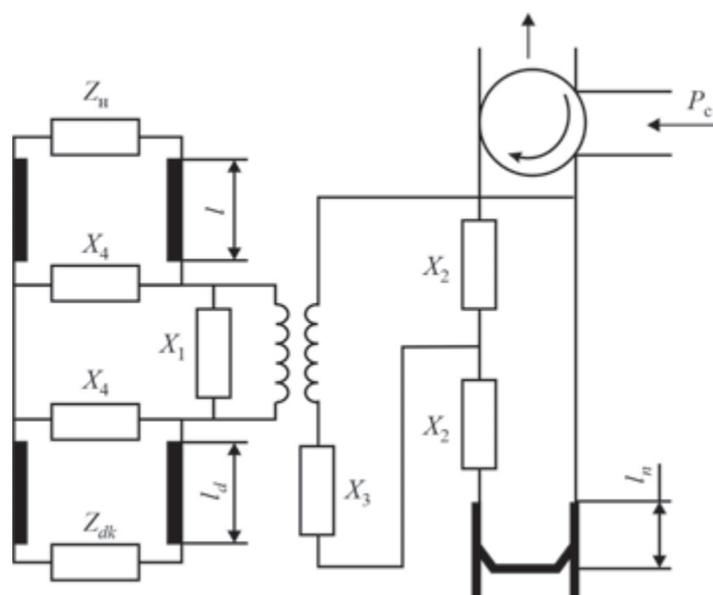


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения высокочастотной цепи синхронизированного генератора на основе волноводно-коаксиального сочленения

Двухполюсники X_1 , X_4 включены в сечении коаксиальной линии S_k , совпадающем со средней плоскостью волноводной секции, параллельной широкой стенке волновода и проходящей через его центр. Реактивные двухполюсники X_2 , X_3 , а также вторичная обмотка трансформатора подключены к точкам, расположенным на оси, перпендикулярной широкой стенке волновода и проходящей через её центр. Особенностью рассматриваемой конструкции является возможность изменения коэффициента трансформации n при изменении смещения Δ оси коаксиальной линии и при изменении положения диода в коаксиальной линии. Зависимости коэффициента трансформации $n = f(\Delta)$ при частоте около 35 ГГц приведены на рис. 6.

Изменение величины n в широких пределах позволяет обеспечить требуемое согласование импеданса диода и нагрузки без применения дополнительных реактивных неоднороднос-

тей в выходном сечении волноводной секции генератора. Частотно-избирательным узлом СВЧ-цепи генератора является корпусированный диод с резонансной трансформацией импеданса к полупроводниковой структуре. В связи с низкой добротностью резонансного контура диода обобщенная добротность СВЧ-цепи генератора принимает значение, уменьшающееся при увеличении эквивалентной проводимости нагрузки как $G_n = G_0/n^2$. Проведенные исследования позволяют выбрать схему и параметры конструкции широкодиапазонного синхронизированного генератора. Конкретное применение полученных результатов приводится в следующем разделе работы при описании синхронизированных генераторов импульсного действия с электронной перестройкой частоты [12].

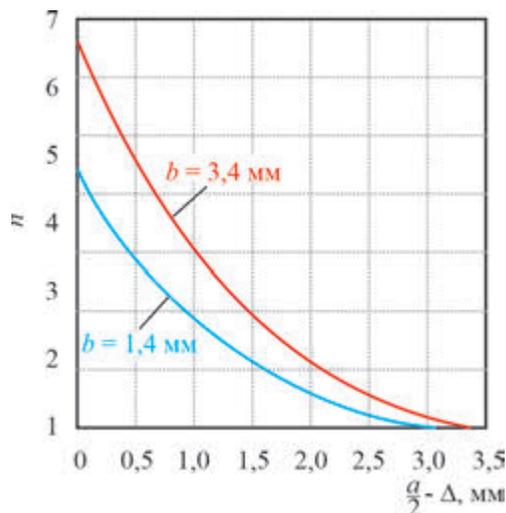


Рис. 6. Зависимости коэффициента трансформации n от смещения оси коаксиала Δ относительно центра волновода при высоте волновода b и ширине $a = 7,2$ мм

Полупроводниковые диодные генераторы в режиме внешней синхронизации могут рассматриваться как синхронные усилители отражательного типа. Их отличие от стабильных усилителей отражательного типа состоит в том, что при выключении входного сигнала ($P_{вх} = 0$) мощность выходного сигнала равна автоколебательной мощности P_0 . В стабильном усилителе при $P_c = 0$ и $P_{вх} = 0$. В результате оказывается, что при одинаковых уровнях входного сигнала и прочих равных условиях за счет включения в суммарную выходную мощность дополнительной автоколебательной мощности, близкой к максимальной P_{0max} , достижимый уровень выходной мощности синхронного усилителя больше, чем стабильного усилителя (рис. 7).

Область применения диодных синхронных усилителей отражательного типа ограничена усилением мощности частотно- или фазомодулированных колебаний в выходных каскадах передающих устройств. Стабильные усилители применяются в каскадах передающих и приемных устройств, в которых время прихода усиливаемых сигналов не определено. При использовании в качестве высокочастотной цепи волноводно-коаксиальной системы (см. рис. 4), переход из режима синхронного усиления в режим стабильного усиления достигается увеличением коэффициента трансформации n за счет смещения оси коаксиальной линии от оси волновода при неизменных параметрах диода. Минимальный уровень шума диодных усилителей больше, чем у транзисторных усилителей. В связи с этим в чувствительных приемных устройствах применяются маломощные усилители на транзисторах.

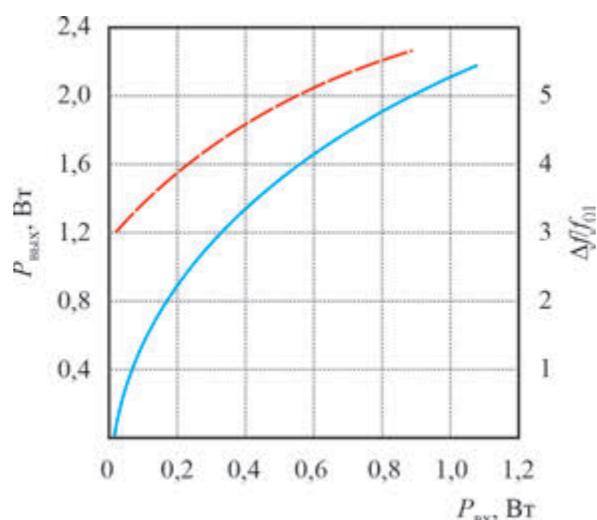


Рис. 7. Зависимости выходной мощности $P_{вых}$ от входной мощности $P_{вх}$:

--- синхронизированный усилитель; — стабильный усилитель

В известных конструкциях генераторов и усилителей СВЧ-мощности на ЛПД используются полупроводниковые структуры сосредоточенного типа, в которых важным фактором, ограничивающим повышение выходной СВЧ-мощности, является тепловой режим, учитывая который, приходится работать при плотностях тока ниже оптимального. Повышение подводимой мощности может быть достигнуто, например, при уменьшении теплового сопротивления диода R_T [16].

Одним из известных способов уменьшения теплового сопротивления диода является переход к полупроводниковой структуре с развитой периферией, поскольку при этом увеличивается теплопередача в боковых направлениях. Полупроводниковые структуры распределенного типа могут быть выполнены протяженными, в виде прямоугольника или тонкого кольца достаточно большого диаметра.

В работе [17] экспериментально показана эффективность использования кольцевых структур ЛПД большого диаметра для создания синхронизированных усилителей импульсного действия с целью повышения средней СВЧ-мощности. Представляется целесообразным использование активных полупроводниковых структур с распределенными параметрами для создания усилителей бегущей волны в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Для этого можно использовать, например, протяженный лавинный $p-n$ -переход. Усилитель представляет собой протяженный, отрицательно смещенный источником тока $p-n$ -переход, обладающий отрицательным сопротивлением, обусловленным лавинно-пролетным механизмом. В силу особенностей такой структуры, можно предположить, что распределенный усилитель на ЛПД будет иметь ряд преимуществ по мощности и рабочей полосе по сравнению с другими, выполненными на диодах с сосредоточенными параметрами.

3. СТАБИЛИЗАЦИЯ СВЧ-ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРОВ

Выбор кремниевого ЛПД в качестве активного элемента источников мощности импульсного действия определяется тем, что при его использовании реализуются наибольшие уровни СВЧ-мощности, превышающие 30 Вт для длины волны в 8 мм и 10 Вт для длины волны в 3 мм при скважности, большей 100, и длительности импульса выходного СВЧ-сигнала, меньшей или равной

300 нс. Эти уровни примерно на порядок выше, чем у наиболее эффективных генераторов на НЕМТ и РНЕМТ.

Особенностью работы генераторов импульсного действия является изменение частоты в пределах СВЧ-импульса вследствие изменения температуры, что приводит к изменению импеданса и, следовательно, к изменению фазы по отношению к синхронизирующему сигналу. В этом случае нарушаются фазовые соотношения сигналов (явление фазовой модуляции). Уменьшение фазовой модуляции или её полное исключение (что требуется для создания когерентных передатчиков) обеспечивается путем применения токовой компенсации, т. е. используется специальная форма импульса тока управления, при которой исключается или существенно уменьшается изменение частоты в пределах импульса.

При разработке мощных импульсных генераторов миллиметрового диапазона необходимо учитывать ряд других особенностей:

- работу диода при высоких плотностях тока ($j_{\text{имп}} \approx 40 \text{ кА/см}^2$), в результате чего собственная частота ЛПД (частота последовательного резонанса) приближается к рабочей частоте, что увеличивает влияние изменений режима электрического питания, температуры окружающей среды и параметров нагрузки на характеристики прибора [18];

- значительное возрастание омических потерь генератора, соизмеримых с величиной модуля отрицательного сопротивления полупроводниковой структуры в режиме большого сигнала.

Определение достижимых характеристик генератора требует выбора температурного режима диода в зависимости от его геометрии и параметров импульсного питания. В ряде работ [19–21] определение температурных характеристик диода производится на основе приближенного аналитического подхода. Для установления связи между подводимой мощностью P_0 и рабочей температурой p - n -перехода T_{pn} вводится понятие теплового сопротивления R_T , которое прямо пропорционально среднему перепаду температуры ΔT_{cp} , возникающему на теплоотводе диодной структуры:

$$P_0 = \Delta T_{cp} / R_T, \quad \Delta T_{cp} = T_{pn} - T_0, \quad (6)$$

где T_0 – температура окружающей среды. Общее тепловое сопротивление R_T можно рассматривать как сумму теплового сопротивления растекания R_{ts} и продольного теплового сопротивления $R_{t,пр}$ [20]:

$$R_T = R_{ts} + R_{t,пр}. \quad (7)$$

Здесь

$$R_{ts} = 1/2d_{pn}K, \quad R_{t,пр} = \sum_i^n (l_i / K_i) / (\pi d_i^2 / 4), \quad (8)$$

где d_{pn} – диаметр структуры ЛПД; K – коэффициент теплопроводности материала теплоотвода; l_i, d_i, K_i – толщина, диаметр и коэффициент теплопроводности i -слоя структуры ЛПД.

Анализ тепловых характеристик и выбор конструкции ЛПД в режиме коротких импульсов выполнены в работе [22]. Случай, когда длительность импульса равна или больше времени тепловой релаксации, исследован в статье [23]. На рис. 8 приведены зависимости переходных тепловых сопротивлений кремниевой двухпролетной структуры ЛПД с диаметром $d_{pn} = 150 \text{ мкм}$ от величины скважности Q и длительности импульса тока питания τ_n .

Перегрев полупроводниковой структуры при длительности импульса 300...400 нс составляет 250...300 °С при токе питания, соответствующем режиму максимальной СВЧ-мощности. Если длительность импульсов тока питания существенно меньше времени поперечной тепловой ре-

лаксации, а скважность импульсов питания Q велика, нагрев полупроводниковой структуры в режиме средней мощности несущественен.

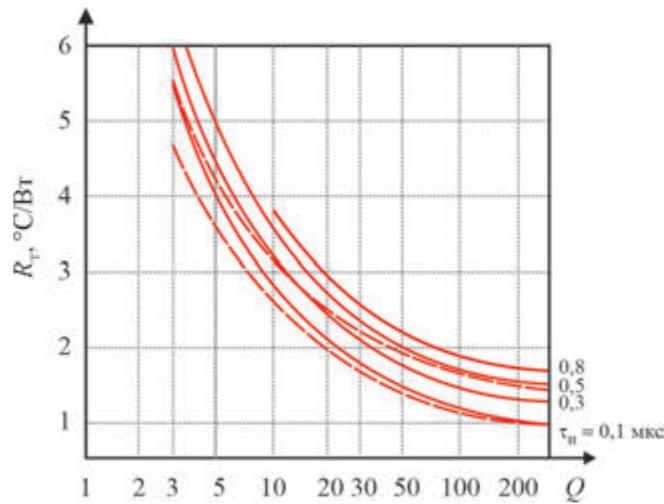


Рис. 8. Зависимости переходного теплового сопротивления ЛПД R_T от скважности Q и длительности импульса тока питания τ_n :
 — расчет; - - - эксперимент

Разогрев полупроводниковой структуры в пределах длительности импульса тока питания диода приводит к изменениям импеданса ЛПД и, в результате, к внутриимпульсной нестационарности СВЧ-характеристик импульсных генераторов. На рис. 9 приведены зависимости импеданса $z_d = r_d + x_d$ двухпролетного ЛПД с оптимальным профилем легирования на частоте около 40 ГГц, рассчитанные для плотности тока питания $j_0 = 18 \text{ кА/см}^2$ при амплитудах напряжений сигнала $U_m = 3 \dots 26 \text{ В}$ и максимальных температурах $\theta = 300, 390, 500 \text{ К}$ [18]. Видно, что при температурах $< 300 \text{ К}$ и напряжениях на диоде $U_m < 10 \text{ В}$ частота становится больше рабочей частоты, вследствие чего реактивное сопротивление диода изменяет свой знак и становится индуктивным; при $\theta \leq 300 \text{ К}$ и $U_m \leq 5 \text{ В}$ модуль отрицательного сопротивления уменьшается. В области большого сигнала ($U_m > 15 \text{ В}$) зависимость импеданса диода от температуры существенно снижается, однако модуль отрицательного сопротивления в этой области уменьшается до величины, соизмеримой с сопротивлением потерь в СВЧ-цепи. В связи с этим оптимизация генератора по энергетическим характеристикам приводит к необходимости максимального уменьшения сопротивления растекания диода r_s , оптимизации диаметра его структуры и к применению трансформации импеданса ЛПД [18]. Фактически, это те же требования, которые предъявляются к ЛПД непрерыв-

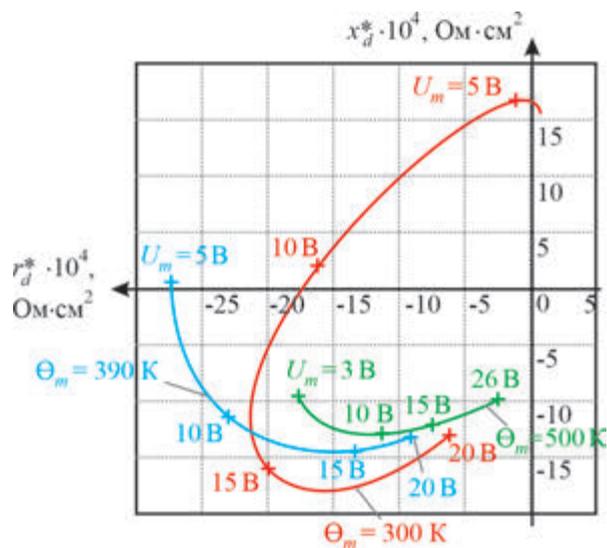


Рис. 9. Зависимости импеданса $z_d = r_d + x_d$ кремниевое двухпролетного диода от амплитуды U_m напряжения сигнала, рассчитанные для температур полупроводниковой структуры $\theta = 300, 390, 500 \text{ К}$

Видно, что при температурах $< 300 \text{ К}$ и напряжениях на диоде $U_m < 10 \text{ В}$ частота становится больше рабочей частоты, вследствие чего реактивное сопротивление диода изменяет свой знак и становится индуктивным; при $\theta \leq 300 \text{ К}$ и $U_m \leq 5 \text{ В}$ модуль отрицательного сопротивления уменьшается. В области большого сигнала ($U_m > 15 \text{ В}$) зависимость импеданса диода от температуры существенно снижается, однако модуль отрицательного сопротивления в этой области уменьшается до величины, соизмеримой с сопротивлением потерь в СВЧ-цепи. В связи с этим оптимизация генератора по энергетическим характеристикам приводит к необходимости максимального уменьшения сопротивления растекания диода r_s , оптимизации диаметра его структуры и к применению трансформации импеданса ЛПД [18]. Фактически, это те же требования, которые предъявляются к ЛПД непрерыв-

ного действия. Однако в импульсном режиме оптимальный диаметр структуры оказывается существенно зависящим от параметров режима питания.

Изменение теплового режима диода в пределах импульса тока питания приводит к значительным изменениям импеданса полупроводниковой структуры и, как результат, к нестабильности амплитуды и фазы выходного сигнала. Наиболее сильно нестабильность СВЧ-параметров проявляется при низких температурах окружающей среды в области переднего фронта импульса.

Известный метод стабилизации СВЧ-параметров генератора, так называемый метод токовой компенсации температурных изменений проводимости ЛПД [24–26], позволяет значительно улучшить ситуацию. Однако при использовании этого метода полная компенсация (особенно при низких температурах) не достигается и можно говорить лишь о минимизации негативных изменений характеристик.

Очевидным альтернативным путем стабилизации СВЧ-параметров является введение дополнительного подогрева полупроводниковой структуры, при котором начальная температура θ_0 диода в области переднего фронта каждого импульса остается практически постоянной, не зависящей от температуры окружающей среды. При этом в пределах длительности импульса стабилизация параметров генератора достигается применением токовой компенсации, т. е. таким изменением амплитуды импульсного тока во времени $j_0(t) = \delta I(t)$, при котором с учетом разогрева полупроводниковой структуры до температуры $\theta_0(t) = \theta_0 + \delta\theta(t)$ частота лавинного резонанса ЛПД остается неизменной. Совместное применение метода токовой компенсации и метода дополнительного подогрева обеспечивает наилучшую стабильность параметров генератора [27, 28].

Еще одним методом достижения высокой частотной стабильности является применение стабилизирующего резонатора. Его полоса частот должна превышать ширину спектра импульсного сигнала. Конструкция такого генератора основана на включении резонатора в реактивную отражающую цепь. Эскиз конструкции приведен на рис. 10. В ней применяется резонатор цилиндрического типа 1, возбуждаемый на волне типа H_{011} и перестраиваемый поршнем. Резонатор связан с волноводной секцией 2 щелью связи 3. Волноводно-коаксиальная секция содержит ЛПД 4 и антипаразитную нагрузку 5.

Принцип работы импульсного генератора аналогичен принципу работы стабилизированного генератора непрерывного действия, но имеется ряд особенностей в импульсном режиме. В режиме стабилизации частоты импульсного автогенератора из-за инерционности теплового режима возможна частотная синхронизация сигнала стабилизирующим резонатором. При недостаточно быстром нарастании тока питания возникают паразитные колебания на частотах побочных колебательных контуров, образуемых неоднородностями в высокочастотной цепи генератора, подавление которых достигается уменьшением длительности фронтов импульсов тока. Также возможно применение быстродействующего модулятора на выходе генератора, гасящего эти колебания.

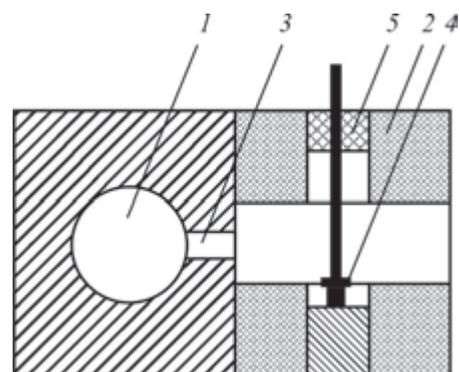


Рис. 10. Эскиз конструкции стабилизирующего импульсного генератора на ЛПД

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой части статьи мы рассмотрели основные конструкции генераторов миллиметрового диапазона длин волн на ЛПД и методы стабилизации их параметров. Во второй части будет дан обзор работ по созданию источников СВЧ-мощности импульсного и непрерывного действия на ЛПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карушкин, Н. Ф.** Влияние когерентных свойств излучения твердотельных генераторов СВЧ на характеристики технологических доплеровских РЛС / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин, В. С. Коростылев, А. В. Костенко, И. К. Кузьмичев, Г. И. Хлопов, В. П. Шестопалов // Твердотельные генераторы и преобразователи миллиметрового и субмиллиметрового диапазона: Сб. научн. тр. – Харьков: ИРЭ АН УССР. – 1989. – С. 108 – 119.
2. Активные фазированные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
3. **Тагер, А. С.** Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. – М.: Сов. радио, 1968. – 470 с.
4. **Goedbloed, I. I.** Theory of noise and transfer properties of IMPATT diode amplifiers / I. I. Goedbloed, M. T. Vluardingbroek // IEEE Trans. – 1977. – Vol. MTT-25, No 4. – P. 324 – 332.
5. **Гершензон, Е. М.** Внешняя синхронизация генераторов на лавинно-пролетных диодах / Е. М. Гершензон, А. А. Левитес, Л. А. Плохова и др. // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 11. – С. 2179 – 2183.
6. **Андреев, В. С.** К теории синхронизации автогенераторов на приборах с отрицательным сопротивлением / В. С. Андреев // Радиотехника. – 1975. – № 2. – С. 43 – 53.
7. **Фомин, Н. Н.** Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизированных генераторах / Н. Н. Фомин, В. С. Андреев, Э. С. Воробейчиков и др.; под ред. Н. Н. Фомина. – М.: Радио и связь, 1991. – 192 с.
8. **Endersz, G.** Stability and linearity of frequency modulated and injection locked oscillators for communication system // Ericsson Technics. – 1976. – Vol. 32, No 4. – P. 249 – 311.
9. **Давыдова, Н. С.** Диодные генераторы и усилители СВЧ / Н. С. Давыдова, Ю. З. Данюшевский. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
10. Теория линий передачи сверхвысоких частот. Ч. II. / Перевод с англ. под ред. А. И. Шпунтова. – М.: Сов. радио, 1951. – 280 с.
11. Справочник по волноводам / Пер. с англ. под ред. Я. Н. Фельда. – М.: Сов. радио, 1952.
12. **Дворниченко, В. П.** Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты Ka-диапазона / В. П. Дворниченко, Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, В. А. Ореховский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 4. – С. 3 – 7.
13. **Пат. 2657324 РФ.** Применение промышленного часового камня в качестве корпуса полупроводникового устройства миллиметрового диапазона длин волн / Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов, Е. А. Смирнова. – Приоритет 20.10.2016.
14. **Карушкин, Н. Ф.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ-диапазона / Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов, Е. А. Смирнова // 29-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрымМиКо'2019. Сентябрь 2019. – С. 1 – 2.
15. **Gorbachev, O.** Complex coaxial-waveguide transitions at millimeter-waves / O. Gorbachev, L. Kasatkin // Microwave Journal. – 2001. – Vol. 44. – P. 90 – 100.
16. **Басанец, В. В.** Мощные кремниевые импульсные лавинно-пролетные диоды 8-миллиметрового диапазона / В. В. Басанец, Н. С. Болтовец, А. В. Зоренко, А. В. Гуцул, Н. В. Колесник, С. И. Геращенко // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – № 1. – С. 27 – 30.

17. **Карушкин, Н. Ф.** Использование кольцевых структур ЛПД для увеличения средней импульсной мощности генераторов миллиметрового диапазона / Н. Ф. Карушкин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 2010. – Вып. 4 (507). – С. 46 – 54.
18. **Белоусов, Н. П.** Температурная зависимость динамических характеристик импульсных ЛПД / Н. П. Белоусов, В. В. Новожилов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 3. – С. 23 – 26.
19. **Касаткин, Л. В.** Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД / Л. В. Касаткин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 44, № 3. – С. 18 – 25.
20. **Касаткин, Л. В.** Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
21. **Тагер, А. С.** Расчет токовой стабилизации частоты импульсных ЛПД / А. С. Тагер, Е. М. Голант // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 11. – С. 20 – 23.
22. **Тагер, А. С.** К расчету тепловых характеристик полупроводниковых структур в режиме коротких импульсов / А. С. Тагер // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1996. – Вып. 2. – С. 41 – 47.
23. **Касаткин, Л. В.** Мощные импульсные полупроводниковые источники миллиметрового диапазона в режиме внешней синхронизации / Л. В. Касаткин, В. П. Рукин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48, № 6. – С. 3 – 19.
24. **Горбачев, А. В.** Экспериментальные исследования методов стабилизации параметров импульсных ГЛПД в интервале температур / А. В. Горбачев // Твердотельные генераторы и преобразователи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1989. – С. 33 – 38.
25. **Белоусов, Н. П.** Токовая стабилизация амплитудно-частотных характеристик синхронизированных импульсных ГЛПД в интервале температур / Н. П. Белоусов, А. В. Горбачев, Л. В. Касаткин, В. В. Новожилов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 4. – С. 10 – 15.
26. **Eisenhort, R.** Controlled bias preheating for variable duty factor IMPATT transmitter / R. Eisenhort, R. Robertson // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig, 1985. – P. 529 – 530.
27. **Карушкин, Н. Ф.** Стабилизация СВЧ-параметров импульсных ГЛПД / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 1 (475). – С. 22 – 27.
28. **Авт. свид. 1162017 СССР.** Генератор сверхвысокочастотных радиоимпульсов / Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин, В. В. Новожилов, В. С. Добрянский, В. В. Имшенецкий. – Приоритет 1983.

Статья поступила 9 декабря 2021 г.

УДК 621.382.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ Г- И Т-ЗАТВОРОВ В DA-DpHEMT

В. М. Лукашин

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

Описаны основные особенности формирования Г- и Т-затворов в DA-DpHEMT. Отмечено, что в транзисторах мм-диапазона желательно использовать увеличенную толщину затворного диэлектрика, что способствует снижению влияния шляпки затвора на управление проводимостью канала. Показано, что окно в затворном диэлектрике, даже при увеличенной его толщине, и затвор могут быть полностью сформированы в рамках одной операции литографии. Эта возможность обеспечивается, если окно имеет сглаженные верхние края и (или) стенки с положительным наклоном. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении не только DA-DpHEMT, но и pHEMT и DpHEMT с улучшенными характеристиками.

КС: затвор, окно в Si_3N_4 , профиль стенок окна в Si_3N_4 , реактивное ионное травление (РИТ) Si_3N_4 , образование дефектов у поверхности полупроводника при формировании окна в Si_3N_4 методом РИТ

THE FEATURES OF Г- AND T-GATES FORMATION IN DA-DpHEMT

V. M. Lukashin

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

The main features of Г- and T-gates formation in DA-DpHEMT are described. It is noted that in mm-range transistors it is desirable to use an increased thickness of the gate dielectric which helps to reduce the effect of the gate cap on the control of the channel conductivity. It is shown that the window in the gate dielectric, even with its increased thickness, and the gate can be completely formed within a single lithography operation. This possibility is provided if the window has smooth top edges and/or walls with a positive slope. The results obtained can be used when manufacturing not only DA-DpHEMT, but also pHEMT and DpHEMT with improved characteristics.

Keywords: gate, window in Si_3N_4 , window wall profile in Si_3N_4 , Si_3N_4 reactive ion etching (RIE), appearance of defects near the semiconductor surface during the formation of a window in Si_3N_4 by RIE method

1. ВВЕДЕНИЕ

Практически все начало активной разработки и производства мощных СВЧ полевых транзисторов связано с оптимизацией конструкции и технологии формирования омических контактов истока, стока и затворов [1]. В конструкции и технологии формирования затворов в мощных СВЧ полевых транзисторах от начала активной разработки и до настоящего времени был сделан переход от затвора с трапецевидной формой продольного сечения [2] к затвору с Т-образной формой. Такой затвор отличается пониженным сопротивлением в направлении его ширины, что дает возможность, как минимум, сохранить быстродействие транзистора, но при этом за счет увеличения ширины увеличить его выходную СВЧ-мощность. В целях улучшения функциональных возможностей Т-затвора, в АО «НПП «Исток» им. Шокина» были разработаны конст-

рукция и технология формирования затворов с Г-образной формой продольного сечения, обладающих рядом преимуществ по отношению к Т-затвору. В частности, технология Г-затвора позволяет формировать основание затвора длиной 0,09...0,11 мкм [3] высокопроизводительными методами оптической литографии. При этом можно обеспечить величину сопротивления Г-затвора в направлении его ширины не хуже, чем в аналогичном по площади шляпки Т-затворе. Этот полезный эффект достигается за счет увеличения высоты ножки Г-затвора при увеличении толщины затворного диэлектрика.

Методы формирования Г- и Т-затворов в DA-DpHEMT практически ничем не отличаются от методов их формирования в pHEMT и DpHEMT, однако имеется ряд особенностей, позволяющих повысить быстродействие и величину максимального стабильного коэффициента усиления (MSG) СВЧ-мощности. Метод формирования затворов в DA-DpHEMT напрямую связан со специфичным легированием слоев в DA-DpHEMT-структурах, в частности с наличием контактных слоев i -GaAs и n^+ -GaAs:Si (табл. 1). Наличие этих слоев требует проведения вскрытия в них окна (рис. 1) для формирования основания затвора на поверхности подзатворного слоя из $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$. Поскольку в DA-DpHEMT используется технология формирования омических контактов непосредственно к слою InGaAs-канала, выходящего на поверхность боковых стенок мезы транзистора, может сформироваться ошибочное мнение, что контактные слои могут быть исключены из состава гетероструктуры без отрицательных последствий. Однако это не так. В частности, удаление контактных слоев приводит к локализации вектора максимальной напряженности электрического поля между стоком и затвором $(\vec{E}_{DG})_{max}$ в подзатворном слое нелегируемого $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ и в спейсере, что сильно снижает пробивные напряжения. Сохранение в транзисторе контактных слоев существенно улучшает ситуацию в плане увеличения пробивных напряжений. На рис. 1 показано, что при наличии достаточно толстых i -GaAs и n^+ -GaAs контактных слоев обеспечивается локализация $(\vec{E}_{DG})_{max}$ в слое Si_3N_4 , что увеличивает пробивное напряжение «сток – затвор» U_{BDG} при сохранении малого расстояния между n^+ -GaAs контактным слоем стока и затвором. Конечно, увеличение U_{BDG} при сохранении контактных слоев в конструкции транзистора наблюдается только после удаления дефектов от плазменных обработок в приповерхностном слое $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ подзатворного слоя, что согласуется с результатами [4, 5]. В DA-DpHEMT при обратном смещении на Т-затворе и при толщинах контактных слоев, приведенных на рис. 1, получено $U_{BDG} = 32$ В при весьма малом расстоянии «затвор – стоковый контактный n^+ -GaAs:Si-слой», равном 0,9 мкм [6]. Сохранение контактных слоев способствует также и увеличению пробивного напряжения «исток – затвор» U_{BGS} .

Таблица 1

Набор и последовательность выращивания на $\langle 100 \rangle$ Si-GaAs-подложке основных слоев DA-DpHEMT-гетероструктур [6]

№	Слой, его назначение	Уровень легирования	Толщина, нм
1	GaAs – буферный слой	–	400
2	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – буферный слой	–	100
3	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As:Be$ – нижний акцепторный слой	$2,55 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	15
4	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – i -слой	–	3,6
5	GaAs – нижняя стенка нижней матрицы	–	0,9

№	Слой, его назначение	Уровень легирования	Толщина, нм
6	Нижний δ :Si-слой	$6,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
7	GaAs – верхняя стенка нижней матрицы	–	1,5
8	(AlAs) ₃ /(GaAs) ₅ – нижний спейсер	–	3,1
9	GaAs – нижний сглаживающий слой	–	0,9
10	In _{0,22} Ga _{0,78} As-канал	–	10
11	GaAs – верхний сглаживающий слой	–	0,9
12	(AlAs) ₂ /(GaAs) ₃ – верхний спейсер	–	2,3
13	GaAs – нижняя стенка верхней матрицы	–	0,9
14	Верхний δ :Si-слой	$9,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	–
15	GaAs – верхняя стенка верхней матрицы	–	1,5
16	Al _{0,33} Ga _{0,67} As – <i>i</i> -слой	–	2,3
17	Al _{0,25} Ga _{0,75} As – <i>i</i> -слой	–	3,0
18	Al _{0,33} Ga _{0,67} As – <i>i</i> -слой	–	2,3
19	Al _{0,25} Ga _{0,75} As:Be – верхний акцепторный слой	$4,83 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	8
20	Al _{0,25} Ga _{0,75} As – подзатворный слой	–	20
21	GaAs – контактный <i>i</i> -слой	–	27
22	<i>n</i> ⁺ -GaAs:Si – контактный слой	$4,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	52

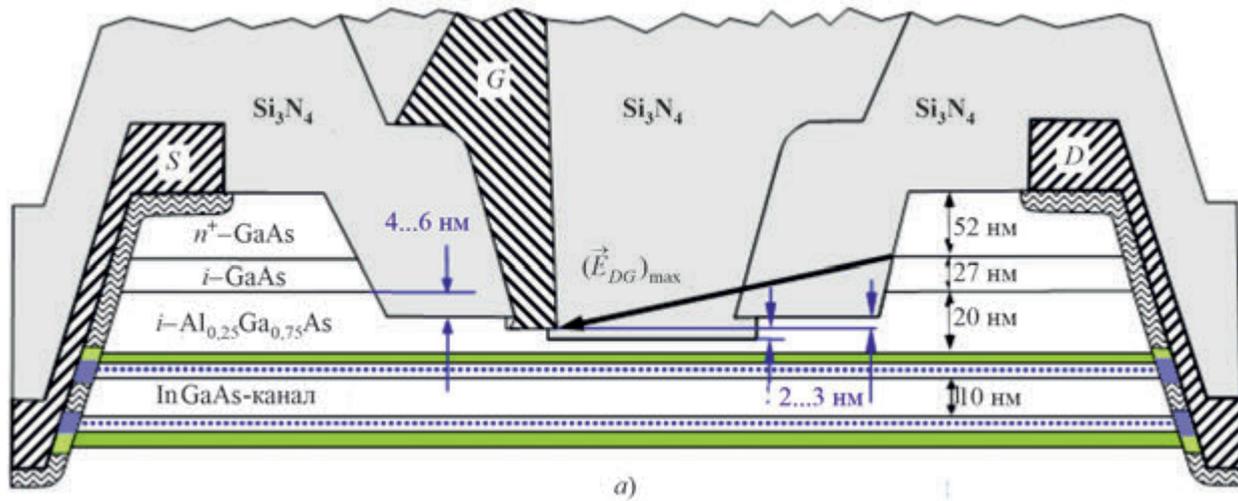


Рис. 1. Схематичные виды сечений DA-DpHEMT (см. также с. 23):
 а – транзистор с Γ -затвором при наклонном напылении металлизации затвора

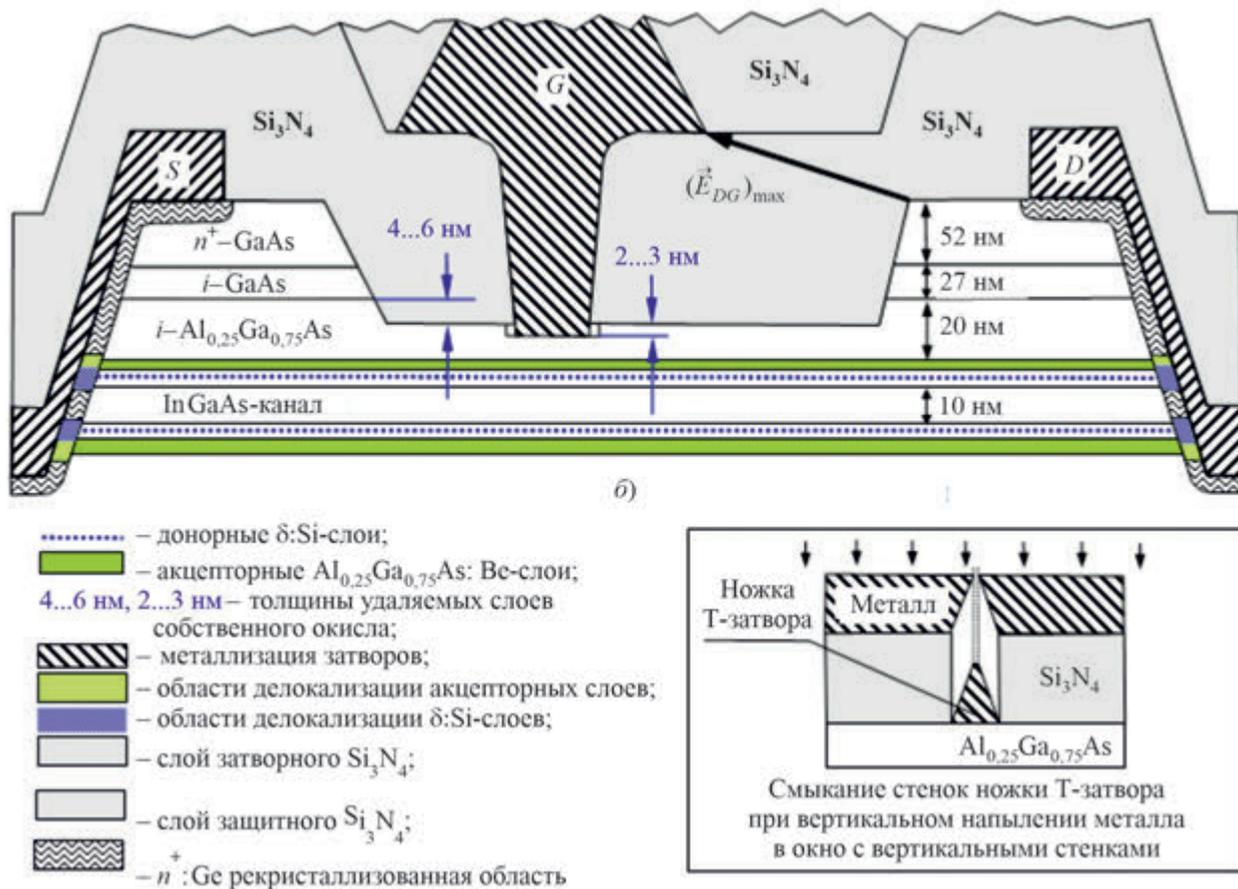


Рис. 1. Схематичные виды сечений DA-DpHEMT:

б – транзистор с Т-затвором при вертикальном напылении металлизации затвора

При использовании гетероструктуры с параметрами, приведенными в табл. 1, формирование Г- или Т-затвора проводится на поверхности Al_{0,25}Ga_{0,75}As подзатворного слоя 20 (см. табл. 1, рис. 1) после проведения операций вскрытия окна в контактных слоях 21, 22 и удаления собственного окисла с поверхности подзатворного слоя 20. На очищенной от собственного окисла верхней поверхности нелегируемого подзатворного слоя 20 в основании затвора формируется затворный контакт «металл – полупроводник», потенциал которого управляет проводимостью канала.

3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ Г-ЗАТВОРА

Для конструкции транзистора с Г-затвором характерным является возможность использования большого размера окна в слое затворного диэлектрика (Si₃N₄) при существенно меньшей длине основания затвора, что обеспечивается применением метода наклона пластины при напылении металлизации затвора [3]. В непосредственном контакте с металлизацией Г-затвора находится истоковая ступенька в слое затворного Si₃N₄, к наклонной боковой стенке которой примыкает ножка затвора, при этом шляпка затвора располагается на верхней горизонтальной поверхности ступеньки (рис. 2). На рис. 1, а показано, что боковая стенка затворного Si₃N₄ в области контакта

с затвором имеет наклон и сглаженный верхний угол. Такая форма боковой стенки позволяет формировать и ножку, и шляпку Г-затвора в одном процессе напыления металлизации затвора, избежав при этом образования дефектов в слое металлизации даже в случае вертикального напыления. Очевидно, что при формировании Г-затвора одной операцией литографии по затворному Si_3N_4 достаточно для формирования методом реактивного ионного травления (РИТ) как окна в затворном диэлектрике, так и топологии затвора, последнее – с применением метода обратной («взрывной») литографии. При этом автоматически обеспечивается самосовмещение расположений стенки окна и затвора.

На рис. 2 показано фото сечения ДрНЕМТ с Г-затвором [3].

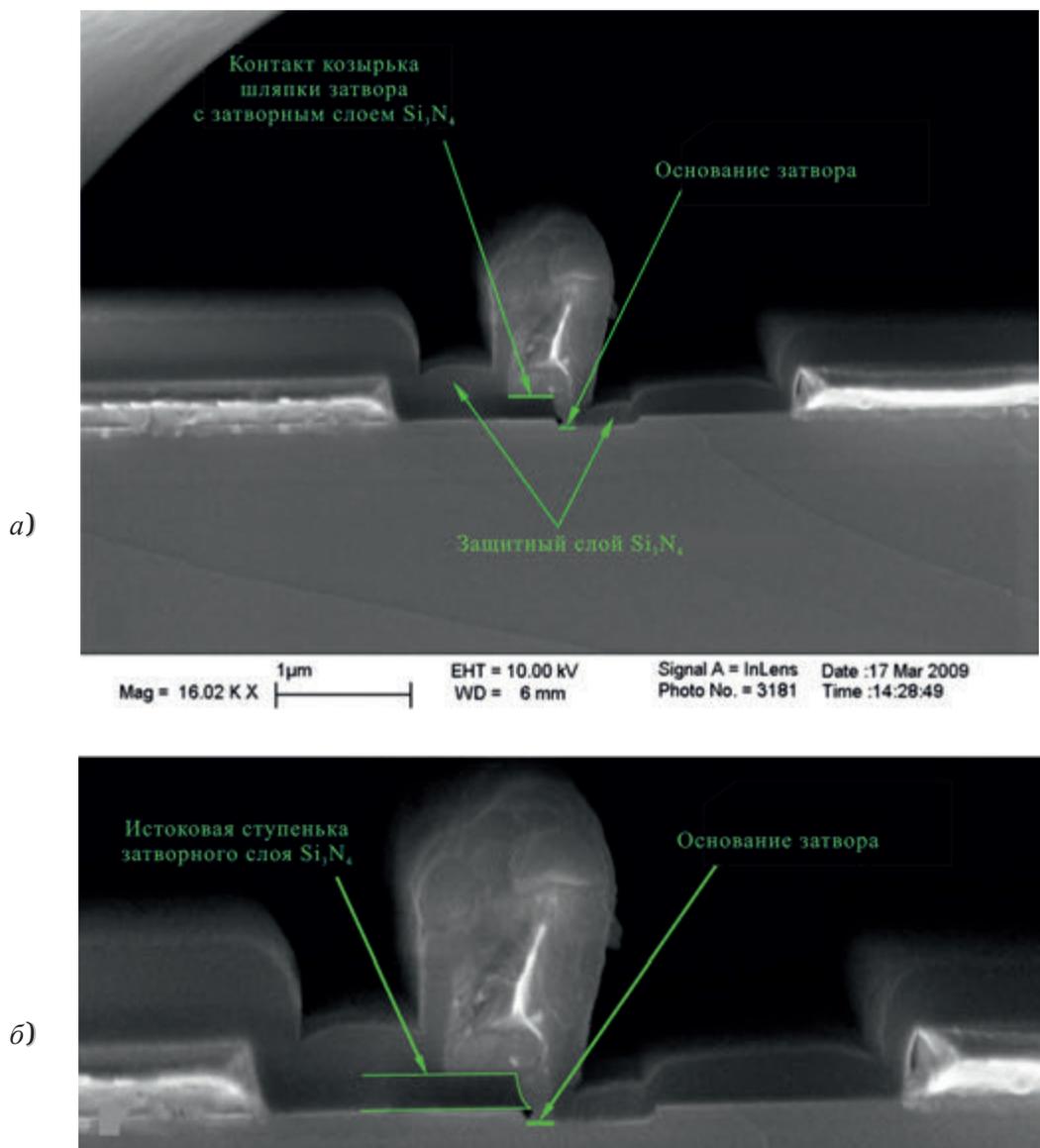


Рис. 2. Общий вид сечения ДрНЕМТ с Г-затвором при длине основания затвора 90...110 нм (а) и увеличенный фрагмент области затвора на общем виде сечения ДрНЕМТ с Г-затвором (б)

На рис. 2, б хорошо видно, что угол наклона боковой стенки истоковой ступеньки затворного слоя Si_3N_4 имеет переменную по толщине ступеньки величину. Такая форма боковой стенки получена применением в работе [3] однослойного электронорезиста (ЭР) и метода электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) для его экспонирования. При ЭЛЛ можно сформировать отрицательные углы наклона боковых стенок окна в электронорезисте, такой угол дал форму истоковой ступеньки затворного слоя Si_3N_4 , показанную на рис. 2, б.

Рис. 3, а поясняет динамику формирования истоковой ступеньки при РИТ или реактивном ионно-лучевом травлении (РИЛТ) затворного слоя Si_3N_4 с профилем, показанным на рис. 2, б.

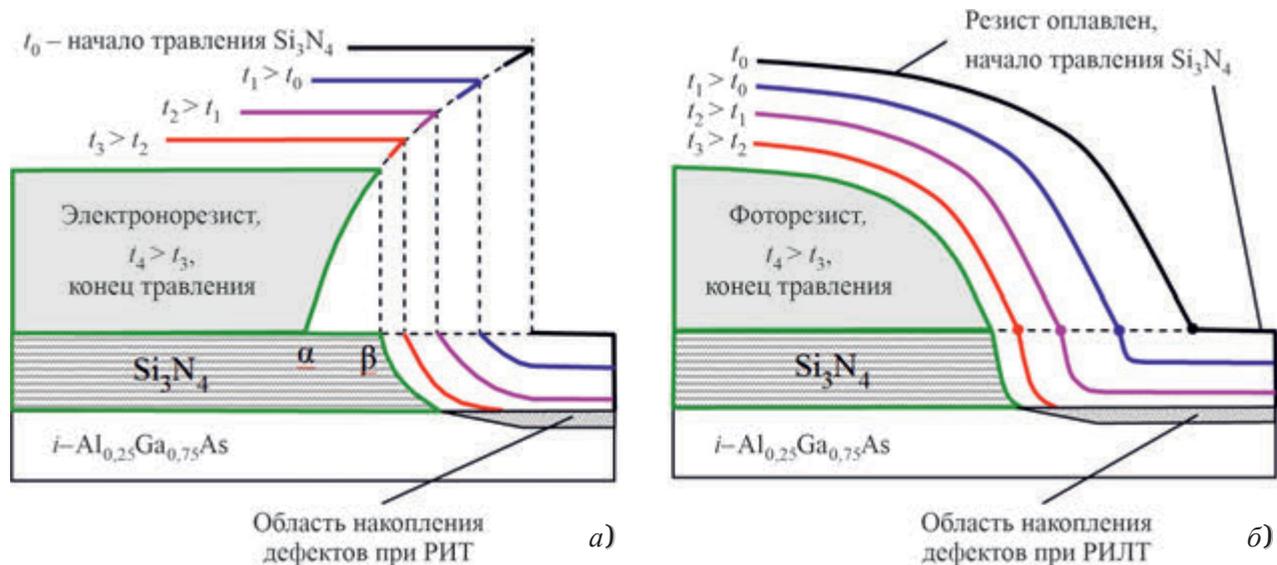


Рис. 3. Схематический вид динамики формирования истоковой ступеньки в затворном слое Si_3N_4 при эрозии резиста в процессе РИТ или РИЛТ:

а – окно в электронорезисте имеет отрицательный угол наклона;

б – используется оплавленный фоторезист

Из рис. 3, а следует, что сужение размера окна в резисте в направлении роста его толщины (т. е. отрицательный угол наклона боковой стенки окна в ЭР) из-за эрозии резистивной маски при РИТ слоя Si_3N_4 (например, РИТ или РИЛТ в плазме $\text{SF}_6 + \text{O}_2 + \text{He}$ при рабочем напряжении 40...50 В) приводит к переменной по толщине диэлектрика величине угла наклона боковой стенки истоковой ступеньки затворного слоя Si_3N_4 , но без сглаживания верхнего угла у ступеньки. Из-за присутствия ионов фтора в составе плазмы и образования стоп-слоя из AlF_3 процесс травления останавливается на верхней поверхности подзатворного слоя $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$. На рис. 3, а хорошо виден процесс образования площадки « $\alpha - \beta$ », на которой при наклонном напылении металлизации затвора располагается козырек шляпки затвора (см. рис. 2, а). По этой причине вариант, показанный на рис. 3, а, допускает возможность самосовмещения и использования одной операции литографии как для формирования истоковой ступеньки в затворном диэлектрике, так и для формирования Г-затвора.

Формирование окна в слое Si_3N_4 по варианту, показанному на рис. 3, б, дает нужный наклон боковой стенки окна в Si_3N_4 тоже без сглаживания верхнего угла окна, в этом случае для формирования затвора требуется дополнительная операция литографии по металлизации затвора. Этот вариант может быть применен для формирования Т-затворов (см. рис. 1, б).

Оптимальный вариант формирования окна в затворном Si_3N_4 и Г-затвора

Использование относительно более дорогостоящей и менее производительной операции ЭЛЛ (по сравнению с операцией оптической литографии) по слою затворного Si_3N_4 при формировании Г-затвора представляется возможным, но неоптимальным решением. Для Г-затворов в этом плане более перспективно использование фотолитографии с применением двух слоев фоторезиста, нижний из которых обладает повышенной фоточувствительностью.

На рис. 4 показаны окно в таком двухслойном фоторезисте, формирование окна в затворном слое Si_3N_4 и формирование Г-затвора при наклонном напылении его металлизации.

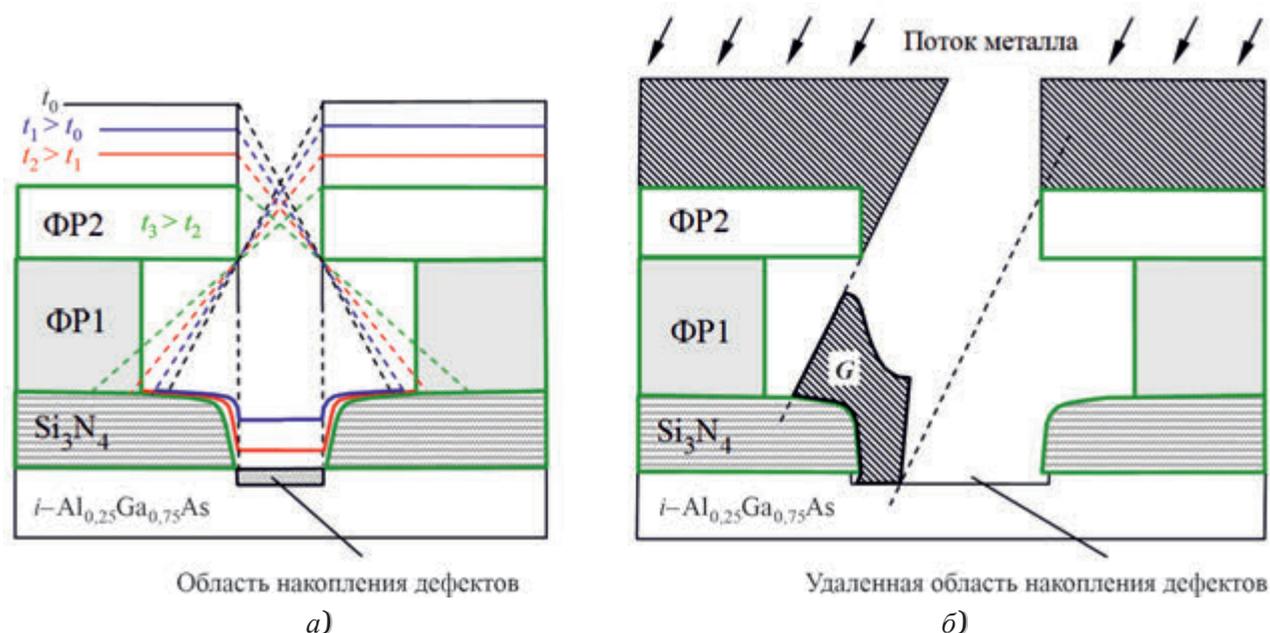


Рис. 4. Динамика изменения толщины второго слоя фоторезиста (ФР2) и формы окна в затворном слое Si_3N_4 при РИЛТ (а), а также формирование Г-затвора методом наклонного напыления его металлизации (б)

На рис. 4, а показаны изменение во времени толщины второго слоя фоторезиста и динамика увеличения углубления в затворном Si_3N_4 в процессе вскрытия окна. В процессе увеличения углубления в затворном слое Si_3N_4 , из-за горизонтальных компонент скоростей в потоке ионов, образуется небольшой наклон боковой стенки и сглаживаются углы «стенка окна – верхняя поверхность». Штриховые линии показывают смещение границ сглаженных участков в различные моменты времени $t_0 \dots t_3$. На рис. 4, б показан схематичный вид Г-затвора, сформированного методом наклонного напыления его металлизации при окне в затворном диэлектрике, имеющем небольшой наклон боковой стенки и сглаженные верхние углы.

Подготовка окна в контактных слоях перед формированием затворного слоя Si_3N_4

Перед нанесением затворного слоя Si_3N_4 необходимо удалить стоп-слой AlF_3 , образовавшийся на поверхности подзатворного слоя $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ при РИТ контактных слоев (в плазме $\text{BCl}_3 + \text{SF}_6$ при рабочем напряжении ~ 40 В), и верхнюю часть подзатворного слоя $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$, в которой произошло накопление дефектов при РИЛТ затворного слоя Si_3N_4 (см. рис. 4). В работе [6]

мы использовали оригинальную методику удаления этих слоев, предусматривающую двукратное удаление собственного окисла, причем второе удаление проводилось после проведения принудительного окисления пластины в смеси газов N_2+O_2 в долевом соотношении 0,8/0,2 при $T = 20$ °С. Двукратное удаление собственного окисла проводилось в $HCl+H_2O$ (1:1), что обеспечивало высокую селективность удаления стоп-слоя и окисленного слоя, в котором, как показала практика, практически полностью сосредоточены РИЛТ-дефекты подзатворного слоя. При этом толщина нижележащего неокисленного подзатворного слоя $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ практически не менялась от партии к партии, что обеспечивало хорошую воспроизводимость параметров транзисторов. В результате удаления собственного окисла исходная толщина подзатворного слоя уменьшалась на 4...6 нм (см. рис. 1). Высокие пробивные напряжения «сток – затвор», полученные в [6] (32 В при расстоянии между затвором и стоковым контактным слоем n^+-GaAs 0,9 мкм), говорят о надежном удалении стоп-слоя и области сосредоточения РИЛТ-дефектов в подзатворном слое методом двукратного окисления поверхности $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$.

Преимущества Г-затвора

Большим преимуществом Г-затвора является то, что, увеличивая угол наклона пластины при напылении металлизации, можно в принципе уменьшить длину основания затвора до нуля. Это открывает возможность формирования оснований затворов длиной менее 100 нм, при этом воспроизводимость получения столь малых размеров оснований затворов при зафиксированном угле наклона пластины во многом определяется возможностями оборудования, воспроизводимостью толщин затворного диэлектрика и резиста. Отметим, что, при наклоне пластины перед напылением металлизации Г-затвора, сглаживание верхнего угла и малый положительный наклон боковой стенки затворного диэлектрика не являются обязательными требованиями. Бездефектный контакт металлизации затвора со ступенькой в Si_3N_4 будет получен. Однако сглаживание этого угла уменьшает сопротивление ножки затвора, снижает напряжения в зоне контакта металлизации затвора и затворного диэлектрика, предотвращает образование трещин в металлизации затвора. Характерно, что в технологии Г-затворов при наклонном напылении металлизации можно использовать окна в затворном диэлектрике, размеры которых в разы превышают длину основания затвора. Это важный фактор, поскольку при большом размере окна появляется возможность более тщательной очистки его от остатков Si_3N_4 и возможность использования более толстого (в два и более раз по отношению к Т-затвору) затворного слоя Si_3N_4 .

Последняя возможность позволяет существенно уменьшить влияние козырька шляпки затвора (см. рис. 1, а) на управление проводимостью канала транзистора. Этому также способствует отсутствие стокового козырька у шляпки Г-затвора. Отметим, что влияние одного или двух козырьков у затвора аналогично увеличению эффективной длины основания затвора, т. е. наличие шляпки у затвора может заметно увеличить эффективную длину затвора по отношению к длине его основания.

Оценка управляющего влияния козырька затвора на проводимость канала

Оценка проводится с помощью выражений для емкостей «kozyрек – канал» и «основание затвора – канал», сумма которых определяет величину емкости «затвор – канал». Определяются изменения величины заряда электронов в канале, наводимого потенциалом основания затвора $(\Delta Q)_1$, и величины заряда электронов в канале, наводимого потенциалом одного или двух козырьков затвора $(\Delta Q)_2$ при изменении напряжения на затворе на величину ΔU_G .

В хорошей конструкции затвора должно соблюдаться неравенство: $(\Delta Q)_2 \ll (\Delta Q)_1$, в этом случае проводимость канала управляется величиной потенциала основания затвора за счет внешнего СВЧ-заряда, сосредоточенного только на основании затвора.

Величины $(\Delta Q)_1$ и $(\Delta Q)_2$ можно легко выразить через емкости «основание затвора – канал» и «kozyрек – канал»:

$$(\Delta Q)_1 = C_1 \cdot \Delta U_G \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1}{d_1} \cdot b L_G \cdot \Delta U_G, \quad (\Delta Q)_2 = \frac{C_0 C_2}{C_0 + C_2} \cdot \Delta U_G = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \cdot b L_K \cdot \Delta U_G. \quad (1)$$

Для величины $(\Delta Q)_2$ использовано выражение для последовательного соединения емкостей «kozyрек – подзатворный слой» (C_0) и «подзатворный слой – канал» (C_2). В (1) используются следующие выражения для емкостей:

$$C_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_0 b L_G / d_1, \quad C_0 = \varepsilon_1 \varepsilon_0 b L_K / d_1, \quad C_2 = \varepsilon_2 \varepsilon_0 b L_K / d_2. \quad (2)$$

Используя (1) и (2), получаем оценку величины отношения зарядов, наводимых в канале потенциалом козырька затвора и потенциалом основания затвора:

$$\frac{(\Delta Q)_2}{(\Delta Q)_1} = \frac{d_1 \varepsilon_2}{d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2} \cdot \frac{L_K}{L_G}. \quad (3)$$

В выражениях (1)...(3) приняты следующие обозначения: C_1 – емкость «основание затвора – канал»; L_G – длина основания затвора; L_K – длина козырька; b – ширина затвора; d_1 – расстояние от основания затвора до нижней границы канала; ε_1 – средняя относительная диэлектрическая проницаемость в емкостях C_0 и C_1 ; C_2 – емкость затворного диэлектрика под козырьком затвора; d_2 – толщина слоя затворного диэлектрика; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость затворного диэлектрика; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость. Для рНЕМТ с $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ подзатворным слоем и с $\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}$ -каналом может быть принято равенство $\varepsilon_1 \cong \varepsilon_{\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}} = 10,2$ при $\varepsilon_{\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}} = 11,2$.

Для Si_3N_4 : $\varepsilon_2 = 5,0 \dots 5,8$. В табл. 2 приведены результаты вычисления отношения $(\Delta Q)_2 / (\Delta Q)_1$ при $\varepsilon_2 = 5,8$ и двух величинах отношения длины одного козырька (или суммарной длины двух козырьков) к длине основания затвора.

Таблица 2

Зависимость $(\Delta Q)_2 / (\Delta Q)_1$ от d_1 и d_2

$d_1, \text{нм} \setminus d_2, \text{нм}$	50	100	150	200	250
$L_K / L_G = 1$					
20	0,185	0,102	0,07	0,054	0,044
25	0,221	0,124	0,087	0,066	0,054
30	0,254	0,146	0,102	0,079	0,064
35	0,285	0,166	0,117	0,091	0,074
40	0,313	0,185	0,132	0,102	0,083
45	0,339	0,204	0,146	0,113	0,093
50	0,363	0,221	0,159	0,124	0,102
55	0,385	0,238	0,173	0,135	0,111

Окончание табл. 2

$d_1, \text{ нм} \setminus d_2, \text{ нм}$	50	100	150	200	250
$L_k / L_G = 2$					
20	0,371	0,204	0,141	0,108	0,087
25	0,443	0,249	0,173	0,133	0,108
30	0,509	0,291	0,204	0,157	0,128
35	0,569	0,332	0,234	0,181	0,147
40	0,625	0,371	0,263	0,204	0,167
45	0,677	0,407	0,291	0,227	0,186
50	0,725	0,443	0,319	0,249	0,204
55	0,77	0,476	0,345	0,27	0,222

Примечание. d_1 – суммарная толщина слоев $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ под основанием затвора и $\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}$ -канала, задана в диапазоне 20...55 нм; d_2 – толщина затворного слоя Si_3N_4 , задана в диапазоне 50...250 нм.

По сути дела, отношение $(\Delta Q)_2 / (\Delta Q)_1$ показывает, насколько эффективная длина затвора $L_{G,\text{эфф}}$ в результате влияния одного или двух козырьков превышает длину основания затвора L_G . Для оценки эффективной длины затвора можно использовать выражение:

$$\frac{L_{G,\text{эфф}} - L_G}{L_G} = \frac{(\Delta Q)_2}{(\Delta Q)_1} \quad (4)$$

В табл. 2 красным цветом показаны значения отношения $(\Delta Q)_2 / (\Delta Q)_1$, превышающие 0,3. Отметим, что, при наличии двух козырьков у симметричного Т-затвора, суммарная длина козырьков удваивается, поэтому для симметричного Т-затвора величины, приведенные в табл. 2, тоже должны быть удвоены.

Из результатов в табл. 2 виден нетривиальный нежелательный эффект: увеличение d_1 , т. е. увеличение толщины слоя $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ под основанием затвора или увеличение толщины канала, усиливает влияние козырьков на управление проводимостью канала. Важно, что этот эффект может быть ослаблен увеличением толщины затворного диэлектрика d_2 .

4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ Т-ЗАТВОРА

Особенностью транзистора с Т-затвором (см. рис. 1, б) является необходимость формирования в слое затворного Si_3N_4 относительно узкого окна, размер нижней части которого определяет длину основания затвора. На рис. 1, б показано, что оптимальная форма окна в затворном диэлектрике имеет небольшой положительный наклон боковых стенок (что желательно, но возможно использование и вертикальных стенок) и сглаженный верхний угол (что необходимо). Такая форма окна обеспечивает возможность формирования ножки и шляпки Т-затвора в одном процессе нанесения металлизации затвора методом вертикального напыления. Достаточно просто можно получить окно в затворном диэлектрике с размером примерно 100 нм при использова-

ния ЭЛЛ, однако при этом для формирования непосредственно самого Т-затвора и увеличения размера его козырьков необходимо применить метод дополнительной обратной литографии, например фотолитографии по двухслойному фоторезисту.

В случае использования простейшей формы окна в затворном диэлектрике, с вертикальными стенками и несглаженным верхним углом, наблюдается уменьшение размера ножки затвора вплоть до смыкания ее боковых стенок, приводящего к отрыву ножки от шляпки затвора (см. вставку на рис. 1, б; рис. 5, а). Этот эффект был обнаружен в [6] при изготовлении экспериментальных образцов транзисторов с Т-затвором.

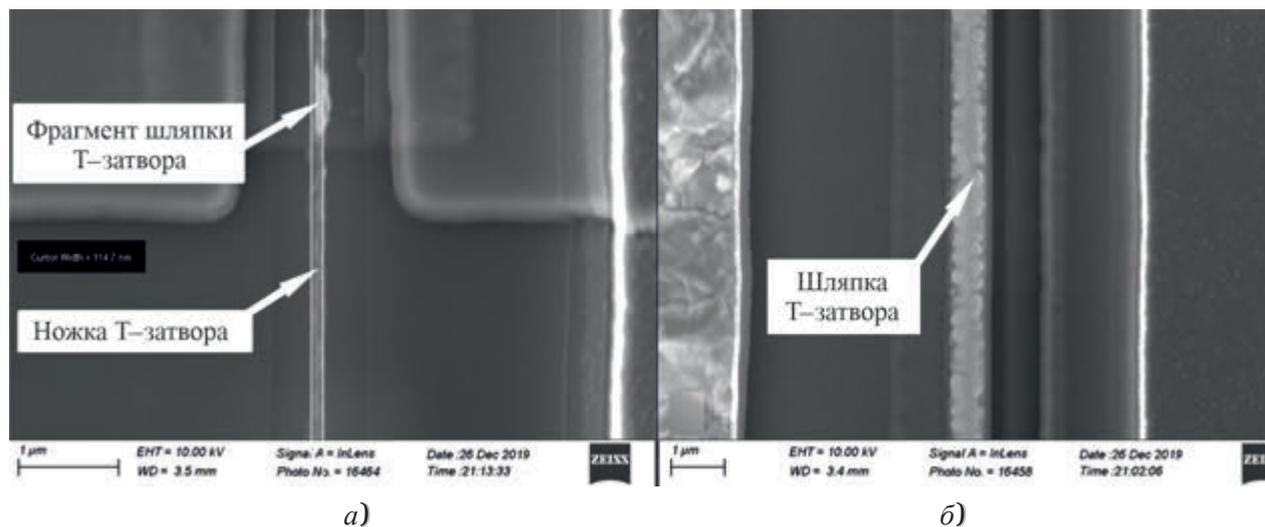


Рис. 5. Ножка Т-затвора с отделившейся шляпкой (а) и вид сформированной шляпки Т-затвора при трехэтапном формировании затвора (б)

В частности, при формировании окна размером 150 нм в слое затворного Si_3N_4 толщиной 200 нм, имеющего вертикальные стенки и несглаженный верхний угол, наблюдались уменьшение размера ножки вплоть до смыкания ее боковых стенок и отрыв шляпки от ножки затвора (см. рис. 5, а). По этой причине в [6] затворный диэлектрик, окно в нем, ножка затвора и его шляпка формировались за 3 этапа: нанесение диэлектрика, вскрытие окна и напыление металлизации затвора. В результате такого трехэтапного формирования Т-затвора были изготовлены DA-DpHEMT для мм-диапазона на основе AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур. Эти транзисторы показали работоспособность на частотах до 100 ГГц при MSG, равном 14 дБ на частоте 67 ГГц и 22 дБ на частоте 40 ГГц.

Возможность формирования окна в затворном слое Si_3N_4 по варианту, показанному на рис. 4, а, была проверена нами на практике.

На рис. 6, а в окне слоя Si_3N_4 толщиной 150 нм хорошо виден небольшой наклон боковой стенки (приблизительно на 37 нм) и достаточно протяженная область сглаживания верхнего угла.

При сухом травлении окна, показанного на рис. 6, а, использовался двухслойный резист SF9/SPR700 (0,65/1,2 мкм), состав плазмы: SF_6/O_2 (25/2 sccm), мощность – 10 Вт, давление – 5 мТорр, напряжение автосмещения – 70...85 В.

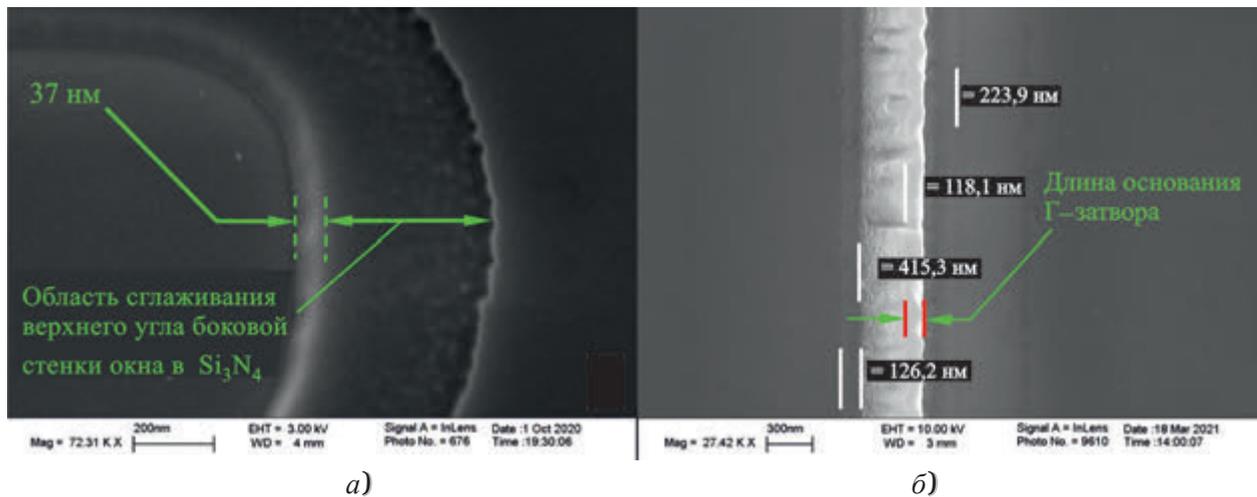


Рис. 6. Вид сверху на боковую стенку окна, сформированного в слое Si_3N_4 (а), и вид сверху на сформированный на подобной стенке Г-затвор с длиной основания 118 нм (б)

Г-затвор на Si_3N_4 -ступеньке при наклоне стенки и сглаженном верхнем угле

Рис. 6, б показывает возможность формирования Г-затвора с длиной основания L_G равной 118 нм, методом оптической литографии при использовании истоковой ступеньки в слое нитрида кремния, имеющей угол отклонения боковой стенки от нормали к поверхности пластины примерно 14 град и сглаженный верхний угол. Проверка воспроизводимости длины основания Г-затвора по пластине показала, что величина L_G меняется в достаточно узких пределах: 120...130 нм. Очевидно, что такой вариант вскрытия окна в слое Si_3N_4 дает форму боковых стенок, пригодную для формирования не только Г-, но и Т-затвора методом обратной («взрывной») литографии без эффекта смыкания стенок ножки затвора, причем за один этап напыления металлизации.

Вид сглаженного верхнего угла в окне слоя затворного Si_3N_4 на рис. 4, а по форме совпадает с аналогичным видом окна, приведенным на FIB виде продольного сечения Т-затвора, показанном на рис. 3 в [7]. Отметим, что в работе [7] использовалась более сложная технология: применялись трехслойный ЭР состава PMMA – PMGI – ZEP и две операции ЭЛЛ для формирования Т-затвора. Первая ЭЛЛ (по PMGI – ZEP) формировала окно для шляпки Т-затвора, вторая ЭЛЛ (по PMMA) обеспечивала формирование окна в Si_3N_4 для нижней части ножки Т-затвора. Из рис. 2 в [7] следует, что формирование сглаженных углов «шляпка – ножка Т-затвора» произошло из-за сглаживания верхнего угла в окне в PMMA. Таким образом, в работе [7] сглаживание верхних углов в окне Si_3N_4 происходило автоматически только на этапе окончательного зарацивания нитридом кремния участков под шляпкой полностью сформированного Т-затвора. В результате в работе [7] был сформирован Т-затвор с высотой ножки, равной 100 нм, причем ножка имела вертикальные стенки, но сглаженные углы перехода к шляпке. При таком конструктивном решении на частоте 45 ГГц была получена сравнительно малая величина MSG, равная 5 дБ (рис. 10 в [7]). Малая высота ножки не является единственной причиной получения столь скромного результата для величины MSG. В [7] транзисторы были изготовлены на основе pHEMT-структур с меньшей (по отношению к DA-DpHEMT) подвижностью горячих электронов и имели существенно большие расстояния «затвор – исток» и «затвор – сток», равные соответственно 1,0 и 2,0 мкм.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование фотолитографии и двухслойного фоторезиста при вскрытии окна в слое затворного диэлектрика (нитрида кремния) показало возможность формирования небольшого положительного наклона боковых стенок и сглаженной вершины окна при реактивном ионном травлении затворного диэлектрика в плазме SF_6/O_2 .

Учитывая наши результаты и результаты работы [7], можно заключить, что аналогичная форма окна в затворном диэлектрике может быть получена при использовании электронно-лучевой литографии по двухслойному электронорезисту, например по PMGI – ZEP, с помощью реактивного ионного травления затворного диэлектрика.

Аналогия форм окон в затворном диэлектрике показывает возможность формирования Т-затвора с малой длиной основания (0,1 мкм и менее) за одну более производительную операцию обратной фотолитографии по его металлизации. При этом для формирования ножки и шляпки Т-затвора можно применить двухслойный фоторезист, например SF9/SPR700.

Получаемая форма окна в затворном диэлектрике позволяет избежать образования трещин в металлизации Г-затвора и устранить проблему смыкания стенок ножки Т-затвора.

При наклонном напылении металлизации Г-затвора можно использовать окно в затворном диэлектрике, размер которого превосходит в два и более раз длину основания затвора и более толстый (в два и более раз) слой затворного диэлектрика.

Показано, что при использовании двухслойного фоторезиста и метода наклонного напыления металлизации с помощью только одной операции фотолитографии возможно формирование ступенек из нитрида кремния, имеющих небольшой наклон боковых стенок (14...15 град), сглаженный верхний угол, и Г-затворов с длиной основания 120...130 нм.

Учитывая, что Г-затвор имеет козырек, сформированный только в промежутке «исток – ножка затвора», простоту снижения сопротивления затвора в направлении его ширины за счет большей высоты ножки, можно утверждать, что Г-затвор обладает технологическим преимуществом по отношению к Т-затвору и меньшей эффективной длиной затвора при одинаковых длинах основания затвора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Drukier, I.** / I. Drukier, P. C. Wade and J. W. Thompson // European Microwave Conference. – Brighton, England, 1979.
2. **Furutsuka, T.** / T. Furutsuka et al. // Electron. Lett. – 1979. – Vol. 15. – P. 417.
3. **Кувшинова, Н. А.** Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором / Н. А. Кувшинова, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, К. М. Петров // Радиотехника. – 2011. – № 11. – С. 90 – 93.
4. **Niehaus, W. C.** Gallium arsenide and related compounds (St. Louis) / W. C. Niehaus et al. – 1976. – P. 271.
5. **Furutsukia, T.** / T. Furutsukia, T. Tsuje, F. Hasegawa // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1976. – ED-25. – P. 563.
6. **Pashkovskii, Andrey B.** Millimeter wave donor – acceptor doped DpHEMT / Andrey B. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov, Alexandr B. Grigorenko, K. S. Zhuravlev, Vladimir G. Lapin, Vladimir M. Lukashin, Ilya A. Rogachev, Evgeniy V. Tereshkin and Sergey V. Shcherbakov // IEEE Trans. on Electron Devices. – Jan. 2021. – Vol. 68, issue 1. – P. 53 – 56.
7. **Sung-Jin Cho, Cong Wang, Nam-Yong Kim.** High power density AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs using an optimized manufacturing process for Ka-band applications // Microelectronic Engineering. –2014. – Vol. 113. – P. 11 – 19.

Статья поступила 17 декабря 2021 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

ГИБРИДНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА

И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Н. А. Фёдоров, Е. В. Терешкин, Е. В. Медянкova

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

Представлена возможность улучшения конструкции гибридной интегральной схемы (ГИС) генераторного модуля СВЧ-диапазона на коаксиальном диэлектрическом резонаторе при использовании 3D-компоновки для размещения элементов и компонентов схемы в объёме многослойной печатной платы и металлического корпуса. Показаны преимущества такой конструкции ГИС.

КС: многослойная печатная плата, топологический рисунок проводников, металлический корпус, коаксиальный диэлектрический резонатор, паразитные ёмкости и индуктивности, генератор, управляемый напряжением, выборка, углубление, отверстие, диэлектрический слой

HYBRID INTEGRATED CIRCUIT FOR MICROWAVE GENERATOR MODULE

I. V. Goryunov, V. A. Iovdalskiy, N. A. Fyodorov, E. V. Tereshkin, E. V. Medyankova

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

The possibility of improving the design of a hybrid integrated circuit (HIC) of a microwave-range generator module based on a coaxial dielectric resonator when using 3D layout for placing the circuit elements and components in the volume of a multilayer printed circuit board and a metal case is presented. The advantages of such a HIC design are presented.

Keywords: multilayer printed circuit board, topological pattern of conductors, metal case, coaxial dielectric resonator, parasitic capacitances and inductances, voltage controlled oscillator, sample, recess, hole, dielectric layer

1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянное ужесточение требований к электрическим и массогабаритным характеристикам РЭА СВЧ-диапазона побуждает специалистов к поиску новых технических решений их создания и совершенствования. Поскольку основным конструкторско-технологическим вариантом устройств СВЧ-диапазона по-прежнему является гибридно-интегральный, обладающий универсальностью свойств для создания и производства большого спектра устройств этого диапазона, совершенствованию конструкции гибридных интегральных схем (ГИС) уделяется большое внимание. В связи с этим отечественные специалисты ещё в 80-х годах прошлого столетия обращали серьёзное внимание на перспективность создания объёмных (3D-конструкций) интегральных схем [1, 2]. Дальнейшие исследования подтвердили перспективность данного направления [3–6].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время существует несколько конструкций гибридных интегральных генераторных модулей, которые широко применяются при разработке РЭА бортового и наземного базирования, например малогабаритного синтезатора частот для многочастотного доплеровского радиолокатора, обеспечивающего повышенную спектральную чистоту выходного колебания.

В состав таких систем обычно входят синтезаторы частот различных типов. Анализ комплекса требований, предъявляемых к характеристикам спектра формирователей частот, показывает, что формирователи должны соответствовать по уровню фазовых шумов, диапазону частот выходного сигнала и другим специфичным характеристикам. В состав формирователей частот, в свою очередь, входят синтезаторы частот косвенного синтеза, включающие в себя опорные СВЧ-генераторы на коаксиальных диэлектрических резонаторах, а в состав опорного генератора – генератор, управляемый напряжением (ГУН), на коаксиальном диэлектрическом резонаторе (КДР). Улучшение электрических и массогабаритных характеристик таких генераторов способствует улучшению характеристик и всего модуля в целом.

Обычно ГУН базируются на единой многослойной печатной плате (МПП) с другими составными частями модуля.

Так, известна конструкция ГИС генераторного модуля СВЧ-диапазона, выполненная в виде МПП с топологическим рисунком проводников металлизации по крайней мере на одной из сторон каждого диэлектрического слоя МПП и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне нижнего диэлектрического слоя. Навесные компоненты, в том числе КДР, расположены на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя МПП и соединены своими выводами с проводниками его топологического рисунка металлизации. Обратная сторона верхнего диэлектрического слоя МПП имеет экранную заземляющую металлизацию на части, занятой схемой обработки СВЧ-сигнала, в том числе ГУН с включённым в его схему КДР. МПП установлена на дне металлического корпуса с крышкой и электрически соединена с ним. В углах корпуса имеются отверстия для крепления корпуса в аппаратуре [7].

Недостатками такой конструкции ГИС генераторного модуля являются высокая спектральная мощность фазовых шумов (СМФШ), высокая паразитная ёмкость формирования СВЧ-сигнала и низкие массогабаритные характеристики.

Известна также ГИС генераторного модуля СВЧ-диапазона, выполненная в виде МПП с топологическим рисунком проводников металлизации хотя бы на одной из сторон каждого диэлектрического слоя МПП и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне нижнего диэлектрического слоя. Навесные компоненты, в том числе КДР, расположены на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя и соединены своими выводами с проводниками его топологического рисунка металлизации. Обратная сторона верхнего диэлектрического слоя МПП имеет экранную заземляющую металлизацию на части, занятой схемой обработки СВЧ-сигнала, ГУН с включённым в его схему КДР. МПП установлена и закреплена на дне металлического корпуса с крышкой [8]. Однако и эта конструкция ГИС генераторного модуля не обладает необходимыми конструктивными особенностями, которые позволили бы заметно улучшить электрические и массогабаритные характеристики схемы. Ей также присущи высокая СМФШ, высокая паразитная ёмкость схемы формирования СВЧ-сигнала и низкие массогабаритные характеристики. Анализ конструкции такой ГИС позволил выявить следующие недостатки.

1. Расположение КДР на поверхности МПП определяет высоту корпуса и расположение металлической крышки над КДР и тем самым не позволяет уменьшить размеры модуля.

2. Размеры КДР и его расположение определяют достаточно большую длину коаксиального вывода КДР, соединяющего его с проводником топологического рисунка на лицевой стороне МПП, а значит, его высокую паразитную индуктивность, которая не позволяет получить высокие электрические характеристики схемы.

3. Наличие экранной заземляющей металлизации на части обратной стороны верхнего диэлектрического слоя МПП, в том числе занятой схемой обработки СВЧ-сигнала, хотя и обеспечивает короткое заземление элементов лицевой стороны МПП, в том числе и боковой металлизации КДР, тем не менее, обуславливает высокую паразитную ёмкость проводников топологического рисунка металлизации части СВЧ-схемы ГУН и не позволяет получить высокие электрические характеристики.

Необходимость улучшения характеристик разрабатываемых устройств потребовала существенных изменений конструкции ГИС генераторного модуля и конкретно ГУН. А это, в свою очередь, потребовало применения объёмности конструкции ГИС и использования объёма МПП и металлического корпуса для расположения элементов и компонентов схемы, то есть применения 3D-компоновки конструкции.

Улучшенная конструкция ГИС генераторного модуля [9] представлена на рис. 1 и 2.

Отличительными особенностями ГИС СВЧ-диапазона с 3D-компоновкой элементов и компонентов являются следующие.

1. В МПП выполнено отверстие, в котором находится КДР, установленный на дно корпуса, в углубление, и электрически соединённый с ним. Глубина углубления выбрана такой, чтобы она совпала с высотой расположения вывода КДР и проводника топологического рисунка металлизации, а расстояние между выходом вывода КДР и местом его соединения с проводником МПП было не более 1,5 мм.

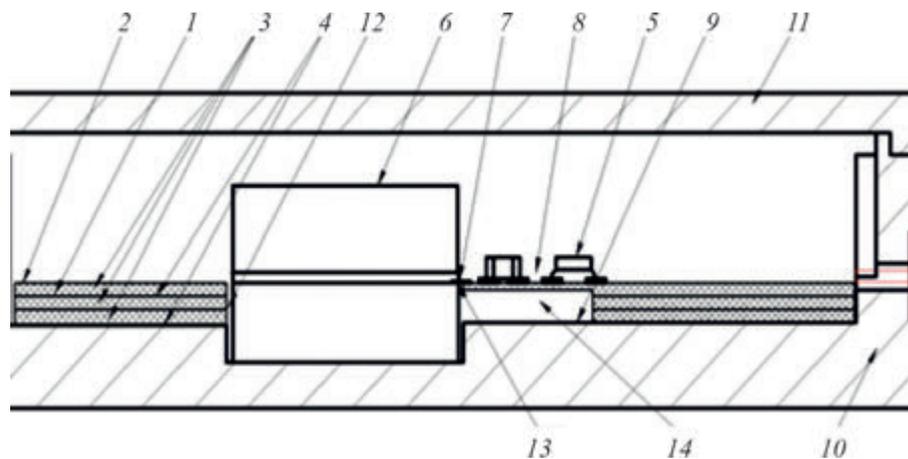


Рис. 1. ГИС СВЧ-диапазона с 3D-компоновкой элементов и компонентов:

1 – МПП; 2 – топологический рисунок проводников металлизации; 3 – диэлектрический слой; 4 – экранная заземляющая металлизация; 5 – навесные компоненты; 6 – КДР; 7 – выводы навесных компонентов; 8 – генератор, управляемый напряжением; 9 – дно корпуса; 10 – корпус; 11 – крышка корпуса; 12 – отверстие в МПП; 13 – выход вывода КДР; 14 – выборка в МПП

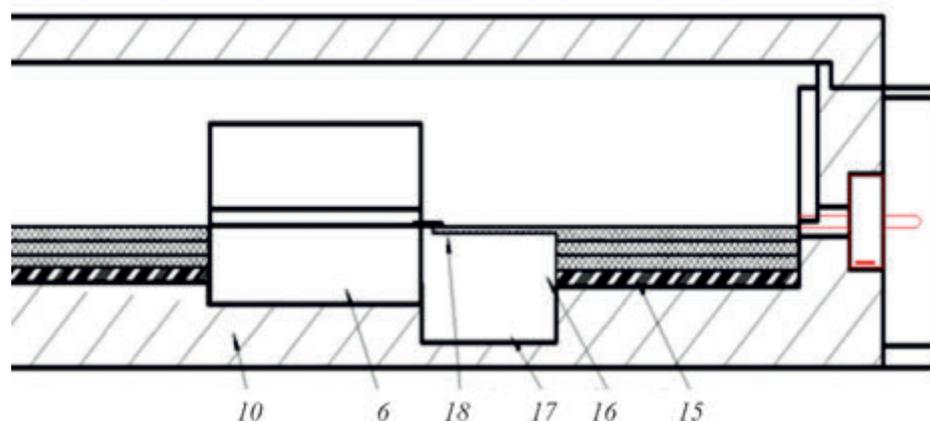


Рис. 2. ГИС СВЧ-диапазона с 3D-компоновкой элементов и компонентов, а также с металлическим основанием и углублением в дне корпуса: 6 – КДР; 10 – корпус; 15 – металлическое основание; 16 – края отверстия металлического основания; 17 – углубление в дне корпуса; 18 – углубление на обратной стороне верхнего диэлектрического слоя МПП

2. В слоях МПП, непосредственно под верхним диэлектрическим слоем, выполнена выборка в части схемы, занятой получением (генерация) и обработкой СВЧ-сигнала ГУН, а отверстие в МПП, в котором расположен КДР, непосредственно соединено с выборкой 14.

3. МПП своей обратной стороной с экранной заземляющей металлизацией закреплена и электрически соединена с металлическим основанием 15, которое, в свою очередь, установлено и закреплено на дне корпуса. В металлическом основании выполнено отверстие, соответствующее по конфигурации выборке 14 в МПП, а края отверстия в металлическом основании расположены под краем выборки 14 на 1...5 мм.

4. В дне корпуса выполнено углубление 17, расположенное под выборкой 14 в МПП и соответствующее ей по конфигурации, края углубления 17 выходят за площадь проекции выборки 14 на 1...5 мм, а глубина углубления 17 обеспечивает остаточную толщину дна корпуса не менее 1 мм.

5. На обратной стороне верхнего диэлектрического слоя МПП выполнено углубление 18, соответствующее выборке 14 по конфигурации и месту расположения в нижерасположенных слоях МПП, а глубина углубления 18 обеспечивает остаточную толщину верхнего диэлектрического слоя МПП не менее 0,1 мм.

3. АНАЛИЗ ПРИЧИН УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

Размещение КДР 6 в отверстии 12, выполненном в многослойной плате 1, и его электрическое соединение с дном 9 корпуса 10 таким образом, что обеспечивается соответствие по высоте и расположению вывода 7 КДР 6 с проводником 2, а расстояние между выходом 13 вывода 7 КДР 6 и местом его соединения с проводником 2 МПП 1 составляет не более 1,5 мм, позволяет существенно сократить длину вывода КДР. Это ведёт к уменьшению его паразитной индуктивности при сохранении добротности колебательной системы генератора, а также к уменьшению массы и габаритов схемы, то есть позволяет улучшить электрические и массогабаритные характеристики схемы.

Выполнение непосредственно под верхним диэлектрическим слоем 3 выборки 14, соответствующей в плане части схемы, занятой ГУН 8, позволяет существенно снизить паразитную ёмкость между топологическим рисунком проводников металлизации на лицевой поверхности МПП и экранной заземляющей металлизацией за счёт увеличения расстояния между обкладками паразитной ёмкости. При этом нижней обкладкой паразитной ёмкости является дно корпуса. Диэлектрик ёмкости становится двухслойным и имеет большую толщину, причём вторым слоем является воздух, имеющий низкую диэлектрическую проницаемость (1). Это дополнительно позволяет уменьшить паразитную ёмкость, сохранить добротность колебательного контура генератора и за счёт этого снизить значение СМФШ, а значит, улучшить электрические характеристики схемы.

Улучшение массогабаритных характеристик происходит за счёт уменьшения массы МПП 1.

Соединение отверстия 12 и выборки 14 в МПП 1 позволяет дополнительно улучшить массогабаритные характеристики схемы и исключить возможность образования замкнутой герметичной полости в составе конструкции, выравнивая тем самым давление в выборке и над МПП, что обеспечивает прочность конструкции.

Размещение МПП 1 на металлическом основании 15 и электрическое соединение МПП 1 обратной стороной с экранной заземляющей металлизацией 4, выполнение отверстия 16 в металлическом основании 15, соответствующего по конфигурации выборке 14 в МПП 1 и отверстию в плате для установки КДР, а также расположение краёв отверстия 16 под краем выборки 14 на 1...5 мм – все это позволяет увеличить толщину слоя диэлектрика паразитной ёмкости и тем самым дополнительно уменьшить паразитную ёмкость схемы, улучшить электрические характеристики.

Выполнение в дне 9 корпуса 10 углубления 17, расположенного под выборкой 14 в МПП 1 и соответствующего ей по конфигурации, с краями, выходящими за площадь проекции выборки 14 на 1...5 мм, и глубиной, обеспечивающей остаточную толщину дна 9 корпуса 10 не менее 1 мм, позволяет дополнительно снизить паразитную ёмкость схемы, а значит, улучшить электрические и массогабаритные характеристики схемы. Ограничение расположения краёв углубления 17, выходящих за площадь проекции выборки 14 на 1...5 мм, снизу обеспечивает отсутствие влияния на паразитную ёмкость, а сверху исключает влияние на неё.

Выполнение на обратной стороне верхнего диэлектрического слоя 3 МПП 1 углубления 18, соответствующего выборке 14 по конфигурации и месту расположения в нижерасположенных слоях 3 МПП 1, с глубиной, обеспечивающей остаточную толщину верхнего диэлектрического слоя 3 МПП 1 не менее 0,1 мм, позволяет снизить паразитную ёмкость схемы и тем самым улучшить её электрические характеристики.

Ограничение остаточной толщины верхнего диэлектрического слоя 3 многослойной печатной платы 1 значением не менее 0,1 мм позволяет сохранить прочность платы при монтаже навесных компонентов и присоединении их выводов к проводникам топологического рисунка металлизации.

4. РАБОТА УСТРОЙСТВА

При подаче питания на активный генераторный элемент (транзистор) за счёт схемотехнического решения ГИС генераторного модуля создаётся область рабочего диапазона с отрицательным сопротивлением в базовой области транзистора. При подключении к этой цепи КДР с определённой добротностью происходит возбуждение транзистора на резонансной частоте

подключаемого контура. Подачей напряжения на варакторный диод осуществляется перестройка частоты резонансного контура в рабочем диапазоне частот.

Снижение паразитной индуктивности происходит за счёт уменьшения длины вывода КДР и расположения КДР в отверстии в МПП. Снижение паразитной ёмкости топологического рисунка металлизации за счёт выполнения выборки на обратной стороне МПП позволяет снизить шунтирующий эффект паразитных ёмкости и индуктивности и тем самым повысить нагруженную добротность КДР. В целом удалось за счёт сохранения оптимального размера КДР и обеспечения его более высокой добротности снизить уровень фазовых шумов генераторного модуля, улучшить его характеристики, а за счёт уменьшения массы и высоты ГИС улучшить массогабаритные характеристики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы реализована на практике концепция 3D-компоновки элементов и компонентов схемы в объёме многослойной печатной платы и металлического корпуса ГИС генераторного модуля СВЧ-диапазона [9]. Внедрение созданной конструкции в серийное производство в АО «НПП «Исток» им. Шокина» позволило улучшить электрические и массогабаритные характеристики выпускаемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гвоздев, В. И.** Объёмные интегральные схемы СВЧ – элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефёдов. – М.: Наука, 1987. – 110 с.
2. **Волков, А. В.** Технология и конструкторско-технологические решения для реализации объёмных интегральных модулей: учеб. пособие / А. В. Волков, А. В. Заводян, А. А. Яшин. – М.: МИЭТ, 1992. – 83 с.
3. **Патент 2109274 РФ.** Устройство для измерения электрических параметров среды / В. И. Гвоздев, В. А. Иовдальский, А. А. Линёв, С. И. Подковырин. – Приоритет 30.09.94, регистрация в Гос. реестре 20.09.03.
4. **Гвоздев, В. И.** Фазовый метод контроля диэлектрической проницаемости различных сред / В. И. Гвоздев, В. А. Иовдальский, А. А. Линёв // Измерительная техника. – 1996. – № 4. – С. 53 – 55.
5. **Иовдальский, В. А.** Измеритель диэлектрических характеристик жидкостей на основе микрополоскового датчика / В. А. Иовдальский, И. М. Олихов, С. П. Прокофьева / Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2002. – Вып. 2 (480). – С. 18 – 23.
6. **Иовдальский, В. А.** Размещение элементов и компонентов ГИС СВЧ-диапазона в подложке МПП: учеб. пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: Изд-во «КУРС», 2018. – 190 с.
7. **Баронов, А. А.** Особенности проектирования гетеродина с петлёй ФАПЧ Ku -диапазона / А. А. Баронов, В. А. Шадский // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2015. – Вып. 4 (160). – С. 18 – 22.
8. **Самохин, С. А.** Малогабаритный опорный СВЧ-генератор на коаксиальном резонаторе / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин, Н. А. Фёдоров // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2 (541). – С. 58 – 66.
9. **Патент № 2750860 РФ,** МПК H 01 L 21/00, 23/00. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин. – Приоритет 21.09.2020.

Статья поступила 14 декабря 2021 г.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.371.362.2

ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРИБОРА ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Скобелин

АО «Российский институт радионавигации и времени», г. Санкт-Петербург

Рассмотрены характеристики существующих и перспективных бортовых квантовых стандартов частоты космического применения, определены требования к точностным характеристикам методов сравнения шкал времени навигационных космических аппаратов и наземных измерительных средств. Предложена и экспериментально исследована схема прибора, реализующего метод встречных измерений с автоматической калибровкой аппаратурных задержек.

КС: квантовый стандарт частоты, шкала времени, калибровка, метод встречных измерений

REQUIREMENTS FOR CHARACTERISTICS OF TIME MEASUREMENTS OF SPATIALLY DIVIDED ATOMIC FREQUENCY STANDARDS. PROPOSALS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE DEVICE FOR COMPARING THE TIME SCALES OF SPACE VEHICLES

A. A. Skobelin

JSC «Russian institute of radionavigation and time», Saint-Petersburg

The characteristics of the existing and future atomic frequency standards for space applications are considered, the requirements for the accuracy characteristics of the methods for comparing the time scales of navigation spacecraft and the time scales of ground-based measuring instruments are determined. The scheme of the device, which implements the method of two-way counter measurements with automatic calibration of the hardware delays, is proposed and experimentally investigated.

Keywords: atomic frequency standard, time scale, calibrarion, two-way counter measurements

Актуальность решения задач синхронизации шкал времени (ШВ) различных потребителей, а также снижения погрешности определения и поддержания опорных частот их генераторов в настоящее время неуклонно повышается в связи с ростом требований к точности решения навигационных задач, увеличением пропускной способности каналов систем связи, созданием сложных информационно-управляющих систем, реализацией новых подходов к решению измерительных задач в различных областях науки, техники и обеспечения безопасности: навигация, радиолокация, релятивистская и космическая геодезия, телекоммуникации, в т. ч. беспроводные технологии связи нового поколения, ИТ-технологии и т. д.

Ключевым элементом систем синхронизации комплексов различного назначения являются квантовые стандарты частоты (КСЧ), обеспечивающие формирование высокостабильных опорных частот, а также формирование и хранение ШВ потребителей. В зависимости от требуемых точностных характеристик (ТХ), области применения, модели внешних воздействующих факторов (ВВФ), требований надежности, требований радиоэлектронной защиты (РЭЗ), КСЧ различаются типом конструктивного исполнения и принципом действия. В качестве меры частоты в КСЧ любого типа используется переход атомов рабочего вещества между фиксированными квантовыми состояниями (т. н. «часовой» переход). Для получения «часового» перехода используются различные комбинации рабочих веществ и технологий построения атомных дискриминаторов.

КСЧ в составе аппаратуры выполняют роль задающих генераторов, на основе сигналов которых формируются ШВ объектов. В данной работе рассматриваются КСЧ космического применения, требования к характеристикам измерительных линий, характеристики, достигнутые в настоящее время, и перспективы их дальнейшего развития.

Наиболее жесткие требования к нестабильности КСЧ космического применения предъявляются к КСЧ навигационных космических аппаратов (КА) и КА, решающих научные задачи. В составе навигационных КА КСЧ являются основой бортовых синхронизирующих устройств (БСУ), обеспечивающих временную синхронизацию всех целевых и служебных систем КА. В космическом пространстве в настоящее время функционирует более 1000 высокостабильных КСЧ [1].

Основной характеристикой КСЧ, оказывающей влияние на погрешность хранения ШВ, является нестабильность частоты, вклад которой монотонно возрастает от момента последнего определения фактического расхождения ШВ, формируемой на основе сигнала данного КСЧ. Для большинства типов КСЧ нестабильность характеризуется девиацией Аллана (среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение измеренного значения меры частоты по ГОСТ 8.567–2014), представляющей собой меру нестабильности частоты во времени, обеспечивающей адекватную оценку нестационарного случайного процесса изменения частоты во времени:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \delta_{0i}^2(\tau)}{2(n-1)}}, \quad (1)$$

где δ_{0i} – значение относительной вариации измеренного значения меры частоты при i -м измерении; τ – длительность интервала измерения; n – число измерений.

Для оценивания погрешности хранения ШВ применяется временная девиация, представляющая собой меру стабильности фазы во времени и вычисляемая согласно следующему выражению:

$$\sigma_x(\tau) = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \text{Mod}\sigma_y(\tau), \quad (2)$$

где $\text{Mod}\sigma_y(\tau)$ – модифицированная девиация Аллана [2].

Следует отметить, что модифицированная девиация Аллана отличается от стандартной девиации Аллана возможностью выделения «белого» шума и фликкер-шума фазы. Учитывая, что для рассматриваемых КСЧ данные типы шумов преобладают на интервалах наблюдения длительностью до десятков секунд, на интервалах наблюдения более 100 с в формуле (2) вместо модифицированной девиации Аллана можно использовать стандартную.

На рис. 1...3 приведены графики девиации Аллана для различных типов существующих и перспективных КСЧ космического применения [3]. На рис. 1 также дополнительно представлены данные по КСЧ российской разработки (*H*-мазеру, созданному в рамках международного проекта «Радиоастрон»).

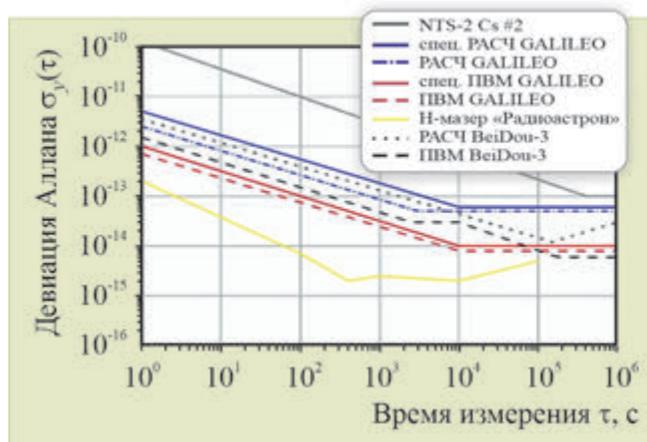


Рис. 1. Нестабильность частоты существующих КСЧ космического применения, созданных в рамках развития иностранных космических навигационных систем и международных научных проектов (PACЧ – рубидиевый атомный стандарт частоты; ПБМ – пассивный водородный мазер)

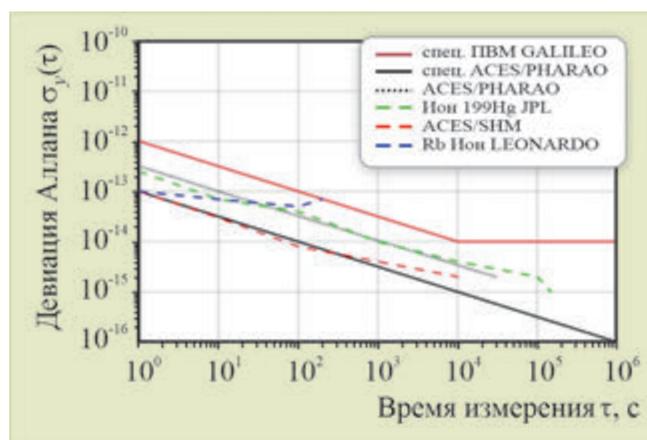


Рис. 2. Нестабильность частоты перспективных иностранных КСЧ космического применения

Анализ данных, приведенных на графиках, показывает, что диапазон значений девиации Аллана для существующих бортовых КСЧ, имеющих летную квалификацию, следующий: $8 \cdot 10^{-13} \dots 3 \cdot 10^{-13}$ – для интервала измерения 100 с; $8 \cdot 10^{-14} \dots 1 \cdot 10^{-14}$ – для интервала измерения 10000 с; $7 \cdot 10^{-14} \dots 8 \cdot 10^{-15}$ – для интервала измерения 86400 с.

Для перспективных бортовых КСЧ, планируемых к практическому освоению в ближайшей перспективе, диапазон значений нестабильности для аналогичных интервалов измерения составляет: $1 \cdot 10^{-13} \dots 1 \cdot 10^{-14}$ – для интервала измерения 100 с; $1 \cdot 10^{-14} \dots 3 \cdot 10^{-15}$ – для интервала измерения 10000 с; $3 \cdot 10^{-15} \dots 1 \cdot 10^{-15}$ – для интервала измерения 86400 с.

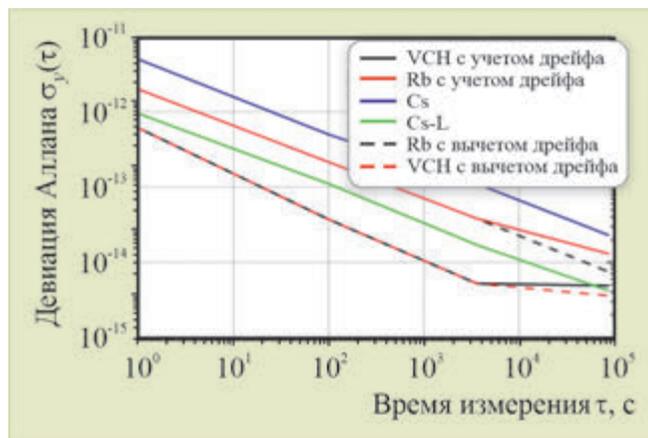


Рис. 3. Нестабильность частоты существующих и перспективных отечественных КСЧ космического применения:

Cs – цезиевый КСЧ АЛТ (имеет летную квалификацию); Rb – КСЧ на рубидиевой газовой ячейке (имеет летную квалификацию); Cs-L – цезиевый КСЧ АЛТ с лазерной накачкой (перспективный); VCH – пассивный водородный КСЧ (перспективный)

На рис. 4 представлены границы нестабильности частоты и погрешности хранения ШВ (временной девиации) для существующих и перспективных КСЧ. Следует отметить, что интервалы наблюдения (измерения) ограничены зонами радиовидимости КА средствами наземного комплекса управления и составляют для навигационных КА ГЛОНАСС 2...5 ч (~7200...18000 с), данные ограничения отмечены на рис. 4...7 вертикальными коричневыми линиями.

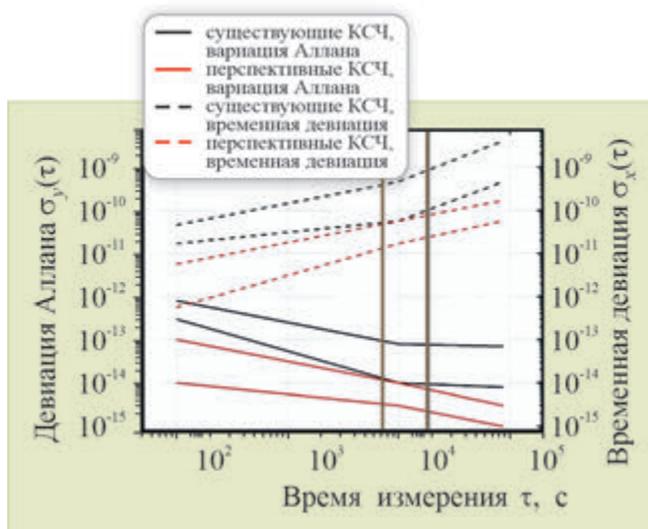


Рис. 4. Нестабильность частоты и временная девиация существующих и перспективных отечественных КСЧ космического применения

В качестве критерия допустимой погрешности определения расхождения ШВ (РШВ), формируемых на основе сигнала КСЧ, примем отсутствие влияния метода определения РШВ и характеристик измерительной линии на предельную погрешность хранения ШВ, определяемую на выбранном интервале наблюдения выражением (2). Под измерительной линией понимается

совокупность аппаратных и программных средств на сравниваемых объектах, непосредственно сопряженных с их опорными генераторами, а также канала связи между ними. Примем, что случайная погрешность сравнения ШВ является пренебрежимо малой, если она составляет не более 30 % от погрешности хранения ШВ.

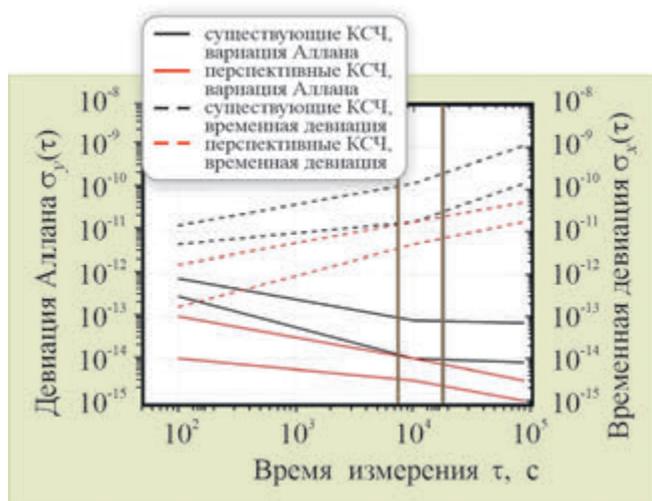


Рис. 5. Требования к ТХ сравнения ШВ существующих и перспективных КСЧ космического применения

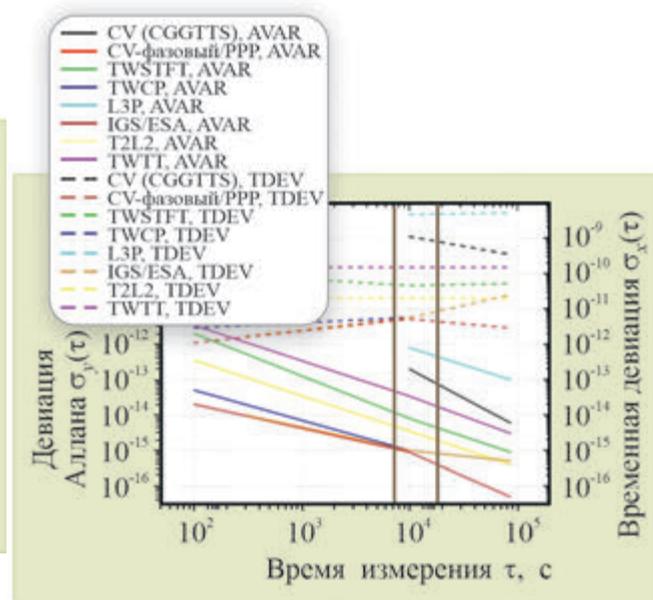


Рис. 6. ТХ существующих методов сравнения ШВ удаленных КСЧ

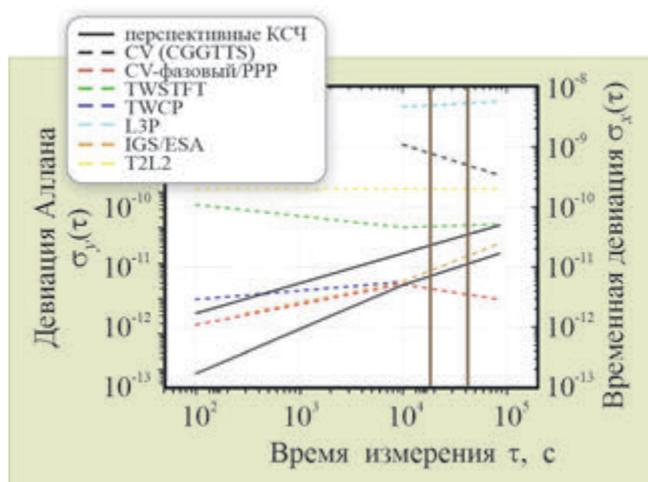


Рис. 7. ТХ существующих методов сравнения ШВ пространственно разнесенных КСЧ и требования по ТХ сравнений ШВ для перспективных КСЧ космического применения

В этом случае может быть достигнута погрешность прогнозирования, близкая к погрешности хранения ШВ. В качестве показателя случайной погрешности определения РШВ примем дополнительную временную девиацию, вносимую измерительной линией. Таким образом, для указанной временной девиации на выбранном интервале оценивания для генератора с известной характеристикой нестабильности от времени $\sigma_y(\tau)$ должно выполняться условие:

$$\sigma_x^{\text{изм}}(\tau) \leq \frac{0,3\tau}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mod}\sigma_y(\tau). \quad (3)$$

В табл. 1 приведены требования к временной девиации определения РШВ в зависимости от характеристик КСЧ.

Таблица 1

Требования к временной девиации, вносимой измерительной линией

Интервал измерения, с	Нестабильность частоты КСЧ (девиация Аллана)	Требования к временной девиации, вносимой измерительной линией $\sigma_x^{\text{изм}}(\tau), \text{с}$
<i>Существующие КСЧ</i>		
100	$8 \cdot 10^{-13} - 3 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^{-11} - 0,5 \cdot 10^{-11}$
10000	$8 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-10} - 1,7 \cdot 10^{-11}$
86400	$7 \cdot 10^{-14} - 8 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-10}$
<i>Перспективные КСЧ</i>		
100	$1 \cdot 10^{-13} - 1 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-12} - 1,7 \cdot 10^{-13}$
10000	$1 \cdot 10^{-14} - 3 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-10} - 0,5 \cdot 10^{-10}$
86400	$3 \cdot 10^{-15} - 1 \cdot 10^{-15}$	$0,5 \cdot 10^{-10} - 1,7 \cdot 10^{-11}$

Дополнительными требованиями, накладываемыми на методы определения РШВ в целях оперативного частотно-временного обеспечения (ЧВО), являются:

- оперативность, обусловленная необходимостью минимизации «возраста» ЧВО;
- возможность достижения заданных ТХ на ограниченных интервалах наблюдения;
- автономность, обусловленная необходимостью надежного решения задач при отсутствии внешних данных.

На рис. 5 представлены графики максимально допустимой вносимой временной девиации, при которой обеспечивается достижение близкой к теоретически возможной погрешности прогнозирования.

Проведенный анализ [4–9] показывает, что существующие методы сравнения ШВ удаленных объектов, применяемые на практике, включают в себя следующие классы.

Для сравнения ШВ наземных стационарных КСЧ:

- дифференциальные методы сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием кодовых и фазовых измерений (CV – common view, AV – all-in-view, PPP – precise point positioning, CV-фазовый) в оперативном и высокоточном режимах (с использованием высокоточной апостериорной ЭВИ);
- двухпутевой метод сравнения ШВ с использованием геостационарных КА в качестве ретрансляторов (TWSTFT – two-way satellite time and frequency transfer, TWCP – two-way via carrier-phase);
- двухпутевые методы сравнений ШВ с использованием оптического волокна (TWOV – two-way via optic fiber);
- двухпутевой метод с использованием лазерных линий связи (T2L2 – time transfer by laser links);
- перевозимые квантовые часы.

Для сравнения ШВ наземных стационарных КСЧ и бортовых КСЧ:

- беззапросные радиотехнические методы сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием кодовых и кодово-фазовых («сглаженных») измерений (L3C, L3P);
- беззапросные радиотехнические методы сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием фазовых измерений и апостериорной высокоточной ЭВИ (IGS/ESA);
- запросно-беззапросный оптический метод сравнения ШВ с использованием пассивного ретранслятора и приемника оптических импульсов на КА (T2L2);
- встречный радиотехнический метод сравнений ШВ (TWTT – two-way time transfer).

Учитывая область применения рассматриваемых КСЧ, оценка ТХ методов с использованием оптического волокна (TWOV) и перевозимых квантовых часов далее не приводится. В табл. 2 и на рис. 6 приведены характеристики существующих методов определения РШВ в терминах девиации Аллана и временной девиации.

Таблица 2

Характеристики существующих методов определения РШВ

Интервал измерения, с	Нестабильность измерений (вариация Аллана)	Временная девиация, с
<i>Дифференциальный метод с использованием сигналов ГЛОНАСС (CV, CGGTTS)</i>		
10000	$2 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
86400	$2 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$
<i>Дифференциальный метод с использованием сигналов ГЛОНАСС (CV-фазовый / PPP)</i>		
100	$2 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$
10000	$9 \cdot 10^{-16}$	$5,2 \cdot 10^{-12}$
86400	$5 \cdot 10^{-17}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$
<i>Двухпутевой метод сравнения ШВ с использованием геостационарных КА в качестве ретрансляторов (TWSTFT)</i>		
100	$2 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$
10000	$8 \cdot 10^{-15}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$
86400	$9 \cdot 10^{-16}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$
<i>Двухпутевой метод сравнения ШВ с использованием геостационарных КА в качестве ретрансляторов (TWCP)</i>		
100	$5 \cdot 10^{-14}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$
10000	$1 \cdot 10^{-15}$	$5,7 \cdot 10^{-12}$
<i>Беззапросные радиотехнические методы сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием кодовых и фазовых измерений (L3C, L3P)</i>		
100	Нет данных	Нет данных
10000	$8 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$
86400	$1 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$

Интервал измерения, с	Нестабильность измерений (вариация Аллана)	Временная девиация, с
<i>Беззапросные радиотехнические методы сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием кодовых и фазовых измерений (IGS / ESA)</i>		
300	$1 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$
10000	$1 \cdot 10^{-15}$	$5,7 \cdot 10^{-12}$
86400	$5 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$
<i>Запросно-беззапросный оптический метод сравнения ШВ с использованием пассивного ретранслятора и приемника оптических импульсов на КА (T2L2)</i>		
100	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$
10000	$3,5 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-11}$
86400	$4,0 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-11}$
<i>Встречный радиотехнический метод сравнений ШВ (TWTT)</i>		
100	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
10000	$34 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
86400	$3,0 \cdot 10^{-15}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$

На рис. 7 представлен сравнительный график требований к сравнению ШВ перспективных КСЧ и достигнутых в настоящее время характеристик.

Анализ графиков, представленных на рис. 7, показывает, что перспективным требованиям по сравнению ШВ в большей степени удовлетворяет класс дифференциальных методов (CV-фазовый), дуплексных методов (TWSTFT, T2L2, TWCP), встречный метод (TWTT), а также беззапросный метод сравнения ШВ по сигналам ГНСС с использованием фазовых измерений и высокоточной апостериорной ЭВИ (IGS/ESA). Вместе с тем последний не применим для целей оперативного ЧВО, т. к. задержка формирования высокоточной ЭВИ, необходимой для определения РШВ, соразмерна с интервалом наблюдения и прогнозирования и приводит к недопустимому «возрасту» ЧВО на момент закладки.

Таким образом, поиск методов сравнения ШВ для перспективных КСЧ должен производиться в подклассе дифференциальных, встречных и дуплексных методов, базирующихся на обработке разностей измерений и обеспечивающих, тем самым, эффективное подавление сильно коррелированных ошибок, возникающих из-за влияния трасс распространения измерительных сигналов.

Одним из способов сравнения ШВ, обеспечивающих минимизацию влияния трассы распространения сигналов, является способ встречных измерений (TWTT). Существо способа состоит во взаимном квазисинхронном обмене сигналами, несущими информацию о ШВ объектов. При этом большая часть погрешностей за счет трассы распространения и неточности знания координат объектов устраняется. Линейная комбинация результатов измерений на каждом из объектов позволяет отдельно определить геометрическую дальность между объектами и расхождение их ШВ на момент излучения. Необходимым условием реализации метода является взаимный обмен результатами измерений между объектами, который целесообразно осуществлять по каналам, используемым для передачи измерительных сигналов.

На рис. 8 схематично изображены временные соотношения между сигналами, излучаемыми с объектов 1 и 2. Здесь приняты следующие обозначения: T_1 – эпоха шкалы времени объекта 1 в общей координированной ШВ в начале технологического цикла (ТЦ) сравнения ШВ; T_2 – аналогичная эпоха ШВ объекта 2 в системной ШВ; ΔT_{12} – расхождение ШВ объектов на начало ТЦ; T_1' – фактический момент излучения сигнала на объекте 1; T_2' – фактический момент излучения сигнала на объекте 2; $\tau_{1TX}, \tau_{1RX}, \tau_{2TX}, \tau_{2RX}$ – аппаратурные задержки в передающем и приемном трактах объекта 1 и 2 соответственно; $\tau_{21}(T_2), \tau_{12}(T_1)$ – задержка на распространение сигналов между объектами 2 и 1, 1 и 2 соответственно; T_1'', T_2'' – эпохи фактического приема сигналов объектами 1 и 2 соответственно; T_1''', T_2''' – эпохи измерения псевдодальностей (ПД) в ШВ объекта 1 и 2 соответственно; $\rho_{21}(T_2), \rho_{12}(T_1)$ – ПД, определенные на объекте 2 и 1 в эпохи T_2 и T_1 соответственно.

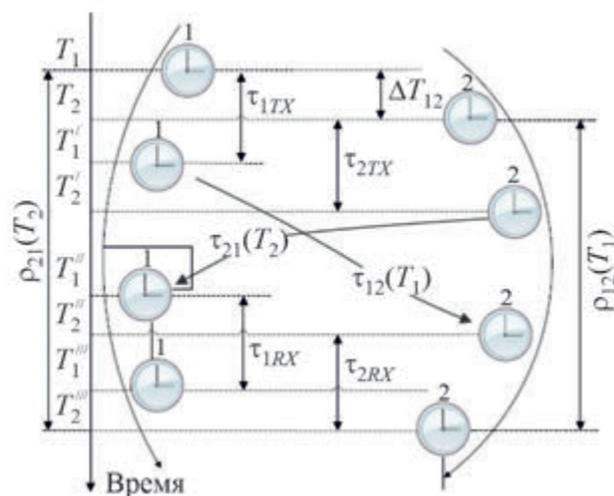


Рис. 8. Принцип встречных измерений

Линейная комбинация результатов измерений ПД обеспечивает определение расхождения ШВ объектов:

$$\Delta T_{12}(T_1) = \left[\frac{\rho_{21}(T_2) - \rho_{12}(T_1)}{c} - \frac{\tau_{21}(T_2) - \tau_{12}(T_1)}{2} - \frac{\tau_{1TX} + \tau_{2RX} - \tau_{2TX} - \tau_{1RX}}{2} - \frac{I_{21} - I_{12}}{2} - \frac{\varepsilon_{21}}{2} - \frac{d_{21} - d_{12}}{2} \right], \quad (4)$$

где I_{21}, I_{12} – задержка сигналов в ионосфере при распространении от объекта 2 к 1 и от 1 к 2 соответственно; ε_{21} – ошибка за счет взаимного расхождения ШВ объектов 1 и 2 за интервал времени, соответствующий задержкам на обмен сигналами; d_{21}, d_{12} – задержки за счет эффектов Саньяка и задержки в тропосфере; c – скорость света.

Анализ уравнения (4) показывает, что особенностью указанного метода для определения РШВ является необходимость раздельного учета задержек измерительных сигналов в трактах передатчика и приемника, который не может быть выполнен без дополнительных измерений. Следует отметить, что весь бюджет аппаратурных систематических и медленно меняющихся погрешностей сосредоточен в третьем члене выражения (4).

Введем в уравнение (4) параметры $\Delta\tau_{RXTX1} = \tau_{1TX} - \tau_{1RX}$, $\Delta\tau_{RXTX2} = \tau_{2TX} - \tau_{2RX}$. В этом случае выражение (4) примет вид:

$$\Delta T_{12}(T_1) = \left[\frac{\rho_{21}(T_2) - \rho_{12}(T_1)}{c} - \frac{\tau_{21}(T_2) - \tau_{12}(T_1)}{2} - \frac{\Delta\tau_{RXTX1} - \Delta\tau_{RXTX2}}{2} - \frac{I_{21} - I_{12}}{2} - \frac{\varepsilon_{21}}{2} - \frac{d_{21} - d_{12}}{2} \right]. \quad (5)$$

Таким образом, для определения третьего члена уравнения (5) необходимо определить разность задержек приемного и передающего тракта относительно выбранной опорной фазы. В качестве опорной фазы может быть использована метка собственной ШВ объекта, для которого определяется параметр $\Delta\tau$ (например, момент T_1 для объекта 1). При условии обеспечения измерений задержки в передающем тракте и задержки в приемном тракте относительно одной опорной фазы, вычитание результатов вышеуказанных измерений дает искомую величину. Предполагая техническую возможность измерения задержки передаваемого и принимаемого сигнала относительно метки ШВ объекта, можно записать выражение (6):

$$\Delta\tau_{RXTX1} = \rho_{11}(T_1 + \tau_{1TX}) + \tau_{измTX1} - \rho_{12}(T_1 + \tau_{1RX}) - \tau_{измRX1}, \quad (6)$$

где $\rho_{11}(T_1 + \tau_{1TX})$ – результат измерения ПД передаваемого объектом 1 сигнала измерительной схемой объекта 1; $\tau_{измTX1}$ – задержка передаваемого сигнала в схеме измерения; $\tau_{измRX1}$ – задержка принимаемого сигнала в схеме измерения.

При условии использования для измерения ПД передаваемого и принимаемого сигнала общего тракта: $\tau_{измTX1} = \tau_{измRX1}$.

Учитывая, что задержка в передающем тракте и ПД объекта 2 за счет ухода его ШВ и взаимного движения за интервал времени $\tau_{1TX} - \tau_{1RX}$ изменяются пренебрежимо мало, можно редуцировать моменты времени взятия отсчетов ПД к единому значению (единой опорной фазе T_1) $\Delta\tau_{RXTX1} = \rho_{11}(T_1) - \rho_{12}(T_1)$.

Аналогично для второго объекта $\Delta\tau_{RXTX2} = \rho_{22}(T_2) - \rho_{21}(T_2)$.

Итоговое выражение для определения РШВ с учетом вышеизложенного примет вид (7):

$$\Delta T_{12}(T_1) = \left[\frac{\rho_{21}(T_2) - \rho_{12}(T_1)}{c} - \frac{\tau_{21}(T_2) - \tau_{12}(T_1)}{2} - \frac{\rho_{11}(T_1) - \rho_{12}(T_1) - \rho_{22}(T_2) + \rho_{21}(T_2)}{2} - \frac{I_{21} - I_{12}}{2} - \frac{\varepsilon_{21}}{2} - \frac{d_{21} - d_{12}}{2} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, при условии обеспечения единого тракта для измерения ПД передаваемого и принимаемого сигнала и обмена измерительной информацией между объектами, возможно обеспечить выполнение калиброванных измерений с учетом величины задержек в передающих и приемных трактах в интересах определения РШВ. При этом определение задержек производится в едином решении одновременно с формированием измерительной информации на каждом из объектов.

Основой предлагаемого способа определения задержек в процессе штатной работы является использование измерительного тракта не только для оценки задержки выходного сигнала радиопередающего устройства, но и для оценки задержек опорных сигналов [10]. Использование общего тракта для измерения относительной задержки сигналов практически полностью исключает дополнительные погрешности, вносимые формирователем модулирующего сигнала. Элементы тракта, различные для опорного и измеряемого сигналов, являются пассивными и широкополосными; тем самым, задержки, возникающие в этих элементах, возможно стабилизировать

на все время эксплуатации с высокой точностью. Принцип измерений, положенный в основу предлагаемого способа, поясняется на рис. 9.

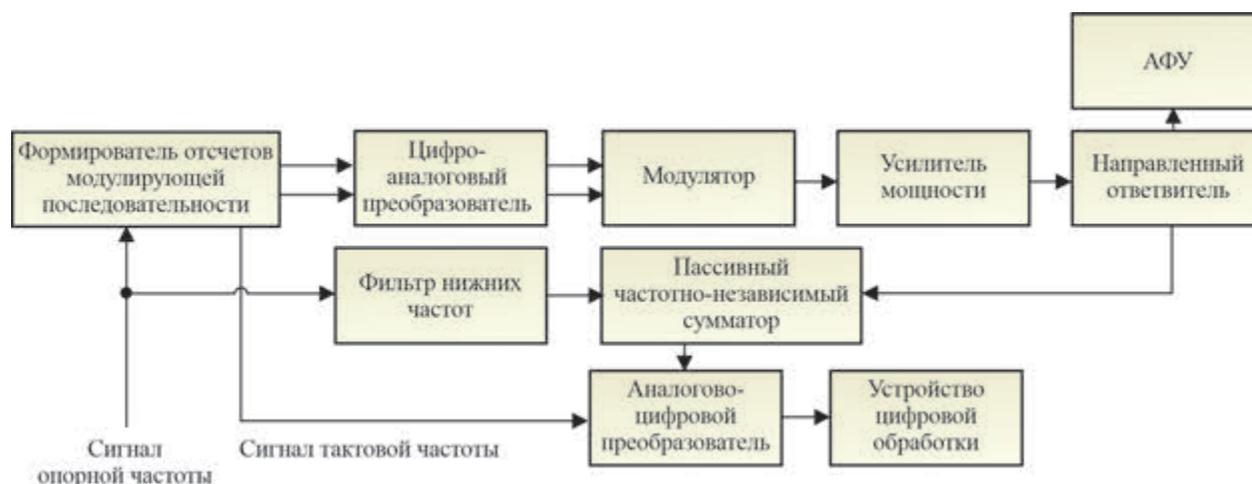


Рис. 9. Упрощенная структурная схема прибора, реализующего автоматическую калибровку

Радиосигнал на несущей частоте формируется модулятором, на вход которого поступает модулирующий сигнал с цифроаналогового преобразователя, отсчеты для которого формируются формирователем отсчетов модулирующей последовательности. После чего он усиливается усилителем мощности и излучается через антенно-фидерное устройство (АФУ).

Часть мощности радиосигнала ответвляется с помощью пассивного направленного ответвителя в измерительный тракт и поступает на пассивный частотно-независимый сумматор.

Через развязывающее устройство (фильтр нижних частот) на второй вход сумматора поступает синусоидальный сигнал, являющийся опорным для формирователя отсчетов модулирующей последовательности. На этот же сумматор может быть подан также принимаемый радиосигнал.

Сумма двух сигналов – опорной частоты и радиосигнала с выхода сумматора – поступает на вход широкополосного аналогово-цифрового преобразователя, где производятся квантование по амплитуде и дискретизация по времени. При этом происходит преобразование несущей частоты радиосигнала: отображение спектра сигнала в первую зону Найквиста. Схематично преобразование спектров показано на рис. 10 и 11.

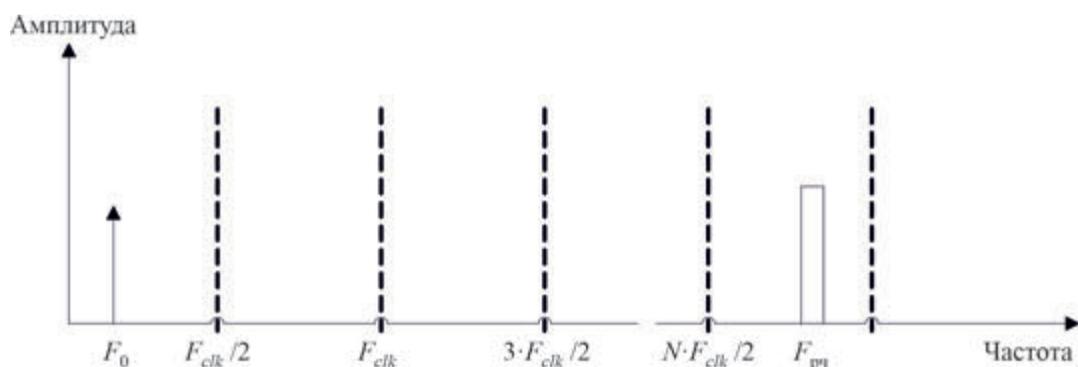


Рис. 10. Спектр сигнала на входе АЦП (F_0 – сигнал опорной частоты, $F_{рч}$ – радиосигнал, F_{clk} – частота дискретизации)

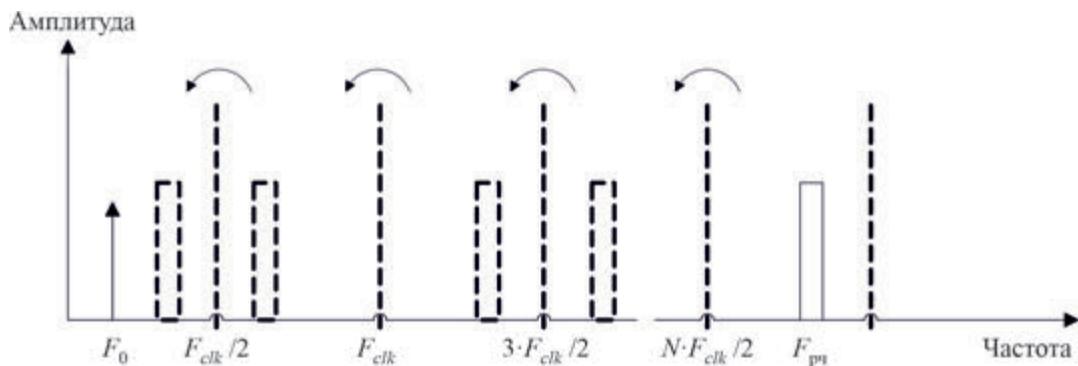


Рис. 11. Спектр сигнала после квантования и дискретизации
(F_0 – сигнал опорной частоты, $F_{рч}$ – радиосигнал, F_{clk} – частота дискретизации)

Полученная с аналогово-цифрового преобразователя последовательность отсчетов поступает в устройство цифровой обработки (УЦО).

В УЦО производится измерение задержки фазы и огибающей радиосигнала относительно фазы сигнала опорной частоты.

Структурная схема УЦО, поясняющая принцип его действия, приведена на рис. 12.

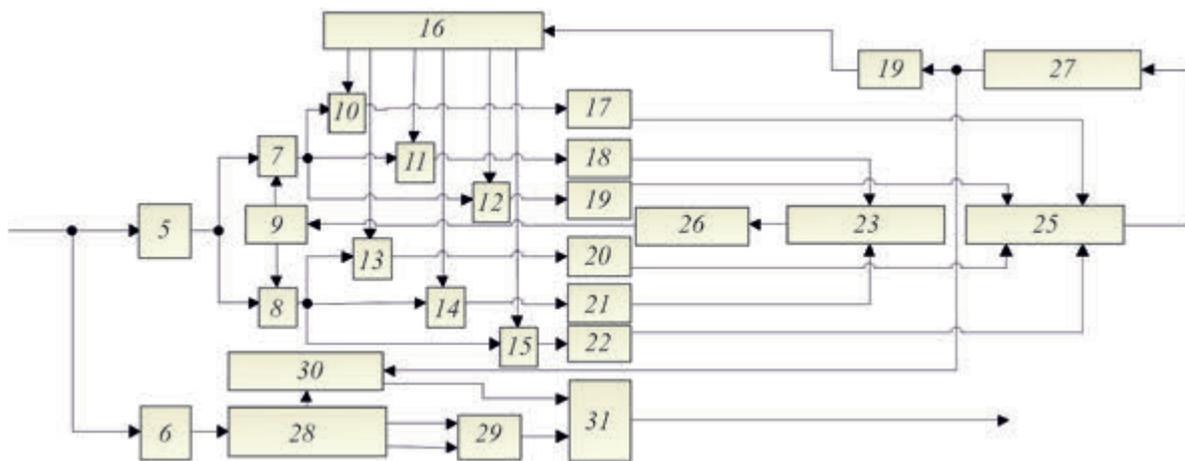


Рис. 12. Структурная схема устройства цифровой обработки

УЦО обеспечивает измерение задержки и фазы радиосигнала, а также фазы опорного сигнала. Для этого из суммарного сигнала с помощью цифровых фильтров 5, 6 выделяются радиосигнал и сигнал опорной частоты, которые поступают соответственно на измеритель задержки и фазы радиосигнала и измеритель фазы опорного сигнала.

Измеритель задержки и фазы радиосигнала представляет собой одноканальный корреляционный приемник. Отсчеты радиосигнала перемножаются на перемножителях 7, 8 с квадратурными отсчетами опорного колебания, формируемыми генератором несущей, управляемым кодом 9, и на перемножителях 10...15 – с отсчетами опорной ПСП, формируемыми генератором ПСП 16, и поступают на интеграторы со сбросом 17...22. Результаты интегрирования поступают на дискриминаторы по фазе 23 и задержке 24, формирующие сигналы рассогласования для управления генераторами несущей частоты 9 и тактовой частоты кода 25. Для уменьшения шума сигналы рассогласования фильтруются петлевыми фильтрами 26, 27.

Измеритель фазы опорного сигнала функционирует следующим образом. Входной опорный сигнал поступает на фильтр Гильберта 28, формирующий аналитический сигнал, мгновенная фаза которого вычисляется в блоке 29 как арктангенс отношения мнимой и вещественной компонент сигнала. Вспомогательный генератор, управляемый кодом 30, формирует сигнал опорной частоты, синхронизированный по задержке с опорной ПСП. Разность фаз аналитического сигнала и сигнала вспомогательного генератора, вычисляемая в блоке 31, соответствует фактическому расхождению фаз огибающей входного сигнала опорной частоты и радиосигнала.

УЦО является синхронным цифровым устройством, поэтому систематические погрешности (задержки обработки) являются строго детерминированными и могут быть вычислены и учтены при измерениях. За счет использования общего измерительного тракта изменяющиеся в процессе эксплуатации задержки в его элементах, общих для опорного и измеряемого сигналов, на результаты измерения влияния не оказывают. Задержки в остальных элементах измерительного тракта могут быть стабилизированы с высокой точностью, учитывая широкую полосу рабочих частот и отсутствие в их составе активных элементов.

Для экспериментальной оценки достигаемых значений погрешности учета калибровочных поправок к измерениям был поставлен эксперимент на макете прибора для встречных измерений, реализованном по схемам, приведенным на рис. 9 и 12. Целью эксперимента являлась численная оценка погрешности учета задержек в передающем тракте на длительных интервалах времени под воздействием дестабилизирующих факторов. Макет прибора и контрольный приемник синхронизированы от общего опорного генератора (ОГ). В качестве дестабилизирующих факторов использовались: температура, имитируемые «скачки» ШВ передатчика, изменение уровня мощности передатчика.

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 13.

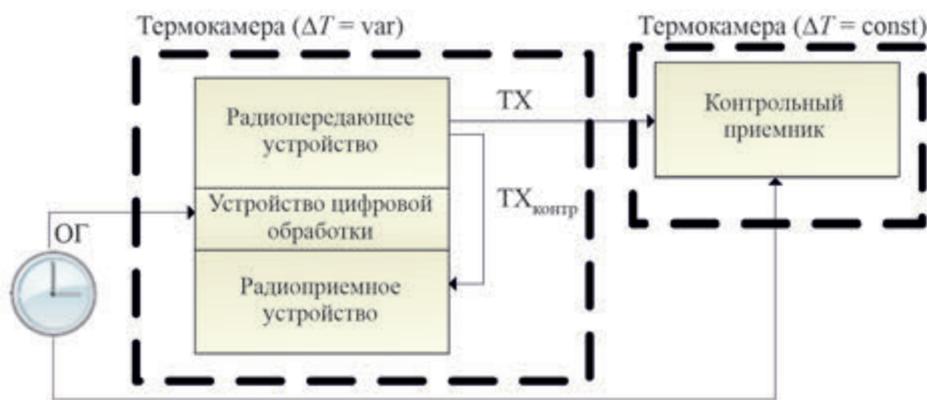


Рис. 13. Структурная схема экспериментальной установки

Параметры экспериментальной установки

Рабочий диапазон частот излучаемого и принимаемого сигналов.....	<i>Ku</i> -диапазон (~14 ГГц)
Ширина полосы модуляции.....	~100 МГц
Вид модуляции.....	бинарная фазовая манипуляция
Энергетический потенциал на входах контрольного и штатного приемников.....	~43...50 дБ·Гц

Контроль задержек в передающем тракте выполнялся с помощью контрольного приемника, размещенного в термокамере с постоянной температурой. Исследуемый прибор размещался в термокамере с запрограммированным изменением температуры в заданном диапазоне.

В ходе эксперимента контрольным термостатированным приемником выполнена проверка температурной чувствительности задержки в передающем тракте. В термокамере был установлен диапазон изменения температуры от 25 до 55 град с интервалом между установкой температур 6 ч. В процессе испытаний проведена имитация «скачков» ШВ и изменения мощности передатчика на 7 дБ. Перед экспериментом проведена верификация стабильности измерений контрольного приемника. На рис. 14 представлен график ПД, полученный на контрольном приемнике.

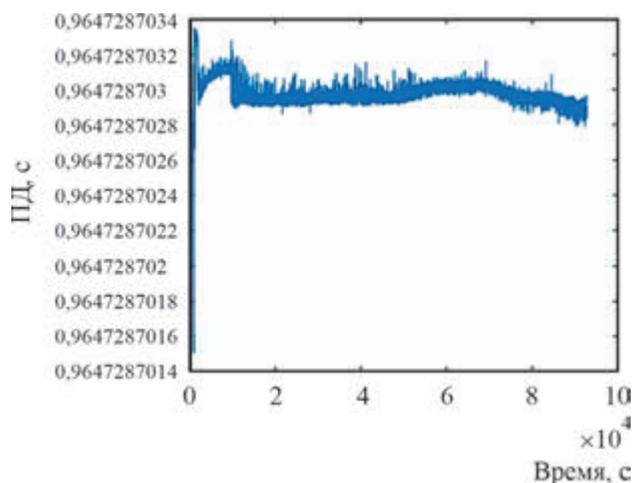


Рис. 14. Результаты измерений ПД термостатированным контрольным приемником

Результаты длительных измерений ПД термостатированным контрольным приемником представлены на рис. 15.

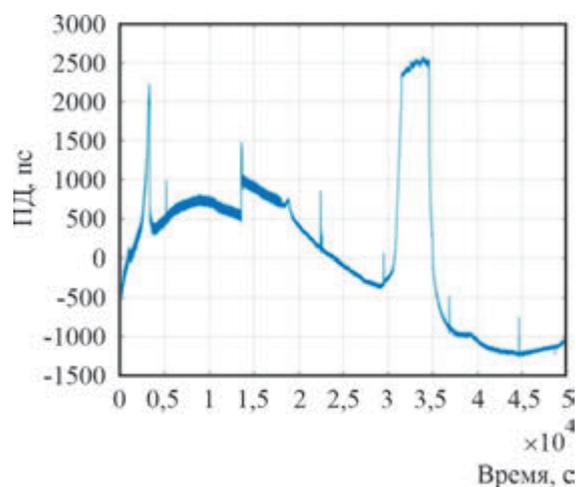


Рис. 15. Результаты измерения ПД контрольным термостатированным приемником при изменении температуры в камере на 35 град

Максимальная температурная чувствительность задержки в передающем тракте составила ~ 40 пс/°С. С учетом необходимой погрешности сравнений ШВ на уровне 100 пс данная величина является значительной и должна компенсироваться.

На рис. 16 представлены результаты измерения ПД штатным приемником при изменении температуры в камере на 35 град. Анализ графиков рис. 15 и 16 показывает их сильную корреляцию, что позволяет судить о корректности измерений штатного приемника. На рис. 17 приведен график разности измерений контрольного и штатного приемников, демонстрирующий остаточную случайную погрешность учета калибровочных поправок к задержке в передающем тракте.

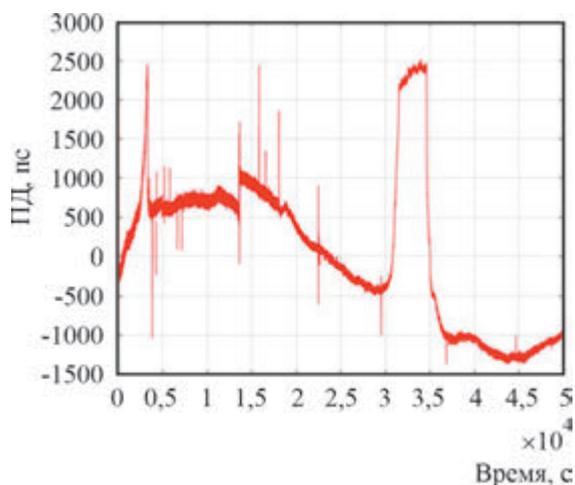


Рис. 16. Результаты измерения ПД штатным приемником при изменении температуры в камере на 35 град

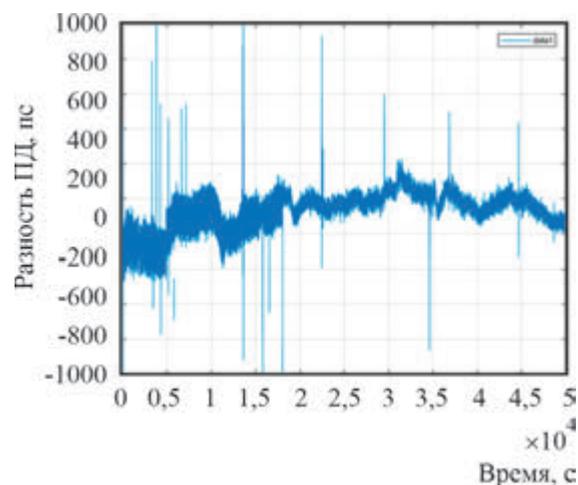


Рис. 17. Разность ПД штатного и контрольного приемников

В результате эксперимента показано значительное снижение температурной чувствительности передающего тракта. Остаточная погрешность учета поправки на задержку в передающем тракте составляет 600 пс (размах без учета выбросов), среднее квадратическое отклонение составляет 116,6 пс (с учетом аномальных выбросов). Следует отметить, что все оценки проведены при измерениях по огибающей дальномерного кода, т. е. возможно дальнейшее повышение точностных характеристик метода встречных измерений путем перехода на фазовые измерения, что обеспечит снижение погрешности не менее чем на порядок.

Использование единого измерительного тракта для принимаемого и передаваемого радиосигнала позволяет обеспечить выполнение калиброванных встречных измерений, при этом процедура калибровки будет выполняться одновременно с измерениями.

Предлагаемое техническое решение может быть положено в основу для создания прецизионных измерительных линий в интересах оперативного ЧВО для навигационных КА с перспективными БСУ.

ВЫВОДЫ

Анализ достигнутых ТХ сравнений ШВ перспективных бортовых КСЧ и наземных КСЧ показывает, что необходимые ТХ определения РШВ достигаются методами, требующими централизованной обработки большого объема данных, глобального покрытия орбит измерениями и формирующими результаты с существенной задержкой. Таким образом, указанные методы могут быть использованы для апостериорной оценки в интересах мониторинга и метрологического обеспечения, а также в интересах сравнения высокостабильных наземных СЧ. Применение указанных методов для целей оперативного ЧВО невозможно или вызывает существенные трудности.

Наиболее высокой точностью обладают дифференциальные методы и метод встречных измерений, обеспечивающие эффективное подавление сильно коррелированных погрешностей, связанных с влиянием среды распространения радиосигналов.

Методом, обеспечивающим достаточные ТХ сравнений перспективных бортовых и наземных ШВ, удовлетворяющим условиям всепогодности, оперативности и «автономности», в настоящее время является метод встречных измерений, который может быть применен для целей оперативного ЧВО.

Основную систематическую и медленно меняющуюся аппаратурную погрешность метода встречных измерений составляют погрешности раздельного определения задержек в приемном и передающем трактах.

В работе предложен способ определения указанных задержек в процессе штатной работы измерительной линии, схема прибора, реализующего данный способ, и проведены экспериментальные оценки достигаемых ТХ. Полученные оценки позволяют рассматривать предлагаемое техническое решение в качестве основы для создания прецизионных измерительных линий в интересах оперативного ЧВО для навигационных КА с перспективными БСУ.

Дальнейшие исследования предложенного метода будут проведены путем натурных испытаний прибора в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Batori, Etienne.** GNSS-grade space atomic frequency standards: Current status and ongoing developments / Etienne Batori, Nil Almat, Christoph Affolderbach, Gaetano Mileti // *Advances in Space Research.* – 2020.
2. **Riley, W. J.** NIST Special Publication 1065 / W. J. Riley // *Handbook of Frequency Stability Analysis.* – National Institute of Standards and Technology.
3. **ГОСТ 34100.3 2017.** Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
4. **Скакун, И. О.** Сравнение шкал времени методом Common View по измерениям НКА ГЛОНАСС с учетом целочисленного свойства фазовых неоднозначностей / И. О. Скакун, В. В. Митрикас // *Гироскопия и навигация.* – 2017. – Т. 25, № 4 (99).
5. **Митрикас, В. В.** Сравнение шкал времени методом PPP по измерениям навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС / В. В. Митрикас, Д. С. Печерица, И. О. Скакун, В. Н. Федотов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* – 2018. – № 4. – С. 32 – 44.
6. **Riedel, F.** Direct comparison of European primary and secondary frequency standards via satellite techniques / F. Riedel, A. Al-Masoudi et al. // *Metrologia.* – 57 (4)б 045005.
7. **Fujieda, M.** Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline / M. Fujieda, D. Piester, T. Gotoh, J. Becker, M. and A. Bauch // *IEEE EFTF.* – 2016.
8. **HYPERLINK.** – URL: https://igs.org/products/#clock_products.
9. **Ziqian Wu.** Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser / Ziqian Wu, Shanshi Zhou, Xiaogong Hu, Li Liu, Tao Shuai, Yonghui Xie, Chengpan Tang, Junyang Pan, Lingfeng Zhu, Zhiqiao Chang // *GPS Solutions.* – 2018.
10. **Патент 2581767.** Устройство определения аппаратной задержки выходного сигнала передатчика / А. А. Скобелин, М. Н. Уткин. – Приоритет 16.03.16.

*Статья поступила 10 декабря 2021 г.,
после переработки – 11 января 2022 г.*

УДК 621.396.67

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН

В. Е. Драч¹, Д. А. Кондратов², А. А. Шмелькова²

¹Сочинский государственный университет

²Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Приведен обзор современных решений и конструкций, позволяющий оценить уровень прогресса в построении компактных антенн в настоящее время. Подчёркиваются основные преимущества фрактальных антенн для сверхширокополосных применений.

КС: фрактальная геометрия, антенна, широкополосный, сверхширокополосный

ADVANCED FRACTAL ANTENNA DESIGNS

V. E. Drach¹, D. A. Kondratov², A. A. Shmelkova²

¹Sochi State University

²Bauman Moscow State Technical University (Kaluga branch)

An overview of modern solutions and designs is given, which allows us to assess the level of progress in the construction of compact antennas at the present time. The main advantages of fractal antennas for ultra-wideband applications are being emphasized.

Keywords: antenna, fractal geometry, wideband, ultra-wideband

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие портативных систем связи поднимает вопрос о необходимости разработки многополосных, широкополосных и сверхширокополосных приемных антенн, удовлетворяющих требованиям современных средств беспроводных передач данных. Предпринимаются попытки разработать новую геометрию, удовлетворяющую всем требованиям систем беспроводной связи, так как характеристики приемных антенн во многом обуславливают результирующие параметры приемопередающих приборов. Ожидается повсеместное внедрение систем связи поколения 5G, так как в течение последних лет для этого была проделана серьезная работа. Интерес к поколению 5G обусловлен постоянно растущим запросом на более высокие скорости передачи информации между абонентами.

В современных беспроводных системах применение фрактальных антенн имеет следующие преимущества [1]:

- Передача большого количества данных за короткий временной промежуток, а значит, улучшенные широкополосные характеристики.
- Селективность – антенна может иметь хорошие характеристики именно для данного диапазона и плохо реагировать (или совсем не реагировать) на частоты нерабочего диапазона.
- Поскольку современные средства связи обладают компактными размерами, применение фрактальных антенн позволяет нейтрализовать побочные отрицательные эффекты миниатюризации.

2. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ

Интерес к компактным антеннам постоянно возрастает в последнее десятилетие. Авторы предлагают различные подходы к проблеме миниатюризации компактных антенн. Одним из оригинальных и перспективных подходов можно назвать применение рекурсивной топологии и фрактальной геометрии [1, 2] при проектировании антенных устройств.

Одним из популярных типов широко известных антенн является микрополосковая патч-антенна. Детально проработана теория ее функционирования, многократно проведены измерения на реальных антеннах и прототипах, которые хорошо согласуются с результатами расчетов. Мы можем встретить такие приборы, например, в персональных устройствах связи, таких, как мобильные телефоны и радиостанции, портативных спутниковых системах связи и т. д.

Рассмотрим традиционную микрополосковую патч-антенну, которая описана в [3]. Антенна выполнена на диэлектрической подложке *RT Duroid*, имеющей $\epsilon_r = 2,45$ и толщину 1,58 мм. Антенна тестировалась в диапазоне частот 2...4 ГГц с резонансом на частоте 2,4 ГГц. Одной из отличительных характеристик антенны можно назвать возвратные потери, которые составили порядка -42,154 дБ при значении коэффициента усиления 19,455 dBi. Предполагается, что антенна может быть использована в устройствах *S*-диапазона. Рабочая область антенны представляла собой почти правильный прямоугольник с размерами 38,677×46,62 мм.

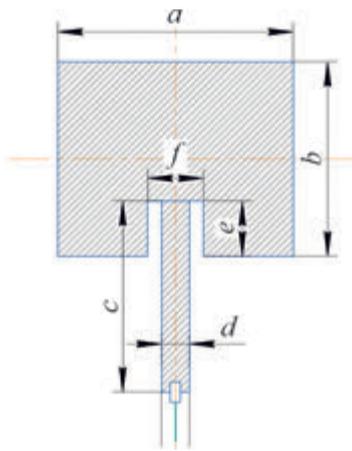


Рис. 1. Антенна для устройств *S*-диапазона

В конструкции антенны для устройств *S*-диапазона, приведенной на рис. 1, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $a = 46,62$ мм, $b = 38,77$ мм, $c = 37,99$ мм, $d = 5,5$ мм, $e = 11,2$ мм, $f = 11$ мм.

Сразу три разновидности конструкции предложены в [4]: рассмотрены антенны, имеющие форму квадрата, круга и треугольника. Выполнены фрактальные итерации для получения рекурсивного топологического рисунка. В качестве материала подложки использовался распространенный стеклотекстолит FR4, земляной полигон был выбран размерами 4,2956×3,9186 мм. Рабочая частота составляла 28 ГГц. Обратные потери – порядка -23,09 дБ при среднем усилении 2,43 дБ. Среди типичных областей применения рассмотренных конструкций можно назвать средства метеорологического наблюдения и любительской связи, радионавигация и спутниковая связь.

В конструкциях антенн, представленных на рис. 2, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $a = 12$ мм, $b = 18$ мм, $c = 25,3$ мм, $d = 20$ мм, $e = 16$ мм, $f = 2$ мм, $g = 10$ мм, $h = 1$ мм, $i = 0,16$ мм.

В [5] предложена антенна в виде шестигранной формы. Для осуществления питания использован копланарный волновод с рабочей частотой от 3,1 до 10,6 ГГц. Антенна изготовлена на полиамидной подложке толщиной 1,53 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,3$. Размеры рабочей области – 26×30 мм. Предложенную конструкцию можно использовать в сверхширокополосных устройствах, поскольку полученная полоса пропускания составляет около 9 ГГц.

В конструкции антенны шестиугольной формы, представленной на рис. 3, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $a = 23$ мм, $c = 9$ мм, $r = 7,5$ мм, $m = 15$ мм, $p = 2$ мм, $f = 1,5$ мм, $t = 3$ мм, $k = 12$ мм, $L = 26$ мм, $W = 30$ мм, $S = 6$ мм.

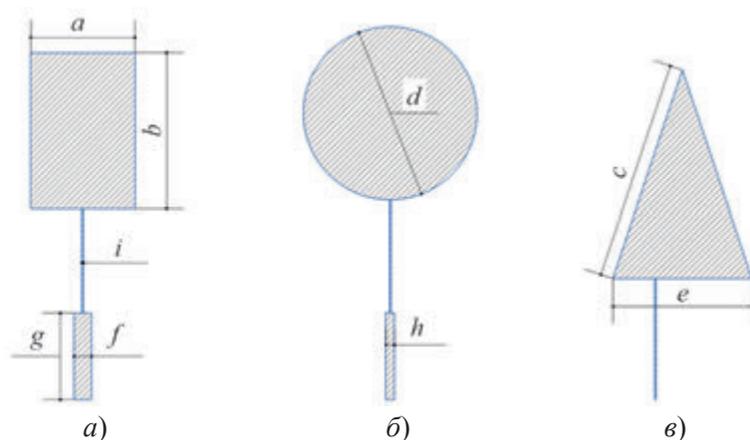


Рис. 2. Конструкции антенны в форме квадрата (а), круга (б) и треугольника (в)

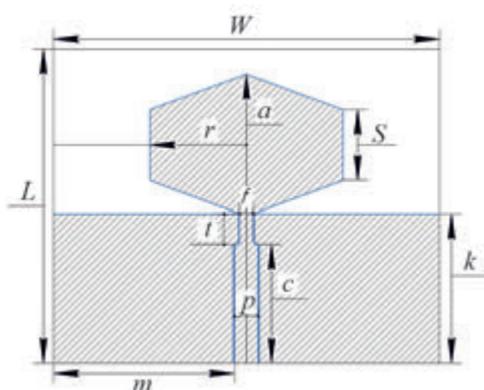


Рис. 3. Антенна в форме шестиугольника

В [6] предложены матричные конструкции 1X2 и 2X2 из 4, 8 или 16 элементов. По мере увеличения количества элементов размер антенны тоже возрастает, однако улучшаются и основные характеристики антенны. Наиболее интересной оказалась конструкция 2X2, в которой было использовано 16 элементов. Общие размеры рабочей области – 185×180 мм. Был использован стеклотекстолит FR4 в качестве материала подложки. Возвратные потери составили порядка -31,9 дБ. Коэффициент усиления, как выяснилось, можно увеличить на 25 % при увеличении количества элементов от 1 до 16.

В конструкции антенны 2X2 с 16-ю элементами, представленной на рис. 4, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $W = 185$ мм, $L = 180$ мм.

В [7] предложена конструкция кольцевой патч-антенны с $p-i-n$ -диодом, в которой возможна перенастройка поляризации на той же частоте. Четыре различные поляризации могут быть возбуждены путем управления состояниями переключателей, установленных над концентрической круглой прорезью, вытравленной в проводящем слое. Предлагаемая конструкция проста и состоит только из проводящего кольца с прорезями, переключателей на $p-i-n$ -диодах и полигона заземления. Для проверки рабочих характеристик был изготовлен прототип, работающий в диапазоне 2,4 ГГц. Удалось получить приемлемую ширину луча и направленность. Обратные потери составили порядка -25 дБ, а коэффициент усиления – 5 дБ.

В конструкции кольцеобразной антенны, представленной на рис. 5, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $r_1 = 24$ мм, $r_2 = 12$ мм, $r_3 = 9$ мм.

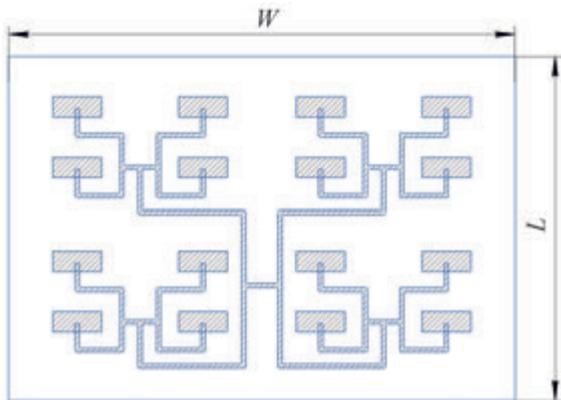


Рис. 4. Вариант антенны с 16-ю элементами

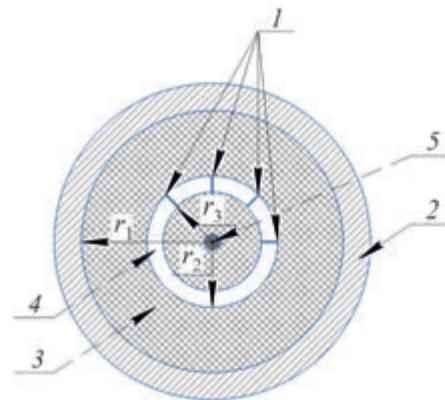


Рис. 5. Кольцеобразная антенна:
1 – переключатели; 2 – полигон заземления; 3 – проводящий слой; 4 – прорезь; 5 – порт питания

С появлением фрактальной геометрии исследователи стали немного иначе смотреть на микрополосковую патч-антенну. При разработке топологии стали применяться фрактальные элементы, такие, как ковер Серпинского, кривая Коха, Минковского и другие, которые обладают рекурсивными свойствами и самоподобием. Рассмотрим известные и новаторские конструкции, полученные с помощью теории фракталов.

Представленная на рис. 6 топология на базе ковра Серпинского, подробно описанная в [8], в основе содержит две формы: квадрат и треугольник. Используя несколько итераций, обычно 3...6, была разработана антенна на подложке из диэлектрика FR4 толщиной 1,6 мм с рабочими частотами до 3 ГГц. Антенна имеет хорошие возвратные потери (до -30 дБ) и усиление до 6 дБ. Антенна может найти применение в широкополосных устройствах.

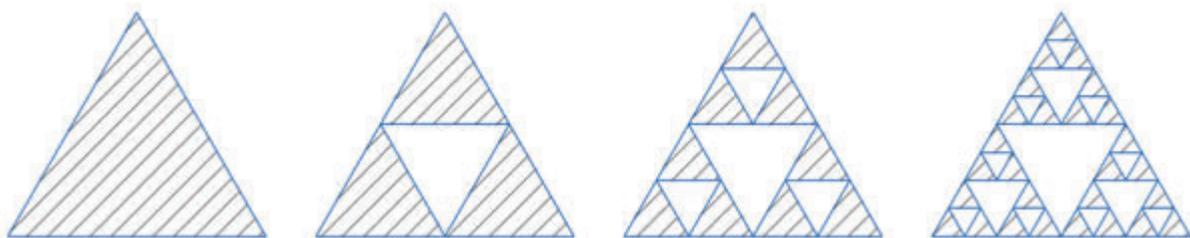


Рис. 6. Геометрия на базе треугольника Серпинского.
Продемонстрированы четыре итерации

Ещё одна популярная фрактальная топология, изображенная на рис. 7, получена с использованием кривой Коха. Например, в [9] рассматривается фрактальная антенна, геометрия которой получена в результате четырех итераций. Антенна была разработана на подложке RT-Duroid 5880 толщиной 3,2 мм, а рабочие частоты составляли 2,6; 3,5 и 5,7 ГГц соответственно. Достигнутая полоса пропускания составила около 406 МГц с хорошими возвратными потерями (около -25 дБ). Антенну предполагается использовать для приложений RFID (англ. *radio frequency identification* – радиочастотная идентификация) – способ автоматической идентификации объектов, в кото-

ром посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках.

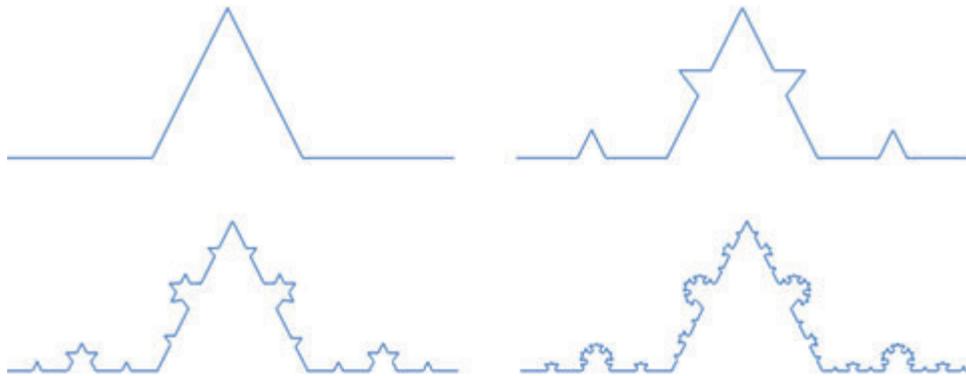


Рис. 7. Геометрия на базе снежинки Коха. Приведены четыре итерации

В следующей конструкции [10] предложена фрактальная антенна с круговыми прорезями. При весьма компактных размерах, антенна может быть использована для сверхширокополосных приложений. Конструктив, показанный на рис. 8, был разработан с использованием четырех итераций, а рабочая частота составляла от 3 до 60 ГГц. Диаграмма направленности оказалась близка к изотропной, при умеренном усилении 3 дБ. Антенна выполнена на подложке FR4 Ероху.

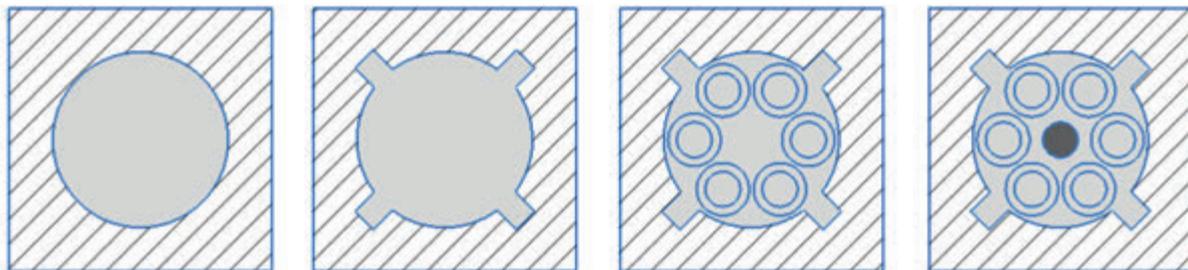


Рис. 8. Конструкция антенны, полученная в результате четырех итераций

Перейдем к следующей конструкции, предложенной в [11], которая состоит из прямоугольных фрактальных пятен и шлейфа с рабочей частотой 3,3...11,0 ГГц. Антенна демонстрирует многообещающие характеристики излучения: всенаправленное усиление около 2,2 dBi и эффективность излучения свыше 95 %. Прототип антенны был выполнен с использованием подложки FR4 Ероху толщиной 0,15 мм.

В конструкции фрактальной антенны на базе прямоугольников, представленной на рис. 9, со шлейфом кольцеобразной антенны геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $W = 39$ мм, $l_0 = 25$ мм, $l_1 = 12,6$ мм, $l_2 = 6,4$ мм, $L = 39$ мм, $h = 3$ мм, $T = 1$ мм, $S = 18,5$ мм, $A = 2$ мм, $C = 4$ мм, $g = 1$ мм.

Основными преимуществами этой антенны были ультратонкая геометрия, широкое подавление гармоник и всенаправленное усиление, как это было предложено.

Следующая конструкция [12] выглядит как структура, напоминающая по форме паука. Коэффициент усиления антенны составлял около 2 dBi с возвратными потерями около -29 дБ. Предполагается использование в многодиапазонных радиоприборах. Многократно повторяющиеся

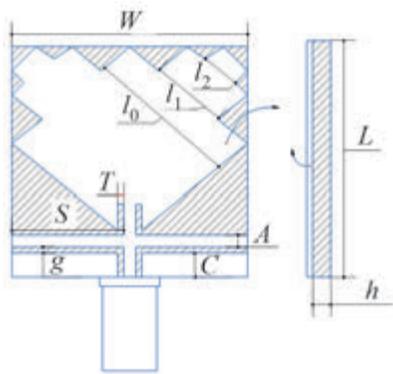


Рис. 9. Фрактальная антенна на базе прямоугольников со шлейфом

элементы фрактальной антенны обеспечивают низкую корреляцию между излучателями. Это позволяет применять данный тип антенн в системах ММО. ММО (англ. *multiple input multiple output*) – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Передающие и приёмные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой.

В конструкции фрактальной антенны для систем ММО, представленной на рис.10, геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $L = 39$ мм, $a = 52$ мм, $b = 80$ мм, $c = 5$ мм, $d = 4$ мм, $e = 13$ мм, $g = 4$ мм, $k = 4$ мм, $h = 8$ мм, $l = 8$ мм, $t = 30$ мм, $q = 19$ мм, $p = 15$ мм, $s = 14$ мм, $i = 4$ мм.

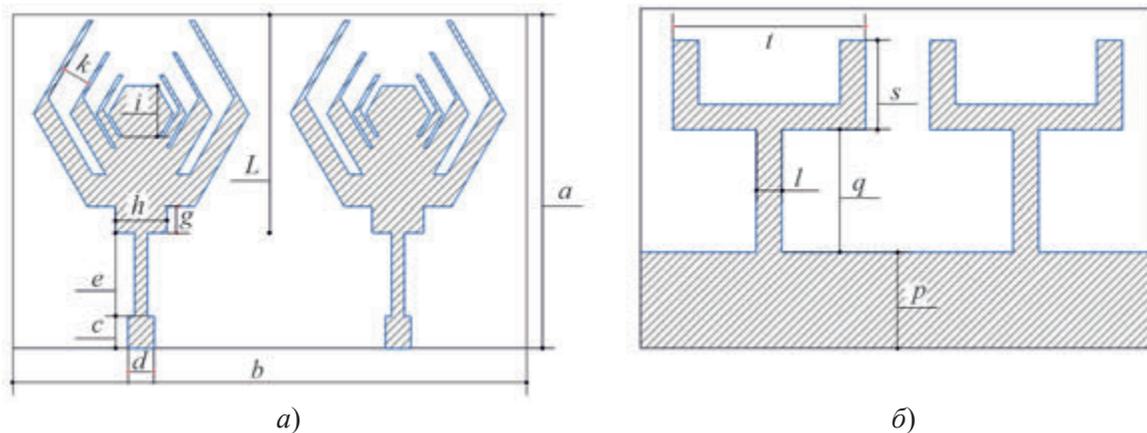


Рис. 10. Фрактальная антенна для систем ММО:

a – вид спереди; b – вид сзади

Топология сверхширокополосной фрактальной антенны [13] базируется на гексагональной форме с гексагональными прорезями, расположенными специальным образом для получения сверхширокополосных характеристик. Прототип антенны был выполнен на подложке FR4 Ероху толщиной 1,6 мм и имел рабочую частоту от 3,1 до 10 ГГц. Предложено использовать эту антенну в приборах, работающих по стандарту IEEE 802.11a. Размеры фрактального рисунка составляли 28×36 мм.

Геометрические размеры топологического рисунка антенны, изображенной на рис.11, имеют следующие значения: $W = 62$ мм, $I = 52$ мм, $L_1 = 4$ мм, $L_2 = 3$ мм, $L_3 = 11$ мм, $f_a = 6$ мм, $f_b = 4,5$ мм, $g = 0,5$ мм, $W_f = 6$ мм, $W_g = 27,5$ мм, $h_g = 10$ мм, $h_l = 18$ мм, $h_c = 1$ мм, $h_s = 3$ мм.

Однодиапазонная микрополосковая патч-антенна для работы в сетях 5G предложена в [14]. Прототип изготовлен на диэлектрической подложке Rogers RT5880 толщиной 1,6 мм. Топология преимущественно состоит из двух геометрических элементов, соответствующих по форме буквам Н и Е. Элементы расположены таким образом, чтобы можно было согласовать импеданс и повысить производительность антенны. Размеры антенны, показанной на рис.12, составляли 45×38 мм, а геометрические размеры топологического рисунка имеют следующие значения: $W_f = 3$ мм, $W_g = 38$ мм, $L_g = 45$ мм, $L_f = 20$ мм, $L_p = 23$ мм, $H_y = 16$ мм, $H_f = 15$ мм.

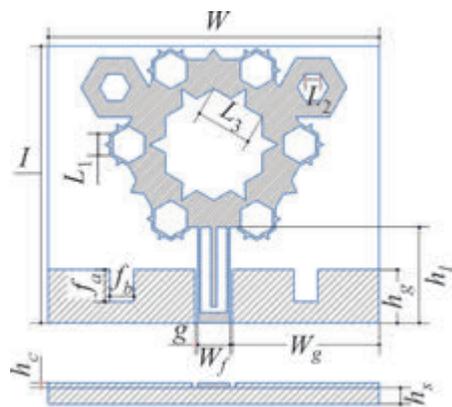


Рис. 11. Антенна для применения в приборах, работающих по стандарту IEEE 802.11a

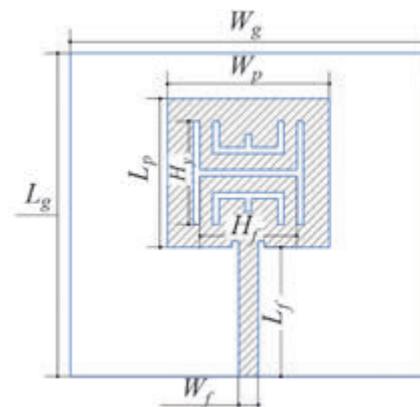


Рис. 12. Антенна на базе элементов в форме Е и Н

Широкополосная антенна для приложений беспроводной связи представлена в [15], её особенностью является рекурсивная топология «шестиугольник в шестиугольнике». На рис. 13 и 14 рассмотрена многополосная фрактальная антенна, топология которой выполнена с четырьмя итерациями, которая запитывается копланарным волноводом. Антенна была смоделирована, изготовлена, протестирована, её размеры составили 24×26 мм. Предложенная антенна предназначена для работы в четырех диапазонах: *C*, *X*, *Ku* и *K*. Прототип антенны протестирован с помощью анализатора для проверки параметров коэффициента отражения и КСВН до 15 ГГц. Оказалось, что антенна имеет резонанс на частотах 2,8; 3,6; 4,2; 6; 10,2 и 15 ГГц.

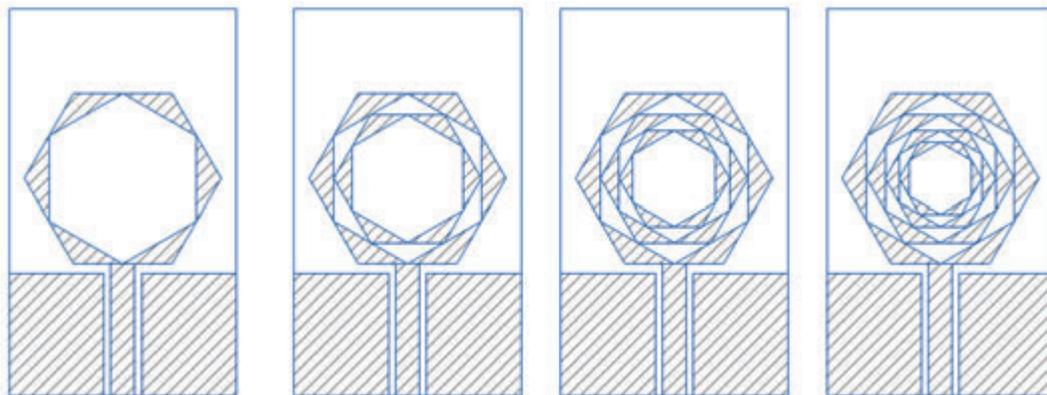


Рис. 13. Последовательность из четырех итераций «шестиугольник в шестиугольнике»

Геометрические размеры топологического рисунка шестиугольной антенны имеют следующие значения: $W_{sub} = 82$ мм, $W_f = 5$ мм, $L_{sub} = 82$ мм, $L_{gnd} = 26$ мм, $S = 1,5$ мм, $g = 2$ мм, $R_1 = 20$ мм, $R_2 = 16$ мм, $R_3 = 12$ мм, $R_4 = 8$ мм, $r_1 = 18$ мм, $r_2 = 14$ мм, $r_3 = 10$ мм, $r_4 = 6$ мм.

Таким образом, были рассмотрены разнообразные конструкции компактных антенн, предложенных разными авторами, которые достаточно сильно отличаются по своим техническим характеристикам. Очевидно, что применение фрактальной геометрии позволяет миниатюризировать конструкцию антенн, не сужая при этом рабочую полосу частот.

Вышеперечисленные характеристики различных антенных устройств сведем в таблицу.

Основные технические характеристики перспективных компактных антенн

Кон-структив	Толщина подложки, мм	Рабочая частота, ГГц	Возвратные потери, дБ	Коэффициент усиления	Диаметр (max), мм	Область применения
Рис. 2	1,58	2 – 4	-42,154	19,455 dBi	46,62	Персональные устройства связи
Рис. 3	1,51	28	-23,09	2,43 дБ	25,3	Средства метеорологического наблюдения и любительской связи, радионавигация и спутниковая связь
Рис. 4	1,53	3,1 – 10,6	-27,8	4,34 дБ	30	Сверхширокополосные устройства
Рис. 5	1,55	3	-31,9	4,1 дБ	185	Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee
Рис. 6	1,6	2,4	-25	5 дБ	27	Бортовые радиолокаторы
Рис. 7	1,6	3	-30	6 дБ	25	Широкополосные устройства: радары и периферия
Рис. 8	3,2	2,6; 3,5; 5,7	-25	3 дБ	28	Приборы RFID
Рис. 9	2,1	3 – 60	-24	3 дБ	30	Для сверхширокополосных приложений
Рис. 10	0,15	3,3 – 11,0	-26	2,2 dBi	39	Базовые станции
Рис. 11	1,8	3,2 – 15	-29	2 dBi	80	В системах MIMO
Рис. 12	1,6	3,1 – 10	-25	2 дБ	62	В приборах, работающих по стандарту IEEE 802.11a
Рис. 13	1,6	15	-26	2,3 дБ	45	Для работы в сетях 5G
Рис. 14	2	3,09 – 15	-28	3 дБ	82	Для приложений беспроводной связи

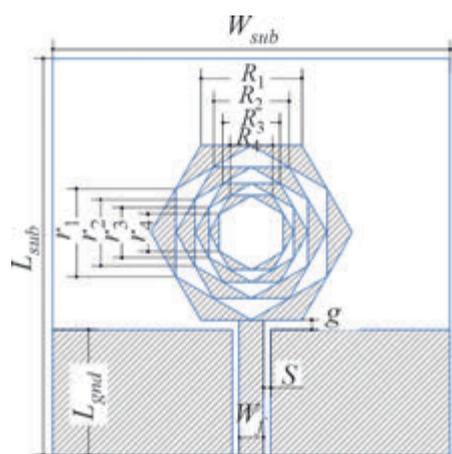


Рис. 14. Топология шестиугольной антенны

Из таблицы видно, что перспективные конструкции фрактальных антенн позволяют обеспечить приём/передачу радиосигнала на частотах порядка 2...5 ГГц, однако некоторые образцы работоспособны на частотах 10...15 ГГц и более. Диаметр (максимальный линейный размер) таких устройств оказывается существенно ниже по сравнению с классическими конструкциями, что позволяет получать гораздо более компактные устройства. Значения коэффициента усиления позволяют говорить о том, что предложенные конструкции антенн будут востребованы в прикладных задачах.

3. ВЫВОДЫ

Рассмотрены варианты микрополосковых антенн различных конструкций. Для обзора были отобраны разработки, которые обеспечивают широкий диапазон рабочих частот для различных беспроводных приложений. Перечислены и описаны: базовая конструкция патч-антенны, фрактальные конструкции, антенны с рекурсивным топологическим рисунком и другие.

Возможности фракталов, такие, как экономия пространства и эффективное использование всего ограниченного объема, обеспечивают явное преимущество интегрированных фрактальных антенн по сравнению с разработанными на основании Евклидовой геометрии. Компактные антенны используются в персональных портативных беспроводных устройствах, таких, как сотовые телефоны, ноутбуки, RFID, PDA и т. п. Ещё одной важной особенностью фрактальной антенны является многодиапазонность. Это позволяет разрабатывать и выпускать различный

ассортимент устройств от двухрежимных телефонов до приборов, интегрирующих услуги связи и определения местоположения, например, на базе GPS. Данная особенность находит применение как в потребительской, так и в оборонной сфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронина, А. Д.** Исследование влияния геометрии фракталов на характеристики фрактальных антенн / А. Д. Воронина, А. А. Матысюк, Н. Л. Ющенко // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – Т. 2. – С. 358 – 364.
2. **Ilichev, V. Y.** Investigation of characteristics of fractal wire antennas made in the form of Koch curve / V. Y. Ilichev // European Journal of Natural History. – 2021. – No 2. – P. 41 – 46.
3. **Prabhakar, D.** Design and performance analysis of microstrip antenna using different ground plane techniques for WLAN application / D. Prabhakar, P. Mallikarjuna Raj, M. Satyanarayana // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2016. – Vol. 4. – P. 48 – 58.
4. **Mishra, G. P.** Study of sierpinski fractal antenna and its array with different patch geometries for short wave *Ka* band wireless applications / G. P. Mishra & M. S. Maharana // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 115. – P. 123 – 134.
5. **Mohanty, A.** Compact wideband hybrid fractal antenna loaded on amc reflector with enhanced gain for hybrid wireless cellular networks / A. Mohanty, S. Sahu // AEÜ – International Journal of Electronics and Communications. – 2021. – Vol. 138. – P. 153837.
6. **De, A.** Design and performance analysis of microstrip patch array antennas with different configurations / A. De, C. K. Chosh, A. K. Bhattacharjee // International Journal of Future Generation Communication and Networking. – 2016. – Vol. 9, No 3. – P. 97 – 110.
7. **Mak, K. M.** Polarization reconfigurable slotted circular patch antenna / K. M. Mak, H. W. Lai // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2016. – P. 1 – 4.
8. **Rahim, A.** Analysis and design of fractal antenna for efficient communication network in vehicular model / A. Rahim, Malik // Sustainable Computing: Informatics and Systems. – 2021. – Vol. 31. – 100586.
9. **Kavitha, K.** Miniaturised circularly polarised koch fractal antenna with rotated fractal sSlot for RFID applications / K. Kavitha, J. Ananthi, M. Parvathi // 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). – 2018. – P. 1219 – 1222.
10. **Liu, N. W.** A novel differential-fed patch antenna on stepped-impedance resonator with enhanced bandwidth under dual-resonance / N. W. Liu, L. Zhu, W. W. Choi, J. D. Zhang. – 2016. – Vol. 64. – P. 4618 – 4625.
11. **Awan, W. A.** Ultra-thin flexible fractal Antenna for 2.45 GHz application with wideband harmonic rejection / W. A. Awan, N. Hussain, T. T. Le // International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – Vol. 110. – P. 152851.
12. **Kumar, J. P.** Ultra wideband MIMO notched antenna for WLAN and mobile applications / J. P. Kumar & G. Karunakar // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 118, No 9. – P. 929 – 934.
13. **Paik, H.** A miniaturized fractal antenna with square ring slots for ultrawideband applications / H. Paik, L. C. Teja, M. A. Reddy, K. S. T. Reddy // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2021. – Vol. 99. – P. 169 – 177.
14. **Oja, S.** Design and analysis of fractal monopole antennas for multiband wireless applications / S. Oja, P. M. Menghal // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 225. – P. 103 – 116.
15. **Yogaprasad, K.** CPW fed hexa-to-hexa fractal antenna for multiband applications / K. Yogaprasad, V. R. Anitha // Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications. – 2021. – Vol. 665. – P. 277 – 283.

Статья поступила 21 декабря 2021 г.

УДК 621.317

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЧАСТОТЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, Г. В. Фомина, В. А. Иовдальский,
Н. С. Карасёв, А. А. Смирнова

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

Выявлены недостатки известного оборудования для проведения оперативного контроля температурного коэффициента частоты, применяемого при серийном производстве диэлектрических резонаторов, в частности низкая производительность и недостаточная точность измерения. Предложено техническое решение, позволяющее увеличить производительность установки в 6,5 раз для партии диэлектрических резонаторов в количестве 10 штук при сохранении точности измерения не менее 12 %.

КС: устройство, контроль, измерение, производительность, точность измерения, диэлектрический резонатор, температурный коэффициент частоты, центрирующий элемент, измерительная камера, нагревательная площадка

UPGRADING THE INSTALLATION FOR MEASURING THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF FREQUENCY OF DIELECTRIC RESONATORS

V. M. Kolomin, V. N. Rybkin, G. V. Fomina, V. A. Iovdalskiy,
N. S. Karasev, A. A. Smirnova

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

The drawbacks of the known equipment for real-time control of the temperature coefficient of frequency, used in the serial production of dielectric resonators, namely low productivity and insufficient measurement accuracy, have been revealed. A technical solution is proposed that makes it possible to increase the installation productivity by a factor of 6.5 for a batch of 10 dielectric resonators while maintaining the measurement accuracy of at least 12 %.

Keywords: installation, control, measurement, productivity, measurement accuracy, dielectric resonator, temperature coefficient of frequency, centering element, measuring chamber, heating pad

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие СВЧ-электроники в значительной степени базируется на достижениях в области создания новых функциональных материалов и изделий из них [1–5].

За годы, прошедшие после первой демонстрации резонансных эффектов в открытых колебательных системах на основе диэлектриков с повышенной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \geq 20$), диэлектрические резонаторы (ДР) превратились из объекта лабораторных исследований в технически совершенные компоненты электронной техники, применение которых в технике СВЧ позволило получить ряд высокоэффективных твердотельных устройств. В отличие от объем-

ных металлических резонаторов, ДР из современных термостабильных материалов обладают весьма малыми размерами, массой и эффективно решают проблему миниатюризации колебательных систем СВЧ- и КВЧ-диапазона с одновременным улучшением ряда основных технических характеристик изделий [6, 7]. Поэтому для твердотельной СВЧ-техники весьма эффективными и востребованными остаются ДР из термостабильных керамических материалов, обладающих малыми диэлектрическими потерями.

Более полное использование возможностей ДР после изучения физики явлений, развития анализа и методов проектирования позволило создать широкий спектр техники СВЧ-диапазона на ДР. Это привело к резкому увеличению потребности в ДР и соответственно потребовало организации серийного производства ДР в отечественных организациях [7].

2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Организация серийного производства ДР потребовала создания контрольно-измерительного оборудования с достаточной производительностью и точностью измерений.

В настоящее время известны устройства, в основном зарубежного производства, для измерения температурного коэффициента частоты (ТКЧ) ДР [8, 9].

Одно из таких устройств состоит [8] из установленных горизонтально по одной оси катушек возбуждения, через которые проходит исследуемый образец, и постоянных магнитов, создающих подмагничивающее поле в исследуемом образце. Катушки возбуждения укреплены в корпусах из диэлектрического материала, расположенных на основании последовательно и на определенном расстоянии, при этом одна из катушек возбуждения подключена к генератору звуковой частоты и частотомеру, а другая – к осциллографу, регистрирующему резонанс, постоянные магниты размещены у наружных торцов корпусов.

Другое устройство представляет собой измерительную камеру, в которой расположена диэлектрическая подставка с низкими диэлектрическими потерями. Измеряемый цилиндрический ДР устанавливается на лицевую сторону подставки, при этом диэлектрическая подставка и цилиндрический резонатор должны находиться по центру измерительной камеры [8].

Данные устройства для измерения ТКЧ отличаются достаточной точностью, но имеют низкую производительность.

Известно еще одно устройство для измерения ТКЧ цилиндрического ДР. В его состав входят измерительная камера с вводом и выводом сигнала СВЧ и измерительный блок СВЧ. В измерительной камере находятся диэлектрическая подставка с низкими диэлектрическими потерями, на лицевую сторону которой помещается измеряемый ДР, и элементы связи ДР с вводом и выводом сигнала СВЧ, при этом диэлектрическая подставка и ДР расположены соосно относительно центральной вертикальной оси измерительной камеры. Измерительный блок СВЧ состоит из генератора, анализатора сигналов, частотомера, вольтметра, термопары, последняя расположена на внешней стороне измерительной камеры. Элементы измерительной камеры и измерительного блока СВЧ соединены электрически, согласно электрической схеме устройства, измерительная камера расположена в термостате с заданной температурой термостатирования [9].

Описанное устройство хотя и позволяет производить измерения ТКЧ с достаточно высокой точностью, как и предыдущие аналоги [8], тем не менее отличается низкой производительнос-

тью, так как за один цикл, который является достаточно длительным, возможно измерение только одного ДР. В связи с этим производители ДР выпускают партии последних в основном с усредненным значением ТКЧ для всей партии изделий, с разбросом $\pm 0,5$; $\pm 1,0$; $\pm 2,0$ ppm/°C от некоторых номинальных значений [10].

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

При разработке и последующем производстве изделий на ДР с повышенным уровнем термостабильности, особенно специального назначения, важно знать ТКЧ каждого ДР, использованного в данном конкретном устройстве, с целью компенсации ухода рабочей частоты из-за влияния других элементов устройства. Поэтому для серийного производства таких ДР и СВЧ-устройств на их основе назрела необходимость в существенном увеличении производительности на операции контроля ТКЧ ДР и совершенствовании конструкции измерительной установки для этой цели.

В устройстве для измерения ТКЧ ДР [11], представленном на рис. 1, содержится измерительная камера с вводом и выводом сигнала СВЧ. В камере находятся: диэлектрическая пластина с низкими диэлектрическими потерями, предназначенная для размещения на ее лицевой стороне измеряемого ДР; элементы связи ДР с вводом и выводом сигнала СВЧ; измерительный блок СВЧ, в составе которого – генератор, анализатор сигналов, частотомер, вольтметр, термопара, расположенная на внешней стороне измерительной камеры. Диэлектрическая пластина и измеряемый ДР расположены соосно относительно центральной вертикальной оси измерительной камеры. Элементы измерительной камеры и измерительного блока СВЧ соединены электрически, согласно электрической схеме устройства (рис. 2), измерительная камера расположена в термостате с заданной температурой термостатирования.

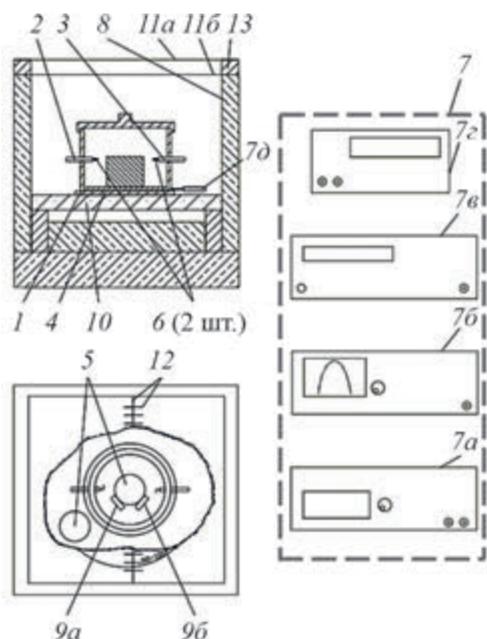


Рис.1. Устройство для измерения ТКЧ ДР:

1 – измерительная камера с вводом 2 и выводом 3 сигнала СВЧ; 4 – диэлектрическая пластина; 5 – диэлектрический резонатор; 6 – элементы связи; 7 – измерительный блок СВЧ, состоящий из генератора 7а, анализатора сигналов 7б, частотомера 7в, вольтметра 7г, термопары 7д; 8 – термостат; 9 – центрирующий элемент в виде двух (а, б) одинаковых прямоугольных пластин; 10 – нагревательный элемент термостата в виде термостола; 11 – съемная крышка, состоящая из двух слоев (а, б) прозрачного гибкого материала; 12 – разрезы в каждом слое съемной крышки; 13 – рамка для крепления двух слоев прозрачного гибкого материала съемной крышки

Отличие рассматриваемого устройства [11] (см. рис. 1 и 2) от известных ранее состоит в следующем.

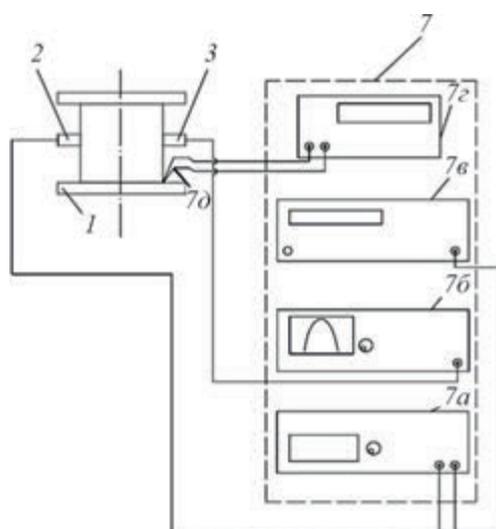


Рис. 2. Электрическая схема устройства
(нумерация позиций соответствует нумерации на рис.1)

1. Измерительная камера дополнительно содержит центрирующий элемент, выполненный в виде двух одинаковых прямоугольных пластин оптимального размера из материала с малыми диэлектрическими потерями и малой относительной диэлектрической проницаемостью. Пластины расположены под углом $90 \dots 100$ град друг к другу и закреплены на лицевой стороне диэлектрической пластины симметрично относительно центральной вертикальной оси измерительной камеры, на расстоянии от неё (вертикальной оси), равном радиусу ДР.

2. Нагревательный элемент термостата выполнен в виде термостола с размерами рабочей поверхности, обеспечивающими расположение измерительной камеры по центру термостола и партии ДР, подлежащих измерению.

3. Верхняя стенка термостата является съемной крышкой, представляющей собой два слоя прозрачного гибкого плёночного материала с размерами, соизмеримыми с внешними размерами сечения продольно-горизонтальной плоскости термостата.

4. Каждый упомянутый слой имеет разрезы, один из которых, первый, выполнен сплошным посередине слоя параллельно горизонтальной плоскости термостола, соосно относительно центральной вертикальной оси измерительной камеры и имеет длину, соизмеримую с размером внутреннего сечения продольно-горизонтальной плоскости термостата, другие – перпендикулярно первому и равномерно пересекают последний разрез по всей его длине.

5. Упомянутые слои расположены между собой параллельно, на некотором расстоянии друг от друга и закреплены посредством рамки, имеющей внешние и внутренние размеры, соизмеримые с внешними и внутренними размерами сечения продольно-горизонтальной плоскости термостата соответственно.

6. Расположение съемной крышки и термостола в термостате выполнено с учетом обеспечения подачи через упомянутые разрезы (в слоях съемной крышки) ДР с термостола в измерительную камеру.

7. Термостат расположен с наклоном под углом $5 \dots 10$ град относительно горизонтальной оси измерительной камеры в направлении ДР и центрирующих элементов.

Наличие в измерительной камере дополнительного центрирующего элемента обеспечивает значительное повышение точности позиционирования и центровки ДР в измерительной камере

и, как следствие, даёт возможность измерения в едином цикле партии ДР при сохранении точности измерения.

Отличия 2...7 обеспечивают одновременное оптимальное расположение на термостоле измерительной камеры и подлежащих измерению отдельных ДР из партии, идентичность положения в измерительной камере одного и того же ДР в режиме поставил-снял-поставил, возможность поочередного измерения резонансной частоты партии отдельных резонаторов при комнатной температуре и при температуре статирования в едином рабочем цикле без нарушения теплоизоляции термостата. В результате создаются необходимые условия для значительного повышения производительности измерения ТКЧ при сохранении точности.

4. РАБОТА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТКЧ ДР

В термостат 8, на рабочую поверхность термостола 10 размерами 80×80 мм, устанавливают измерительную камеру 1 с вводом 2 и выводом 3 сигнала СВЧ и подлежащую измерению партию отдельных ДР 5 в количестве 10 штук.

Затем в измерительную камеру 1, в центр диэлектрической пластины 4, поочередно помещают подлежащие измерению диэлектрические резонаторы 5 из партии, расположенной на термостоле 10.

Поэтапно осуществляют процесс измерения резонансной частоты всех ДР 5 в двух температурных режимах, едином рабочем цикле и в одной измерительной камере: на первом этапе – при комнатной температуре, на втором этапе – при температуре статирования 60...70 °С. При этом подача очередного ДР 5 выполняется посредством пинцета через разрезы 12 в прозрачных гибких слоях 11 съёмной крышки.

При измерении резонансной частоты каждого из упомянутых ДР на ввод 2 измерительной камеры 1 подают сигнал СВЧ от генератора измерительного блока СВЧ 7а с частотой, соответствующей частоте ДР. С выхода 3 измерительной камеры 1 сигнал СВЧ поступает на анализатор сигналов 7б, одновременно с генератора СВЧ 7а сигнал СВЧ поступает на частотомер 7в. Далее, синхронно изменяя частоту генератора СВЧ 7а и анализатора сигналов 7б, добиваются совпадения их частот с частотой ДР, и на экране формируется последнее изображение резонансной кривой ДР 5, максимум которой (кривой) соответствует его резонансной частоте F_1 при комнатной температуре T_1 и частоте F_2 при температуре статирования T_2 .

Затем осуществляют расчет ТКЧ по формуле:

$$\text{ТКЧ} = F_2 - F_1 / F_1 (T_2 - T_1).$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы создано устройство для измерения температурного коэффициента ДР, обладающее производительностью, примерно в 6,5 раз большей по сравнению с аналогичными, для партии в количестве 10 штук при сохранении точности измерения.

Производительность устройства увеличивается по мере увеличения партии измеряемых ДР.

Результаты работы являются актуальными для перспективы производства СВЧ-изделий на ДР. Разработанное устройство обладает мировой новизной и подлежит патентованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Окадзаки, К.** Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки; перевод с японского М. М. Богачихина, Л. Р. Зайонца. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
2. **Белоус, А. Г.** Диэлектрические материалы для резонаторов сантиметровых волн с экстремально высокой добротностью / А. Г. Белоус, О. В. Овчар, Д. О. Мишук, Ю. Д. Ступин, С. Н. Гуменный // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – Вып. 2. – С. 34 – 40.
3. **Chun, T. L.** Cation ordering and dielectric characteristics in barium zinc niobate / T. L. Chun, L. Yi-Chang, H. Chi-Yuen // Journal of the American ceramic society. – 2007. – Vol. 90. – P. 483 – 489.
4. **Кулешов, В. Н.** Методика проектирования малошумящих ГУН СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах / В. Н. Кулешов, А. Б. Кувшинников, Е. Д. Болдырева // Электросвязь. – 2011. – Вып. 5. – С. 47 – 50.
5. **Белов, Л.** Генераторы с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты / Л. Белов, В. Хилькевич // Электроника НТБ. – 2006. – Вып. 7. – С. 54 – 59.
6. **Ильченко, М. Е.** Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, Л. Г. Взятыхшев, Л. Г. Гасланов. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
7. **Коломин, В. М.** Диэлектрические резонаторы для изделий электронной техники СВЧ-диапазона: учеб. для вузов / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, В. А. Иовдальский, И. А. Соколов. – М.: КУРС, 2021. – 150 с.
8. Resomics: каталог Murata Manufacturing Co., 1992.
9. A designer's guide to microwave dielectric ceramics: каталог Trans-Tech, 1988.
10. Высокочастотные керамические материалы и микроволновые элементы: каталог ООО «Керамика», 2000.
11. **Заявка 2021121494.** Устройство для измерения температурного коэффициента частоты диэлектрического резонатора / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, Г. В. Фомина. – Приоритет 19.07.2021.

Статья поступила 13 декабря 2021 г.

═══════ **НОВЫЕ КНИГИ** ═══════

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

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

Для радиоспециалистов, связанных с созданием радиоэлектронной аппаратуры.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВЫШАЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК К АПОПТОТИЧЕСКИМ СТИМУЛАМ

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

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

Представлены экспериментальные результаты исследования действия КВЧ-излучения на процесс уничтожения онкологических клеток HL-60 актиномицином *D*. Использование флуоресцентного зонда в исследованиях позволило предложить механизм наблюдаемого эффекта, связанный с окислением липидов в мембранах клеток.

КС: микроволновое излучение, КВЧ, окислительный стресс, онкологические клетки, апоптоз, флуоресцентный зонд BODIPY, актиномицин D, липосомы

MICROWAVE RADIATION INCREASES THE SENSITIVITY OF ONCOLOGICAL CELLS TO APOPTOTIC STIMULI

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

FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS

The experimental results of studying the effect of EHF-radiation on the process of destructing HL-60 oncological cells by actinomycin *D* are presented. The use of a fluorescent probe in the studies made it possible to propose a mechanism of the observed effect associated with oxidation of lipids in cell membranes.

Keywords: microwave radiation, EHF, oxidative stress, oncological cells, apoptosis, fluorescent probe BODIPY, actinomycin D, liposomes

1. ВВЕДЕНИЕ

В следующем году исполняется 50 лет, как была опубликована академиком Н. Д. Девятковым статья в журнале «Успехи физических наук», в которой было объявлено новое направление исследований – изучение биологического действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн (КВЧ-излучение) [1]. Первые исследования были выполнены коллективом сотрудников НПО «Исток» совместно с учеными предприятий медико-биологического профиля. Сформированный таким образом коллектив исследователей в дальнейшем расширился за счет привлечения все новых и новых специалистов. Организовывались ежегодные конференции и выпускались сборники докладов, которые непрерывно пополняли базу данных нового направления исследований. Было издано несколько монографий и защищено несколько десятков диссертаций как физического, химического, биологического, так и медицинского профилей. Параллельно за рубежом стали появляться публикации по данной тематике. Такая масштабная работа позволила сформулировать основные закономерности обнаруженного биологического действия КВЧ-излу-

чения, предложить ряд идей для изучения механизмов наблюдаемых эффектов и приступить к использованию КВЧ-излучения в лечебной практике [2, 3].

Продолжение исследований в данном направлении вызвано необходимостью расширения сферы применения КВЧ-излучения в различных областях медицины, а также учета электромагнитного воздействия как экологического фактора [4]. По поводу последнего следует отметить, что микроволновое излучение КВЧ-диапазона до сих пор незначительно использовалось в бытовых приборах и технике. Теперь же ситуация начинает кардинально меняться. Это вызвано тем, что, из-за огромного роста мобильного трафика во всем мире, руководители многих стран и частных компаний привлекают значительные ресурсы для развития систем связи пятого поколения (5G), в которых, наряду с СВЧ, предполагается использование и КВЧ. Однако и этот стандарт уже рассматривается как промежуточный на пути к системам связи шестого поколения (6G), в которых будут задействованы частоты коротковолновой части миллиметрового диапазона, или субтерагерцового диапазона [5]. Возникшая ситуация ставит вопрос о дополнительных мерах по защите здоровья населения, и особенно специалистов, занятых в производстве и внедрении этой техники. Кроме того, несмотря на то, что исследования эффектов биологического действия микроволнового излучения ведутся уже достаточно давно, механизмы этого явления продолжают оставаться до сих пор предметом предположений и гипотез.

Исследования влияния микроволнового излучения на пролиферацию и смерть клеток начались с работ S. J. Webb и D. D. Dodds на *Escherichia coli* (вид грамотрицательных палочковых бактерий, распространенных в нижней части кишечника теплокровных животных) и были подхвачены научными группами, которые изучали не только бактерии, но и культуры дрожжей и клеток млекопитающих. К сожалению, независимо от изучаемого объекта, результаты исследований отличались противоречивостью [6]. Сообщалось как об отсутствии эффекта, так и о стимуляции пролиферации и цитотоксическом действии микроволнового излучения, включая даже существование резонансных частот, вызывающих эффект [7]. Учитывая наш опыт экспериментальной работы [8], а также известные литературные данные [9], КВЧ низкой интенсивности способно оказывать заметное действие на клетки только в сочетании с другими физико-химическими факторами. Поэтому в данном исследовании мы использовали комбинированное действие КВЧ-излучения и известного апоптотического стимула клеток – актиномицина *D*.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хотя микроволновое излучение не вызывает непосредственной гибели клеток, оно может влиять на разнообразные внутриклеточные системы. В частности, было продемонстрировано увеличение продукции цитокинов кератиноцитами и клетками иммунной системы под действием микроволнового излучения [10, 11]. Микроволновое излучение стимулировало продукцию активных форм кислорода праймированными нейтрофилами, причём эффект был опосредован активностью белковых киназ [12]. Микроволновое излучение вызывало обратимую экстернализацию фосфатидилсерина на поверхности разных типов клеток – явление, часто сопровождающее различные виды функциональной активации [13, 14].

Помимо активации специфических функций в клетках под действием КВЧ-излучения, некоторыми исследователями также был отмечен общий адаптивный ответ на стрессовое воздействие, который выражался в увеличении экспрессии белков теплового шока (HSP). Было показано увеличение HSP (70 и/или 27) в фибробластах, эндотелиальных и нейрональных клетках [15–18].

Некоторые исследователи полагают, что этот эффект носит сугубо температурный характер, т. е. увеличение HSP наблюдается даже при подъёме температуры всего на 0,2 °С. Однако, на наш взгляд, этот результат не умаляет биологического значения явления, а лишь подчёркивает эффективность действия микроволнового излучения.

Было предпринято несколько попыток по исследованию индукции апоптоза микроволновым излучением. Однако в самых разных типах клеток (нейроны, кератиноциты, клетки крови) не было обнаружено появления характерных маркёров запрограммированной смерти [19, 20].

Таким образом, обзор данных указывает на то, что микроволновое излучение не индуцирует апоптоз и не имеет прямого цитотоксического действия, если только не обнаруживается влияние какого-либо другого физико-химического фактора. Это воздействие может носить стрессовый характер и проявляться при низких интенсивностях. Мы предположили, что если клетки находятся под воздействием стрессовых факторов, дополнительных к микроволновому излучению, то последнее может дать аддитивный (или синергичный) вклад. Исследований влияния микроволнового излучения на клетки человека, находящиеся в стрессовых состояниях, проводилось недостаточно.

Нам удалось показать, что микроволновое излучение влияет на чувствительность клеток к индукторам апоптоза. В качестве источника микроволнового излучения в наших экспериментах использовался генератор на основе диода Ганна с частотой в диапазоне 32,9...39,6 ГГц (длина волны соответственно 9,1...7,6 мм) и мощностью излучения от 3 до 30 мВт. Установка микроволнового облучения обеспечивала подведение излучения к исследуемому объекту с помощью волновода сечением 7,2×3,4 мм² с согласующими элементами. Осуществлялся контроль режима бегущей волны, мощности микроволнового излучения и длины волны излучения. Образцы подвергались микроволновому воздействию над рупорной антенной, расположенной вертикально, и находясь над ней на расстоянии 6 см от плоскости раскрытия рупора, т. е. в ближней зоне облучателя. Образцы перемешивали осторожным встряхиванием каждые 5 мин. Температуру в образцах измеряли с использованием волоконно-оптического микротермодетектора МТ-4МО (Россия) с точностью 0,1 °С. Расчет удельной поглощенной мощности для аналогичной схемы эксперимента приведен в работе [22].

В настоящей работе использовали широкоизвестную линию раковых клеток HL-60 (человеческие промиелоцитарные лейкозные клетки). Онкологические клетки в концентрации $1 \cdot 10^6$ /мл обрабатывали актиномицином *D* (цитостатический препарат из группы противоопухолевых антибиотиков) в концентрации 0,5 мкг/мл в течение 8 ч при температуре 37 °С в условиях микроволнового облучения. Контрольные эксперименты проводили в тех же условиях, но при выключенном генераторе КВЧ-излучения. Оказалось, что микроволновое излучение само по себе практически не влияет на выживаемость нативных клеток, однако смертность клеток, обработанных актиномицином *D*, в условиях КВЧ-облучения увеличивалась в полтора раза (рис. 1).

Для объяснения механизма наблюдаемого эффекта микроволнового воздействия на раковые клетки, которые обрабатывались индуктором апоптоза – актиномицином *D*, мы использовали наши результаты по изучению влияния этого излучения на пероксидазную активность мембранного митохондриального комплекса кардиолипидов – цитохром *c*.

Нам не удалось обнаружить в литературе данных по исследованию влияния излучения КВЧ на пероксидазную активность белков. Между тем такие исследования представляют значительный интерес, так как пероксидазы играют огромную роль в функционировании многих систем организма. Например, миелопероксидаза является одним из ключевых ферментов воспаления,

семейство циклооксигеназ участвует в синтезе простагландинов и развитии окислительного стресса в клетках. Гемовые белки, традиционно не относящиеся к пероксидазам, также могут проявлять пероксидазную активность в определённых условиях. В частности, цитохром *c* превращается в пероксидазу при образовании комплекса с кардиолипином (КЦ-комплекс) и выполняет ключевую функцию в митохондриальной стадии апоптоза. На наш взгляд, может существовать целый ряд механизмов взаимодействия цитохрома *c* с микроволновым излучением, включая тепловой эффект, усиление конвекции в примембранных слоях, конформационные перестройки белка. Последнее обстоятельство представляется наиболее важным, т. к. при взаимодействии с мембраной белок частично разворачивается и переходит в новое, конформационное состояние расплавленной глобулы [23]. Этот переход важен как для образования комплекса, так и для приобретения пероксидазной активности. Недавно было показано, что микроволновое излучение стимулирует значительно более эффективное разворачивание белков, чем простой нагрев [13].

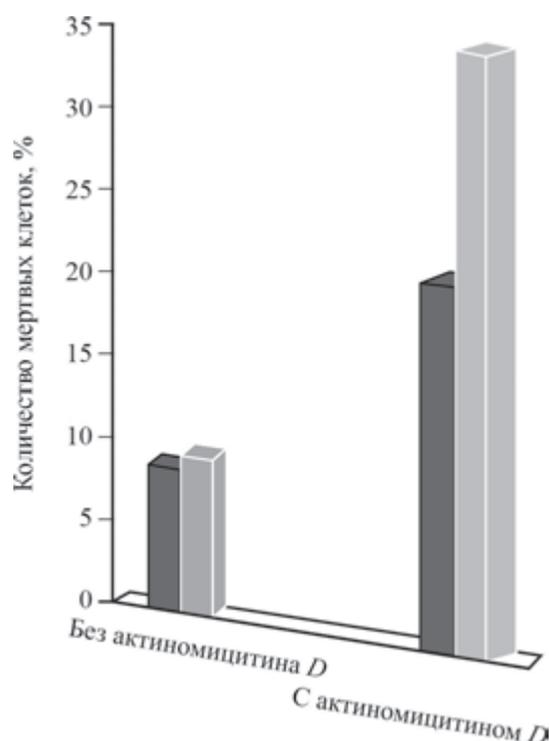


Рис. 1. Гибель клеток HL-60, индуцированная актиномицином *D*, и эффект КВЧ-облучения (светлый тон). Темный тон – контроль

Механизмы запуска апоптоза, вызванного стрессом, чрезвычайно разнообразны, однако все эти механизмы сходятся на уровне митохондрии и индуцируют выход цитохрома *c* из митохондрий в цитозоль (митохондриально-зависимый апоптоз). Эта необратимая стадия развития апоптоза приводит к запуску каскада протеолитических ферментов и деградации клетки. Считается, что выходу цитохрома *c* в цитозоль предшествует перераспределение кардиолипина (дифосфатидилглицерола) в мембранах митохондрии и образование КЦ-комплексов.

В данном эксперименте мы использовали флуоресцентный зонд, основу которого составляет трициклическая кольцевая система бордипиррометен (BODIPY). Этот зонд применяется в качестве люминесцентного материала в биохимических исследованиях и может быть использован для исследования пространственного распределения и динамики липидных мембранных

систем и изучения их метаболизма, а также специфических взаимодействий с белками на поверхности клетки [24]. Во флуоресцентной липофильной пробе BODIPY-C11 окислению подвергаются конъюгированные ненасыщенные двойные связи, аналогичные окисляемым группам в фосфолипидах. При этом исходная молекула, флуоресцирующая в оранжево-красной области, превращается в продукт со спектром эмиссии в зелёной области. Эти свойства позволяют применять данную пробу для оценки окисления липидов в модельных системах и клетках.

Малые однослойные липосомы из яичного фосфатидилхолина были получены путем этанольной инъекции в фосфатный буфер и дальнейшей обработки ультразвуком [25]. BODIPY-C11^{581/591} концентрацию исходного раствора определяли путем измерения поглощения при 581 нм на Hitachi U-2000 с использованием спектрофотометра (коэффициент молярной экстинкции – 139444 л·моль⁻¹·см⁻¹). Липосомы в фосфатном буфере (NaCl – 137 мМ, KCl – 2,7 мМ, MgCl₂ – 0,5 мМ, CaCl₂ – 0,9 мМ, KH₂PO₄ – 1,5 мМ, Na₂HPO₄ – 8,1 мМ, pH – 7,4) инкубировали в течение 30 мин при 37 °С с BODIPY-C11^{581/591} (1 мкМ). Измерения флуоресценции проводили при комнатной температуре на спектрофлуориметре «Hitachi High-Technologies F-2500» (Япония).

Нам удалось подобрать условия, при которых система цитохром *c* / H₂O₂ не вызывает окисления BODIPY-C11 в мембранах, содержащих только фосфатидилхолин, в то время как в присутствии кардиолипидсодержащих липосом проба окисляется полностью в течение нескольких минут. Микроволновое излучение не вызывало окисления BODIPY-C11 в присутствии фосфатидилхолина, однако стимулировало достоверное 20%-е усиление скорости окисления в системе, содержащей кардиолипид (рис. 2).

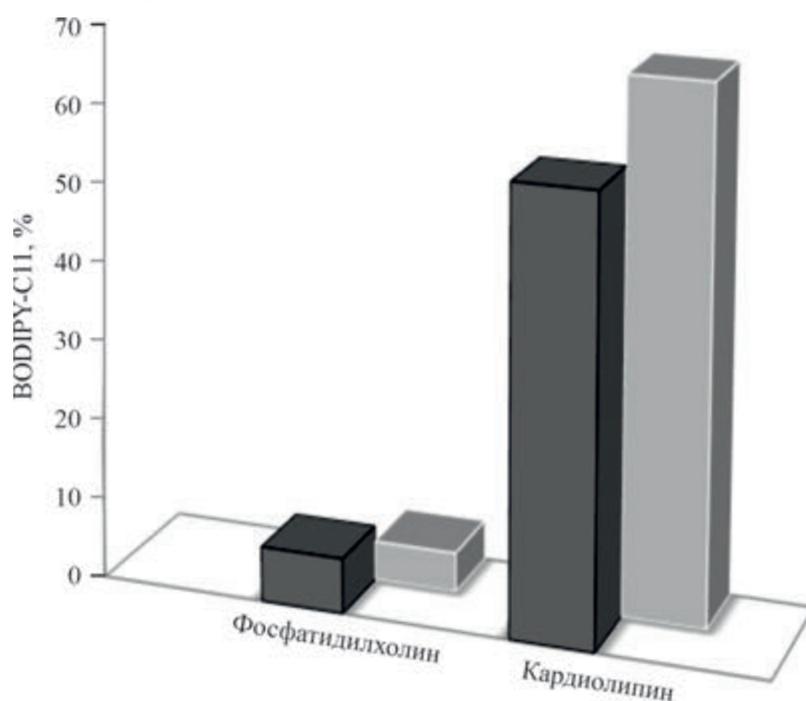


Рис. 2. Цитохром *c* зависимое окисление пробы BODIPY-C11 и эффект СВЧ-облучения (светлый тон). Темный тон – контроль

КЦ-комплекс представляет интерес с точки зрения взаимодействия с микроволновым излучением. Во-первых, он находится на границе раздела фаз липид-вода и катализирует окислительно-восстановительные реакции в обеих фазах. Следовательно, простое усиление конвекции за счёт

поглощения микроволнового излучения водой может повлиять на кинетику ферментативной реакции. Во-вторых, белок в КЦ-комплексе находится в состоянии расплавленной глобулы и, следовательно, может иметь максимумы поглощения в очень широком диапазоне частот. Поглощение микроволнового излучения глобулой может влиять на её конформационное состояние и, следовательно, на каталитическую активность гема.

Таким образом, мы показали, что микроволновое излучение не влияет (или сравнительно мало влияет) на окислительные процессы, индуцируемые глобулярной формой цитохрома *c*. В то время как оксидазная активность КЦ-комплексов значительно повышала активность свободного цитохрома *c* и в ещё большей степени усиливалась под действием микроволнового излучения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе экспериментальные результаты показывают, что микроволновое излучение низкой интенсивности способствует устранению поврежденных клеток из организма, ускоряя их гибель по пути апоптоза, т. е. оказывая проапоптотическое действие на онкологические клетки. Стимулированная микроволнами активация КЦ-комплекса может лежать в основе механизма повышения смертности клеток под действием этого излучения. Активация КЦ-комплекса микроволновым излучением в клетках может повысить чувствительность клеток к апоптотическим (в том числе противораковым) агентам и позволит моделировать ответ клеток на различные воздействия.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков, Н. Д.** Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на биологические объекты / Н. Д. Девятков // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110, № 3. – С. 453 – 454.
2. **Rojavin, M. A.** Medical application of millimetre waves / M. A. Rojavin, M. C. Ziskin // QJM. – 1998. – 91(1). – P. 57 – 66.
3. **Терроне, М.** Extremely high-frequency therapy in oncology / M. Terrone, R. Avakyan // J. Altern Complement Med. – 2010 Nov. – 16(11). – P. 1211 – 1216.
4. **Kottou, S.** How safe is the environmental electromagnetic radiation? / S. Kottou, D. Nikolopoulos, E. Vogiannis, D. Koulougliotis, E. Petraki // Journal of Physical and Biophysics. – 2014. – Vol. 4. – P. 146.
5. **Степунин, А. Н.** Мобильная связь на пути к 6G. В 2-х томах / А. Н. Степунин, А. Д. Николаев. – Инфра-Инженерия, 2020.
6. **Meltz, M. L.** Radiofrequency exposure and mammalian cell toxicity, genotoxicity, and transformation / M. L. Meltz // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 6. – P. 196 – 213.
7. **Manna, D.** Effect of radiofrequency radiation in cultured mammalian cells: A review / D. Manna, R. Ghosh // Electromagn. Biol. Med. – 2016. – Vol. 35. – P. 265 – 301.
8. **Казаринов, К. Д.** Особенности реакции клеток крови на микроволновое излучение / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 3 (550). – С. 42 – 48.
9. **Аловская, А. А.** Биологический эффект ЭМИ КВЧ определяется функциональным статусом клеток / А. А. Аловская, А. Б. Гапеев, А. Г. Габдулхакова и др. // Вестник новых медицинских технологий. – 1998. – Т. 4, № 2. – С. 11 – 15.
10. **Makar, V. R.** Effect of cyclophosphamide and 61.22 GHz millimeter waves on T-cell, B-cell and macrophage functions / V. R. Makar, M. K. Logani, A. Bhanushali, S. I. Alekseev, M. C. Ziskin // Bioelectromagnetics. – 2006. – Vol. 27. – P. 458 – 466.

11. **Szabo, I.** Reactions of keratinocytes to in vitro millimeter wave exposure / I. Szabo, M. A. Rojavin, T. J. Rogers, M. C. Ziskin // *Bioelectromagnetics*. – 2001. – Vol. 22. – P. 358 – 364.
12. **Safronova, V. G.** Immunomodulating action of low intensity millimeter waves on primed neutrophils / V. G. Safronova, A. G. Gabdoulkhakova, B. F. Santalov // *Bioelectromagnetics*. – 2002. – Vol. 23. – P. 599 – 606.
13. **George, D. F.** Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding / D. F. George, M. M. Bilek, D. R. McKenzie // *Bioelectromagnetics*. – 2008, May. – Vol. 29(4). – P. 324 – 330.
14. **Le Quément, C.** Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression / Le Quément C., Nicolaz C. N., Habauzit D., Zhadobov M., Sauleau R., Le Dréan Y. // *Bioelectromagnetics*. – 2014. – Vol. 35, Issue 6. – P. 444 – 451.
15. **Kwee, S.** Changes in cellular proteins due to environmental non-ionizing radiation. I. Heat-shock proteins / S. Kwee, P. Raskmark and S. Velizarov // *Electro- and Magnetobiology*. – 2001. – Vol. 20. – P. 141 – 152.
16. **Leszczynski, D.** Non-thermal activation of the hsp27 / p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: molecular mechanism for cancer and blood-brain barrier-related effects / D. Leszczynski, S. Joenvaara, J. Reivinen and R. Kuokka // *Differentiation*. – 2002. – Vol. 70. – P. 120 – 129.
17. **Tian, F.** / Tian F., Nakahara T., Wake K., Taki M., Miyakoshi J. // *Int. J. Radiat. Biol.* – 2002. – Vol. 78. – P. 433 – 440.
18. **Takahashi, S.** Lack of mutation induction with exposure to 1.5 GHz electromagnetic near fields used for cellular phones in brains of Big Blue Mice / S. Takahashi, S. Inaguma, Y.-M. Cho, K. Imaida, J. Wang, Q. Fujiwara, S. Tomoyuki. – 2002. – *Cancer Res.* 62. – P. 1956 – 1960.
19. **Merola, P.** Proliferation and apoptosis in a neuroblastoma cell line exposed to 900 MHz modulated radiofrequency field / P. Merola, C. Marino, G. A. Lovisolò, R. Pinto, C. Laconi, A. Negroni // *Bioelectromagnetics*. – 2006. – Vol. 27. – P. 164 – 171.
20. **Szabo, I.** Millimeter wave induced reversible externalization of phosphatidylserine molecules in cells exposed in vitro / I. Szabo, J. Kappelmayer, S. I. Alekseev, M. C. Ziskin // *Bioelectromagnetics*. – 2006. – Vol. 27. – P. 233 – 244.
21. **Sanchez, S.** Human skin cell stress response to GSM-900 mobile phone signals. In vitro study on isolated primary cells and reconstructed epidermis / S. Sanchez, A. Milochau, G. Ruffie, F. Poullietier de Gannes, I. Lagroye, E. Haro, J. E. Surleve-Bazeille, B. Billaudel, M. Lassegues, B. Veyret // *FEBS J.* – 2006. – Vol. 273 (24). – P. 5491 – 5507.
22. **Vlasova, I. I.** Extremely high-frequency electromagnetic radiation enhances neutrophil response to particulate agonists / I. I. Vlasova, E. V. Mikhalechik, A. A. Gusev, N. G. Bala-bushevich, S. A. Gusev and K. D. Kazarinov // *Bioelectromagnetics*. – February 2018. – Vol. 39, Is. 2. – P. 144 – 155.
23. **Kagan, V. E.** Oxidative lipidomics of apoptosis: redox catalytic interactions of cytochrome *c* with cardiolipin and phosphatidylserine / V. E. Kagan, G. G. Borisenko, Y. Y. Tyurina, T. A. Tyurin, J. Jiang, A. I. Potapovich, V. Kini, A. A. Amoscato and Y. Fuji // *Free Radical Biology & Medicine*. – 2004. – Vol. 37, No 12. – P. 1963 – 1985.
24. **Schwarzmann, G.** Labeled gangliosides: Their synthesis and use in biological studies / G. Schwarzmann // *FEBS Lett.* – 2018. – 592(23). – P. 3992 – 4006.
25. **Batzri, S.** / S. Batzri, E. D. Korn // *Biochim. Biophys. Acta.* – 1973. – Vol. 298. – P. 1015 – 1019.

Статья поступила 14 декабря 2021 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53

О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ

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

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

Рассмотрены четыре физические константы размерностью джоуль-метр: электрическая, тепловая, квантовая и гравитационная, связанные с постоянной тонкой структуры α . Показано, что гравитационная константа для электрона $G \cdot m^2 / r_0 = \alpha^{-20}$, где r_0 – классический радиус электрона, m – масса электрона, G – гравитационная постоянная.

КС: физические размерные и безразмерные константы, постоянная тонкой структуры, классический радиус электрона

ABOUT PHYSICAL CONSTANTS

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

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

Four physical constants with Joule-meter dimensions are considered: electrical, thermal, quantum and gravitational ones, which are related to the fine structure constant α . It is shown that the gravitational constant for electron is $G \cdot m^2 / r_0 = \alpha^{-20}$, where r_0 is the classical radius of the electron, m is the mass of the electron, G is the gravitational constant.

Keywords: physical dimensional and dimensionless constants, fine structure constant, classical radius of the electron

В математике, физике, электронике огромное значение имеют фундаментальные постоянные (константы, числа), которые можно разделить на несколько групп.

1. Числа, полученные в результате предельных переходов:

$$\pi = 4 \cdot \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{2 \cdot k + 1} = 3,14159265... \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} = 2,71828... \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

$$C = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln(n) \right] = 0,5772164... \text{ при } n \rightarrow \infty \text{ (постоянная Эйлера)}.$$

2. Числа, полученные в результате решения алгебраических уравнений:

$\varphi = 1,6180339... –$ корень квадратного уравнения $\varphi^2 - \varphi - 1 = 0$ («золотое сечение»),

$w = 4,96511423 –$ корень уравнения $5 \cdot e^{-z} = 5 - z$ (число Вина).

3. Физические размерные постоянные, значения которых определяются в результате измерений либо самих постоянных, либо вспомогательных величин, связанных с этими постоянными формулами [1–3]:

$$\begin{aligned} c &= 2,9979925 \dots \cdot 10^8 \text{ – скорость света, м/с;} \\ e &= 1,6021913 \dots \cdot 10^{-19} \text{ – заряд электрона, Кл;} \\ m &= 9,1095482 \dots \cdot 10^{-31} \text{ – масса электрона, кг;} \\ k &= 1,3806223 \dots \cdot 10^{-23} \text{ – постоянная Больцмана, Дж/К;} \\ h &= 6,6261894 \dots \cdot 10^{-34} \text{ – постоянная Планка, Дж·с; } \hbar = h / (2 \cdot \pi); \\ G &= 6,6732456 \dots \cdot 10^{-11} \text{ – гравитационная постоянная, м}^3\text{/(кг·с}^2\text{);} \\ \varepsilon_0 &= (1/9) \cdot 10^{-9} \text{ – диэлектрическая постоянная вакуума, Кл}^2\text{/(Дж·м).} \end{aligned}$$

4. Безразмерные постоянные, полученные из формул, например постоянная тонкой структуры $\alpha = 0,007297955 \dots$

В истории физики имеются примеры, когда ученые получали значения фундаментальных постоянных, но при этом не совсем понимали, какое значение они имеют для науки. Такова, например, история уже упомянутой постоянной α .

В 1909 году сравнительно молодой, но уже всемирно известный 30-летний швейцарский физик Альберт Эйнштейн опубликовал статью [4], в которой он разными способами вычислил две физические постоянные, имеющие одинаковые размерности. При этом в статье он сделал замечание: «По поводу выражения для h следует отметить, что $h = 6 \cdot 10^{-27}$ [эрг·с] и $e^2/c = 7 \cdot 10^{-30}$ [эрг·с]. Здесь не хватает целых трех порядков. Это, конечно, можно отнести на счет неизвестных безразмерных множителей».

Без сомнения, он рассчитал отношение приведенных выше величин $(e^2/c)(1/h)$ и получил значение, разнящееся на три порядка, но не придал этой величине должного значения, списав её на счет «неизвестных безразмерных множителей», и даже не включил величину этого отношения в свою статью. Это вызывает большое удивление, поскольку к безразмерным величинам у физиков всегда имелся интерес.

Немецкий физик Арнольд Зоммерфельд либо не прочитал статью А. Эйнштейна, либо не придал значения замечанию швейцарского физика. Так или иначе, в 1916 г. он, проводя теоретические исследования атома водорода, получил безразмерную постоянную $\alpha = 2\pi(e^2/c)(1/h)$, которую назвал постоянной тонкой структуры [5]. Нетрудно видеть, что в эту постоянную помимо множителя 2π входит именно отношение, на которое указал А. Эйнштейн [4]. Физики ни тогда, ни в последующие годы почему-то не обратили внимания, что, по существу, постоянная α была получена А. Эйнштейном на семь лет раньше А. Зоммерфельда. Приоритет за открытием одной из важнейших фундаментальных постоянных остался за А. Зоммерфельдом.

Мы же последуем методологии А. Эйнштейна. Из приведенного выше перечня физических размерных постоянных образуем четыре физические константы, имеющие одинаковую размерность, джоуль-метр:

$$\text{– электрическая константа } K_E = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} = 0,0231031526 \dots \cdot 10^{-26}, \text{ Дж·м;}$$

$$\text{– тепловая константа } K_T = k \cdot (\lambda \cdot T)_{\max} = 4,000883756 \dots \cdot 10^{-26}, \text{ Дж·м;}$$

$$\text{– квантовая константа } K_H = \hbar \cdot c = 3,161583926 \dots \cdot 10^{-26}, \text{ Дж·м;}$$

$$\text{– гравитационная константа } K_G = \gamma \cdot m^2 = 0,553767926 \dots \cdot 10^{-70}, \text{ Дж·м.}$$

Физическую величину размерностью джоуль-метр дают, во-первых, момент силы $F \times R$ (Н·м), умноженный на расстояние R (м), во-вторых, момент импульса $mV \times R$ (кг·м²/с), умноженный на скорость V (м/с). Это связано с тем, что в трехмерном пространстве два вектора, R и V , дают только три комбинации неповторяющихся векторных произведений: $X = R \times V$, $Y = X \times R = R \times V \times R$ и $Z = X - V = R \times V \times V$. Все остальные комбинации векторных произведений с точностью до знака повторяют эти вектора.

У трех первых физических констант порядок величин различается не на много, в то время как у гравитационной константы он отличается существенно, поскольку сила тяготения начинает играть определяющую роль только при взаимодействии массивных тел.

Из четырех упомянутых физических констант можно образовать сколь угодно большое число других констант размерности джоуль-метр, например:

$$K_{H2E} = \frac{K_H^2}{K_E} = 4,327150316... \cdot 10^{-24}, \text{ Дж} \cdot \text{м};$$

$$K_{H3E2} = \frac{K_H^3}{K_E^2} = 5,92493237... \cdot 10^{-22}, \text{ Дж} \cdot \text{м};$$

$$K_{E2T} = \frac{K_E^2}{K_T}; \quad K_{E3H2} = \frac{K_E^3}{K_H^2}; \quad K_{H4TE2} = \frac{K_H^4}{K_E^2 \cdot K_T} \text{ и т. д.},$$

а также безразмерных констант:

$$\alpha = \frac{K_E}{K_H} = 0,007297955...; \quad \beta = \frac{K_E}{K_T} = 0,0057652...; \quad \eta = \frac{K_T}{\sqrt{K_E \cdot K_H}} = 14,80111...;$$

$$\mu = \frac{K_E^2}{K_H \cdot K_T}; \quad \chi = \frac{K_H^3}{K_E \cdot K_T^2} \text{ и т. д.}$$

Одна из безразмерных констант – постоянная тонкой структуры α хорошо известна в физике микромира.

Размерность джоуль-метр позволяет каждую константу представить в виде произведения энергии на характерную длину. Выбрав в качестве энергии энергии покоя электрона $m \cdot c^2$, получим равенства: $m \cdot c^2 \cdot r_0 = K_E$, $m \cdot c^2 \cdot \lambda_K = K_H$, $m \cdot c^2 \cdot S = K_G$, где r_0 – классический радиус электрона, λ_K – комптоновская длина волны электрона, S – гравитационная постоянная электрона.

Поскольку $\alpha = K_E/K_H$, то из первых двух равенств получаем $\lambda_K = r_0 \cdot \alpha^{-1}$.

Полагая $m \cdot c^2 \cdot a_0 = K_H^2 / K_E$, приходим к формуле $a_0 = r_0 \cdot \alpha^{-2}$, где a_0 – радиус первой орбиты атома водорода.

По аналогии, полагая $m \cdot c^2 \cdot b = K_H^3 / K_E^2$, находим выражение $b = r_0 \cdot \alpha^{-3}$. Здесь $b = 1 / (4 \cdot \pi \cdot R_\infty)$, где R_∞ – постоянная Ридберга для бесконечной массы.

Видно, что полученные соотношения физики микромира кратны постоянной тонкой структуры α : $r_0 = r_0 \cdot \alpha^0$, $\lambda_K = r_0 \cdot \alpha^{-1}$, $a_0 = r_0 \cdot \alpha^{-2}$, $b = r_0 \cdot \alpha^{-3}$. Упоминание же о бесконечной массе в постоянной Ридберга вызвало интерес рассмотреть связь α с гравитационной постоянной электрона $S = G \cdot m / c^2 = 6,7637795... \cdot 10^{-58}$ (м). Полагая $S = r_0 \cdot \alpha^n$, логарифмируя это равенство, получаем:

$$n = \ln(S/r_0) / \ln(\alpha) = \ln(2,396937 \cdot 10^{-43}) / \ln(7,3 \cdot 10^{-3}) = 98,1187 / 4,92 = 19,943 \approx 20.$$

Полученное выражение $S = r_0 \cdot \alpha^{20}$ для гравитационной константы располагается в одном ряду с целочисленными степенями α для электрических и квантовых констант.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карякин, Н. И.** Краткий справочник по физике / Н. И. Карякин. – М.: Высшая школа, 1964.
2. **Тейлор, М.** Фундаментальные постоянные и квантовая электродинамика / М. Тейлор. – М.: Мир, 1972.
3. **Фритцш, Х.** Фундаментальные физические постоянные / Х. Фритцш // УФН. – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 384–392.
4. **Эйнштейн, А.** К современному состоянию проблем излучения. Собрание научных трудов. Т. III. / А. Эйнштейн. – М.: Наука, 1966. – С. 164–179.
5. **Зоммерфельд, А.** Пути познания в физике / А. Зоммерфельд. – М.: Наука, 1973.

Статья поступила 31 января 2022 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ОТТО М. Современные методы аналитической химии. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 656 с.

Аналитическая химия, будучи наукой междисциплинарной, включает в себя множество разнообразных методов, использующих различные химические, физические, а в последнее время – и биологические явления.

В пятом издании известного учебника подробно рассмотрены методы математической обработки результатов химического анализа и наиболее актуальные проблемы аналитической химии – автоматизация анализа, анализ материалов, биологических объектов и объектов окружающей среды.

Автор учебника сумел изложить разнообразные методы анализа – от классических до самых современных – с единых позиций, основанных на представлении об аналитическом процессе как процедуре извлечения информации о веществе. Книга, безусловно, будет полезна студентам университетов, изучающим химию, и специалистам-химикам.

ИСТОРИЯ

УДК 9

«ИСТОК» – КУЗНИЦА ВЫДАЮЩИХСЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УЧЕНЫХ

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

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

«ISTOK» – A FORGE OF OUTSTANDING DOMESTIC SCIENTISTS

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

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

Ученые «Истока» не только выдающиеся специалисты в области электроники СВЧ, но и уникальные исследователи в других, зачастую далеких от электроники областях человеческой деятельности. Очередную статью о знаменитых ученых «Истока» мы посвящаем им.

АНАТОЛИЙ ГАВРИЛОВИЧ МИХАЛЬЧЕНКОВ

В декабре 2021 года, не дожив до своего 80-летия, ушел из жизни Анатолий Гаврилович Михальченков. Его плодотворная научно-производственная и общественная деятельность связана с нашим городом и его промышленными предприятиями. Он пережил целый ряд крутых поворотов судьбы, но всегда оставался верен дорогому для его сердца «Истоку» и наукограду Фрязино.

А. Г. Михальченков родился 20 сентября 1942 г. в небольшой деревне Смоленской области в семье председателя колхоза. Отец и два старших брата сражались на фронтах Великой Отечественной войны, и, к счастью для семьи, все трое вернулись домой ранеными, но живыми. В деревне, дважды разрушаемой в годы войны, практически не осталось жилых домов, так что он с мамой больше года, пока не построили первый дом, жили в землянке. Начальное образование Анатолий получил в деревне, а за средним пришлось ежедневно по 8 км туда и обратно ходить в районный центр. Основным занятием для юноши было чтение. С жадностью он перечитал все книги сельской библиотеки, а стихи и поэмы учил по дальней дороге в школу. В юности он мечтал поступить в военное училище, но из-за нескрываемой худобы, появившейся еще в военные годы, не прошел врачебную комиссию.



А. Н. Михальченков

Хорошая школьная подготовка позволила Анатолию без особого труда поступить в Смоленский государственный университет на физико-математический факультет. Учился хорошо, с особым старанием постигал азы новой в те годы области науки и техники – полупроводниковой, в перспективе была учеба в аспирантуре. На последнем курсе он принял первое для себя крутое решение – поехал в Москву и с потерей полутора курсов поступил в Московский институт стали и сплавов (МИСиС) на факультет полупроводниковых материалов и приборов. С 5 курса начал работать на кафедре в МИСиС – влекла инженерная деятельность. В 1966 году окончил институт и был распределен в аспирантуру на кафедру известного ученого С. С. Горелика. Однажды на кафедру приехал молодой ученый из НИИЭТ (впоследствии «Исток») Н. Д. Урсуляк. Он уговорил Анатолия переехать во Фрязино и работать в отделе 190. Это стало вторым крутым поворотом в жизни А. Г. Михальченкова.

В технике СВЧ начиналась новая эра – твердотельная. Она коснулась не только активных приборов (полупроводниковых диодов и транзисторов), но и невзаимных элементов (вентилей и циркуляторов). Интенсивно развивалась планарная технология, как на диэлектрических, так и на ферромагнитных материалах – ферритах. А. Г. Михальченков подготовил и в 1976 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Многокомпонентные монокристаллические феррогранаты для СВЧ-устройств». Много лет Анатолий Гаврилович работал в тесном контакте с С. А. Перегоновым, поэтому после выделения в отдельное подразделение отдела 270 ему предложили возглавить лабораторию в этом отделе. Генеральный директор С. И. Ребров поставил перед новой лабораторией сложную задачу – организовать выпуск широкого ассортимента гибридных интегральных схем (ГИС). Через год эта задача была решена. Несомненные успехи молодого ученого и организатора были замечены в партийном руководстве предприятия, что неминуемо привело к следующему повороту его судьбы.

Следуя практике того времени привлечения к партийной работе молодых ученых, А. Г. Михальченкова сначала избирают освобожденным заместителем секретаря парткома, а вскоре и секретарем парткома «Истока». Он стал самым молодым секретарем первичной организации в Московской области. На предприятии работало 2500 коммунистов, партком имел права райкома, а должность секретаря была номенклатурной и утверждалась в оборонных отделах МОК КПСС и ЦК КПСС. К тому времени предприятие развернулось в сторону создания комплексированных устройств и было уже готово к разработке сложных радиолокационных систем, что неоднократно было предметом обсуждения на партийных конференциях и заседаниях парткома. Помимо научно-технических задач, партком организует шефские работы в совхозе «Восход», школах и детских садах города, участвует в реализации планов жилищного строительства, помогает комитету комсомола в подготовке к строительству МЖК, контролирует исполнение системы подготовки кадров, включая учебу в филиале МИРЭА и аспирантуре. На начальном этапе работы на «Истоке» Анатолий Гаврилович сам был победителем на нескольких конференциях и выставках творчества молодых и, став секретарем парткома, будучи молодым ученым, всемерно помогал совету молодых ученых и специалистов. В целом на предприятии не было ни одного направления деятельности, в котором не участвовал бы партком. За успешную работу на предприятии А. Г. Михальченкову предлагали должность в ЦК КПСС, но он оставался верен родному предприятию, будто предчувствовал, что впереди его ожидают новые повороты в жизни.

В начале 80-х годов А. Г. Михальченков возглавил одно из крупнейших подразделений «Истока» – НПК-17. Рассказывает бывший начальник НПК-17 В. А. Мальцев: «Это произошло в то время, когда предприятие все свои лучшие силы бросило на разработку уникального изделия С-20.

Работавший в те годы начальником НПК-17 И. И. Бродуленко – крупный специалист и организатор отечественной электроники, лауреат Ленинской премии – с самого начала не очень стремился вникать в кардинально новые для предприятия работы, связанные с С-20. И С. И. Ребров стал искать ему замену. В НПК-17 в то время не оказалось человека, кто бы смог в полной мере его заменить. Я имею в виду не только производственную сторону, но и умение найти общий язык со всеми, вовремя погасить конфликты, где надо – быть суровым, а где надо – добрым и заботливым. Как всегда, Сергей Иванович принял мудрое решение. Он поставил во главе НПК-17 человека со стороны, и не просто человека, а секретаря парткома А. Г. Михальченкова. Во-первых, Анатолий Гаврилович умел быстро принимать решения и безукоснительно, в положенные сроки их выполнять. В то время, время работы над блоком задающих генераторов, который, по существу, являлся сердцем С-20, это было чрезвычайно важно. Во-вторых, он обладал уникальными качествами владения собой, никогда не впадал в эмоции. И этим, в том числе, внушал к себе доверие. В-третьих, несмотря на несколько лет общественной работы, он оставался ученым, способным разобраться во всех тонкостях решаемой задачи. В-четвертых, как секретарю парткома, ему приходилось часто общаться с генеральным, и по некоторым производственным позициям он был очень хорошо подготовлен. И наконец, он умел ладить с людьми, обязательно каждого выслушивал, что очень важно для начальника».

Новый этап в деятельности предприятия – переход к технологии монолитных интегральных схем (МИС) потребовал значительной перестройки всей технологической базы на «Истоке». С. И. Ребров привлек к этой работе А. Г. Михальченкова, сделав его своим заместителем по микроэлектронике. Рассказывает бывший начальник НПК-4 А. М. Темнов: «С приходом Анатолия Гавриловича в жизнь НПК-4 влилась новая струя. Оживилась атмосфера в коллективе. Не сбавляя темпов разработок технологии МИС, в НПК-4 при нем были переделаны все участки, перестроена структура организации коллектива, пришли новые молодые руководители участков и лабораторий, были заложены технологические основы производства МИС, а также собственных твердотельных модулей. Все это сыграло огромную роль во всей последующей работе. По существу, это было началом той масштабной реконструкции технологической базы, которая ведется и сегодня. Думаю, что такие преобразования в то время были по силам только Анатолию Гавриловичу».

В 1988 г., в период «перестройки», А. Г. Михальченков участвует в выборах трудовым коллективом генерального директора «Истока», на которых побеждает А. Н. Королев. Анатолия Гавриловича переводят работать в Москву заместителем генерального директора и генерального конструктора крупного радиопромышленного предприятия – ЦНИИРТИ НПО им. Плешакова, где по подобию НПК-4 он создает подразделение по изготовлению тонкопленочных ГИС и применению в них МИС, разработанных на «Истоке». Это сыграло большую роль в разработке новых систем для обороны страны.

В середине девяностых годов возникает острая проблема с банкротством государственных предприятий. Руководители отечественной электроники предлагают А. Г. Михальченкову возглавить НИИ «Платан», чтобы удержать некогда славное предприятие от полного банкротства. Путем невероятных усилий ему удается это сделать, во многом благодаря принципиальной позиции Главы города В. П. Савченко, но вернуть былую мощь «Платану» было уже невозможно, по не зависящим от него причинам.

После известных событий, связанных с безвластием в городе, а затем избранием прямым голосованием Главой города В. В. Ухалкина, своего финала достигает движение за присвоение городу статуса наукограда, в котором активное участие принимал Совет директоров под руководством

С. И. Реброва. Важным звеном в этом движении стала разработка «Комплексной программы социально-экономического развития города Фрязино». 29 декабря 2003 г. указом Президента России Фрязино получил статус наукограда. Совет директоров, возглавляемый уже А. Н. Королевым, рекомендовал назначить А. Г. Михальченкова заместителем Главы города по реализации этой программы.

12 лет, вплоть до 2016 г., проработал Анатолий Гаврилович директором созданного им муниципального предприятия «Дирекция наукограда», многое свершалось впервые не только в городе, но и в стране. Прежде всего удалось более тесно связать работу Администрации города и предприятий научно-производственного комплекса. Была решена и другая важная задача: разработана система по эффективному распределению средств, получаемых на реализацию программы из федерального и регионального бюджетов, которые на начальном этапе составляли четвертую часть общего городского бюджета. Эти так необходимые финансовые средства позволили городу встать на ноги. Правда, и контроль за их использованием был особый, его осуществляли сразу два федеральных министерства: образования и науки и финансов. Большие средства были вложены в прокладку в городе новых тепловых сетей, строительство терапевтического комплекса, музыкальной школы, ремонт школ, строительство и ремонт детских садов, в приобретение спецтехники для коммунального хозяйства и многое другое.

Большое внимание А. Г. Михальченков уделял научно-техническому творчеству. В декабре 2004 года в клубе «Факел» прошла I Международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству 2004», в которой приняли участие ученые из России, Белоруссии, Германии, Италии и других стран. В последующие годы в нашем городе состоялись еще десять подобных конференций. Были организованы многочисленные выставки продукции промышленных предприятий как внутри города, так и за его пределами. Большой интерес вызвали издание книги «Фрязинская школа электроники» и видеофильм «Наукоград Фрязино – радиоэлектронике России».

На протяжении всей этой деятельности Анатолий Гаврилович получал неизменную поддержку и заимствовал опыт руководителей города В. В. Ухалкина и К. Р. Тихонова и Совета директоров города А. Н. Королева, А. А. Борисова, И. М. Панаса и других.

За «наукоградский» период существенно развился научно-производственный комплекс города, объемы продукции выросли на порядок, возник ряд новых предприятий, эффективно работали Совет директоров и НТС города, расширилась предпринимательская деятельность, город стал особой экономической зоной и кластером Московской области, была разработана стратегия социально-экономического развития наукограда на период до 2025 года. Из всех наукоградов страны только Фрязино и Дубна по комплексным показателям шли рядом. За какую бы работу Анатолий Гаврилович не брался, он выполнял ее на высоком уровне. По существу, в каждой такой выполненной работе закладывался фундамент будущего важного научно-технического или хозяйственного направления предприятий и города. В этом была его сила.

Светлой памятью пусть будет освящен путь дорогого нашему сердцу Анатолия Гавриловича Михальченкова. Мы всегда будем помнить уважаемого и любимого нашего друга и товарища, отдавшего свою пламенную жизнь на благо отчизны, «Истока» и наукограда Фрязино.

АЛЕКСЕЙ БОРИСОВИЧ КИСЕЛЕВ

15 лет назад 4 марта 2007 года перестало биться сердце Алексея Борисовича Киселева – талантливого и многогранно одаренного человека. С его уходом «Исток» и наукоград Фрязино лишились высококлассного специалиста в разных областях человеческой деятельности.

На «Истоке» А. Б. Киселев проработал более 50 лет. Много лет он возглавлял лабораторию в катодном отделе предприятия, в конце жизни доктор технических наук А. Б. Киселев работал ведущим научным сотрудником этого отдела. Его имя часто можно было видеть в различных научных журналах и на обложках книг. Активный изобретатель Алексей Борисович не только сам генерировал новые идеи, но и всемерно пропагандировал изобретательскую деятельность в общероссийском журнале «Изобретатель и рационализатор». Будучи профессором, он преподавал в ряде учебных институтов Москвы и Московской области. А. Б. Киселев был талантливым журналистом, членом Союза журналистов России, регулярно публиковавшим свои



А. Б. Киселев

интересные статьи в газетах «Ключь», «За коммунизм», «Время», «За передовую науку», «Голос ученого». Он был истинным поэтом с глубоким пониманием жизни, с критической и иронической жилкой, автором удивительных по красоте языка и смелых по содержанию стихов. А. Б. Киселев – единственный фрязинец, лично встречавшийся с гордостью нашей страны Юрием Алексеевичем Гагариным на комсомольской конференции Щелковского района Московской области и посвятивший этой встрече одно из своих стихотворений.

А. Б. Киселев был участником знаменитой, победно шествовавшей по СССР фрязинской команды КВН. Он всегда был неутомимым пропагандистом глубоких научных и общественно-политических идей; человеком с активной жизненной позицией, членом Всероссийского общества «Российские ученые социалистической ориентации» (РУСО) с момента его возникновения; бесстрашным альпинистом, покорившим не одну вершину Памира, Тянь-Шаня, Кавказа; надежным другом и верным товарищем.

Киселев А. Б. родился 27 июля 1934 года в г. Астрахань. Во Фрязино Алексей Киселев впервые появился в 1954 году студентом-практикантом Московского физико-технического института (МФТИ). Об этом вузе уже тогда ходили невероятные слухи – будто бы его студенты в уме брали тройные интегралы. Практикант отдела 240, на первый взгляд, опровергал такие слухи. Он много шутил, улыбался, был, как говорится, рубаха-парень. Но опытный взгляд начальника отдела, знаменитого ученого Б. М. Царева сразу отметил в одаренном студенте неумное стремление к знаниям и научному поиску. При решении задач катодной техники дипломник всегда предлагал что-то свое и обязательно доискивался, было ли это уже кем-то предложено. По-мальчишески радовался, если его предложение было новым. Интерес к новому и неизведанному не покидал А. Б. Киселева всю жизнь. Именно этот интерес привел его в ряды ученых и изобретателей. За свою не слишком долгую жизнь он опубликовал 100 оригинальных статей, 50 научно-технических отчетов и предложил 30 изобретений. Написал

и защитил кандидатскую и докторскую диссертации. Венцом его научной деятельности явилась умная и полезная монография «Металлооксидные катоды электровакуумных приборов», изданная в 2002 году. Писательский талант Алексея Борисовича проявился здесь во всем своем блеске. Книга написана живым языком и читается, как детектив, на одном дыхании.

А. Б. Киселев обладал редким для крупного ученого талантом. Он с восхищением рассказывал о новых удивительных результатах своих коллег, особенно изобретателей. Это качество способствовало тому, что на протяжении 18 лет он без отрыва от производства работал государственным экспертом, рассмотревшим более 500 заявок на изобретения. Его статьи об уникальных изобретениях академиков Н. Д. Девяткова, Ю. В. Гуляева, А. А. Чернышева, профессоров С. А. Зусмановского, М. Б. Голанта, А. С. Тагера и других в научно-техническом сборнике «СВЧ-техника» и всероссийском журнале «Изобретатель и рационализатор» (ИР) могут служить примером тонкого понимания психологии изобретателя. А его публикация «Записки эксперта» настолько задела за живое, что журнал ИР получил на нее более 800 откликов. За это искреннее внимание и уважение к изобретателям А. Б. Киселев был награжден медалью по итогам конкурса ИР «Техника – колесница прогресса» и медалью «Лучший журналист года ИР».

Другое привлекательное качество Алексея Борисовича – доступно рассказывать о новых идеях и методах в изобретательстве молодым ученым и студентам. Курс о новой для многих изобретателей сфере – защите интеллектуальной собственности, который он читал студентам МФТИ и МИРЭА, стоял в одном ряду с подобными курсами Оксфордского университета и Стокгольмского Королевского технологического института. Лекции его были настолько увлекательными, в них было столько интересных примеров из творчества изобретателей, что студенты старались не пропускать ни одного занятия. И сам профессор всегда стремился к своим слушателям.

И еще одна черта Алексея Борисовича достойна глубокого уважения. Это его отзывчивость, исходившая от самого сердца. Он любил людей и поэтому всегда стремился помочь любому человеку, который обращался к нему за помощью в научной области: студенту-первокурснику, молодому специалисту, опытному сотруднику, начальнику цеха или заместителю генерального директора. Причем помощь эта всегда была конкретной и информативно исчерпывающей.

Алексей Борисович из той категории ученых, которые раньше других увидели в перестройке и реформах целенаправленный развал СССР и встали на защиту советской науки. Его обличительные статьи в общероссийском журнале «ИЗМЪ» и газете «Советская Россия», а также в газете Фрязинского отделения РУСО «Голос ученого» были честными, а потому шли вразрез с той пагубной политикой, которая насаждалась стране сверху. А. Б. Киселев имел большое мужество сказать открыто правду. Друзья и товарищи искренне уважали его.

Алексей Борисович с любовью относился к своей семье, детям, внукам.

ВАДИМ ГРИГОРЬЕВИЧ БОРОДЕНКО

Уже в 30-летнем возрасте молодой кандидат технических наук Вадим Григорьевич Бороденко был признан выдающимся ученым «Истока». Этому признанию способствовало и то обстоятельство, что, помимо пионерных работ по моделированию электровакуумных приборов СВЧ, сотрудникам предприятия хорошо были известны уникальные работы В. Г. Бороденко по проблемам релятивистской астрофизики и общей теории относительности, его многолетние исследования древнерусских текстов и углубленная трактовка им учений философов разных временных периодов. Обобщая его творчество, интересным, на наш взгляд, представляется интервью с В. Г. Бороденко 1997 года.



В. Г. Бороденко

Я просто осмыслил то, что сделали до меня

– Я совсем не помню своего отца Анатолия Васильевича Седельникова и лишь немного смог о нем узнать из рассказов родственников и знакомых. Родом он из Туруханска. Мой дед был профессиональным охотником, но слыл человеком очень культурным. В то же время его жена, бабушка Саша, была совершенно неграмотной крестьянкой. Как образовалась эта пара не совсем понятно. Седельниковы скорее всего происходили из дворянского рода; по крайней мере брат деда был белым офицером и не скрывал этого даже при советской власти. Сам же дед был активным большевиком; в 1937 г. он был репрессирован и расстрелян. Отец в 19 лет от роду приехал в Красноярск и устроился работать в газете. Здесь его судьба свела с моей матерью Ниной Ивановной Трубецкой. Скажу сразу, что к известному княжескому роду она, видимо, отношения не имеет. Ее отец был обрусевшим армянином, а мать происходила из семьи сосланных в Сибирь поляков. Так что во мне смешано несколько кровей. В 30-е годы семья Трубецких была раскулачена.

Сам я родился в Красноярске в 1939 г., т. е. в год начала второй мировой войны. Отца практически сразу после моего рождения взяли в Красную Армию. К началу Великой Отечественной войны он успел отслужить полный срок, вернулся домой, а в 1941 году на фронт ушел добровольцем. Судьба его, защитника советской родины, была тяжелой. Попал в окружение, с трудом выбрался, затем партизанил в Белоруссии и Польше, где и погиб в ноябре 1944 г., не дожив даже до 26 лет. Его партизанский период описан в двух книгах: А. Линькова «Война в тылу врага» и И. Черного «Данные достоверны». Он награжден орденами Ленина и Отечественной войны, несколькими медалями. А мне на память о нем остались шесть томов А. С. Пушкина 1907 г. издания, его дневники да звуковое письмо со стихами обо мне и маме. Мама в молодости закончила бухгалтерские курсы и всю жизнь проработала бухгалтером. Вторично она вышла замуж за Г. А. Бороденко, чью фамилию я и ношу. Григорий Александрович умер в 1990 г. Он был из сибирских крестьян – переселенцев с Украины. Смолodu любил сцену, участвовал в художественной самодеятельности. Поступил в труппу драматического театра в г. Норильске. С этим театром связана интересная история. Набранная труппа должна была отплывать последним рейсом Красноярск – Дудинка в Норильск, а ее руководитель со всеми деньгами не явился. Новорожденной труппе в пору было питаться обедками. Однако составилась карточная «пулька» из высших парходных чинов, и отчим, классный преферансист, вошел

в нее. И кормил труппу всю дорогу. Когда прибыли в Норильск и встал вопрос о директоре, актеры указали на него. И он отлично справился с новой должностью. И режиссером оказался интересным, да и сам на сцене играл неплохо. Театр щедро финансировали, труппа пополнялась, и в какой-то год появился в ней, среди других, молодой актер Кеша Смоктуновский... Видимо, отчим к концу войны имел солидный театральный авторитет, поскольку в 1947 г. его направили создавать театр на уже советской территории в г. Калининград (Кенигсберг).

Однако в этом разрушенном городе с разношерстным новым населением работать было крайне трудно, да и удача от него отвернулась. Правда, в моей детской памяти остались яркие театральные спектакли этого калининградского театра. У отца же начались неприятности, он ушел из театра в рыбную промышленность. Но заболел чахоткой, перенес мучительную операцию, и поскольку жить в таком климате больше не мог, его направили работать на юг, на самую румынскую границу, с заданием организовать агентство по перегону судов по Дунаю и морем в г. Ростов-на-Дону. Так что школу я закончил в маленьком городке Рени (Одесская обл.), который, впрочем, старше Москвы. И, похвастанусь, стал первым в истории Рени школьником – золотым медалистом.

– Как же тогда Вы, из театральной семьи, пошли в физики?

– В последних классах школы я был одержим наивным стремлением познать все. И чувствовал, что способен многое освоить самостоятельно, но только не физику, которая для нашего поколения была наукой, полной тайн. Поэтому я решил заполнить этот интеллектуальный пробел и сдал документы на физический факультет МГУ. Выдержав нелегкое, даже для золотого медалиста, собеседование, стал студентом прославленного университета мирового класса. После провинциальной школы мне пришлось на первом курсе тужо, но уже к четвертому курсу я почувствовал, что понимаю некоторые вещи, которые другие не понимали. Например, что специальная теория относительности Эйнштейна на самом деле слабее теории Лоренца. Много вопросов и идей возникло у меня и по общей теории относительности.

– В юности многие советские школьники «переболели» теориями относительности и квантовой механики, но, к сожалению, все это так и осталось «забавой» молодости.

– Со мной случилось несколько иначе. В последний год учебы в МГУ и на начальном этапе работы в г. Фрязино мне действительно пришлось отложить занятия высокой наукой. К исследованиям по теории относительности я вернулся только в 1974 г., уже защитив кандидатскую диссертацию, когда по состоянию здоровья попал на два месяца в московскую областную больницу МОНИКИ. Старые идеи основ физики буквально поглотили меня. Их я разрабатывал еще в двух клиниках (не подумайте чего плохого). И мне, как казалось, удалось сдвинуть камень, после чего его можно было катить по прямой дороге... Популярная статья не то место, где удобно об этом рассказывать. Да и «незавершенка» этих моих идей в целом оказалась вопиющей. Я несколько раз излагал свои идеи для научных сотрудников «Истока», и все маститые ученые-физики говорили мне, что только «идиот» мог бросить все на столь интересном месте. Но в стационарах я больше не лечился, и свободного времени от основной моей работы инженера по электронной технике у меня было не очень много, чтобы продолжать глубокие физические исследования. Таково было мое первое интеллектуальное приключение.

– Были и другие?

– Да, и не одно. В 1984 г. мне попала в руки книга О. Сулейменова «Аз и Я», о которой я много был до этого наслышан. Прочитав ее, я был потрясен тем, что такой памятник нашей культуры, как «Слово о полку Игореве», до сих пор вызывает яростные споры. Полгода я ходил под впечатлением и в конце концов решил разобраться сам. Я давно увлекался этимологией и имел

целую коллекцию словарей на разных языках. Я интуитивно чувствовал, что О. Сулейменов прав и что принятая трактовка великого русского творения «Слово о полку Игореве» неверна. Замечу, что в первоисточнике этого шедевра часть слов написана слитно, без интервалов, разделяющих слова. Поэтому в зависимости от способа расчленения текста на слова в принципе может измениться и смысл всего произведения. Да и сами слова имеют иногда редкие, забытые значения. А есть еще иноязычные слова, похожие на русские. Как известно, первоисточник сгорел во время пожара 1812 года и его роль играет текст первого книжного издания. Работая только с этим текстом, мне удалось прочитать практически все «темные» места, восстановить структуру стиха и показать, что в «Слове о полку Игореве» и содержание, и форма, и идея – все отличается от известных трактовок. Попутно я вышел на другие древние тексты, сравнимые по сложности со «Словом о полку Игореве». Но была еще Екатерининская копия «Слова о полку Игореве», и лишь недавно я смог до нее добраться...

Вот уже несколько лет я готовлю свою публикацию по этим вопросам. Она будет посвящена древнерусским шедеврам, и анализ «Слова о полку Игореве» в ней не будет основным. Готовлюсь тщательно, поскольку, на мой взгляд, это должен быть «хит».

– Какую роль в Вашей трудовой деятельности сыграла семья?

– Прежде всего расскажу об огромной роли моей супруги Эльзы Васильевны Погореловой.

Она родилась 19 сентября 1938 года в семье второго секретаря Челябинского областного комитета ВКП (б). Учеба в МГУ им. М. В. Ломоносова свела ее со многими выдающимися учеными современности, и прежде всего с академиком, ректором МГУ Р. В. Хохловым. Поскольку Эльза Васильевна была секретарем комитета ВЛКСМ физического факультета МГУ, то она в 1956 г. по призыву ЦК КПСС и Правительства СССР возглавила первый студенческий отряд университета, выезжавший в Казахстан на поднятие целины.

Научные работы Э. В. Погореловой в МГУ были связаны в основном с квантовой электроникой и явились продолжением ее дипломной работы, которую она выполняла под руководством знаменитого профессора Ахманова. Успешное завершение этих работ по теории и экспериментальному исследованию лазеров в СССР позволило ей с блеском защитить диссертацию. На «Истоке» она стала единственной женщиной – кандидатом физико-математических наук.

На предприятии Э. В. Погорелова была распределена в теоретический отдел, в лабораторию А. С. Тагера, и сразу внесла мощный энергетический импульс в жизнь отдела. На протяжении многих лет она возглавляла партийное бюро отдела. На мой взгляд, нет жизненного и производственного вопроса, на который Эльза Васильевна не знает ответа. Начальник теоретического отделения доктор технических наук В. П. Сазонов и сменивший его кандидат физико-математических наук А. В. Галдецкий всегда внимательно прислушиваются к ее мнению. Э. В. Погореловой совместно с Е. И. Голантом предложен удобный экспрессный метод расчета лавинно-пролетных диодов (ЛПД); создан комплекс программ для ЭВМ, открывший новые возможности для генерации и усиления колебаний СВЧ. Совместно с Я. Б. Мартыновым они исследовали влияние «всплеска» дрейфовой скорости электронов и других тонких эффектов на характеристики ЛПД, диодов Ганна и полевых транзисторов.

В должности ученого секретаря докторского диссертационного совета при «Истоке» она работает в тесном контакте с руководителями предприятия С. И. Ребровым, А. Н. Королевым и академиком Н. Д. Девятковым.

В течение четырех лет Эльза Васильевна работала освобожденным заместителем председателя Фрязинского городского Совета депутатов.

Помимо любимой, умной и заботливой моей супруги, я очень рад, что мои гуманитарные наклонности повторились в сыне Виталии, который стал профессиональным филологом и журналистом. Некоторое время он, взявший фамилию бабушки – Трубецкой, в качестве корреспондента Центрального телевидения сопровождал в поездках по миру Президента России Бориса Николаевича Ельцина.

– Вадим Григорьевич, многие «истоковцы» помнят Ваши интереснейшие лекции по атеизму, в частности. Вы один из первых поведали сотрудникам предприятия о внутренних причинах исламской революции в Иране. Остался ли у Вас к этому интерес?

– Скажу откровенно, в годы гласности за короткий период резко изменилось не только общее в СССР, но и мое мировоззрение. Я был убежденным марксистом, хотя религия интересовала меня всегда. Но «по жизни» и теперь я остаюсь человеком нерелигиозным. Изменилась моя картина мира. Если раньше я считал эволюцию (т. е. сложное – из простого) основным путем развития, то сейчас понимаю, что это один из путей. И не главный, а главный – это путь рождения, путь, так сказать, генетический, т. е. по образу и подобию. В этом смысле религиозная картина мира в чем-то более естественна. В ней сложное рождается из еще более сложного. В целом ведь вся философия идеалистов от Платона до Гегеля – это генетическая концепция, которая вполне поддается материальной трактовке. Впрочем, наверное, это слишком «заумно».

– Расскажите, пожалуйста, о Ваших работах в области электроники СВЧ.

– В «Исток» я попал по распределению в 1963 г. и никак не хотел идти в технологи, куда первоначально направляли меня в отделе кадров. Тогда сам начальник отдела кадров передал меня из рук в руки заместителю директора по теоретической работе профессору Владимиру Сергеевичу Лукошкову. Тот повел меня к директору предприятия – и все сразу решилось – я стал сотрудником лаборатории Александра Семеновича Тагера и практически сразу же получил задание написать большой обзор по теории ламп обратной волны. Писательство – мой конек, и обзор имел успех у ученых.

За годы работы я участвовал в большом числе НИР и ОКР, написал немало отчетов и научных статей, защитил диссертацию. Тем не менее я внутренне понимал, что «не рожден для электроники», но мне удалось вписаться в коллектив теоретиков, мои способности на предприятии использовались, и я, как мне кажется, принес пользу «Истоку».

В заключение хочу сказать вот о чем. Странные у меня способности и странная судьба. Все, что я действительно создал – это несколько приближенных формул в электронике СВЧ и несколько стихотворений «по случаю». В остальном же я просто понял то, что сделали другие. Видно, я из тех, кто идет вслед за Колумбом и, подобно Америго Веспуччи, вносит в этот след ясность.

Заметим, что Вадим Григорьевич скромно умолчал о выдающихся своих работах в области электроники СВЧ, которые на сегодняшний день приводят в восторг разработчиков электровакуумных приборов (ЭВП).

После того как была высказана идея использования в ЭВП СВЧ нескольких электронных пучков, А. С. Победоносцев, В. Г. Бороденко и Н. Я. Малькова-Хаимова дали исчерпывающее теоретическое обоснование перехода к многолучевым конструкциям, которые позволяли в несколько раз расширить полосу частот усилительного клистрона по сравнению с однолучевым. Эти результаты коренным образом изменили отношение разработчиков к многолучевым приборам. В настоящее время электроника СВЧ немыслима без этих приборов.

С именем В. Г. Бороденко связано широкое внедрение идеи оптимизации и проектирования ЭВП СВЧ с помощью универсальных ЭВМ. Поворотным этапом в отношении к машинным

методам расчета ЭВП СВЧ стал выполненным им совместно с другими теоретиками сложнейший анализ гибридных приборов О-типа. Это была первая работа, посвященная нелинейному анализу клистронов и твистронов с распределенным взаимодействием.

Работы В. Г. Бороденко послужили толчком к последующему созданию универсальных программ, позволяющих рассчитывать практически все приборы О-типа, в том числе и многосекционные СВЧ-приборы, многолучевые клистроны, работающие на основном и высшем видах колебаний резонатора, мощные многолучевые ЛБВ и усилительные цепочки на их основе.

На «Истоке» разрабатывалось большое количество новых СВЧ-приборов, и теоретический отдел не успевал выполнить проектирование всех этих ламп. Вадим Григорьевич предложил методики синтеза ЛБВ и клистронов по исходным параметрам технического задания. Эти методы и программы до сих пор являются уникальными и предметом зависти многих других организаций, в том числе зарубежных. Разработанные методы позволили не только улучшить параметры клистронов, ЛБВ и ЛОВ, что явилось ключевым фактором в применении этих приборов, но и выполнять комплексное проектирование ЭВП с первого захода.

В. Г. Бороденко был одним из самых уважаемых на предприятии специалистов по многим теоретическим вопросам. Сотрудники и руководители «Истока» его ценили и к его мнению прислушивались. Вадим Григорьевич ушел из жизни в расцвете лет, немногим не дожив до своего шестидесятилетия. Он был полон творческих планов и замыслов. Его признанный талант и уникальные способности широко использовались на предприятии. Он принес огромную пользу «Истоку», отрасли и стране, а потому память о Вадиме Григорьевиче Бороденко с годами не меркнет.

ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛОДИНСКИЙ

Виталию Николаевичу Колодинскому исполнилось 80 лет!

В. Н. Колодинский родился 28 декабря 1941 года в г. Баку в семье военнослужащего. Отец, участник Великой Отечественной войны и войны с Японией, был командиром бронепоезда. Память о нем сохранилась не только в семье. В музее г. Могилев-Подольска ему посвящен целый уголок.

После окончания средней школы Виталий продолжил учебу в Харьковском политехническом институте (ХПИ). В самом начале учебы В. Н. Колодинский попал под «хрущевские реформы» – первые три курса студенты должны были совмещать учебу с производством, поэтому днем Виталий работал слесарем на военном заводе, а вечером учился.

В 1964 году после окончания ХПИ он по распределению приехал во Фрязино. Выбор НПП «Исток» был не случаен, здесь Виталий Колодинский проходил преддипломную практику в отделении 5, которое возглавлял незабвенный Радомир Александрович Беляков. К нему Виталий Николаевич и по сей день испытывает огромную симпатию: «И специалист он был первоклассный, и человек душевный».

Уход от науки и производства в сторону общественной работы произошел для него как-то незаметно. Уже в 1965 году В. Колодинского избирают секретарем комсомольского бюро отделения,



В. Н. Колодинский

а еще через два года – освобожденным секретарем комитета ВЛКСМ «Истока». В новой должности Виталий знакомится с целой плеядой славных тружеников могучего предприятия: Николаем Дмитриевичем Девятковым, Константином Алексеевичем Амосовым, Ларисой Анатольевной Парышкуро, Станиславом Васильевичем Королевым, Эдуардом Альбертовичем Гельвичем, Иваном Михайловичем Панасом, Сергеем Павловичем Кантюком, Александром Семеновичем Тагером, Михаилом Борисовичем Голантом, Владимиром Ивановичем Волк, Виталием Николаевичем Батыгиным и многими другими. Они были и навсегда останутся гордостью НПП «Исток». Особое уважение питает он к С. И. Реброву. «Сергей Иванович был, пожалуй, самым выдающимся организатором науки и производства в отечественной электронике СВЧ. А в начале 90-х годов, после передачи предприятия в надежные руки Александра Николаевича Королева, он оказывал огромную поддержку администрации города в усилиях по выходу из сложного положения. Много прекрасных специалистов работало и в сфере общеинститутских проблем. Назову по крайней мере двух – К. А. Амосов и Л. Ф. Лаврененко. Они успевали и решать вопросы на предприятии, и принимать самое активное участие в жизни города. Позднее, работая в горсовете, я всецело оценил их огромный вклад в решение городских проблем. К сожалению, они слишком рано ушли из жизни. Лаврентий Федорович Лаврененко памятен для меня еще и тем, что, будучи секретарем парткома «Истока», в 1969 году он принимал меня в КПСС».

В. Н. Колодинский проработал секретарем комитета комсомола пять лет. Активно комитет ВЛКСМ взаимодействовал с советом молодых ученых и специалистов (СМУС), во главе которого стоял Игорь Михайлович Олихов, известный на «Истоке» и во Фрязино ученый, изобретатель, организатор науки, позднее его сменил талантливейший «истоковец» Сергей Васильевич Беляков. Совместно со СМУС комсомольцы проводили многочисленные научно-технические конференции, конкурсы, смотры технического творчества молодых специалистов. С особой заботой комитет комсомола относился к молодым изобретателям и рационализаторам. Большая работа проводилась в культурной жизни молодежи. Комитет ВЛКСМ продолжал славную для Фрязино КВН-компанию, проводил в клубе интересные вечера, приглашал знаменитых ученых, спортсменов, артистов. Мощной опорой комитету комсомола в этом направлении были сотрудники клуба «Факел» и, прежде всего, директор клуба Иван Андреевич Гусев, обладающий удивительным талантом бесконфликтности, такта и доброжелательности к людям. Важное направление работы комитета комсомола – занятие с детьми, организация их досуга во внеурочное время. И здесь комсомольцы имели немало надежных помощников, таких, как директор Дома пионеров Лора Александровна Чижма, секретарь комиссии по делам несовершеннолетних Вениамин Семенович Поляков, детский тренер-общественник Серафим Дмитриевич Фролов и многие другие. Весьма эффективно работал выездной лагерь для подростков «Астра», а также комсомольский оперотряд во главе с Георгием Васильевичем Ровенским. Увлекательно проходили многочисленные массовые спортивные соревнования. Комсомол выступал в числе их организаторов, но основная нагрузка, конечно, ложилась на спортивный клуб «Олимп», который возглавлял мастер спорта по лыжным гонкам Геннадий Николаевич Старостин, а немного позднее Ольга Вячеславовна Плотникова. Будучи секретарем комитета ВЛКСМ, В. Н. Колодинский всегда выходил на лыжню для сдачи нормативов ГТО под первым номером, тем самым показывая пример остальной молодежи.

«Отмечу и еще одно важное обстоятельство, – рассказывает В. Н. Колодинский. – В эти годы комсомол стал самостоятельно зарабатывать деньги для общественных фондов, в частности для Фонда мира. Комсомольцы работали на субботниках по благоустройству города, на строительстве социально значимых объектов, а деньги накапливались по статье «Привлеченные средства».

Памятен такой случай. Прямо под Новый год заместитель генерального директора «Истока» К. А. Амосов раздобыл для строительства дома на базе «Электрон» целый железнодорожный вагон кирпича. Мороз в тот день стоял под 30 градусов. Но дело было очень важным, и Виталий Николаевич срочно собрал комсомольцев, они поехали в Дубну, разгрузили вагон и перебросили кирпич на остров на Волге, где располагалась база отдыха. И другой пример. К 30-летию Победы в Великой Отечественной войне по инициативе В. Н. Колодинского комсомольцы решили создать в городе аллею Героев. Работали по-ударному, быстро и слаженно. Аллея сейчас украшает наукоград Фрязино. Так что ударные стройки к юбилейным датам также приносили огромную пользу.

После завершения работы в комитете ВЛКСМ и заместителем секретаря партийного комитета НПП «Исток» по идеологии (секретарем в то время был Юрий Иванович Седенков) для В. Н. Колодинского начался столь же славный этап работы в городском Совете. Впервые депутатом в городской Совет он был избран еще 1968 году – практически сразу же после того, как стал секретарем комитета ВЛКСМ. В дальнейшем он избирался депутатом городского Совета вплоть до 1988 года. В 1975 году председатель исполкома горсовета Валентина Дмитриевна Башлыкова пригласила его стать ее первым заместителем. Он согласился и окупился в малознакомую, ответственную и трудную работу. Достаточно сказать, что, как первый заместитель, Виталий Николаевич возглавлял или курировал 23 различных городских комитетов и комиссий, в том числе по коммунальному хозяйству, благоустройству, образованию, культуре, народной дружине и т. д. Но он был молод, полон сил и потому за сравнительно короткий срок и при поддержке старших товарищей, таких, как Иван Федорович Пакин, Николай Иванович Корозин, главный врач больницы Матвей Владимирович Гольц, директор «Фрязинского завода им. 50-летия СССР» Георгий Дмитриевич Колмогоров, директор НИИ «Циклон» Василий Борисович Степанищев, заместитель директора ФИРЭ АН СССР Неон Александрович Арманд, и руководителей «Истока» постиг все азы профессиональной административной работы в городе. За 17 лет работы в горисполкоме город для Виталия Николаевича стал еще более родным. Вместе с жителями Фрязино он создавал славную историю города, разрешал подчас непосильные проблемы, преодолевал трудности и всей душой радовался, глядя на новые свершения.

В 1987 году по состоянию здоровья он оставил городскую власть и перевелся заместителем генерального директора НПО «Исток» по мобилизационной работе, где создал многоступенчатую учебу сотрудников предприятия по гражданской обороне, мобильную систему оповещения работников предприятия и многовариантную систему продолжения функционирования предприятия на начальной стадии возможных военных действий.

В 1988 году в Армении произошло страшное землетрясение. Все народы Советского Союза пришли на помощь братской Армении. Эту общую для страны трагедию забыть нельзя. В. Н. Колодинский организовал из сотрудников «Истока» спасательный отряд и отправил его в армянский город Спитак. Туда же направлялись собранные жителями Фрязино теплые вещи и медикаменты.

Во время трагических событий в Югославии, наша страна тоже протянула руку помощи братскому народу. Под непосредственным руководством Виталия Николаевича на специальном самолете из Чкаловского аэродрома были отправлены медикаменты, носилки, одеяла и многое другое из запасов подразделения «Истока» по гражданской обороне.

В 1995 году по приглашению Главы города Фрязино, бывшего «истоковца», В. П. Савченко В. Н. Колодинский вновь вернулся на работу в администрацию города и возглавил комитет по управлению имуществом и жилищным вопросам, став одновременно и первым заместителем

Главы города, и председателем по чрезвычайным ситуациям. На долю руководства городом пришлось, пожалуй, самые тяжелые годы становления Российской Федерации. Один за другим исчезали некогда мощные промышленные предприятия города. Основное градообразующее предприятие «Исток» едва сводило концы с концами. Денег не было на зарплату сотрудникам, к минимуму свелась уплата налогов в городской бюджет. Но градообразующее предприятие «Исток» и город Фрязино в тот тяжелый период выстояли.

Огромная заслуга в этом принадлежит Владимиру Петровичу Савченко, Константину Романовичу Тихонову, Владимиру Федоровичу Ластовскому, Виталию Николаевичу Колодинскому, Лидии Николаевне Гутник, Борису Михайловичу Гильману, Ирине Степановне Хмелевой, Александру Николаевичу Королеву, Сергею Ивановичу Реброву, Анатолию Гавриловичу Михальченкову, Ивану Михайловичу Панасу и другим руководителям промышленных и научных предприятий наукограда.

В середине 90-х годов теплотрасса, связывающая центральную котельную № 15 и 4-й микрорайон города, пролегла под землей и постоянно выходила из строя, оставляя без тепла много-тысячный район города. Виталий Николаевич, как заместитель Главы города по чрезвычайным ситуациям, никогда не уходил с объекта, пока не были ликвидированы все неполадки. Иногда это длилось не один день и ночь...

Последний трудовой период В. Н. Колодинского был связан с хозяйственной деятельностью в администрации города. На этот «колодинский» период пришелся переход администрации в новое здание на проспекте Мира.

Виталий Николаевич – пример беззаветной преданности НПП «Исток», наукограду Фрязино, Советскому Союзу и Российской Федерации, идеям процветания родной страны, социального равенства и всемерного повышения благосостояния всех народов, населяющих нашу необъятную Родину.

«Вся моя жизнь и трудовая деятельность на «Истоке» и в городе, – говорит В. Н. Колодинский, – связана с коммунистической партией, в которой я состою по сей день. Я вступал в партию по убеждению, хотя, не буду скрывать, членство в партии способствовало и моему продвижению. Я партии многим обязан, поэтому даже в трудные моменты у меня не было и нет причин предавать ее».

Сотрудники «Истока» и жители наукограда Фрязино поздравляют дорогого и уважаемого Виталия Николаевича Колодинского с 80-летним юбилеем и желают ему крепкого здоровья, долголетия, успехов в труде и счастья в жизни!

ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ ИНДЫК

В 2008 году к 70-летию фрязинского ученого Московское издательство «Университетская книга» выпустило в свет монографию В. И. Индыка «Стационарная и динамичная Вселенная (новая космологическая теория)», содержащую 260 страниц.

Виталий Иванович Индык родился в 1938 году в Украине в семье врача. Отец умер еще до войны. Эвакуацию Виталий пережил вместе с мамой, бабушкой и сестрой. После войны он закончил среднюю школу с золотой медалью и поступил в Харьковский государственный университет на факультет радиофизики. В 1960 году после окончания университета с красным дипломом Виталий Иванович получил назначение на работу во Фрязино. В 1969 году он окончил аспирантуру при «Истоке», с блеском защитил кандидатскую диссертацию и был назначен начальником лаборатории в НПК-2, в которой разрабатывались электровакуумные приборы нового класса.

В начале 80-х годов Виталию Ивановичу предложили в том же НПК-2 возглавить лабораторию твердотельных (полупроводниковых) устройств. В короткие сроки он освоил и это

направление. Научные результаты его работы содержатся в 70 статьях, 9 авторских свидетельствах на изобретения и нескольких десятках отчетов по завершённым НИР и ОКР. Технические результаты работы В. И. Индыка нашли свое отражение в многочисленных изделиях специального и гражданского назначения. Существенно отметить, что все его изобретения были применены в выпускаемых приборах.

В. И. Индык ушел из жизни в 2006 году после второго инсульта.

Последнее десятилетие Виталий Иванович возглавлял лабораторию в отделе научно-технической информации «Истока», был научным редактором ежемесячного бюллетеня новостей зарубежной СВЧ-техники «Сигнал».

На протяжении многих лет мы имели возможность общаться с Виталием Ивановичем по различным вопросам. Прежде всего, нас привлекала в нем неутомимая тяга к знаниям.

Он не только знал, а знал глубоко то, о чем рассказывал сотрудникам. Видимо, поэтому ему несложно было освоить две непересекающиеся области электроники СВЧ (электровакуумную и твердотельную) и стать специалистом высшей квалификации в каждой из них. Он много читал научной литературы, переосмысливал прочитанное, а потому мог просто и в то же время на высоком научном уровне раскрыть интересующую окружающих проблему. У него был не только пытливый, но и критический склад ума. В своих замечаниях он всегда был спокойным и выдержанным. Он был интеллигент как во внешнем облике, так и в поведении. Виталий Иванович с интересом, даже с нежностью, относился к молодым сотрудникам. Не жалел на них своего времени. Рассказывал, убеждал, помогал писать первые научные работы, участвовал в работе различных конференций, конкурсов молодых специалистов.

Мы часто с ним общались, но ни разу с нами он не обсуждал проблему Вселенной. Поэтому изданная книга оказалась для нас полным откровением. Мы нисколько не сомневались, что Виталий Иванович способен был написать не одну книгу по технике и теории приборов СВЧ. Но чтобы вникнуть в глубинные тайны космологической теории и создать собственную, новую теорию, отличную от признанной, об этом мы даже и подумать не могли. Уверены, что не меньше нас были удивлены и другие «истоковцы», знавшие и уважавшие Виталия Ивановича. Это еще раз подтверждает яркий талант и незаурядность фрязинского ученого.

В начале 90-х годов Виталий Иванович заинтересовался проблемами дальних межзвездных перелетов и разработки мощных ракетных двигателей. Изучая материалы, он столкнулся с тем, что современные космологические теории не могут описать некоторые процессы и явления во Вселенной.

В 1995 г. он начал работу по формированию собственной теории. На написание книги ушло около десяти лет. Осенью 2004 года рукопись была завершена. В книге В. И. Индыка изложена новая космологическая теория или, как часто говорят, модель Вселенной. Она призвана сменить ныне принятую модель, именуемую гипотезой Большого взрыва (ГБВ). Сегодня ГБВ переживает кризис: она не может объяснить многие явления, происходящие в космосе. Новая теория позволяет вывести космологию из тупика. С ее помощью уже получены ответы на ряд актуальных вопросов науки.



В. И. Индык

Отдельный раздел книги посвящен приложениям новой теории к решению общих проблем естествознания. Здесь читатель найдет научно обоснованные ответы на вопросы: конечна или бесконечна наша Вселенная? Двигается ли она? Закономерно ли появление во Вселенной жизни? Существуют ли другие Вселенные?

Книга адресована специалистам в области астрономии, космологии и философии, преподавателям, студентам и школьникам, а также читателям, которые интересуются последними достижениями науки.

ЮРИЙ ИСАЕВИЧ МОЛДОВАНОВ



Ю. И. Молдованов

Опытный руководитель технологического производства, известный в стране ученый и изобретатель, кандидат технических наук, много лет проработал начальником лаборатории НПК-8, в настоящее время ведущий научный сотрудник этого подразделения, пользуется заслуженным уважением среди сотрудников «Истока» и жителей Фрязино. Имя его достойно уважения, из руководителя технологической лаборатории численностью в 30 человек в возрасте 70 лет он был переведен в ведущие научные сотрудники, а спустя год вновь возвращен на должность начальника той же самой «молдовановской» лаборатории.

Ю. И. Молдованов родился 29 декабря 1932 года в Новосибирске в большой и дружной семье. После окончания Новосибирского авиационного техникума и двух лет работы на Новосибирском электровакуумном заводе был призван в Советскую Армию. Уже в молодости проявились главные его качества – целеустремленность, бесстрашие и готовность к борьбе до победного конца, будь

то борьба за знания, в боевом учении, за производственный план или за данное кому-то обещание. Невысокого роста, худощавый, Юрий Молдованов в юности поставил перед собой непростую задачу – добиться высоких результатов в легкой атлетике. Спустя три года он становится чемпионом Новосибирской области в беге на длинные дистанции. Причем в его спортивной биографии есть немало примеров, когда ему удавалось побеждать в соревнованиях весьма именитых соперников.

Во время службы в армии он не раз доказывал, что способен к высокой самоотдаче, к подвигу. В его архиве хранится вырезка из газеты Сибирского военного округа «Советский воин» от 18 марта 1956 года, в которой Герой Советского Союза полковник И. Ладутько так рассказывает о воине: «...На тактических учениях рядовому Молдованову, выполнявшему обязанности связного, было приказано срочно доставить донесение. Солдат встал на лыжи и быстро побежал в указанном направлении. В пути лыжи сломались, а снег в поле лежал рыхлый и глубокий. Пробираясь к командиру, Молдованов местами по пояс проваливался в снежных сугробах. Однако это не помешало связному успешно выполнить приказ. Он добрался до командира, промокший от пота, уставший выше всяких мер, но донесение доставил своевременно...».

Закончив Новосибирский электротехнический институт, Ю. И. Молдованов за 5 лет прошел путь от инженера до руководителя цеха Новосибирского электровакуумного завода. В 1966 году

он был переведен заместителем начальника производства завода полупроводниковых приборов во Фрязино (с 1972 г. «Завод им. 50-летия СССР»), а впоследствии стал заместителем главного технолога Фрязинского производственного объединения «Электронприбор». В то время это было самое крупное в стране объединение (22 тысячи работников) по выпуску транзисторов и интегральных схем, применяющихся практически во всех радиоприемниках и телевизорах, изготавливаемых на заводах страны, а также в космической технике. Несмотря на колоссальную загруженность, Юрий Исаевич подготовил материал, написал и успешно защитил кандидатскую диссертацию, что в условиях производства, без сомнения, может быть приравнено уже к научному подвигу.

Он автор более 100 научных трудов, авторских свидетельств и патентов на изобретения. За выдающиеся заслуги в новаторстве удостоен почетного звания «Изобретатель СССР». Почти половина из более тридцати его изобретений связана с повышением надёжности и качества мощных транзисторов и интегральных схем при одновременном снижении расхода драгоценных металлов. Он обосновал и разработал методики и технологические процессы диффузионной сварки различных материалов в конвейерных водородных печах, которые позволили резко сократить расход драгоценных материалов. Продолжая развивать это направление на фрязинском «Заводе им. 50-летия СССР» и других предприятиях, ему удалось освоить новые конструкции и технологии производства корпусов мощных транзисторов, в том числе и способы дифференцированного золочения оснований корпусов. Весь этот комплекс научно-изобретательских работ, внедрённый на заводах Фрязино, Торжка, Гомеля, Красноярска, Ростова-на-Дону, позволил за период с 1979 по 1988 г., согласно официальным документам, сократить потребление золота на 45 т и серебра на 18,2 т, что дало экономию государству 389 млн руб. Эта значимая для страны работа выдвигалась на соискание премии Совета Министров СССР, но из-за резкой смены политической обстановки в стране процесс выдвижения не был завершён.

Тридцать лет Юрий Исаевич руководил на «Истоке» в НПК-8 технологической лабораторией. За это время было выполнено большое число важных работ, тончайших экспериментов, найдены оптимальные технологические решения, в том числе и в области мелкодисперсионных материалов, которые в настоящее время стали называться наноматериалами. Вся эта огромная и ответственная работа не была бы успешно выполнена без поддержки со стороны генеральных директоров «Истока» С. И. Реброва и А. Н. Королева, главных технологов В. В. Окшина, В. Н. Батыгина, И. П. Стародубова, Б. Ф. Горбика и самоотверженной работы сотрудников «молдовановской» лаборатории.

На протяжении многих лет Ю. И. Молдованов работает в тесном контакте с Фрязинским филиалом МИРЭА. Ежегодно один-два сотрудника его лаборатории заканчивали филиал, причем защищали диплом с оценкой «отлично», а некоторые «его студенты» заканчивали институт с красным дипломом.

С большой теплотой Юрий Исаевич всегда отзывается о выдающихся ученых и руководителях, с кем ему посчастливилось работать на протяжении многих лет: генеральном директоре ПО «Электронприбор» Г. Д. Колмогорове и начальниках НПК-8 С. П. Кантюке и Ю. А. Будзинском.

За большую и плодотворную производственную деятельность Ю. И. Молдованов награжден медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина».

Большое место в его жизни занимает общественная работа. Ю. И. Молдованов – самый активный в городе общественный деятель. Он неоднократно избирался секретарем Фрязинского отделения КПРФ. В 1995 году он создал во Фрязино и является бессменным руководителем

Фрязинского отделения общества «Российские учёные социалистической ориентации» (РУСО), которое в короткие сроки стало одним из самых крупных в России. Он председатель Московского областного отделения и член Центрального совета РУСО, инициатор издания в городе газеты РУСО «Голос ученого». С большим вниманием и заботой Ю. И. Молдованов относится к подрастающему поколению, стремясь всеми своими силами сделать жизнь молодежи интереснее, отвлечь их от вредных привычек. Близко к сердцу принял Юрий Исаевич нарастающее движение по восстановлению пионерской организации, возглавил это движение, став в 1998 году председателем Фрязинской городской пионерской организации. К работе с пионерами он привлекает своих друзей и единомышленников, которых у него немало. Под руководством Ю. И. Молдованова пионеры ежегодно участвуют в торжественных мероприятиях в День Победы, выезжают на Красную Площадь в День пионерии (19 мая), проводят слеты юных пионеров, выпускают газету «Пионерская жизнь».

Юрий Исаевич всегда с большой любовью относился к своей супруге Маргарите Евгеньевне, их супружеская пара была примером для подражания. С теплотой и уважением помогает он людям. Заботится о здоровье ветеранов, не забывает поздравить с днями рождения и знаменательными датами своих сотрудников, друзей, товарищей, помогает устроить на работу молодежь, в общем, старается по мере сил и возможностей помочь всем, кто к нему обращается.

НАТАЛЬЯ ПЕТРОВНА НИ



Н. П. Ни

В 2022 году исполнилось 90 лет со дня рождения ведущего инженера НПП «Исток» Натальи Петровны Ни. В каждом своем увлечении на протяжении недолгой (для российской женщины) своей жизни Наталья Петровна Ни добивалась поразительных успехов. Уникальный разработчик сложнейших электровакуумных и твердотельных приборов СВЧ, мастер спорта СССР по альпинизму, художница с оригинальной манерой рисунка шариковой ручкой, тонкий знаток московских улочек и их истории, организатор первого во Фрязино музыкального салона – вот далеко не полный перечень ее интересов.

Ниже мы публикуем интервью с ней, взятое в 1997 году.

– ***Началось все с далеко не безоблачного детства?***

– К сожалению, да. Родилась я в 1932 г. во Владивостоке в корейской семье, но родители были православными, оттого и имена у них и у нас, детей, русские. Папа закончил Дальневосточный политехнический институт с первым его выпуском и получил специальность геолога.

Мама окончила женскую гимназию, она была одной из первых кореянок, выпускницей гимназии на Дальнем Востоке. Затем она успешно завершила учебу в политэкономическом техникуме и многие годы работала в системе театров. Советская власть на Дальнем Востоке установилась в 1923 – 1924 годах, начиналось, как казалось тогда родителям, романтическое время. Но после «романтики» наступил 1937 год... Правительство СССР готовилось к возможной войне, в том числе с Японией, и все корейское население, видимо «похожее на японцев», было выслано на специальное поселение в Среднюю Азию. Наша семья, в которой к тому времени было трое детей,

была переселена в Северный Казахстан, где половина населения была также «похожа на японцев». Возможно, И. В. Сталин считал, что «такие» на поселении быстрее найдут общий язык.

Мама, будучи смелой женщиной, поехала без паспорта в Москву «искать правду». Дошла до приемной Председателя ЦИК СССР М. И. Калинина и только там поняла, что бывают и несчастья, большие, чем у нее. Вернулась домой. Так что в Казахстане на золотых приисках и угольных рудниках прошло мое босоное детство. На поселении мы, дети, не чувствовали себя изгоями, потому что кроме коренного населения все остальные были ссыльными. Учителя – тоже из ссыльных, имели хорошее дореволюционное образование.

Учились мы прекрасно и, главное, с радостью. Хотя было тяжело, пережили и голодные годы. После окончания школы пришло время выбирать, где учиться дальше. Мама сказала: «Поезжай в Россию». Я поехала в Москву. Познакомившись с несколькими институтами, остановилась на Московском энергетическом институте (МЭИ). И факультет выбрала сама, хотя сразу и не выговоришь: «Электровакуумное и специальное приборостроение». Волновалась ужасно, но экзамены сдала хорошо. Когда вывесили списки поступивших абитуриентов, прочла: «Н. П. Ни (тут что-то не дописано)». Поняла, что это я, и была счастлива.

– ***О МЭИ шутят, что это спортивный институт с энергетическим уклоном.***

– Действительно, спортом здесь занимались все. Я увлеклась фехтованием. Была чемпионкой МЭИ, наша команда «сражалась» со всеми московскими вузами и спортивными обществами. За команду МВТУ, например, выступал будущий космонавт дважды Герой Советского Союза Алексей Елисеев.

И все же основное внимание, конечно же, мы уделяли учебе. МЭИ в ту пору был «кузницей кадров». Это был престижный институт, поскольку в нем учились дети Первого секретаря ЦК КПСС Никиты Сергеевича Хрущева, члена Политбюро ЦК КПСС М. А. Суслова, коммунистического лидера Румынии Николая Чаушеско, а также дети французского политического деятеля Марин Ли Пена. А какие в институте были преподаватели! За каждым именем раздел науки и техники, целая научная школа. Однако по-настоящему я поняла, что такое МЭИ для Советского Союза, в тот день, когда отмечали юбилей вуза и в Кремле была организована грандиозная встреча выпускников, и немногим позднее, когда профессор Игорь Всеволодович Лебедев собрал фрязинских выпускников МЭИ во фрязинском ресторане. Тогда пришел весь цвет «Истока» и других предприятий нашего города. Это было что-то!

– ***Да Вы и сами немало сделали в электронике СВЧ.***

– Это слишком громко сказано. Просто трудилась, не боясь заниматься незнакомыми вопросами. И мне везло на хороших людей, прежде всего отмечу Акулина и Боброва, которым не очень нравился мой независимый характер (все-таки я была дитя репрессированных!). Пришла я на «Исток» в отдел незабвенного лауреата Ленинской премии Владимира Александровича Афанасьева (уже в московском НИИ «Титан» он был удостоен высокого звания Героя Социалистического Труда). Этим отделом (отд. 190) после его переезда в Москву руководила лауреат Ленинской премии Вера Ивановна Мнойн. Трудно даже передать, что это были за годы в истории отечественной электроники СВЧ для сотрудников отдела В. И. Мнойн. Это было время создания первых ламп бегущей волны (ЛБВ) космического назначения, а мы – молодые специалисты, непосредственно участвовавшие в этих уникальных разработках. Конечно, мы были увлечены не только «свободными» электронами, но и художественной самодеятельностью, походами, альпинизмом. Мой последующий начальник отдела легендарный Александр Александрович Шеногин написал простую книгу по ЛБВ. Так вот, каждый новый прибор мы разрабатывали либо по американцу Пирсу, либо по фрязинцу Шеногину.

Позднее меня заинтересовали преобразователи и умножители частоты СВЧ-диапазона на основе ЛБВ. По этому направлению я закончила аспирантуру «Истока», подготовила диссертацию, но для выхода на защиту просто не хватило внедрения, поскольку начальник лаборатории кандидат технических наук Георгий Васильевич Ровенский, сам человек увлекающийся и уникальный «увлекатор», убедил меня заняться твердотельной тематикой, которую в середине 70-х годов по «призыву» выпускника МЭИ генерального директора «Истока» С. И. Реброва начали масштабными темпами развивать на «Источке». Мы одними из первых в стране стали разрабатывать приличные транзисторные усилители СВЧ, в том числе и на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ), которые потом выпускались тысячными партиями. С большим интересом я ездила на всесоюзные научные конференции, международные симпозиумы и отраслевые семинары, поскольку участие в них позволяло постоянно держать руку на пульсе развития науки и техники и знать, кто и над чем работает.

– ***А как началось Ваше увлечение альпинизмом?***

– Сначала ходили в походы. В первый горный поход по Кавказу нас повел будущий лауреат Ленинской премии Анатолий Иванович Мельников. Он как-то просто и доходчиво показал, как пройти через перевалы и выйти к морю. Немного позднее замечательный сотрудник теоретического отдела Владимир Михайлович Ипполитов, руководивший в то время легендарной секцией альпинистов во Фрязино, насчитывающей более 100 человек, убедил нас, что, для того чтобы ходить по горам, надо прежде всего этому поучиться в альплагере. Так мы – Володя Ипполитов, Ким Карашоков, Наталья Ни – и сделали. И на 20 лет я «заболела» горами. Обычно, как и на кораблях, мужчины стараются избегать брать в горы женщин. Я же оказалась «обласканной» первыми своими альпинистами и в такой атмосфере быстро росла спортивно. Больше всего любила скалолазание. Вместе со своей подругой Софьей Винокуровой мы входили в сборную команду ДСО «Труд», участвовали и не без успеха в первенствах страны.

Красноярские столбы излазили вдоль и поперек. В жизни мне удалось покорить несколько труднейших вершин. Восхождений было много, помню каждое, но есть особенно памятные: вершина «Замок» в альплагере «Узункол» на Кавказе, «Короны» на Тянь-Шане. Сурово и красиво. В горах главное – горы и люди. А подружисься в горах – это надолго.

– ***Эта красота и подтолкнула Вас к живописи?***

– Нет, когда я ходила в горы, мне это в голову не приходило. Потом, расставшись с восхождениями, вернулась к байдарочным походам по Карелии – писала дневник и тут же в тетради делала зарисовки шариковой ручкой. С нами всегда плавали дети, им рисунки нравились. А потом моя внучка Оля спросила: «Ба, а почему ты красками не рисуешь? Это же так просто». И нарисовала акварелью рисунок с перспективой. Тогда и я попробовала, теперь не могу остановиться. Рисую и делаю для себя «открытия». В какой-то момент у моих друзей, и прежде всего у дальневосточника А. К. Балыко, возникло предложение сделать выставку моих рисунков во Дворце культуры. Надо сказать, что до того в холле ДК выставлялись лишь рисунки детской студии и картины профессиональных художников. Наши же художники как-то стеснялись показывать свои произведения. Я же, благодаря поддержке директора ДК Ивана Андреевича Гусева, в 1994 году сделала вернисаж своих рисунков, в основном шариковой ручкой. Спустя год председатель союза художников Л. Г. Георгян стал организовывать периодические выставки фрязинских любителей живописи и профессиональных художников, таких, как заслуженный художник России Н. Д. Денисов, автор герба Фрязино Л. А. Ракчеев и др. В 1996 году уже в рамках этих вернисажей прошла моя еще одна выставка картин, среди которых было много акварелей.

– **Чем Вы занимаетесь сейчас?**

– Работаю на предприятии, рисую, хожу в походы, копаюсь в огороде, занимаюсь с детьми – и своими внуками, и чужими. Хочется им больше рассказать, поводить по Москве, по старым московским улочкам. Часто источником вдохновения является наша лаборатория. По предложению Г. В. Ровенского мы вместе с музыкантами из Фрязинской музыкальной школы выступали в салоне Зинаиды Волконской на Тверской. Одушевленные, организовали «по велению сердца» свой фрязинский салон в клубе «Факел». Много нового и интересного открыла нам на этих вечерах Н. С. Жаркевич, бабушка которой был военным прокурором России, дружил с И. Е. Репиным, знал Л. Н. Толстого... В жизни, оказалось, еще так много интересного!

РУДОЛЬФ МИХАЙЛОВИЧ ПОПОВ

Рудольф Попов родился в семье военнослужащего и по воле судьбы именно в День Советской Армии и Военно-Морского Флота 23 февраля 1939 г. в г. Кречевицы Новгородской области. Вместе с отцом семья «кочевала» по просторам великой нашей страны. Смена обстановки не могла не отразиться на активности юноши. Во всех школах, в которых пришлось ему учиться, он был в числе лидеров. Более того, когда семья жила в Тбилиси, молодой комсомолец Р. Попов был избран членом ЦК ЛКСМ Грузии.



Р. М. Попов

В 1957 году после окончания средней школы он поступил в Ивановский химико-технологический институт (ИХТИ). В студенческие годы в полной мере раскрылся многогранный талант Р. М. Попова. Вместе с многомиллионной армией молодежи он выезжал осваивать целину, где руководил студенческим отрядом ИХТИ. В институте организовал киностудию, в которой выступал в качестве сценариста, режиссера, оператора и актера. Руководил студенческим театром эстрадных миниатюр. Участвовал в выступлениях студенческой команды зарождавшегося в то время клуба веселых и находчивых (КВН). Активную творческую деятельность гармонично сочетал с учебной. Выступал с докладами на научно-технических конференциях, выставлял экспонаты своих работ на студенческих выставках. Для одного из лучших выпускников ИХТИ были открыты двери аспирантуры, но Р. М. Попов выбрал путь практического использования полученных знаний и в 1962 году по распределению приехал во Фрязино и поступил работать на «Исток» в катодный отдел 240.

Кипучая деятельность предприятия, в том числе и катодного отдела, внимательное и дружелюбное отношение к молодежи корифеев катодной техники захватили молодого специалиста. Он много творчески работал, изобретал. В то же время продолжал находиться под влиянием раскрученных в студенческие годы оборотов общественной деятельности. Его наполненная активностью комсомольская биография привлекла внимание дирекции предприятия, горкома ВЛКСМ и комсомольцев «Истока». На комсомольской конференции Рудольфа Попова избрали секретарем комитета ВЛКСМ «Истока».

Р. М. Попов начал с организации Фрязинского академического комического театра (ФАКТ), но вскоре поставил перед руководством предприятия и города масштабную задачу – создать высококлассную команду КВН г. Фрязино, такую, которая могла бы достойно выступать в состязаниях «КВН-щиков» на уровне всей страны. Несмотря на то, что он находил поддержку у руководителей всех рангов, многие с большим сомнением относились к задумке молодого комсомольского секретаря. А он, взяв на себя не только всю ответственность за начатое дело, но и всю организацию нового проекта, включая непосредственное руководство командой на сцене в роли ее капитана, довел задумку до своего логического завершения. В 1965 году команда КВН г. Фрязино выиграла Всесоюзные соревнования и стала едва ли не самой популярной командой КВН в стране. Фильмы фрязинцев, снятые на высоком профессиональном уровне под руководством и при непосредственном участии Р. М. Попова, в те годы смотрелись на одном дыхании, да и сегодня не потеряли своей актуальности и уникального тонкого юмора.

На волне всесоюзной славы Рудольф Попов взялся за еще одну масштабную задачу – силами молодежи и, в первую очередь, для молодежи построить дом. Ударная комсомольская стройка завершилась беспрецедентным успехом – «Домом молодоженов».

А лидер молодежи Рудольф Попов был во власти уже других идей. В помещении клуба «Факел» и ресторана «Фрязино» по его инициативе создается молодежное кафе «Эврика», в клубе начинает работу театральная студия, которая открывает для фрязинцев много талантливых актеров из числа сотрудников предприятия. Сам Рудольф Михайлович – в центре жизни студии: пишет сценарии, выступает в качестве режиссера и актера. Апофеозом этой его деятельности является поездка по путевке ЦК ВЛКСМ агитбригады по городам Дальнего Востока.

В 1967 году он назначается начальником кино-фотолаборатории в отделе 100. Дружный коллектив под руководством Р. М. Попова начал проводить объемные по масштабам фото- и киносъемки научных и технических достижений предприятия. Это была, по существу, первоклассная реклама выпускаемых предприятием изделий электронной техники. Его фильмы неоднократно демонстрировались на коллегии Министерства электронной промышленности СССР. Разработанная под его руководством оригинальная проекционная аппаратура была удостоена серебряной медали ВДНХ, а сам Рудольф Михайлович был награжден медалью «За трудовую доблесть».

Несмотря на большую производственную деятельность, Рудольф Михайлович ни на минуту не прекращал свои любимые занятия. Огромным успехом у зрителя пользовался спектакль «1917-й», постановку которого по собственному сценарию осуществил Р. Попов с сотрудниками НПК-17. Его документальные фильмы о родном предприятии и городе Фрязино, такие, как «Земляки», «Мой город» и другие, сделаны на высоком профессиональном уровне и смотрятся на одном дыхании. В них каждый компонент фильма, будь то сценарий, техника съемки или дикторский текст, отточен до совершенства. К этому Р. М. Попов постоянно стремился. Работая, например, над документальными фильмами, он осуществил идею использовать для показа фотографий слайды, техника которых в те годы достигла совершенства. Идея создания полиэкранных слайд-фильмов захватила Рудольфа Михайловича, и к середине 80-х годов он воплотил ее в жизнь в фильмах «Союз нерушимый», «Этапы большого пути» и других уникальных работах. Все они имели большое воспитательное значение и потому вошли органично в мощную экспозицию Музея предприятия, который был создан при его самом непосредственном участии и который он любил и берег, чтобы воссоздать после двух десятилетий перестройки и реформ, потрясших нашу великую страну.

Рудольф Михайлович обладал писательским талантом. Он подготовил обширный материал и выпустил две великолепные книги по истории «Истока»: «От НИИ-160 до НПП «Исток». Часть 1. Так начинался «Исток» (1941 – 1951 гг.)» и «Часть 2. Холодная война (1950 – 1960 гг.)». Р. М. Попов до конца своих дней продолжал работать над третьей частью запланированной трилогии.

Настоящий талант талантлив во всем. Это целиком относилось к Р. М. Попову. Мы не переставали восхищаться его душевной молодостью, неутомимым поиском новых идей в различных областях человеческой деятельности, огромным трудолюбием, стремлением завершать начатое им дело, причем на высоком современном уровне. Всей своей жизнью он подтверждал свою любовь к предприятию и его славным традициям, к наукограду Фрязино и его жителям, заставил нас еще раз глубже осознать важность исторических этапов в деятельности «Истока», его легендарных основоположников, выдающихся руководителей, простых и вместе с тем великих тружеников.

Наша память всегда будет хранить облик Рудольфа Михайловича Попова – уникального «истоковца» с многогранным талантом, человека доброго и отзывчивого, всем своим сердцем любящего «Исток» и наукоград Фрязино.

Статья поступила 17 января 2022 г.

=== **НОВЫЕ КНИГИ** ===

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

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

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

≡≡≡ **НОВЫЕ КНИГИ** ≡≡≡

ФАДКЕ АРУНГ., ТОРП ДЖЕЙМС С. Синхронизированные векторные измерения и их применение. Второе издание. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 320 с.

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

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

РЭНДАЛ У. БИАРД., ТИМОТИ У. МАКЛЭЙН. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 312 с.

Это издание посвящено управлению беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Акцент в книге делается на системы повышения устойчивости управления. Других изданий, которые бы охватывали вопросы моделирования динамики летательных аппаратов, разработки автопилотов (решающих задачи «низкого уровня»), оценки состояния БЛА, а также расчета траектории полета (задачи «высокого уровня»), в настоящее время нет.

Целевой аудиторией являются студенты, которые прошли подготовку в области электротехники, компьютерной техники, машиностроения и информатики и прослушали вводный курс по системам управления с обратной связью или робототехнике. Также книга будет интересна инженерам в области авиации, которые заинтересованы во вводном курсе в автономные системы.

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

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

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

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

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

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

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

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

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

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

ЗАКАЗ

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

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.

Переводчик Барабанова Л.В.

Компьютерная верстка Земскова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.03.2022 г.

Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.

г. Фрязино

Усл. п. л. 13,0

Уч.-изд. л. 13,5

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

Подписной индекс 36292



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2022, вып. 1(552), с. 106