ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (544)

2020

1(544).indd 1 18.03.2020 10:56:32

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(544) **2020** **Издается с 1950 г.**

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

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, ФГУП «МНИИРИП», г. Мытищи;
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;
д.т.н. **С.П. Морев**, АО «НПП «Торий», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

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

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2020 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(544) **2020** **Founded in 1950**

Editor-in-chief

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

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **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;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, FSUE «MNIIRIP», Mytischi;
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;
D.T.Sc. **S.P. Morev**, JSC «RPC «Torij», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИ № 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», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Электровакуумные приборы

Симонов К.Г., Юнаков А.Н., Ключников Н.А., Мамонтов А.В., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И., Рыжов В.А., Цыберт А.О., Поливникова О.В., Галина Н.М., Соколов А.М., Голеницкий И.И., Морозов О.А. – Достигнутые результаты и пути развития разработок сверхмощных клистронов при существенно пониженных рабочих напряжениях..... 6

Быковский С.В., Будзинский Ю.А., Калина В.Г., Котов В.Е., Николаев С.В., Саврухин О.А. – Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров..... 12

Журавлев С.Д., Шестеркин В.И., Целиков Д.И., Горбачева М.В., Бессонов Д.А. – Формоустойчивость сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением..... 22

Технология и материаловедение

Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеенко О.С., Павлов В.Ю., Славовский Д.Н., Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А., Мальцев П.П. – Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона..... 26

Жабин Г.А., Архипов Д.Ю., Седловец Д.М., Темирязева М.П. – Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов..... 46

Твердотельная электроника

Данилин Н.С., Димитров Д.М. – О проблеме выпуска качественных отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре..... 56

Уткин М.Н. – Синтез и исследование характеристик макета частотного компаратора для оценки нестабильности частоты бортовых квантовых стандартов частоты..... 59

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Власова И.И., Михальчик Е.В., Полников И.Г., Щелконогов В.А., Чеканов А.В.– Изучение механизма действия микроволнового излучения в КВЧ-диапазоне на клетки цельной крови..... 72

Краткие сообщения

Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А., Сизоненко М.И. – Связь распределения ионизированных частиц в полупроводнике с треугольником Паскаля..... 80

Экономика

Джамалдинова М.Д., Курдюкова Н.О., Вершинин А.А. – Стратегия-2030 как путь развития цифрового общества в современной России..... 88

История

Балыко Т.А., Балыко А.К., Сизоненко М.И. – Ученые «Истока» – ветераны Великой Отечественной войны..... 94

1(544).indd 4 18.03.2020 10:56:32

CONTENTS

Electrovacuum devices

Simonov K.G., Yunakov A.N., Klyuchnikov N.A., Mamontov A.V., Perminov I.G., Pravdikovskaya G.I., Ryzhov V.A., Tsybert A.O., Polivnikova O.V., Galina N.M., Sokolov A.M., Golenitsky I.I., Morozov O.A. – The achieved results and the ways of development for high-power klystrons at significantly reduced operating voltages..... 6

Bykovsky S.V., Budzinsky Yu.A., Kalina V.G., Kotov V.E., Nikolaev S.V., Savrukhin O.A. – Cyclotron protective devices: recovery time of parameters..... 12

Zhuravlev S.D., Shesterkin V.I., Tselikov D.I., Gorbacheva M.V., Bessonov D.A. – Stability of shape of high-density pyrolytic graphite grid structures under the influence of vibrational and impact loads with high acceleration..... 22

Technology and material science

Fedorov Yu.V., Bugaev A.S., Pavlov A.Yu., Gnatyuk D.L., Matveyenko O.S., Pavlov V.Yu., Slapovsky D.N., Tomosh K.N., Enyushkina E.N., Galiev P.P., Maitama M.V., Zuev A.V., Krapukhin D.V., Gamkrelidze S.A., Maltsev P.P. – Peculiarities of manufacturing technology and development of microwave MICs based on gallium nitride for millimeter range..... 26

Zhabin G.A., Arkhipov D.Yu., Sedlovets D.M., Temiryazeva M.P. – Parameters of ion-plasma deposition of oxide coatings and emission properties of sputter-deposited cathodes..... 46

Solid-state electronics

Danilin N.S., Dimitrov D.M. – On the issue of producing high-quality domestic microcircuits for use in space equipment..... 56

Utkin M.N. – Synthesis and implementation of frequency comparator breadboard used for stability measurement of space vehicle atomic frequency standards..... 59

Medical electronics

Kazarinov K.D., Vlasova I.I., Mikhalchik E.V., Polnikov I.G., Shchelkonogov V.A., Chekanov A.V. – Studying the mechanism of microwave radiation action on whole blood cells in EHF-range..... 72

News in brief

Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A., Sizonenko M.I. – Relationship between the distribution of ionized particles in semiconductor with a Pascal triangle..... 80

Economics

Dzhamaldinova M.D., Kurdyukova N.O., Vershinin A.A. – Strategy-2030 as a way to develop a digital society in modern Russia..... 88

History

Balyko T.A., Balyko A.K., Sizonenko M.I. – Scientists of «Istok» – Veterans of the Great Patriotic War.. 94

1(544).indd 5 18.03.2020 10:56:32

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.623

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ РАЗРАБОТОК СВЕРХМОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ ПРИ СУЩЕСТВЕННО ПОНИЖЕННЫХ РАБОЧИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

К. Г. Симонов, А. Н. Юнаков, Н. А. Ключников, А. В. Мамонтов, И. Г. Перминов, Г. И. Правдиковская, В. А. Рыжов, А. О. Цыберт, О. В. Поливникова, Н. М. Галина, А. М. Соколов, И. И. Голеницкий

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

О. А. Морозов

ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Рассмотрены возможные пути создания сверхмощных импульсных клистронов при существенно пониженных рабочих напряжениях, заключающиеся в разработке принципов конструирования клистронов с магнетронной пушкой и анодной модуляцией, сверхмощных клистронов с многолучевой магнетронной пушкой и анодной модуляцией, а также с модуляцией по управляющему электроду и с несколькими выводами СВЧ-энергии. Приведены результаты испытаний клистрона с магнетронной пушкой и анодной модуляцией. Принципы создания однолучевых и многолучевых клистронов с магнетронной пушкой и анодной модуляцией, а также многолучевых клистронов с модуляцией по управляющему электроду являются новыми, оригинальными, не имеющими аналогов в мире.

КС: сверхмощный клистрон, существенно пониженное рабочее напряжение, пути развития

THE ACHIEVED RESULTS AND THE WAYS OF DEVELOPMENT FOR HIGH-POWER KLYSTRONS AT SIGNIFICANTLY REDUCED OPERATING VOLTAGES

K. G. Simonov, A. N. Yunakov, N. A. Klyuchnikov, A. V. Mamontov, I. G. Perminov, G. I. Pravdikovskaya, V. A. Ryzhov, A. O. Tsybert, O. V. Polivnikova, N. M. Galina, A. M. Sokolov, I. I. Golenitsky

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

O. A. Morozov

CJSC «RPE «Magratep», Fryazino

Possible ways of creating high-power pulsed klystrons at significantly reduced operating voltages are considered, which consist in developing the principles of designing klystrons with a magnetron gun and anode modulation, super-power klystrons with a multi-beam magnetron gun and anode modulation, as well as with modulation on control electrode and with several outputs of microwave energy. The test results of the klystron with a magnetron gun and anode modulation are presented. The principles of creating single-beam and multi-beam klystrons with a magnetron gun and anode modulation, as well as multi-beam klystrons with modulation on control electrode are new, original and have no analogs in the world.

Keywords: super-power klystron, significantly reduced operating voltage, ways of development

1(544).indd 6 18.03.2020 10:56:33

До настоящего времени основное применение сверхмощных импульсных клистронов – ускорение заряженных частиц в ускорителях различного назначения.

В последние годы значительный интерес проявляется к сверхмощным импульсным клистронам в связи с возможностью построения на их основе современных систем специального назначения.

Разработкой сверхмощных клистронов для ускорителей за рубежом занимается ряд фирм, основные из них SLAC и CPI (США), THALES (Франция) и Toshiba (Япония). Существенный прогресс в разработке сверхмощных клистронов наблюдается в последние годы в КНР. Достигнуты существенные результаты, получены импульсные мощности в промышленных образцах клистронов 5…65 МВт и в экспериментальных образцах до 150 МВт.

Так как клистроны однолучевые, высокие значения мощностей в них достигаются за счёт высокого анодного напряжения. Так, в 65-МВт клистроне анодное напряжение составляет 350 кВ, а в 150-МВт – 535 кВ (рис.1), то есть источники питания для них представляют собой громоздкие сооружения.

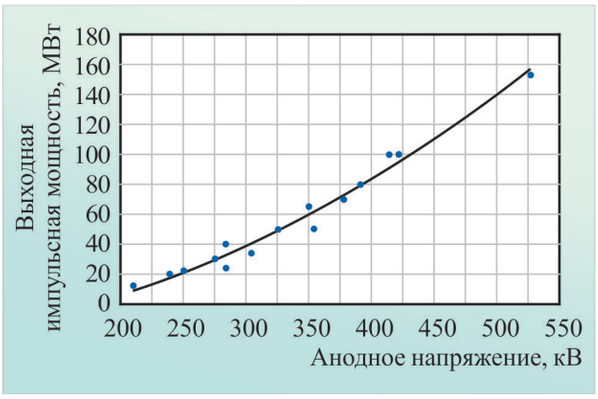


Рис. 1. Достигнутые уровни выходной мощности сверхмощных клистронов

В настоящее время в России (в АО «НПП «Исток» им. Шокина») создана сверхмощная цепочка усилительных однолучевых клистронов специального назначения с выходным клистроном КИУ-257 (рис. 2), в котором применен новый высоковольтный керамический изолятор.

Рис. 2. Сверхмощный клистрон КИУ-257

Кроме того, в АО «НПП «Исток» им. Шокина» выпускается сверхмощная цепочка усилительных однолучевых клистронов КИУ-15М – КИУ-17 в диапазоне 1,8 ГГц с выходной импульсной мощностью 20 МВт, средней мощностью 18 кВт и напряжением 250 кВ [1]. Клистроны КИУ-15М – КИУ-17 надежно работают в круглосуточном режиме в ряде ускорительных комплексов в России и Польше, их долговечность составляет более 5 тыс. ч.

1(544).indd 7 18.03.2020 10:56:33

Клистроны КИУ-15М и КИУ-257 являются самыми мощными клистронами в России.

В перспективе для повышения функциональных возможностей систем специального назначения потребуется создание надежно работающих сверхмощных клистронов с выходной импульсной мощностью 30…100 МВт. В обычных однолучевых клистронах для получения таких мощностей требуются напряжения 290…450 кВ. Отметим, что 30-МВт клистрон, который требует напряжения 290…300 кВ, еще можно выполнить в однолучевом варианте. Дальнейшее увеличение импульсных мощностей за счет увеличения анодного напряжения считаем неэффективным решением, так как специальные системы, в которых клистроны будут применены, становятся громоздкими и не очень надежными. Кроме того, при напряжениях более 300 кВ системы требуют сложных и громоздких средств защиты от рентгеновского излучения.

Другой путь – это новое прорывное решение, предложенное в АО «НПП «Исток» им. Шокина», которое заключается в создании однолучевых клистронов с магнетронной пушкой и анодной модуляцией электронного пучка, а также многолучевых клистронов с анодной модуляцией электронного пучка и модуляцией электронного пучка по управляющему электроду [2–6].

В предлагаемых клистронах с магнетронной пушкой эмитирующая поверхность катода имеет форму боковой поверхности усеченного конуса малого диаметра (порядка 30 мм), в отличие от классических сверхмощных клистронов, где диаметры катодов достигают 110 мм. В этом случае катод имеет протяженную эмитирующую поверхность в продольном направлении клистрона, при сравнительно небольшом наружном диаметре как самого катода, так и электронной пушки.

Применение в клистроне магнетронной пушки позволяет формировать полый электронный пучок с высоким первеансом, порядка $(3…5)\cdot10^{-6}$ $А/В^{3/2}$ вместо $(1,5...2)\cdot10^{-6}$ $А/В^{3/2}$ в обычных клистронах, что существенно понижает величину анодного напряжения и, следовательно, повышает электрическую прочность клистрона.

Однолучевые приборы мегаваттных уровней с магнетронной пушкой и модуляцией по управляющему электроду, т. е. с триодной магнетронной пушкой, были созданы в России (АО «НПП «Исток» им. Шокина») и за рубежом (фирма Litton, США). В этих приборах на анод подаётся постоянное напряжение, а импульсное напряжение подаётся на управляющий электрод. Для получения сверхбольших мощностей необходимо подать на анод клистрона постоянное напряжение 200 кВ и выше. При таких постоянных напряжениях трудно защитить прибор от мощных высоковольтных пробоев и он становится ненадёжным.

В патенте РФ № 2449467 [3] (АО «НПП «Исток» им. Шокина») рассматривается клистрон с магнетронной пушкой и анодной модуляцией электронного потока, т. е. когда на клистрон подается только импульсное анодное напряжение.

Так как клистронов с диодной магнетронной пушкой в мире не существует, то вначале нами проведены теоретические исследования, направленные на изучение возможности создания однолучевых клистронов с магнетронной пушкой при анодных напряжениях 150…200 кВ.

В результате были рассмотрены вопросы конструирования электронно-оптической системы, электродинамической системы клистрона, изучены вопросы устойчивости электронных пучков, электропрочности прибора, был проведен расчет магнитно-фокусирующей системы с однородным магнитным полем. На рис. 3 приведен расчет электронно-оптической системы клистрона с магнетронной пушкой при анодном напряжении 200 кВ. На рис. 4 представлены результаты расчета магнитного поля магнитно-фокусирующей системы клистрона.

Сконструирована и изготовлена магнитно-фокусирующая система (рис. 5), обеспечивающая однородное магнитное поле 0,2 Тл на длине 500 мм при общей длине соленоида 800 мм.

1(544).indd 8 18.03.2020 10:56:33

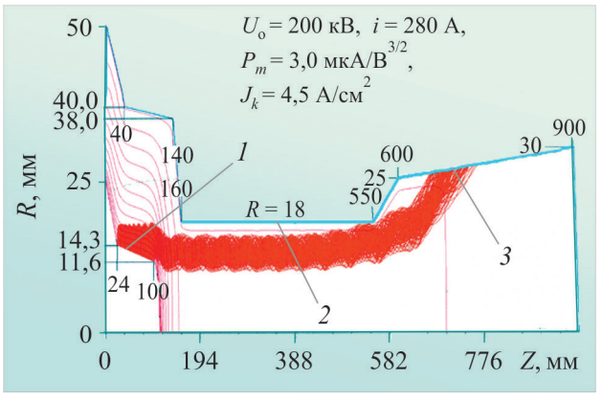


Рис. 3. Результаты расчета электронно-оптической системы клистрона с диодной магнетронной пушкой:
1 – эмитирующая поверхность катода; *2* – пролетный канал; *3* – область коллектора

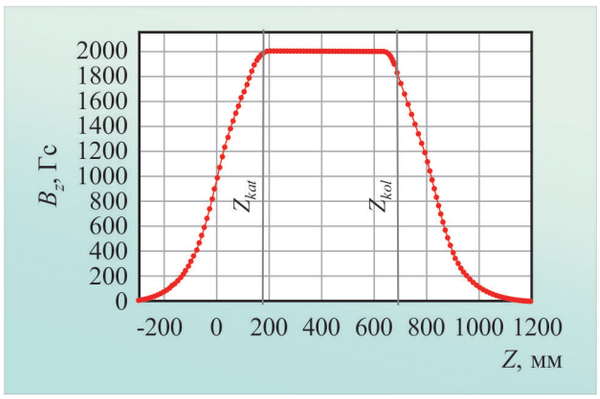


Рис. 4. Распределение магнитного поля в магнитно-фокусирующей системе

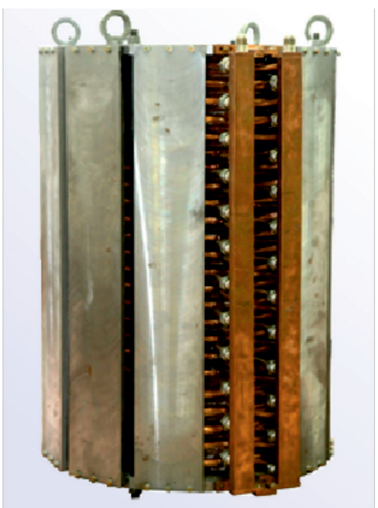


Рис. 5. Изготовленная магнитно-фокусирующая система

Для проверки работоспособности таких клистронов был изготовлен образец клистрона с диодной магнетронной пушкой (рис. 6). При этом резонаторная система клистрона была заимствована от клистрона КИУ-15М, работающего при анодном напряжении 250 кВ. Такая резонаторная система неоптимальна для сконструированного клистрона с магнетронной пушкой при пониженных рабочих напряжениях 150 кВ, но она была необходима для изучения работоспособности клистрона.

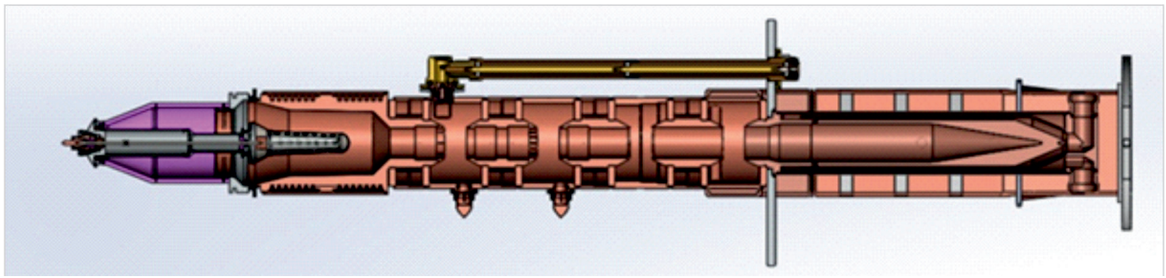
В результате проведенных экспериментальных исследований клистрона с магнетронной пушкой были получены следующие результаты.

Параметры клистрона с магнетронной пушкой

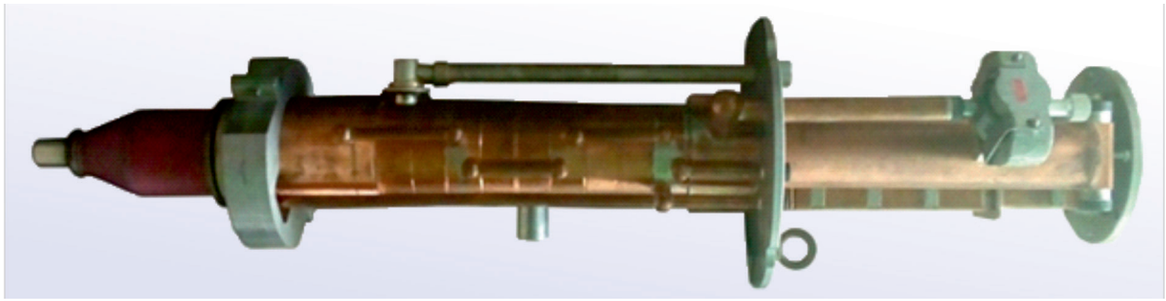
Рабочая частота	1818 МГц
Мощность выходная импульсная	8,5 МВт
Мощность выходная средняя	8,5 кВт
Анодное напряжение	150 кВ
Анодный ток	190 А
Длительность импульсов	6 мкс
Первеанс	$3{,}27\cdot10^{-6}$ А/В$^{3/2}$
Коэффициент усиления	30 дБ
КПД	30 %

Испытания при анодном напряжении свыше 150 кВ не проводились, так как существующий стенд динамических испытаний (линейный модулятор) не позволил поднять напряжение более 150 кВ при указанном высоком первеансе ($3{,}27\cdot10^{-6}$ А/В$^{3/2}$).

1(544).indd 9 18.03.2020 10:56:34



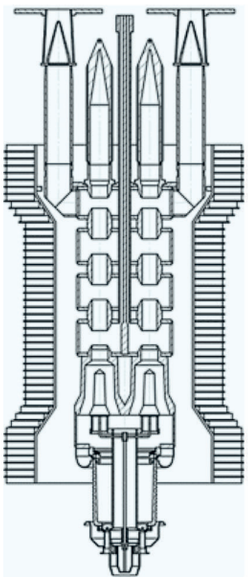
а)



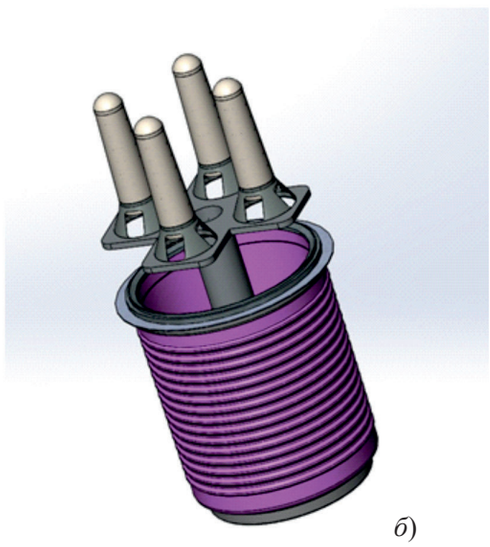
б)

Рис. 6. Конструкция клистрона с магнетронной пушкой (*а*)
и фотография созданного клистрона с рабочим напряжением 150 кВ (*б*)

Дальнейшее развитие клистронов с магнетронной пушкой заключается в создании многолучевой конструкции с анодной модуляцией электронного луча, также предложенной на «Истоке» [5]. Так, например, при четырехлучевой конструкции прибора (рис. 7) можно обеспечить выходную мощность более 50 МВт при напряжении 170…180 кВ. В обычных классических однолучевых клистронах это напряжение составляет 330…340 кВ.



а)



б)

Рис. 7. Схематическое изображение четырехлучевого клистрона с диодной магнетронной пушкой в соленоиде (*а*) и модель катодной ножки четырехлучевого клистрона (*б*)

1(544).indd 10 18.03.2020 10:56:34

Предварительные исследования показывают, что в четырехлучевом клистроне с диодной магнетронной пушкой для получения выходной импульсной мощности 100 МВт потребуется анодное напряжение 240…250 кВ. При этом на выходе клистрона должны быть установлены четыре вывода СВЧ-мощности. Это позволит повысить надежность работы каждого вывода СВЧ-мощности и всего клистрона в целом, так как через каждое волноводное металлокерамическое окно будет передаваться мощность 25…30 МВт. Кроме того, будет обеспечена равномерная нагрузка выходного резонатора, что должно привести к высоким величинам КПД клистрона.

Другой путь получения высоких величин импульсных мощностей при существенно пониженных анодных напряжениях, предложенный в [3], заключается в следующем: разместив четыре однолучевых клистрона в едином соленоиде с однородным магнитным полем и сложив их выходные мощности с помощью двухканальных сумматоров, можно достичь выходной импульсной мощности 50 МВт при напряжениях 170…180 кВ.

Весьма интересным является также клистрон с многолучевой магнетронной пушкой и модуляцией электронного пучка по управляющему электроду, то есть с триодной электронной пушкой (АО «НПП «Исток» им. Шокина») [6]. В этом случае для обеспечения надёжной работы клистрона целесообразно на его анод подавать постоянное напряжение не выше 200 кВ. Тогда выходную импульсную мощность 50 МВт можно получить при постоянных анодных напряжениях 170…180 кВ и импульсных напряжениях, подаваемых на управляющий электрод, около 60 кВ.

Принципы создания однолучевых и многолучевых клистронов с магнетронной пушкой и анодной модуляцией, а также многолучевых клистронов с модуляцией по управляющему электроду являются новыми, оригинальными, не имеющими аналогов в мире. В случае их реализации можно достичь в перспективе прорыва в сверхмощном СВЧ-приборостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисов, А. А.** Сверхмощные импульсные клистроны и многочастотные СВЧ электровакуумные приборы. Достигнутые характеристики, перспективы разработки / А. А. Борисов, А. В. Галдецкий, А. Н. Королев, А. В. Мамонтов, В. А. Рыжов, К. Г. Симонов, О. А. Морозов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Часть II. – 2013. – Вып. 4 (519). – С. 26 – 36.

2. **Мамонтов, А. В.** Перспективы развития сверхмощного клистроностроения / А. В. Мамонтов, И. Г. Перминов, К. Г. Симонов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1(528). – С. 31 – 40.

3. **Патент 2449467 РФ.** Сверхмощное СВЧ-устройство / К. Г. Симонов. – Опубл. 2012, Бюл. № 12; приоритет 26.04.2011.

4. **Simonov, K.** Principles for design of high power pulsed microwave devices and devices with low operating voltage for accelerators / K. Simonov, A. Borisov, I. Golenitskiy, A. Mamontov, A. Yunakov, O. Morozov // Proceedings of IPAC 2014, Dresden, Germany. – P. 2273 – 2275.

5. **Патент 2554106 РФ.** Сверхмощный многолучевой СВЧ-прибор клистронного типа / К. Г. Симонов. – Опубл. 2015, Бюл. № 18; приоритет 30.12.2013.

6. **Патент 2562798 РФ.** Сверхмощный СВЧ-прибор клистронного типа / А. А. Борисов, А. В. Мамонтов, К. Г. Симонов. – Опубл. 2015, Бюл. № 25; приоритет 30.05.2014.

Статья поступила 19 ноября 2019 г.

1(544).indd 11 18.03.2020 10:56:34

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА: ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

С. В. Быковский, Ю. А. Будзинский, В. Г. Калина, В. Е. Котов, С. В. Николаев, О. А. Саврухин

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

Рассмотрены физические особенности процесса восстановления прохождения сигнала в циклотронных защитных устройствах СВЧ-диапазона после окончания мощного входного импульса, приведена оценка времени восстановления, представлены экспериментальные результаты соответствующих измерений.

КС: защитное устройство СВЧ, циклотронное защитное устройство, время восстановления параметров, быстрая циклотронная волна

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICES: RECOVERY TIME OF PARAMETERS

S. V. Bykovsky, Yu. A. Budzinsky, V. G. Kalina, V. E. Kotov, S. V. Nikolaev, O. A. Savrukhin

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

The physical features of the signal transmission recovery process in microwave cyclotron protective devices after the end of a powerful input pulse are considered, the recovery time is estimated, and the experimental results of the corresponding measurements are presented.

Keywords: microwave protective device, cyclotron protective device, recovery time of parameters, fast cyclotron wave

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклотронно-защищенные комплексированные усилители (ЦЗКУ) используются в качестве входного каскада приемников многих современных радиолокационных систем. Это обусловлено исключительным набором параметров этих устройств, в том числе отсутствием пика просачивающейся мощности по переднему фронту поступающего на вход ЦЗКУ мощного СВЧ-импульса и крайне малым временем восстановления прохождения сигнала после окончания входного импульса.

ЦЗКУ, в составе циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) и малошумящего транзисторного усилителя (МШУ), выполняет функции защиты МШУ от входной СВЧ-мощности высокого уровня и усиления полезного сигнала с малым коэффициентом шума. Переключение ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты и обратно происходит автономно, без подачи управляющего сигнала, в зависимости от уровня поступающей на вход устройства СВЧ-мощности [1–3].

Время включения режима защиты и время восстановления параметров устройства после окончания импульса входной мощности – основные временны́е параметры СВЧ защитных устройств (ЗУ).

1(544).indd 12 18.03.2020 10:56:34

Для распространенных в настоящее время газоразрядных и неуправляемых полупроводниковых ЗУ время включения режима защиты является принципиально важной характеристикой. За то время пока газоразрядное или полупроводниковое ЗУ переходит из режима пропускания в режим защиты, существенная часть входной СВЧ-энергии поступает на выход ЗУ, создавая пик просачивающейся мощности/энергии, способный вывести из строя или привести к перегрузке последующие чувствительные СВЧ-каскады приемника [4, 5].

В ЦЗУ пик просачивающейся мощности принципиально отсутствует. Входной и выходной резонаторы ЦЗУ конструктивно разнесены, и передача СВЧ-сигнала с входа на выход осуществляется посредством электронного луча в пределах его ограниченной энергетической емкости. Функциональная схема ЦЗУ приведена на рис. 1, конструкция резонаторов и физические особенности перехода ЦЗУ в режим защиты приведены в работе [6].

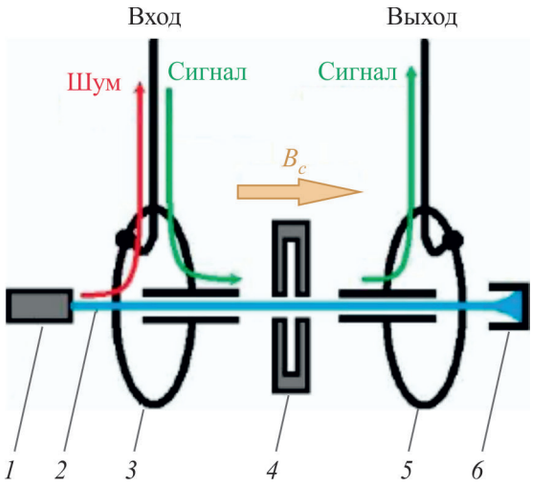


Рис.1. Функциональная схема ЦЗУ в режиме пропускания:
1 – электронная пушка; *2* – электронный луч; *3* – входной резонатор; *4* – разделительная секция; *5* – выходной резонатор; *6* – коллектор; B_c – продольное однородное магнитное поле, обеспечивающее циклотронный резонанс электронов на рабочей частоте

При малом уровне входного сигнала, во входном резонаторе в режиме пропускания в электронном луче возбуждается быстрая циклотронная волна (БЦВ), переносящая энергию сигнала. Одновременно из луча выводится шумовая БЦВ, возникшая на нагретом катоде, что способствует снижению уровня собственных шумов ЦЗУ. В выходном резонаторе сигнал выводится из БЦВ, поступая далее на вход МШУ.

При уровне входной СВЧ-мощности, составляющем несколько милливатт, электронный луч во входном резонаторе разрушается, оседая на стенках электронного зазора между ламелями резонатора. Связь входа ЦЗУ с выходом через электронный луч прекращается, устройство переходит в режим защиты с развязкой между входом и выходом более 60 дБ. Конструкция разделительной секции, установленной между входным и выходным резонаторами (см. рис. 1, поз. *4*), обеспечивает высокое затухание СВЧ-мощности при отсутствии электронного луча в режиме защиты.

1(544).indd 13 18.03.2020 10:56:34

2. ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЗУ

Рассмотрим в качестве основного случай, когда задний фронт (срез) импульса СВЧ-мощности, воздействующей на вход ЦЗУ, имеет нулевую длительность, а входной и выходной тракты ЦЗУ не имеют дополнительного резонансного контура, предназначенного для расширения рабочей полосы частот.

Восстановление режима пропускания ЦЗУ после окончания импульса мощности высокого уровня на входе можно разделить по времени на несколько этапов.

Этап 1. Время снижения СВЧ-мощности во входном резонаторе от пикового уровня до минимального, при котором в зазоре резонатора электроны луча еще отсутствуют (резонатор не нагружен электронным лучом) – продолжается режим защиты.

Этап 2. Время снижения мощности во входном резонаторе от уровня, при котором все электроны луча оседают на стенках входа в резонатор и зазора между ламелями (окончание этапа 1), до уровня верхней границы линейности ЦЗУ [6] – уровня максимальной входной мощности, при котором все электроны луча проходят через зазор между ламелями входного резонатора без оседания – переход из режима защиты в режим пропускания.

Этап 3. Время снижения мощности во входном резонаторе от верхней границы линейности ЦЗУ до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ (минимального уровня мощности сигнала, уверенно различимого над собственными шумами ЦЗУ) – работа в режиме пропускания.

Этап 4. Задержка передачи сигнала с входа на выход ЦЗУ – время пролета электронов луча между входным и выходным резонаторами. После возбуждения лучом выходного резонатора ЦЗУ сигнал практически одномоментно поступает на выход устройства.

Рассмотрим процессы в резонаторе на протяжении этапа 1. Электромагнитная энергия, поступающая с входа ЦЗУ, взаимодействует с электронами луча на входе в зазор резонатора и приводит к их моментальному оседанию на ламелях и входном диске, закрывающем резонатор. Затраты СВЧ-энергии при этом незначительны по сравнению с уровнем поступающей мощности.

Электронный поток в зазоре входного резонатора на этапе 1 фактически отсутствует. Резонатор нагружен активной проводимостью собственных потерь и проводимостью внешней нагрузки через входную линию.

Исходя из того, что объемный резонатор ЦЗУ структурно близок к резонатору с сосредоточенными параметрами (определяющая часть емкости резонатора, как параллельного контура, сосредоточена в зазоре между ламелями), проведем оценку времени снижения СВЧ-мощности в резонаторе от пикового уровня до уровня, при котором электроны луча еще не нагружают резонатор, используя классическую теорию электрических колебаний [7].

Колебания напряжения u с амплитудой U_m на конденсаторе параллельного контура изменяются со временем t в соответствии со следующим выражением:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ – круговая частота периодических колебаний в резонаторе; ω_0 – частота собственных колебаний ненагруженного резонатора; α – коэффициент затухания колебаний; амплитуда колебаний U_m и фаза φ постоянные, которые определяются начальными условиями.

Рассмотрим экспоненциальное снижение амплитуды колебаний в контуре от начального уровня с амплитудой U_1 до конечного уровня с амплитудой U_2:

$$U_2 = U_1 e^{-\alpha t}. \quad (2)$$

1(544).indd 14 18.03.2020 10:56:35

Из чего следует:

$$t = \frac{1}{\alpha}\ln\frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\alpha}\ln\sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \frac{1}{2\alpha}\ln\frac{P_1}{P_2}, \quad (3)$$

где мощность $P_1 \sim U_1^2$, $P_2 \sim U_2^2$.

Коэффициент затухания α связан с логарифмическим декрементом затухания δ и добротностью Q контура:

$$\alpha = \delta/T = \delta f = \frac{\pi}{Q} f, \quad (4)$$

где T – период и f – частота колебаний контура; Q – добротность контура.

Из (3) и (4) следует:

$$t = \frac{Q}{2\pi f}\ln\frac{P_1}{P_2}, \quad (5)$$

где t – время затухания колебаний в контуре от уровня мощности P_1 до уровня P_2.

Резонатор, не нагруженный электронным лучом, не согласован с внешней линией, и часть падающей на резонатор СВЧ-мощности отражается от него. Определим долю поступившей в резонатор СВЧ-мощности (P_1 в выражении (5)) относительно полной входной мощности $P_{\text{вх.и}}$, падающей на резонатор во время импульса:

$$P_1 = P_{\text{вх.и}}\left(1 - K_{\text{отр}}\right) = P_{\text{вх.и}}\left(1 - \frac{(\sigma-1)^2}{(\sigma+1)^2}\right) = P_{\text{вх.и}}\frac{4\sigma}{(\sigma+1)^2}, \quad (6)$$

где $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения по мощности; σ - «холодный» (без электронного луча) КСВН резонатора.

Вычислим по выражениям (5), (6) время затухания СВЧ-мощности во входном резонаторе до уровня P_2, при котором ток луча еще отсутствует во входном резонаторе (**этап 1**). Используем типичные значения «холодного» КСВН входного резонатора ЦЗУ $\sigma \approx 30$ и добротности $Q \approx 25$, определяемой собственными потерями в резонаторе и связью «холодного» резонатора с внешней линией.

Расчет времени t_1 затухания колебаний в контуре на частоте f = 10 ГГц (P_2 = 10 мВт) дает следующие значения: при $P_{\text{вх.и}}$ = 1 кВт t_1 = 3,8 нс; при $P_{\text{вх.и}}$ = 10 кВт t_1 = 4,7 нс.

Для частоты f = 3 ГГц (P_2 = 1 мВт) аналогичные оценки составят: при $P_{\text{вх.и}}$ = 1 кВт t = 15,6 нс; при $P_{\text{вх.и}}$ = 10 кВт t = 18,6 нс.

Уровни мощности P_2 = 10 мВт для частоты 10 ГГц и P_2 = 1 мВт для частоты 3 ГГц приняты как типичные минимальные значения мощности для ЦЗУ соответствующих частотных диапазонов, при которых отсутствует электронный луч в зазоре резонаторов [6].

На следующем этапе (**этап 2**) при переходе ЦЗУ из режима защиты в режим пропускания происходит дальнейшее затухание СВЧ-мощности во входном резонаторе до уровня, при котором все электроны луча выходят из резонатора. При этом нагруженная добротность входного резонатора понижается от уровня $Q \approx 25$ (режим защиты, резонатор нагружен собственными потерями и внешней нагрузкой через входной тракт ЦЗУ) до типичного уровня $Q \approx 8$ (режим пропускания, резонатор нагружен собственными потерями, внешней нагрузкой и электронным лучом). Можно считать, что усредненная добротность входного резонатора на данном этапе составляет величину $Q \approx 16$.

На данном этапе происходит снижение мощности от уровня ≈ 10 мВт до границы линейности

1(544).indd 15 18.03.2020 10:56:35

1 мВт для ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц или от уровня ≈ 1 мВт до границы линейности 0,1 мВт (для 3 ГГц), т. е. перепад $P_1/P_2 = 10$. Согласно (5), определяем соответствующее время затухания колебаний t_2: для частоты $f = 10$ ГГц $t_2 = 0{,}6$ нс; для частоты $f = 3$ ГГц $t_2 = 2{,}0$ нс.

Затухание остаточных колебаний СВЧ-энергии во входном резонаторе до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ (**этап 3**), т. е. приблизительно на 90 дБ, проходит в резонаторе, который нагружен собственными потерями, внешней нагрузкой и электронным лучом (нагрузка резонатора электронным лучом обычно несколько превышает оптимальный уровень на резонансной частоте для расширения полосы частот) и имеет типичную нагруженную добротность $Q \approx 8$. Время затухания колебаний t_3 в соответствии с (5) составит: для частоты $f = 10$ ГГц $t_3 = 2{,}6$ нс; для частоты $f = 3$ ГГц $t_3 = 8{,}8$ нс.

Типичное время пролета электронов луча между входным и выходным резонаторами t_4 (**этап 4**) составляет 2…5 нс. Время пролета зависит от электрического режима ЦЗУ: потенциал дрейфа луча обычно равен 15…25 В, расстояние между центрами входного и выходного резонаторов – 5…10 мм.

В соответствии с [8], под временем восстановления ЗУ понимается интервал времени, отсчитываемый от момента окончания СВЧ-импульса до момента, когда потери, дополнительные к потерям пропускания, достигнут в СВЧ защитном устройстве заданного уровня (обычно 3 дБ).

В ЦЗУ после окончания этапа 2 режим пропускания восстанавливается без каких-либо дополнительных потерь с задержкой на время пролета электронов между резонаторами (t_4, этап 4).

Таким образом, время восстановления ЦЗУ $t_в$ определяется суммой: $t_в = t_1 + t_2 + t_4$ – и при входной СВЧ импульсной мощности до 10 кВт оценочно составляет: для частоты $f = 10$ ГГц $t_в \approx 10$ нс; для частоты $f = 3$ ГГц $t_в \approx 22…26$ нс.

Следует иметь в виду, что в приведенных оценках предполагается идеальный задний фронт с нулевой длительностью завершения импульса СВЧ-мощности.

За дополнительное время от 3 до 10 нс (продолжительность этапа 3) в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1…1,5 дБ.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены синхронизированные по времени осциллограммы импульсной СВЧ-мощности на частоте 10 ГГц на входе и выходе ЦЗУ. Импульсная мощность во входном тракте составляет 5 Вт (см. рис. 2, *а*), длительность переднего и заднего фронта импульса – приблизительно 30 нс. Сигнал на осциллограф подается через детектор, снимается с направленного ответвителя во входном тракте.

Осциллограмма сигнала с выхода ЦЗУ (см. рис. 2, *б*) снята также через детектор. При этом на входе ЦЗУ установлен ферритовый циркулятор, ответвляющий отраженную от ЦЗУ мощность в согласованную нагрузку. Пик мощности на выходе ЦЗУ (метка «*А*») по заднему фронту входного импульса обусловлен тем, что по мере снижении входной мощности до уровня, при котором начинается восстановление прохождения электронного луча в ЦЗУ [6], на выходе ЦЗУ начинает возрастать уровень прошедшей мощности. Пройдя через максимум, мощность на выходе ЦЗУ снижается в соответствии с дальнейшим снижением мощности на заднем фронте входного импульса. Пик мощности на выходе ЦЗУ задерживается по времени относительно заднего фронта входного импульса согласно с описанными выше процессами восстановления прохождения и задержки в ЦЗУ.

1(544).indd 16 18.03.2020 10:56:35

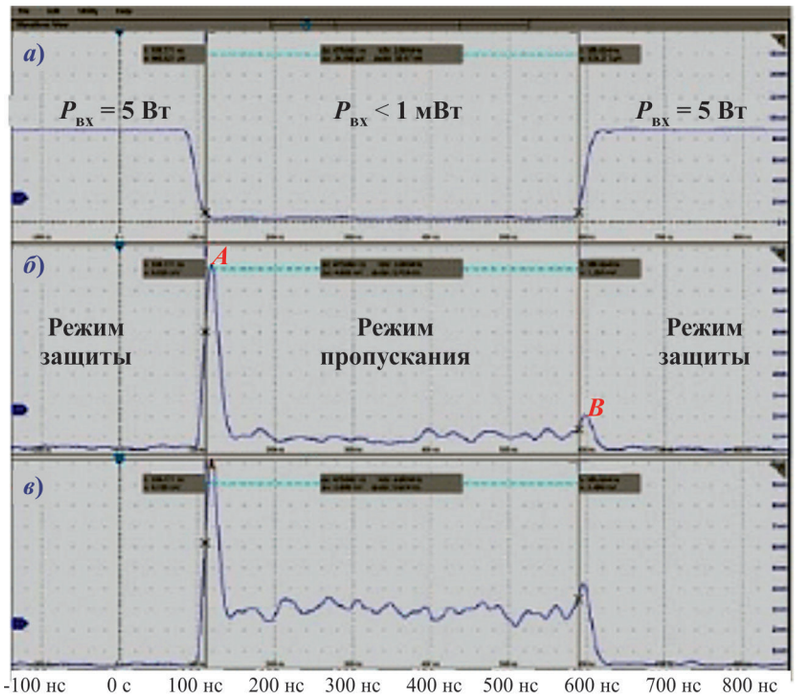


Рис. 2. Синхронизированные по времени осциллограммы импульсной мощности на частоте 10 ГГц:
а – импульсная мощность с уровнем 5 Вт в тракте на входе ЦЗУ, мощность в паузе между импульсами (средняя часть рисунка) – менее 1 мВт; *б* – мощность на выходе ЦЗУ; *в* – мощность на выходе ЦЗУ при подаче пилот-сигнала с уровнем 0,3 мВт во входной тракт

Пик мощности на выходе ЦЗУ (см. рис. 2, *б*; метка «*B*») по переднему фронту входного импульса объясняется тем, что при увеличении входной мощности соответственно возрастает мощность на выходе ЦЗУ до уровня, при котором устройство переходит в режим защиты и мощность на выходе спадает.

Непрерывный пилот-сигнал, введенный во входной тракт ЦЗУ (см. рис. 2, *в*), подавляется в режиме защиты ЦЗУ и суммируется с мощностью в паузе входного импульса, проходящей через ЦЗУ.

Следует отметить, что пики по переднему и заднему фронтам входного импульса (метки «*A*» и «*B*» на рис. 2, *б*), как правило, не превышают 10 мВт и не представляют опасности для последующих чувствительных каскадов МШУ.

На рис. 3…8 приведены осциллограммы, полученные с использованием осциллографа с большой полосой пропускания, позволяющего наблюдать СВЧ-сигналы без использования детектора, формирующего огибающую сигналов.

На рис. 3 и 4 показаны осциллограммы процессов на выходе ЦЗУ на частоте 10 ГГц после окончания входного импульса мощностью 200 мВт с задним фронтом 0,7 нс. Первые по времени пики (слева) на обоих рисунках обусловлены восстановлением прохождения электронного луча в ЦЗУ на заднем фронте входного импульса при переходе ЦЗУ из режима защиты в режим пропускания (аналогично пику «*A*» на рис. 2, *б*). Далее продолжаются процессы затухания остаточной мощности продолжительностью примерно 22 нс с учетом переотражения мощности

1(544).indd 17 18.03.2020 10:56:35

во входной СВЧ-линии от ЦЗУ и от выхода СВЧ-генератора (см. рис. 3) и примерно 4 нс без переотражений во входной СВЧ-линии, т. к. непосредственно к входу ЦЗУ подсоединен ферритовый вентиль, поглощающий отраженную от ЦЗУ мощность (см. рис. 4).

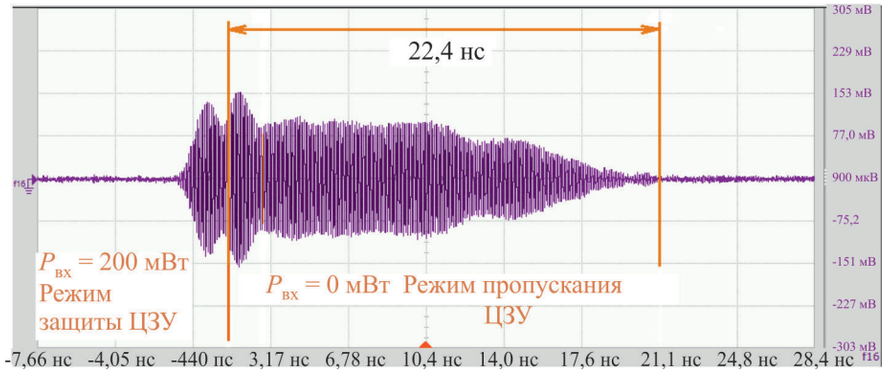


Рис. 3. Осциллограмма СВЧ-мощности на выходе ЦЗУ (10 ГГц) без установки вентиля на входе ЦЗУ

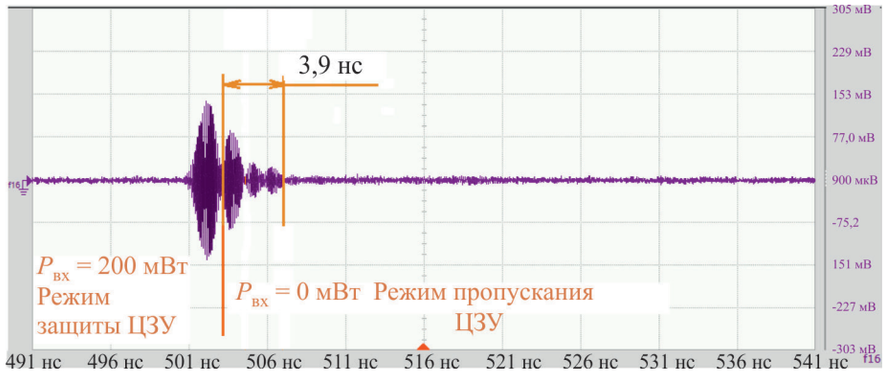


Рис. 4. Осциллограмма СВЧ-мощности на выходе ЦЗУ (10 ГГц) при установке вентиля на входе ЦЗУ

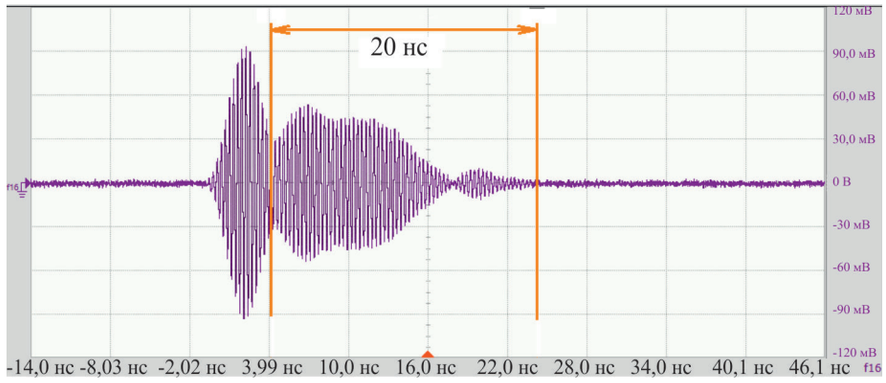


Рис. 5. Осциллограмма СВЧ-мощности на выходе ЦЗУ (3 ГГц) при установке вентиля на входе ЦЗУ

1(544).indd 18 18.03.2020 10:56:35

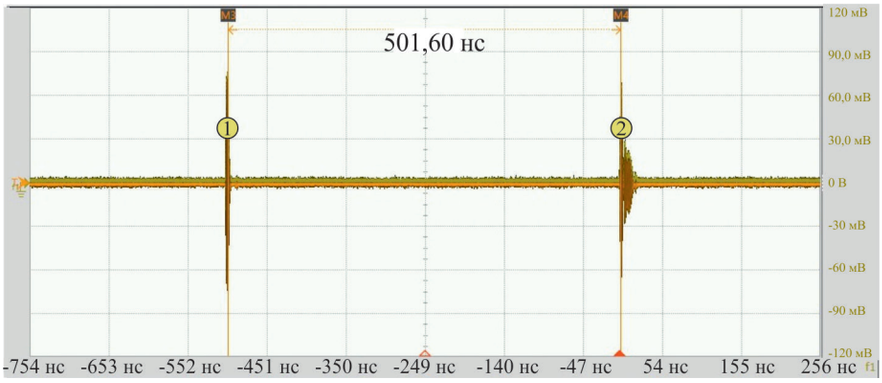


Рис. 6. Осциллограмма СВЧ-мощности на выходе ЦЗУ (3 ГГц)
при входном импульсе мощностью 10 мВт и длительностью 500 нс

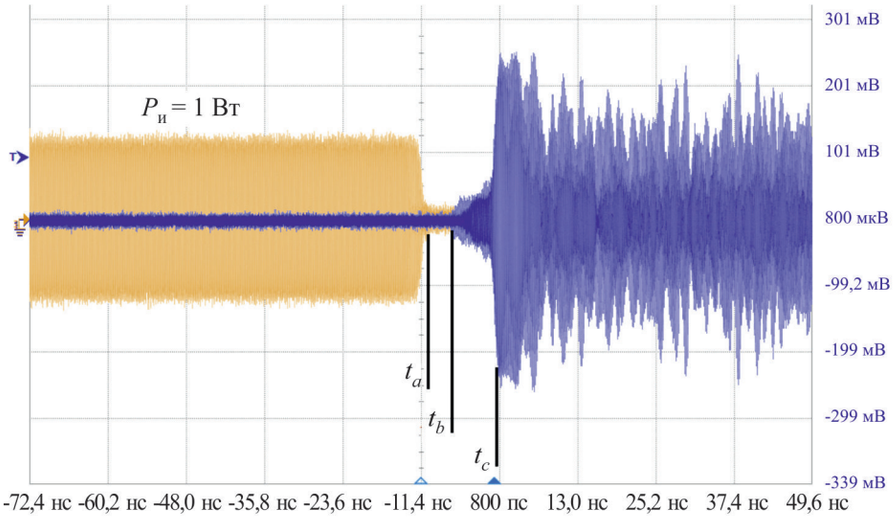


Рис. 7. Осциллограмма СВЧ-мощности на входе (1 Вт) и выходе ЦЗУ (9,2 ГГц)
с вентилем на входе ЦЗУ

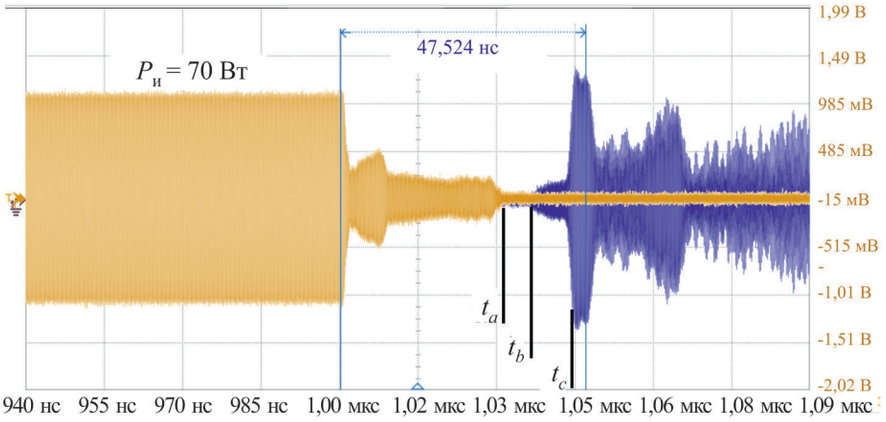


Рис. 8. Осциллограмма СВЧ-мощности на входе (70 Вт) и выходе ЦЗУ (9,2 ГГц)
с вентилем на входе ЦЗУ

1(544).indd 19 18.03.2020 10:56:36

Аналогичная осциллограмма СВЧ-мощности на выходе ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц при входной мощности 200 мВт и установке вентиля на входе ЦЗУ приведена на рис. 5.

На рис. 6 показаны пики мощности (диапазон частот 3 ГГц) на выходе ЦЗУ, соответствующие переднему фронту входного импульса (пик с меткой «1») и заднему фронту входного импульса (пик с меткой «2»). Мощность входного импульса – 10 мВт, длительность импульса – 500 нс, на входе ЦЗУ установлен вентиль. Слева от пика с меткой «1» и справа от пика с меткой «2» – режим пропускания ЦЗУ при отсутствии входной мощности, между пиками – режим защиты ЦЗУ.

На рис. 7 и 8 представлены двухканальные осциллограммы, на которых показана мощность на входе ЦЗУ (желтый цвет) и сигнал на выходе ЦЗУ (синий цвет) для частоты 9,2 ГГц.

На обоих рисунках отмечены временные точки t_a, t_b и t_c, интервалы между которыми и сами временные точки соответствуют следующим процессам.

Момент времени t_a – импульс мощности на входе ЦЗУ в основном закончился.

Интервал $t_a \ldots t_b$ – уровень мощности во входном резонаторе снижается до минимального значения, при котором электроны луча в зазоре резонатора еще отсутствуют (этап 1), продолжается режим защиты ЦЗУ. К данному интервалу времени следует отнести также время пролета первых электронов, способных выйти из входного резонатора. Продолжительность интервала $t_a \ldots t_b$ равна 3,7 нс на рис. 7 и 5,3 нс на рис. 8.

Интервал $t_b \ldots t_c$ – в выходном резонаторе появляются электроны луча, увеличивается их количество с переносом нарастающей входной СВЧ-мощности, – этап перехода из режима защиты в режим пропускания, совмещенный с временем пролета. Продолжительность данного интервала (6,9 нс на рис. 7 и 7,8 нс на рис. 8) свидетельствует о том, что во входной резонатор продолжает поступать мощность на окончании заднего фронта входного импульса. Уровень верхней границы линейности ЦЗУ и полное прохождение луча из входного резонатора в выходной достигаются при завершении данного интервала.

Момент времени t_c – восстанавливается полное прохождение электронного луча. Правее точки t_c на осциллограммах отражена передача на выход ЦЗУ СВЧ-мощности, имеющей место в паузах между импульсами входного сигнала (сигнал синего цвета на рис.7 и 8, мощность – менее 1 мВт).

Ненулевая продолжительность спада заднего фронта мощного входного СВЧ-импульса приводит к продлению и частичному перекрытию по времени этапов 2 и 4 времени восстановления ЦЗУ – восстановления прохождения луча и времени пролета.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крайне малое время восстановления параметров ЦЗУ обусловлено тем, что в основе работы устройства лежит взаимодействие с заряженной частицей, обладающей максимально возможной подвижностью – электроном в вакууме. Время восстановления определяется двумя основными процессами: спаданием уровня мощности в низкодобротном резонаторе и временем пролета электронного луча между входным и выходным резонаторами.

Время пролета определяется конструкцией и напряжением корпуса резонаторов ЦЗУ, которое выбирается исходя из обеспечения максимально полного согласования проводимостей луча, резонаторов и внешней нагрузки в режиме пропускания. Время пролета обычно составляет не более 2…5 нс.

Время спадания уровня мощности в резонаторе, в соответствии с (5), в значительной степени

1(544).indd 20 18.03.2020 10:56:36

определяется добротностью резонатора и частотой: имеет место прямая пропорциональная зависимость от добротности и обратная пропорциональная зависимость от частоты. Значительно слабее время спадания уровня мощности зависит от перепада мощности в течение времени восстановления, а значит, от уровня входной импульсной мощности.

Для типичных конструкций ЦЗУ СВЧ-диапазона время восстановления составляет от 8…10 нс (частота 10 ГГц) до 20…30 нс (частота 3 ГГц) при длительности заднего фронта входного импульса, близкой к нулевой. При плавно спадающих задних фронтах реальных мощных импульсов с длительностью приблизительно 50 нс и более процессы восстановления пропускания сигнала в ЦЗУ в основном повторяют задний фронт импульса с малосущественной задержкой.

Переходные процессы в СВЧ-тракте на входе ЦЗУ, связанные с отражением от ЦЗУ большей части мощного входного импульса и последующим переотражением этой мощности от элементов тракта в аппаратуре, приводят к затягиванию на выходе ЦЗУ остаточной мощности входного импульса (см. рис. 3 и 4). Указанное затягивание остаточной мощности на выходе ЦЗУ не связано с временем восстановления. Для минимизации влияния данных процессов следует в СВЧ-тракте перед входом ЦЗУ устанавливать устройство (ферритовый вентиль, циркулятор), поглощающее или ответвляющее в нагрузку СВЧ-мощность, отраженную от входа ЦЗУ в режиме защиты. Подобное устройство должно иметь минимальный КСВН со стороны ЦЗУ и располагаться возможно ближе к ЦЗУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Будзинский, Ю. А.** Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 136 – 142.

2. **Будзинский, Ю. А.** Защитные устройства СВЧ-диапазона на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, Т. Ш. Сиюхов, А. И. Тёхан // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 69 – 73.

3. **Быковский, С. В.** Теоретическое исследование процессов энергообмена поперечных волн электронного потока и на этой основе исследование и разработка электронных защитных устройств на быстрой циклотронной волне с малым (порядка 10^1 нс) временем восстановления: дис. канд. техн. наук / Быковский Сергей Васильевич. – Фрязино, 1996. – 134 с.

4. **Алыбин, В. Г.** СВЧ-защитные устройства в радиолокации и связи / В. Г. Алыбин // Радиотехника. – 2002. – № 8. – С. 42 – 49.

5. **Ропий, А. И.** Сверхвысокочастотные защитные устройства / А. И. Ропий, А. М. Старик, К. К. Шутов. – М.: Радио и связь, 1993.

6. **Быковский, С. В.** Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты / С. В. Быковский, Ю. А. Будзинский, В. Г. Калина, В. Е. Котов, О. А. Саврухин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 43 – 49.

7. **Калашников, С. Г.** Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1985. – С. 450 – 455.

8. **ГОСТ 23769-79.** Приборы электронные и устройства защитные СВЧ. Термины, определения и буквенные обозначения.

Статья поступила 24 декабря 2019 г.

1(544).indd 21 18.03.2020 10:56:36

УДК 621.385.6

ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬ СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ИЗ ВЫСОКОПЛОТНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИОННЫХ И УДАРНЫХ НАГРУЗОК С БОЛЬШИМ УСКОРЕНИЕМ

С. Д. Журавлев[1], В. И. Шестеркин[1], Д. И. Целиков[1], М. В. Горбачева[2], Д. А. Бессонов[3]

[1]*Акционерное общество «Научно производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов*

[2]*ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург*

[3]*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.*

Представлены результаты испытаний сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита на устойчивость к вибрационным и ударным механическим воздействиям с большим ускорением. Экспериментально подтверждена возможность использования сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита в катодно-сеточных узлах для низковольтного управления током мощных импульсных ЛБВ.

КС: катодно-сеточный узел, сеточные структуры, низковольтное управление, пиролитический графит

STABILITY OF SHAPE OF HIGH-DENSITY PYROLYTIC GRAPHITE GRID STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF VIBRATIONAL AND IMPACT LOADS WITH HIGH ACCELERATION

S. D. Zhuravlev[1], V. I. Shesterkin[1], D. I. Tselikov[1], M. V. Gorbacheva[2], D. A Bessonov[3]

[1]*JSC «RPE "Almaz», Saratov*

[2]*JSC Ltd. «Virial», St.Petersburg*

[3]*SSTU named after Gagarin U.A., Saratov*

Results of testing grid structures made of high-density pyrolytic graphite for resistance to vibrational and impact mechanical effects with high acceleration are presented. The possibility of using grid structures of high-density pyrolytic graphite in cathode-grid assemblies for low-voltage current control of high-power TWTs has been experimentally confirmed.

Keywords: cathode-grid assembly, grid structures, low-voltage control, pyrolytic graphite

1. ВВЕДЕНИЕ

Низковольтное управление током электронного пучка в электровакуумных приборах, в том числе СВЧ-диапазона, таких, как ЛБВ и клистроны, осуществляют сеточным электродом, рас-

1(544).indd 22 18.03.2020 10:56:36

положенным вблизи поверхности импрегнированного термоэмиссионного катода. В импульсных ЛБВ с выходной средней мощностью до ~60 Вт применяют одинарные, перехватывающие ток сеточные структуры, изготовленные из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, гафний) [1]. В более мощных импульсных ЛБВ с удельной средней мощностью электронного потока в плоскости сетки более 7 Вт/см^2 при температуре импрегнированного катода 1050 °С для исключения появления паразитной термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки ее перемычки размещают в геометрической тени прикатодной (теневой) сетки [2]. Однако в результате тепловых смещений сеточных структур перемычки управляющей сетки могут выходить из геометрической тени теневой сетки, что может приводить к локальному оседанию тока электронного пучка, повышению температуры на отдельных ее участках и появлению паразитной термоэлектронной эмиссии в паузе между импульсами. Напыление продуктов испарения металлопористого катода (МПК) Ba и BaO на перемычки сеточных структур существенно уменьшает работу выхода электронов, способствуя появлению термоэлектронной эмиссии с сеток при меньшей температуре. Для уменьшения вероятности появления паразитной термоэлектронной эмиссии используют материал сеточных структур, способный рассеивать большие мощности электронного потока без появления термоэлектронной эмиссии. Таким материалом является пиролитический графит, способный рассеивать мощность электронного потока в 20 раз больше, чем молибден, и в 9 раз больше, чем гафний, без появления термоэлектронной эмиссии [3]. Необходимым условием для использования того или иного материала сеточных структур является сохранение их формоустойчивости при воздействии вибрационных и ударных механических воздействий с большим ускорением.

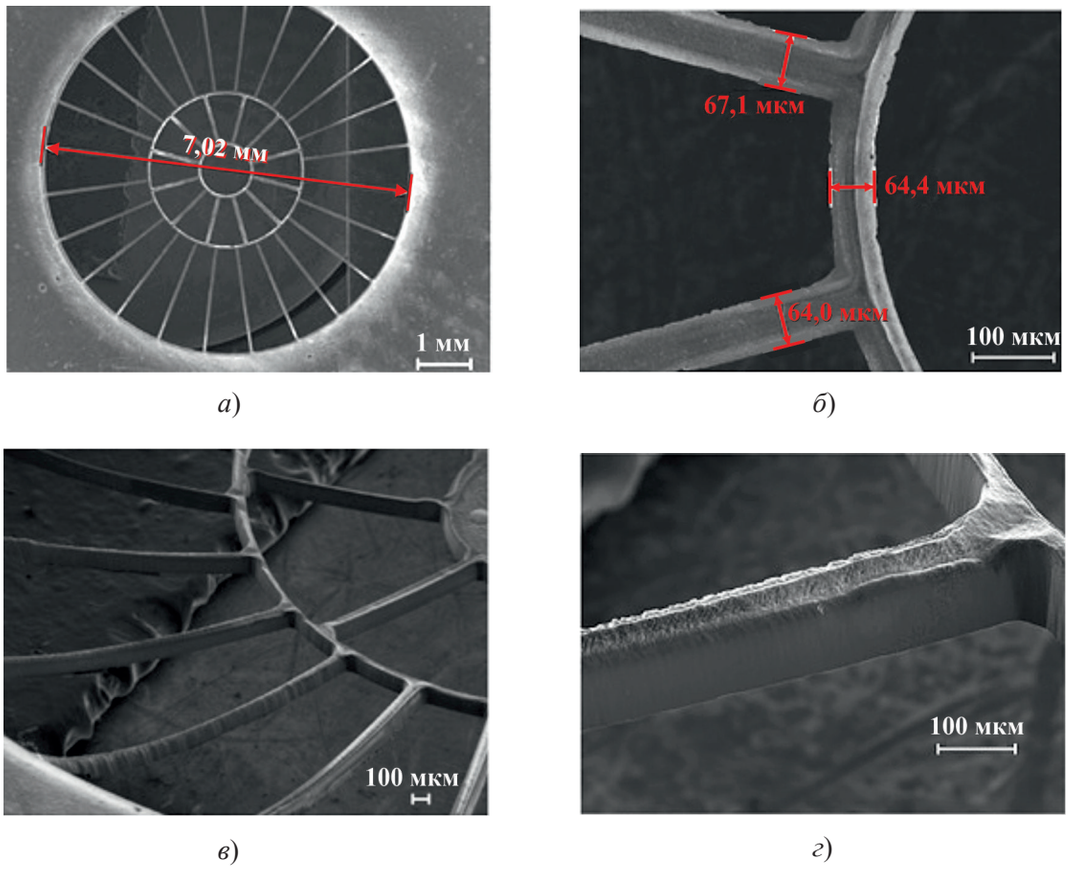
В настоящей работе приведены результаты исследований стойкости сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита (ВПГ) при воздействии на них механических вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением, в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.57.416, предъявляемыми к электровакуумным СВЧ-приборам специального назначения.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытаниям подвергались сеточные структуры из ВПГ толщиной 110 мкм с радиально-кольцевыми перемычками шириной 60…70 мкм (рисунок).

Сеточные структуры были изготовлены методом микроразмерного лазерного фрезерования [4]. Формирование перемычек сетки осуществлялось по программе путем последовательного вырезания сегментов при азимутальном повороте заготовки вокруг оси симметрии. Были изготовлены два типа сеточных структур с радиально-кольцевыми перемычками толщиной 110 мкм: с центральным отверстием (№ 1, рис. *а*, *б*) и без центрального отверстия (№ 2, рис. *в*, *г*). Периферия сеточной структуры № 1 (рис. *а*), ограниченная окружностями с диаметрами D_1 = 7,02 мм и D_2 = 3,2 мм, содержала 24 радиальные перемычки, центральная часть содержала 12 перемычек. Диаметр центрального отверстия D_3 = 1,2 мм. Перемычки на периферийной части сеточной структуры № 2 в количестве 24 шт. были ограничены диаметрами D_1 = 10,2 мм и D_2 = 4,1 мм. Восемь перемычек были ограничены диаметром D_3 = 1,2 мм. Ширина перемычек составляла ~ 65 мкм. Шероховатость краев перемычек сеточной структуры не превышала 1 мкм.

1(544).indd 23 18.03.2020 10:56:36



а) *б*)

в) *г*)

Сеточные структуры с радиально-кольцевыми перемычками

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изготовленные сеточные структуры были проверены на способность противостоять разрушающему действию вибрации и механических ударов. Испытания на вибропрочность и воздействие механических ударов проводились на вибрационном стенде УВЭ 100/5-3000 и ударном стенде 12МУ 50/1470-1, предназначенных для испытаний промышленно выпускаемых на предприятии АО «НПП «Алмаз» электровакуумных приборов. Амплитуда ускорения контролировалась пьезоэлектрическим измерительным преобразователем АВС-036. Перед испытаниями и после испытаний сеточные структуры фотографировали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7100.

Испытания на вибропрочность проводились в двух плоскостях методом 103-4 ГОСТ Р В 20.57.416-98 ШСВ (широкополосная случайная вибрация) со значениями среднеквадратического ускорения 170 м/с^2 в диапазоне частот 20…2000 Гц со средней степенью воспроизводимости. Общее время воздействия составило 6 ч.

Испытания на ударную прочность проводились методом 104-1 ГОСТ Р В 20.57.416-98 со значением пикового ударного ускорения 150 м/с^2 и длительностью импульса 2…20 мс. Общее количество ударов составляло 4000, форма импульса полусинусоидальная.

1(544).indd 24 18.03.2020 10:56:37

Испытания на воздействие одиночных ударов осуществлялись методом 106-1 ГОСТ Р В 20.57.416-98 со значением пикового ударного ускорения 230 м/с^2 и длительностью импульсов 2…20 мс, общее количество ударов – 12.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований сеточных структур на сканирующем электронном микроскопе после испытаний на вибропрочность и механических ударов с большим ускорением не выявили разрушения перемычек сеточных структур, подтвердили высокую механическую прочность перемычек сеток из ВПГ и возможность применения данных сеточных структур в мощных импульсных СВЧ-приборах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лысова, И. К.** ЛБВ импульсного действия с низковольтным управлением электронными пучками / И. К. Лысова, О. Н. Корешкова // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1976. – Вып.16 (341). – 27с.

2. **Григорьев, Ю. А.** Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1987. – Вып. 7 (1264). – 71с.

3. **Журавлев, С. Д.** Токоперехватывающие сетки из анизотропного пиролитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом // С. Д. Журавлев, В. И. Шестеркин // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, вып. 9. – С. 1464 – 1468.

4. **Пат. 2344027 РФ.** Способ резки пирографита / Т. Н. Соколова, О. А. Трофимова, А. В. Конюшин, Е. Л. Сурменко. – Заявл. 14.05.2007; опубл. 20.01.2009; Бюл. № 2.

Статья поступила 27 января 2020 г.

1(544).indd 25 18.03.2020 10:56:37

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.315.592:621.382

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ СВЧ МИС НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Ю. В. Федоров, А. С. Бугаев, А. Ю. Павлов, Д. Л. Гнатюк, О. С. Матвеенко, В. Ю. Павлов, Д. Н. Слаповский, К. Н. Томош, Е. Н. Енюшкина, Р. Р. Галиев, М. В. Майтама, А. В. Зуев, Д. В. Крапухин, С. А. Гамкрелидзе, П. П. Мальцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

Представлена технология изготовления монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона с внедрением технологии невжигаемых омических контактов и обеспечением общей земли с лицевой стороны кристалла, что на нитриде галлия в России еще не было реализовано при изготовлении СВЧ МИС.

КС: нитрид галлия, монолитная интегральная схема (МИС), усилитель мощности, малошумящий усилитель, технология, полевой транзистор, омические контакты, межэлектрические соединения

PECULIARITIES OF MANUFACTURING TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE MICS BASED ON GALLIUM NITRIDE FOR MILLIMETER RANGE

Yu. V. Fedorov, A. S. Bugaev, A. Yu. Pavlov, D. L. Gnatyuk, O. S. Matveyenko, V. Yu. Pavlov, D. N. Slapovsky, K. N.Tomosh, E. N. Enyushkina, P. P. Galiev, M. V. Maitama, A. V. Zuev, D. V. Krapukhin, S. A. Gamkrelidze, P. P. Maltsev

Institute of Microwave Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Science (IMSE RAS), Moscow

The technology of manufacturing monolithic integrated circuits (MICs) based on gallium nitride for millimeter range with the introduction of non-fired ohmic contacts technology and providing common ground from the front side of the crystal is presented, which has not been implemented on gallium nitride so far when manufacturing microwave MICs in Russia.

Keywords: gallium nitride, monolithic integrated circuit (MIC), power amplifier, low-noise amplifier, technology, field-effect transistor, ohmic contacts, electrical connections

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд областей радиоэлектроники, требующих достижения максимальной выходной мощности в СВЧ-диапазоне при отсутствии дополнительных теплоотводящих элементов, т. е.

1(544).indd 26 18.03.2020 10:56:37

теплообмен только с кристалла монолитной интегральной схемы (МИС) для обеспечения минимальных массогабаритных характеристик устройств. Прежде всего, такие требования возникают у разработчиков робототехнических устройств и космических аппаратов.

Для применения МИС в таких системах можно ввести требование, что микропотребляющая электронная компонентная база должна потреблять ток менее 1 А на кристалл, а предельным ограничением общепринято считать обеспечение выходной мощности до 3...4 Вт при рассеивании мощности на кристалле до 10 Вт.

Таким образом, достичь необходимую величину выходной мощности можно, варьируя значениями тока и напряжения, а также конструктивно-технологическим базисом и схемотехническими решениями для формирования максимального КПД при минимальных массе и габаритах устройств.

При разработке современных устройств коммерческого и военного назначения постоянно ужесточаются требования, предъявляемые к их эффективности и экономичности. Данная тенденция обусловлена многими факторами, варьирующимися от проблем с обеспечением необходимого теплового режима до требований к энергопотреблению всей системы в целом. В этих условиях применение высокоэффективных СВЧ МИС позволяет не только понизить массу аппаратуры по сравнению с системами, использующими волноводы, но и повысить стойкость системы к вибрации, а также упростить ее настройку за счет применения большого числа однотипных дискретных усилителей.

На основании проведенного анализа современного состояния разработок МИС для мм-диапазона за рубежом и опыта работ ИСВЧПЭ РАН, полученного в ходе выполнения ряда НИР в предыдущие годы [1–5], был сделан вывод о необходимости проведения исследований по оптимизации ряда технологических операций изготовления транзисторов и схем на их основе [6–18].

Особенностью разработанного комплекта МИС мм-диапазона серии 5411 является внедрение технологии невжигаемых омических контактов и обеспечение общей земли с лицевой стороны кристалла, что на нитриде галлия в России еще не было реализовано при изготовлении СВЧ МИС.

В ИСВЧПЭ РАН разработана технология изготовления МИС на нитриде галлия с напряжением питания 30 В и плотностью мощности 1 Вт/мм, которая аналогична технологии МИС на арсениде галлия и позволяет использовать ряд ранее применяемых материалов и технологических приемов. По данной технологии разработан комплект МИС серии 5411, прошедший необходимые испытания на надежность и безотказность.

Для изготовления экспериментальных образцов МИС использовались отечественные HEMT-гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN на подложках сапфира производства ЗАО «Элма-Малахит».

При изготовлении МИС, в едином технологическом цикле формируются как пассивные, так и активные элементы схемы, обеспечивающие реализацию проекта МИС для необходимого частотного диапазона. Составляется технологический маршрут изделия, состоящий из последовательно выполняемых технологических операций. При этом ряд технологических операций можно объединить в группу, отвечающую за выполнение этапа формирования части будущего прибора.

В процессе изготовления МИС на основе нитрида галлия необходимо выполнение следующих основных этапов: формирование приборной мезаизоляции; формирование невыпрямляющего (омического) контакта к гетероструктуре, при котором обеспечивается формирование резисторов, нижних обкладок конденсаторов, индуктивностей; формирование выпрямляющего контакта (затвора Шотки) к гетероструктуре; пассивация затвора, формирование конденсаторного ди-

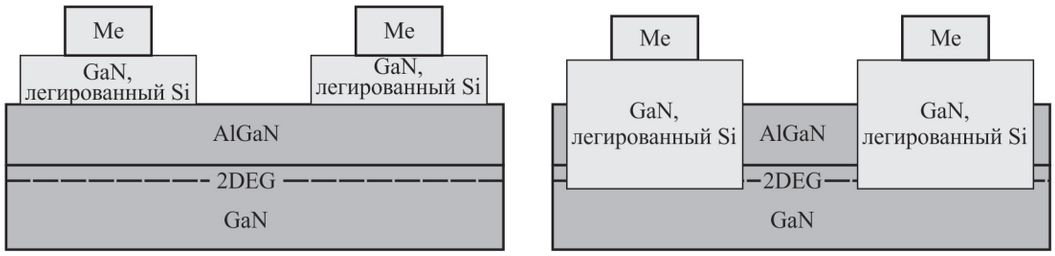
1(544).indd 27 18.03.2020 10:56:37

электрика; формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов; формирование межэлементных соединений в виде «воздушных мостов»; формирование межэлементных соединений, обеспечивающих общую землю; шлифовка пластины; резка пластины на кристаллы; отбраковка; посадка кристаллов на теплоотвод. Последовательное выполнение всех основных этапов является необходимым условием получения работоспособной МИС.

Рассмотрим особенности двух основных этапов маршрута изготовления МИС на основе нитрида галлия для мм-диапазона.

2. НЕВЖИГАЕМЫЕ (НЕСПЛАВНЫЕ) ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ К НИТРИДУ ГАЛЛИЯ

На сегодняшний день наиболее распространенная технология несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN – технология эпитаксиально доращиваемого сильнолегированного GaN в окнах под омические контакты через предварительно сформированную маску [15]. Суть метода заключается в формировании диэлектрической маски на гетероструктуре, формировании в диэлектрике окон под омические контакты, эпитаксиальном росте n^+-GaN, удалении диэлектрической маски и напылении металлизации контакта на n^+-GaN. В некоторых вариантах перед эпитаксиальным ростом плазмохимически через диэлектрическую маску заглубляются до уровня двумерного электронного газа (2DEG). Схематически формирование невжигаемых омических контактов с доращиваемым n^+-GaN показано на рис. 1.



а) *б*)

Рис. 1. Схематическое изображение использования доращиваемого сильнолегированного GaN при формировании невжигаемых омических контактов к AlGaN/GaN:
а – без заглубления до уровня 2DEG; *б* – с заглублением до уровня 2DEG

Благодаря введению примеси Si, происходит вырождение полупроводящего GaN, который должен находиться в непосредственном контакте с областью двумерного электронного газа. Легирование GaN проводится в процессе осаждения с помощью установленного в ростовой камере молекулярного источника кремния. Важно подобрать верную концентрацию легирующей примеси в осаждаемом нитриде галлия. С одной стороны, увеличение концентрации Si, который выступает в роли донорной примеси, позволяет повысить концентрацию электронов и понизить сопротивление контакта. С другой стороны, при чрезмерном повышении концентрации Si проводимость контакта начинает падать, а кремний перестает равномерно растворяться в объеме GaN и образует дополнительные дефекты и конгломераты.

Для реализации СВЧ-транзисторов с невжигаемыми омическими контактами была выбрана технология с доращиванием сильнолегированного GaN молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ), так как в ней отсутствуют плазмохимическое воздействие на барьерный слой AlGaN, как при

1(544).indd 28 18.03.2020 10:56:37

формировании контактов к сильнолегированному защитному слою, и высокотемпературная активация (более 1000 °С) перед нанесением контактной металлизации при формировании омического контакта к областям, легированным Si ионной имплантацией. При этом формируемые диэлектрические покрытия для создания маски под рост служат защитным слоем для активных областей гетероструктуры.

Достоинствами невжигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN являются хорошая воспроизводимость (зависимость сопротивления в основном от легированного GaN), хорошая морфология контактов, определяемая только шероховатостью поверхности под металлизацию и внесенными дефектами самой металлизации, низкое сопротивление. Недостатком – необходимость в использовании высокотехнологичного дорогостоящего оборудования.

Внедрение технологии невжигаемых омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN позволило избежать недостатков классических вжигаемых омических контактов. За счет использования невжигаемых контактов можно отказаться от высокотемпературных процессов обработки сформированной на полупроводнике металлизации.

Процедура осаждения сильнолегированного GaN при изготовлении МИС на основе нитрида галлия проводилась на гетероструктуре с барьерным слоем AlGaN/AlN. Для маскирования поверхности структуры была использована двухслойная система диэлектриков Si_3N_4/SiO_2 [16]. Диэлектрики осаждались плазмохимическим методом на установке Plasmalab System 100 фирмы Oxford с источником индуктивно связанной плазмы (ИСП). Si_3N_4 осаждался из смеси газов N_2 (10 sccm*) + SiH_4 (12 sccm) при давлении 8 мТорр, температуре 250 °С и мощности ИСП 800 Вт на стадии перед формированием приборной «мезаизоляции». SiO_2 осаждался из смеси газов N_2O (23 sccm) + SiH_4 (6 sccm) при давлении 4 мТорр, температуре 300 °С и мощности ИСП 500 Вт. Далее с помощью фотолитографии формировались «окна» под контакты в диэлектрике. Обычно эту операцию называют «вскрытие окон диэлектрика». Для вскрытия этих окон необходимо сформировать маску из материала, скорость травления которого ниже скорости травления диэлектрика при других одинаковых условиях. Типичное формирование маски происходит на участке фотолитографии и состоит из нанесения на рабочую пластину с диэлектриком фоторезиста необходимой толщины, совмещения и экспонирования рисунка маски для травления диэлектрика, сушки фоторезиста на пластине, проявки и задубливания маски. После формирования фоторезистивной маски рабочая пластина подвергается операции травления.

Травление диэлектрических слоев через предварительно сформированную фоторезистивную маску осуществляется плазмохимическим методом в смеси SF_6 и O_2 на установке плазмохимического травления SI 500.

После снятия фоторезистивной маски проводится плазмохимическое травление AlGaN и GaN через сформированную диэлектрическую маску в смеси BCl_3 и Ar на той же установке. Возможно последующее травление AlGaN и GaN без снятия фоторезистивной маски непосредственно сразу после плазмохимического травления диэлектриков. Такая система маскирования не влияет на свойства поверхности гетероструктуры и с помощью МЛЭ делает рост сильнолегированного GaN селективным – рост происходит только в участках, где диэлектрическая маска вытравлена. На гетероструктуру со сформированной диэлектрической маской омических контактов осаждается сильнолегированный GaN в установке МЛЭ при температуре 850 °С. Изображение после роста на растровом электронном микроскопе (РЭМ) показано на рис. 2, где видно, что рост идет только в сформированных окнах. После осаждения сильнолегированного GaN происходит удаление

*sccm – стандартные кубические сантиметры.

1(544).indd 29 18.03.2020 10:56:37

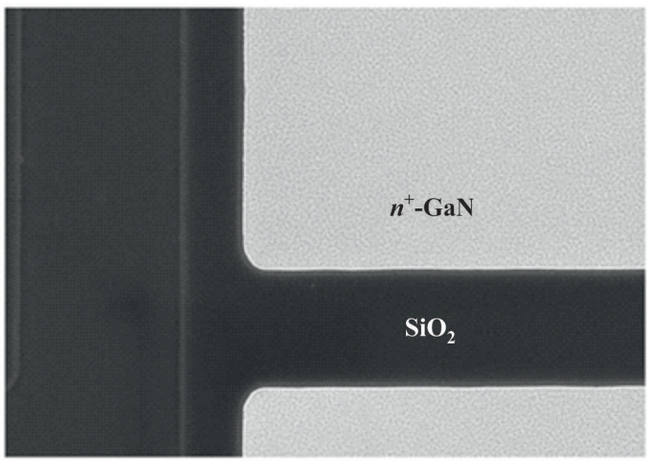


Рис. 2. РЭМ-изображение после эпитаксиального роста сильнолегированного GaN по диэлектрической маске

диэлектрической маски в жидком растворе буферного травителя ($HF:NH_4F:H_2O=1:3:7$). На сформированные сильнолегированные области GaN осаждается металлизация омических контактов. Для этого с помощью оптической фотолитографии формируется двухслойная маска, в вакууме осуществляется напыление металлизации невжигаемых омических контактов Cr/Pd/Au с последующим «взрывом» фоторезистивной маски. Данная система металлизации не требует последующих термических обработок. Графически последовательность операций формирования невжигаемых омических контактов показана на рис. 3.

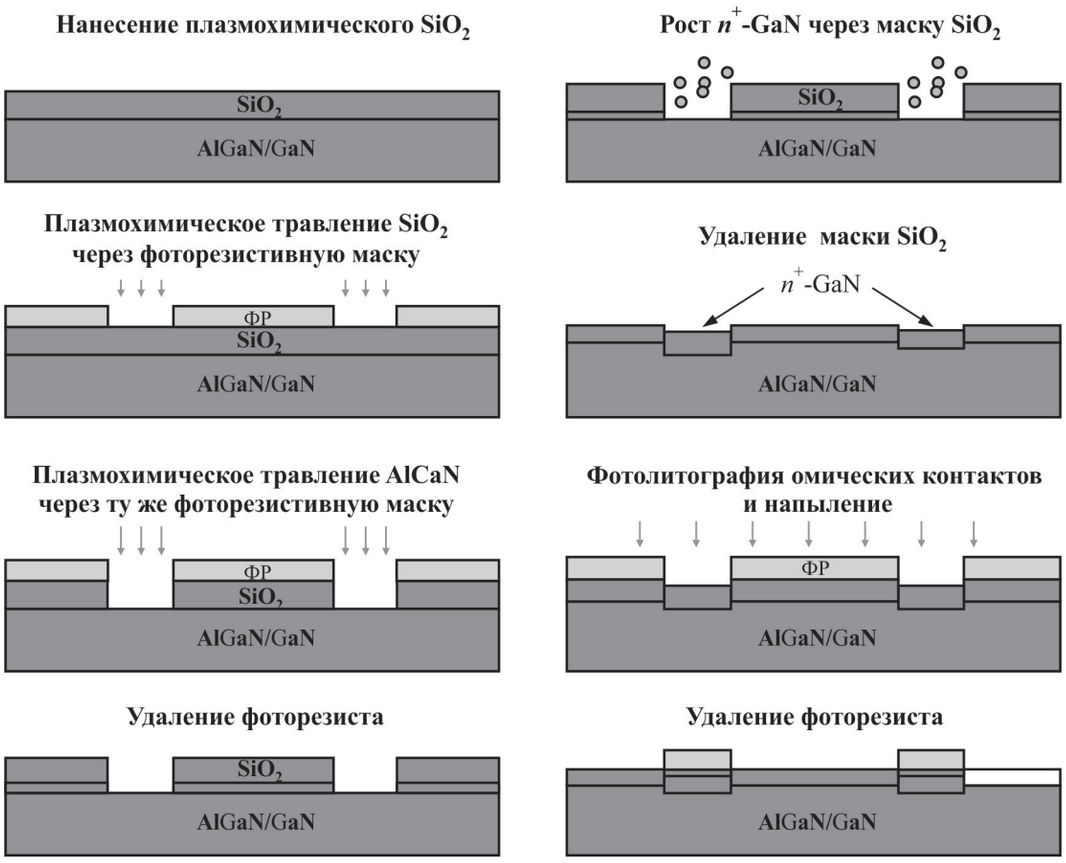


Рис. 3. Последовательность операций формирования невжигаемых омических контактов

1(544).indd 30 18.03.2020 10:56:38

Использование технологии формирования невжигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN позволило отказаться от высокотемпературных процессов обработки. За счет этого удалось сохранить высококачественный рельеф контактов для последующих технологических операций, а также получить омические контакты с удельным сопротивлением 0,15…0,2 Ом·мм, что является результатом мирового уровня. При этом металлизация омических контактов и меток для электронно-лучевой литографии затворов Шотки проводится в одном технологическом процессе напыления металлизации.

3. ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОБЩУЮ ЗЕМЛЮ

Для соединения общих электродов (чаще всего земляного) используют копланарные полоски, общий нижний электрод на обратной стороне пластины либо дополнительный уровень электрического соединения на лицевой стороне пластины на изолирующем слое.

В процессе разработки МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на Al_2O_3 см- и мм-диапазонов длин волн предварительные исследования показали, что создание таких МИС на основе копланарной технологии крайне затруднительно, ввиду проблем с обеспечением устойчивости подобных систем и в связи с наличием частотно-зависимых фазовых набегов по общим проводникам. Это проявляется уже при повышении усиления и выходной мощности МИС усилителей мощности (УМ). За рубежом МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN, как правило, изготавливают по микрополосковой технологии, подразумевающей травление сквозных отверстий сквозь подложку. Однако это связано с серьезными технологическими трудностями. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к гетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие гетероструктуры еще исследуются.

В результате было найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании «заземляющей плоскости» над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами, поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10…15 мкм (специального фотолака, разработанного ИВС РАН). При этом соответствующие элементы заземляют через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

Разработанный фотолак представляет собой композицию, включающую прекурсор высокотермостойкого полимера (аналога полиимида) и светочувствительный компонент хинондиазидного типа, аналогичный светочувствительным компонентам, применяемым в обычных позитивных фоторезистах типа ФП 383 и ФП 051.

Применение фотолаков не требует специального оборудования. Работа с ними осуществляется на стандартных литографических установках с использованием дуговых ртутных ламп.

С учетом рекомендаций изготовителей фотолака был разработан маршрут дополнительного уровня межэлектрических соединений, обеспечивающий как защиту схемы, так и общую землю.

На подложку с изготовленными схемами центрифугированием наносится первый слой фотолака, после чего ступенчато осуществляется сплошное экспонирование и задубливание в статической печке в инертной среде азота: 150 °С – 15 мин, 200 °С – 15 мин, 250 °С – 15 мин, 350 °С – 30 мин. Таким образом формируется первый адгезионный слой фотолака толщиной 2 мкм. Сплошное экспонирование рельефа без шаблона необходимо для разложения светочувствительного компонента, иначе при термозадубливании сформированного микрорельефа

1(544).indd 31 18.03.2020 10:56:38

возможно вспучивание пленки или появление дырок («рыбьих глаз») за счет разложения светочувствительного соединения с выделением азота при температуре задубливания.

Затем повторно наносят два слоя лака (также центрифугированием) для формирования конечной толщины изолирующего слоя 12…15 мкм. Совмещение и экспонирование фотолака осуществляется на установке прецизионной контактной фотолитографии SUSS MJB4 IR. Проявление выполняют 0,3%-ным водным раствором едкого калия. Затем проводится ступенчатое задубливание по вышеописанной схеме в инертной среде азота.

Полное запыление поверхности фотолака со сформированным рельефом металлизацией Ti/Au (50 нм/500 нм) осуществляется на установке вакуумного напыления термическим (резистивным) методом. Непосредственно перед напылением выполняется плазмохимическая зачистка в окнах фотолака для удаления нижнего задубленного адгезионного слоя. Зачистка происходит на установке плазмохимического травления SI 500 в среде O_2 с последующим контролем в оптическом микроскопе. Таким образом, после напыления формируется электрический контакт, соединяющий общий электрод через окна в фотолаке, лежащий на непроводящем материале.

По напыленному металлу делается фотолитография обтрава лишней металлизации на поверхности фотолака. По фотолитографической маске жидкостным химическим травлением удаляется незащищенная металлизация. Сформированный рисунок металлизации верхней «земли» утолщается гальваническим осаждением золота. Для удаления фотолака с дорожек реза и контактных площадок схем проводят плазмохимическое травление фотолака по сформированной металлической маске в среде O_2 на установке плазмохимического травления SI 500.

После формирования межэлектрических соединений заканчивается маршрут изготовления «лицевой» части МИС на нитриде галлия. Затем следуют операции полировки обратной стороны пластины химико-механическим методом на установке PM5 фирмы Logitech, резки на кристаллы методом лазерного управляемого термораскалывания, их отбраковки и посадки через тепловой интерфейс на теплоотвод. Схематически основные этапы технологического маршрута изготовления «лицевой» части МИС показаны на рис. 4.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИС НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Описанная технология производства была внедрена в ИСВЧПЭ РАН и успешно использована для создания широкой номенклатуры МИС различных частотных диапазонов вплоть до 70 ГГц [19–31].

В 2015 году ИСВЧПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу «Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5-мм диапазона длин волн» по заказу Минпромторга России.

Были разработаны следующие МИС:

– малошумящий усилитель без антенны 5411УВ01Н и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ01АН (АЕНВ.431130.293ТУ);

– усилитель мощности без антенны 5411УВ02Н и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ02АН (АЕНВ.431120.294ТУ);

– преобразователь сигнала в составе: смесителя, гетеродина, усилителя промежуточный частоты на одном кристалле 5411НС01Н (АЕНВ.431320.295ТУ).

1(544).indd 32 18.03.2020 10:56:38

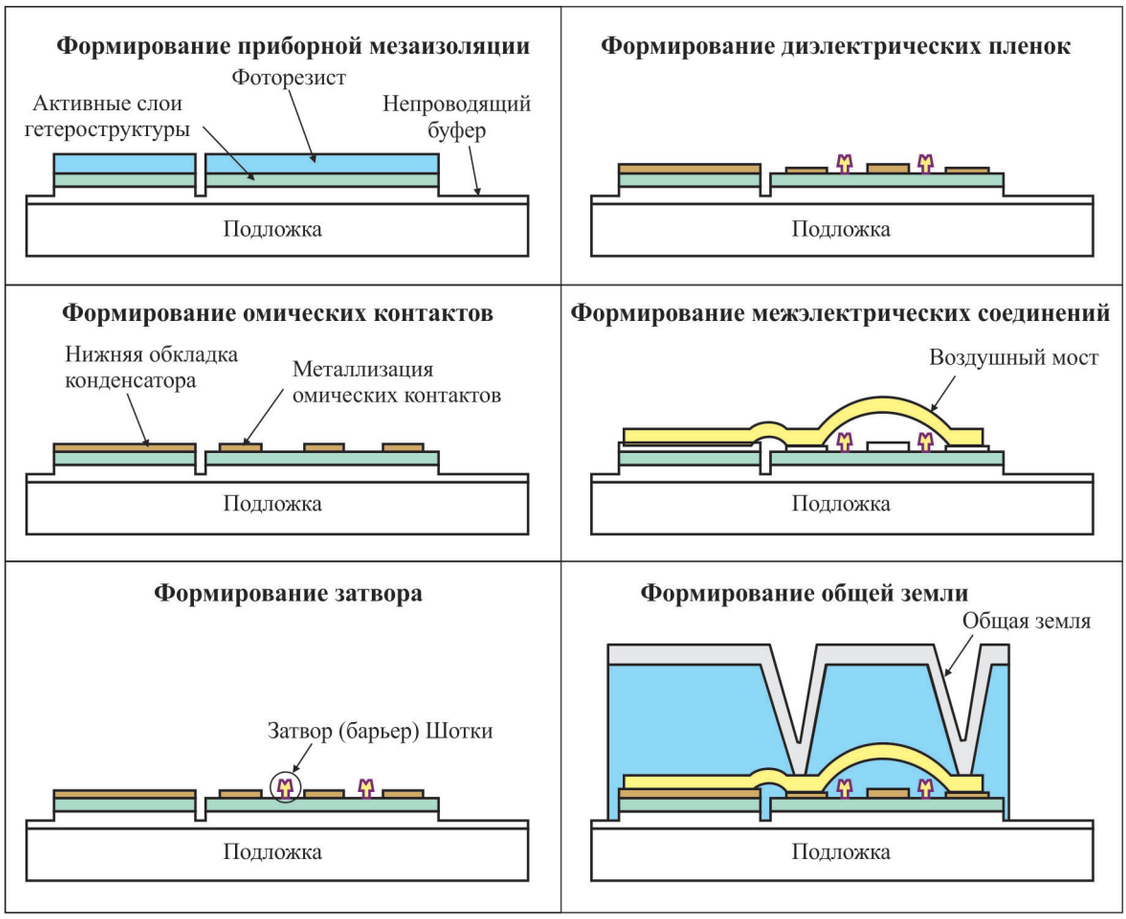


Рис. 4. Основные этапы технологического маршрута «лицевой» стороны МИС

Конструктивно МИС выполнены в виде кристаллов со структурами на основе нитрида галлия (AlGaN/GaN) на подложке сапфира для диапазона частот 57…64 ГГц в бескорпусном исполнении. Основные параметры приведены в справочном листе (Приложение 1).

В 2018 году ИСВЧПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу «Разработка комплекта бескорпусных монолитных интегральных схем 8-мм диапазона длин волн» по заказу Минпромторга России.

Были разработаны следующие МИС:

– малошумящий усилитель 5411УВ03Н (АЕНВ.431130.317ТУ);

– двойной балансный смеситель 5411МС01Н (АЕНВ.431320.318ТУ);

– генератор, управляемый напряжением, 5411ММ01Н (АЕНВ.431110.319ТУ);

– усилитель промежуточной частоты 5411УР01Н (АЕНВ.431130.320ТУ).

Конструктивно МИС выполнены в виде кристаллов на основе нитрида галлия (AlGaN/GaN) на подложке сапфира для диапазона частот 32…36 ГГц в бескорпусном исполнении. Основные параметры приведены в справочном листе (Приложение 2).

Примером реализации вышеописанной технологии изготовления МИС на нитриде галлия в мм-диапазоне длин волн служит разработка комплекта 5411 на сапфировой подложке с рабочими

1(544).indd 33 18.03.2020 10:56:38

частотами 57…64 ГГц. При этом топологический размер ножки грибообразного затвора СВЧ-транзистора для мм-диапазона составил 0,14 мкм.

В состав комплекта вошли генератор, управляемый напряжением (ГУН), балансный смеситель (См), усилитель мм-диапазона, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), антенна. Помимо этого были изготовлены усилители с интегрированными приемной и передающей антеннами, а также многофункциональные приемный и приемопередающий преобразователи сигнала в составе ГУН, См, УПЧ. Насколько известно авторам, подобные многофункциональные нитридгаллиевые системы на кристалле преобразователей сигнала на сапфировых подложках изготовлены впервые в мире.

МИС усилителя мм-диапазона в зависимости от рабочей точки может служить в качестве малошумящего усилителя (МШУ) или усилителя мощности (УМ). Усилитель имеет 4 каскада. В малосигнальном режиме коэффициент передачи $K_{пер}$ составляет не менее 15 дБ при коэффициенте шума $K_{ш}$ около 6 дБ и токе потребления менее 100 мА. В режиме большого сигнала и импульсном режиме по питанию выходная мощность $P_{вых}$ достигает 100 мВт (20 дБ·мВт) при коэффициенте усиления $K_{р}$ до 20 дБ и токе потребления не более 200 мА. Линейная выходная мощность составляет 30…50 мВт.

Выходная мощность МИС ГУН составляет 30…40 мВт. Диапазон перестройки частоты – не менее 3 ГГц. Стабильность частоты генерации от напряжения питания – не хуже 200 МГц/В при напряжении питания 10 В.

Многофункциональные приемная и приемопередающая МИС преобразователей сигнала имеют типовой коэффициент преобразования плюс 10 дБ при напряжении питания не более 10 В и токе потребления до 150 мА. Выходная мощность передающего канала составляет не менее 10 мВт.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование технологии изготовления монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия позволило реализовать технические решения для мм-диапазонов в виде МИС УМ, МШУ, См, ГУН и УПЧ, не уступающие по своих характеристикам зарубежным аналогам. Разработанные МИС могут быть использованы в автомобильных радарах, устройствах радиолокации, быстродействующих каналах наземной и межспутниковой связи.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СПРАВОЧНЫЙ ЛИСТ КОМПЛЕКТА БЕСКОРПУСНЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 57…64 ГГц

В 2015 году ИСВЧПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу «Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5-мм диапазона длин волн» по заказу Минпромторга России.

Были разработаны следующие МИС:

– малошумящий усилитель без антенны 5411УВ01Н (рис. П1.1) и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ01АН (рис. П1.2) (АЕНВ.431130.293ТУ);

– усилитель мощности без антенны 5411УВ02Н (рис. П1.3) и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ02АН (рис. П1.4) (АЕНВ.431120.294ТУ);

– преобразователь сигнала в составе: смесителя, гетеродина, усилителя промежуточный частоты на одном кристалле 5411НС01Н (рис. П1.5) (АЕНВ.431320.295ТУ).

1(544).indd 34 18.03.2020 10:56:38

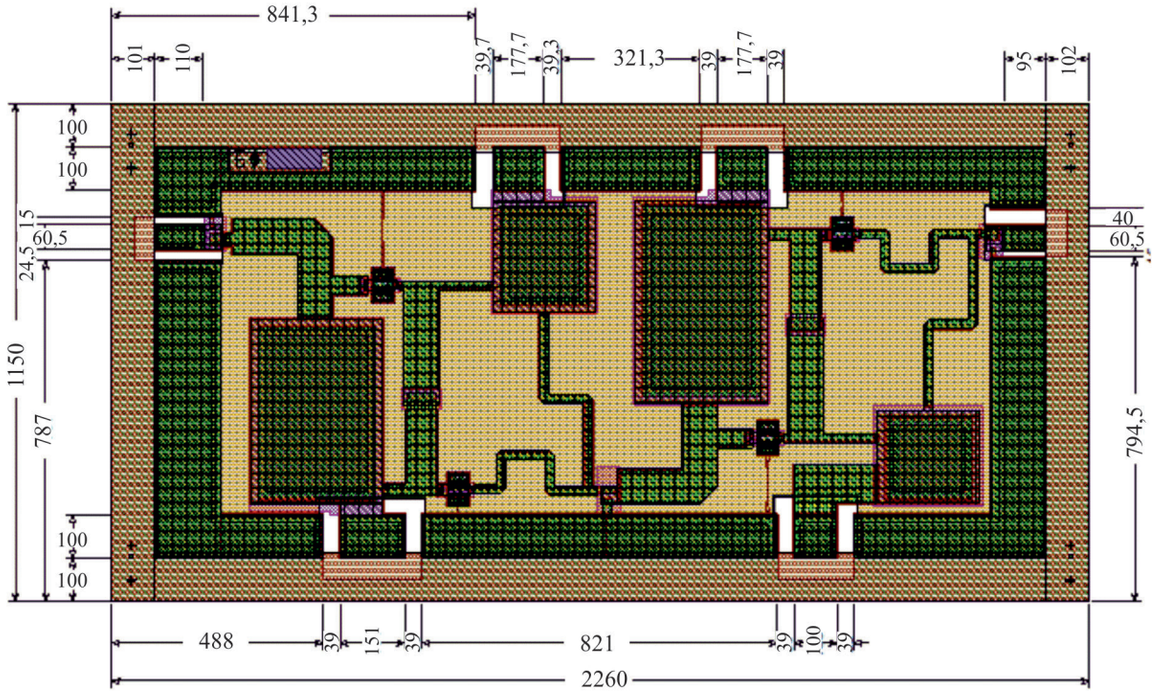


Рис. П1.1. Габаритный чертеж МИС малошумящего усилителя 5411УВ01Н

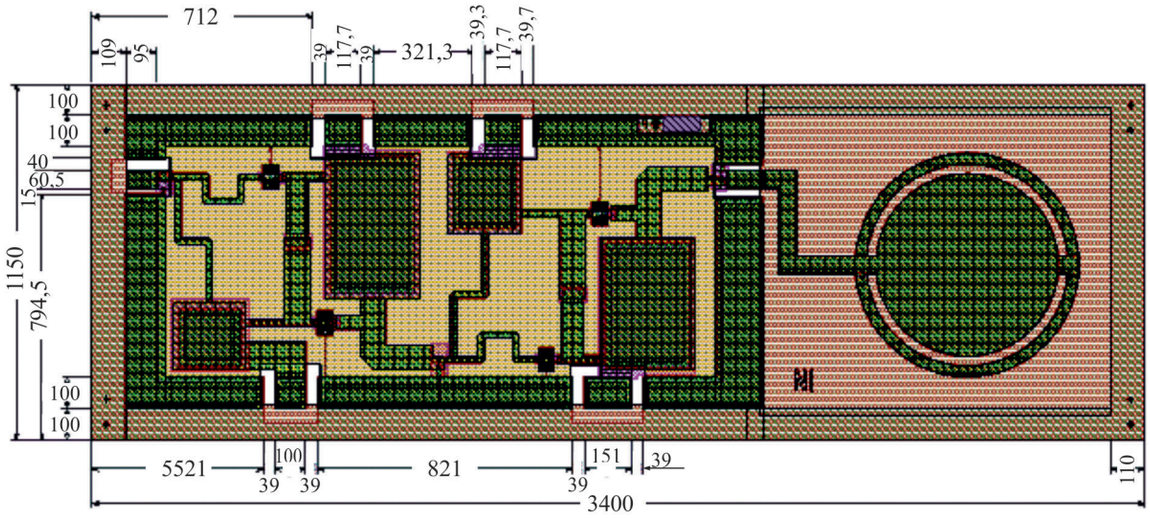


Рис. П1.2. Габаритный чертеж МИС малошумящего усилителя с антенной 5411УВ01АН

Конструктивно МИС выполнены в виде кристаллов со структурами на основе нитрида галлия (AlGaN/GaN) на подложке сапфира для диапазона частот 57…64 ГГц в бескорпусном исполнении.

МИС предназначены для применения в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, агрессивных испытательных сред заполнения.

Электрические параметры МИС приведены в табл.П1.1.

1(544).indd 35 18.03.2020 10:56:39

Таблица П1.1. **Электрические параметры МИС при приемке и поставке**

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Малошумящий усилитель	
Коэффициент шума, дБ	≤ 6,5
Коэффициент передачи, дБ	≥ 16
КСВН входа и выхода	≤ 2
Ток потребления, мА	≤ 100
Усилитель мощности	
Коэффициент усиления по мощности, дБ	≥ 20
Выходная мощность, мВт	≥ 100
КСВН входа и выхода	≤ 2
Ток потребления, мА	≤ 200
Преобразователь сигнала	
Рабочий диапазон частот выходного сигнала промежуточной частоты, ГГц	0,06 – 2
Коэффициент преобразования, дБ	≥ 4
КСВН входа и выхода	≤ 2
Ток потребления, мА	≤ 100

Предельно допустимые и предельные значения параметров режимов эксплуатации должны соответствовать нормам, установленным в табл. П1.2.

Таблица П1.2. **Предельно допустимые и предельные режимы эксплуатации МИС**

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра			
	Предельно допустимый режим		Предельный режим	
	Не менее	Не более	Не менее	Не более
Мощность входного импульсного сигнала $P_{вх}$, Вт	–	–	–	5
Напряжение питания усилителя мощности $U_{п}$, В	15	30	–	30
Напряжение питания малошумящего усилителя и преобразователя частоты $U_{п}$, В	5	10	–	10

Требования безотказности

Гамма-процентная наработка до отказа T_{γ} МИС при $\gamma = 95$ % в режимах и условиях, установленных в настоящем требовании к техническим характеристикам, должна быть не менее 20 000 ч в пределах срока службы 20 лет.

Требования сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости $T_{с\gamma}$ МИС при $\gamma = 95$ % при хранении в упаковке изготовителя в условиях отапливаемых хранилищ, хранилищ с кондиционированием воздуха, а также вмонтированных в защищенную аппаратуру или находящихся в защищенном комплекте ЗИП во всех местах хранения должен быть не менее 20 лет.

Указания по применению и эксплуатации

При работе с МИС и при их монтаже необходимо предусматривать защиту от воздействия статического электричества.

1(544).indd 36 18.03.2020 10:56:39

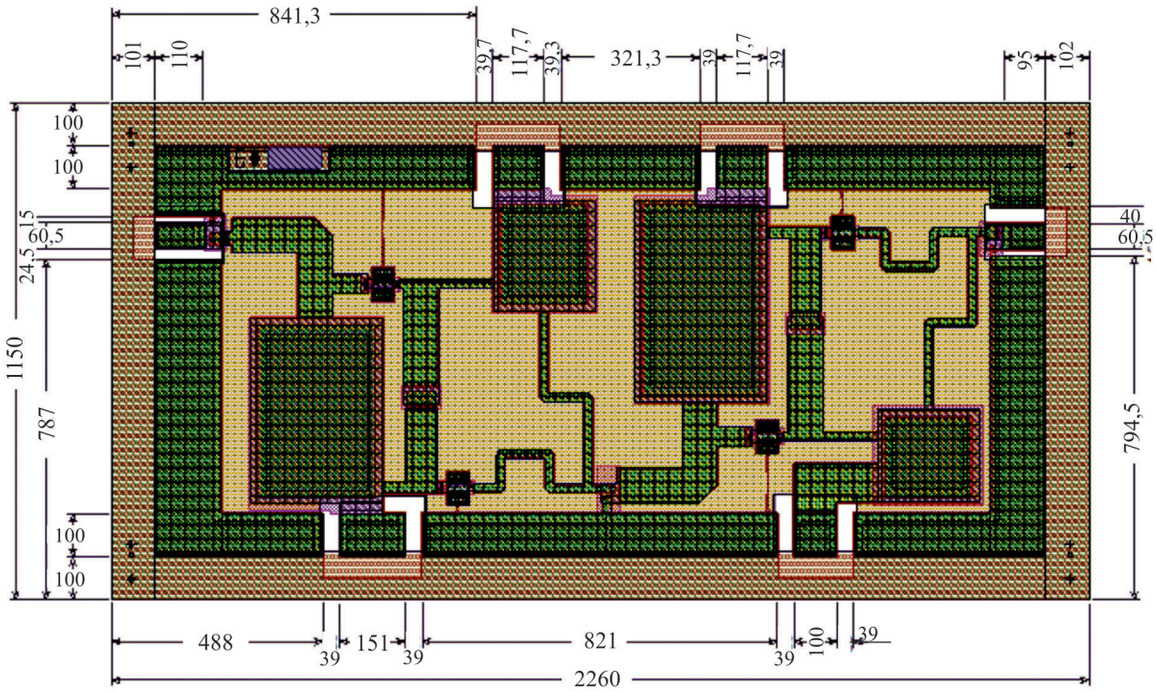


Рис. П1.3. Габаритный чертеж МИС усилителя мощности 5411УВ02Н

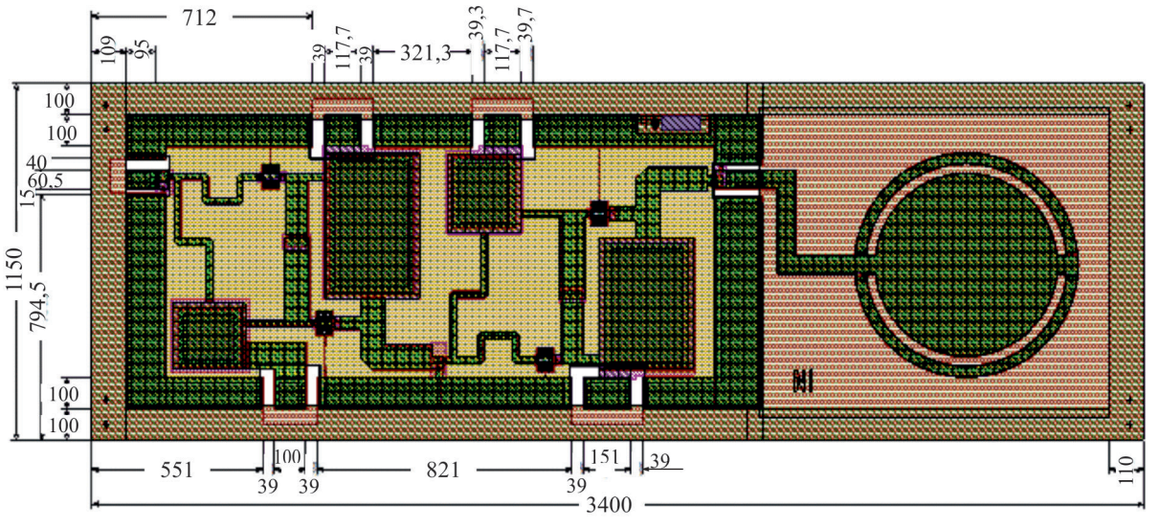


Рис. П1.4. Габаритный чертеж МИС усилителя мощности с антенной 5411УВ02АН

При работе с МИС не допускается касание незащищенными руками, твердым инструментом и другими предметами.

МИС следует брать вакуумным пинцетом.

МИС после снятия с эксплуатации подлежит утилизации в порядке и методами, устанавливаемыми в контракте на поставку.

МИС не должны иметь резонансных частот в диапазоне до 100 Гц.

1(544).indd 37 18.03.2020 10:56:40

Рис. П1.5. Габаритный чертеж МИС преобразователя сигнала

При монтаже МИС в микросборках, предназначенных для ВВСТ, необходимо выполнение следующих условий:

– монтаж МИС должен осуществляться методом наклейки, способ монтажа кристалла прямой. При наклейке следует использовать клей ЭЧЭ-С. Допустима температура при наклейке 175 °С, время выдержки – 2 ч. Основание, на которое наклеивается кристалл МИС, должно быть золоченное, толщина покрытия – не менее 2,5 мкм;

– разварку земляной шины по длинной стороне кристалла производить с шагом 150 мкм;

– входы и выходы ВЧ-сигнала микрополосковые, согласованные с подводящими каналами;

– присоединение выводов к контактным площадкам МИС производится методом термоультразвуковой сварки. В качестве выводов должна применяться золотая проволока марки Зл ПД 2,5 (ТУ 48-1-415-77) или Зл 999,9 (ТУ 48-1-353-86);

– выводы после сварки не должны касаться структуры МИС и боковых ребер МИС;

– не допускается смещение сварных точек, приводящее к закорачиванию элементов структуры;

– не допускается сильное натяжение и провисание выводов;

– не допускается разрыв (пережатие) вывода на месте сварки.

При установке МИС с интегрированной на кристалл антенной необходим корпус ВВСТ, проницаемый для электромагнитного излучения в диапазоне 57…64 ГГц.

При монтаже МИС не допускается использование материалов, вступающих в химическое и электрохимическое воздействие с защитным покрытием и другими элементами конструкции МИС.

1(544).indd 38 18.03.2020 10:56:40

В случае использования части МИС из общей упаковки, неиспользованные МИС должны быть повторно упакованы в герметичную тару.

МИС после снятия с эксплуатации (аппаратуры в которую входят МИС) подлежат утилизации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СПРАВОЧНЫЙ ЛИСТ КОМПЛЕКТА БЕСКОРПУСНЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 32…36 ГГц

В 2018 году ИСВЧПЭ РАН завершил опытно-конструкторскую работу «Разработка комплекта бескорпусных монолитных интегральных схем 8-мм диапазона длин волн» по заказу Минпромторга России.

Были разработаны следующие МИС:

– малошумящий усилитель 5411УВ03Н (АЕНВ.431130.317ТУ), рис. П2.1;

– двойной балансный смеситель 5411МС01Н (АЕНВ.431320.318ТУ), рис. П2.2;

– генератор, управляемый напряжением, 5411ММ01Н (АЕНВ.431110.319ТУ), рис. П2.3;

– усилитель промежуточной частоты 5411УР01Н (АЕНВ.431130.320ТУ), рис. П2.4.

Конструктивно МИС выполнены в виде кристаллов на основе нитрида галлия (AlGaN/GaN) на подложке сапфира для диапазона частот 32…36 ГГц в бескорпусном исполнении.

МИС предназначены для применения в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, агрессивных испытательных сред заполнения.

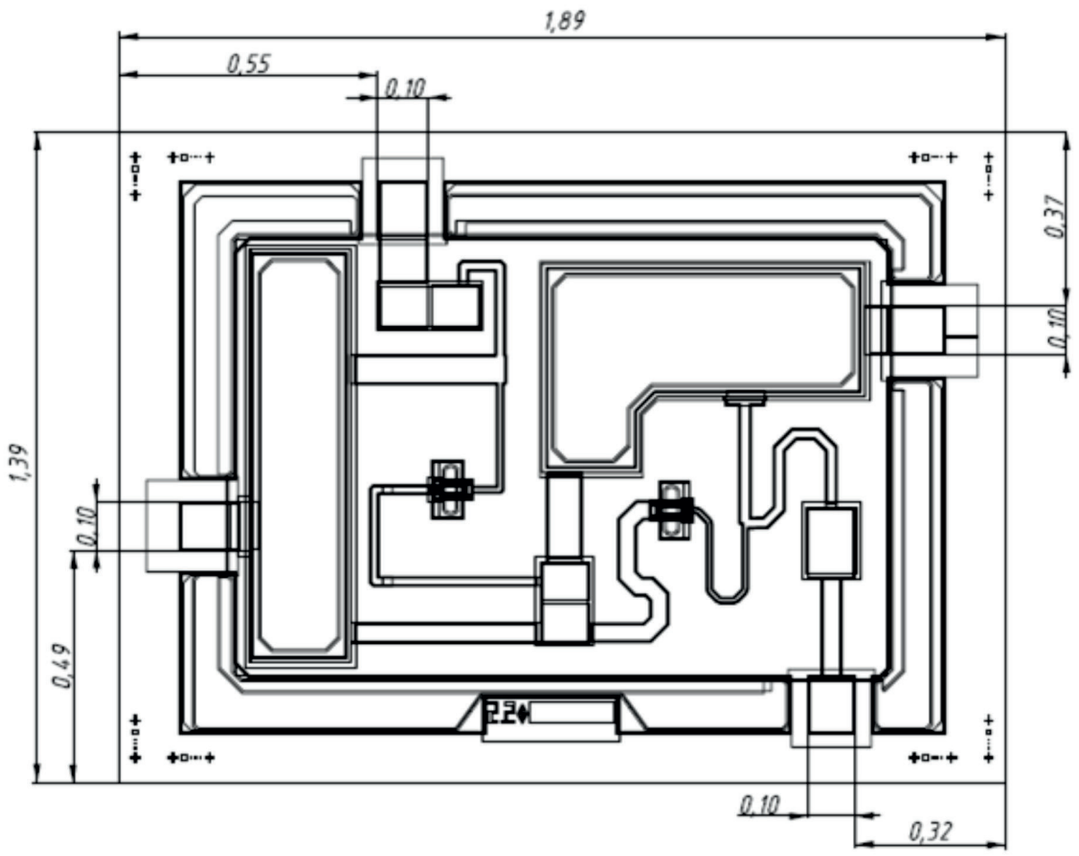


Рис. П2.1. Габаритные и установочные размеры малошумящего усилителя 5411УВ03Н

1(544).indd 39 18.03.2020 10:56:41

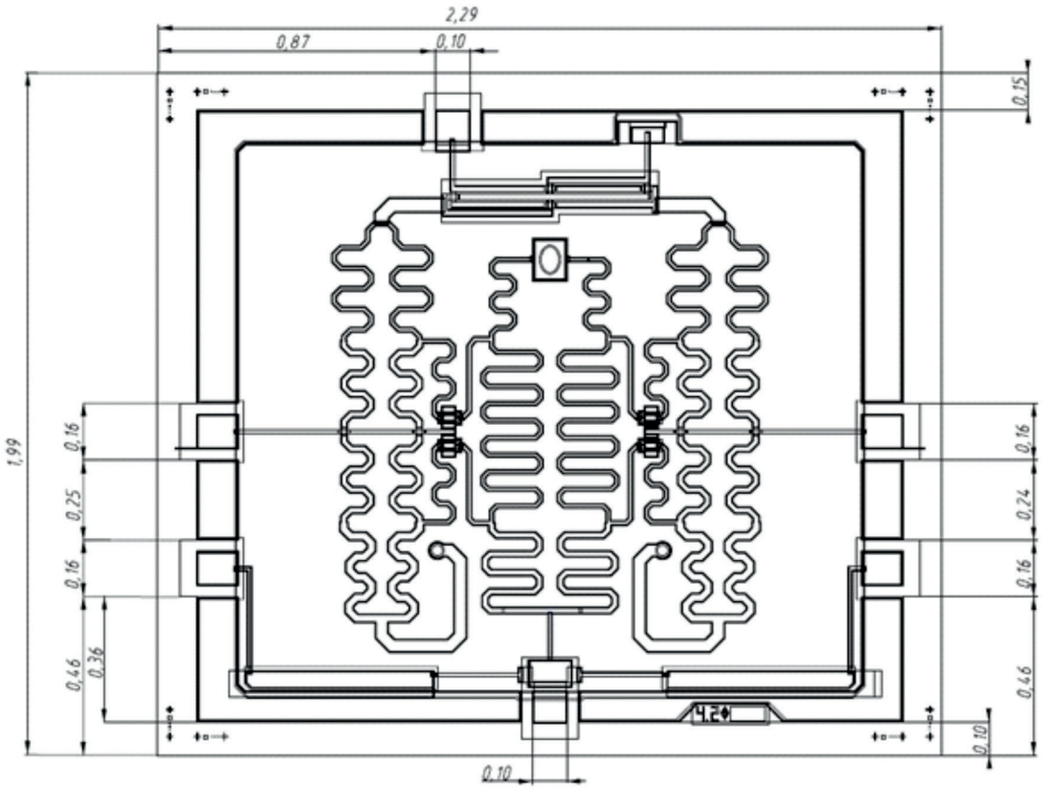


Рис. П2.2 Габаритные и установочные размеры двойного балансного смесителя 5411МС01Н

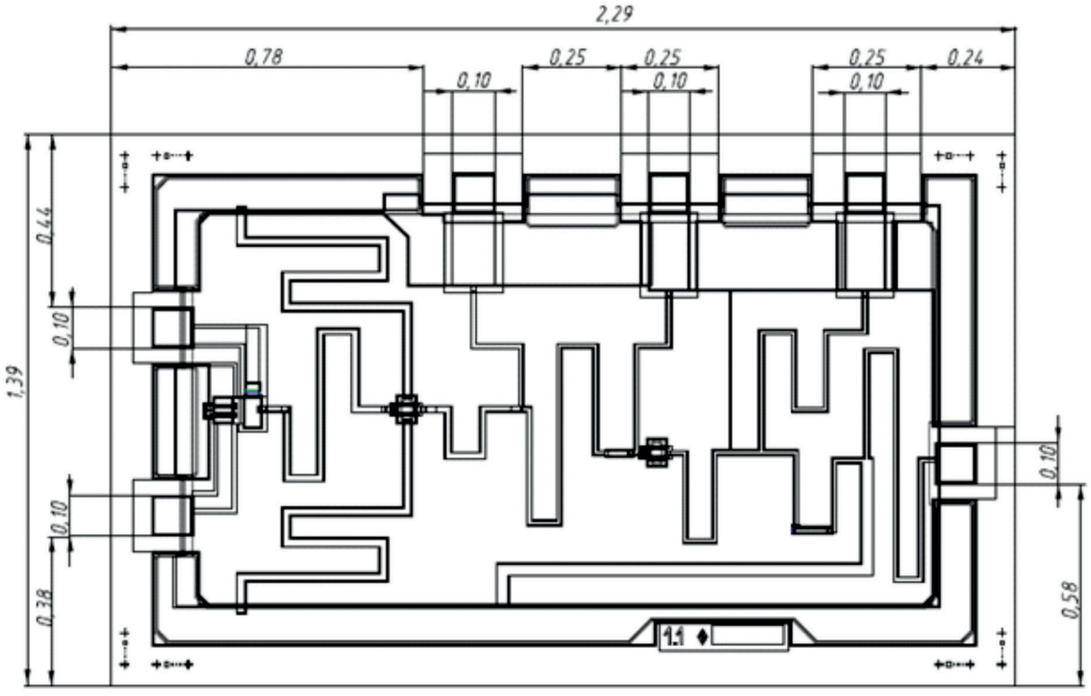


Рис. П2.3. Габаритные и установочные размеры генератора, управляемого напряжением, 5411ММ01Н

1(544).indd 40 18.03.2020 10:56:41

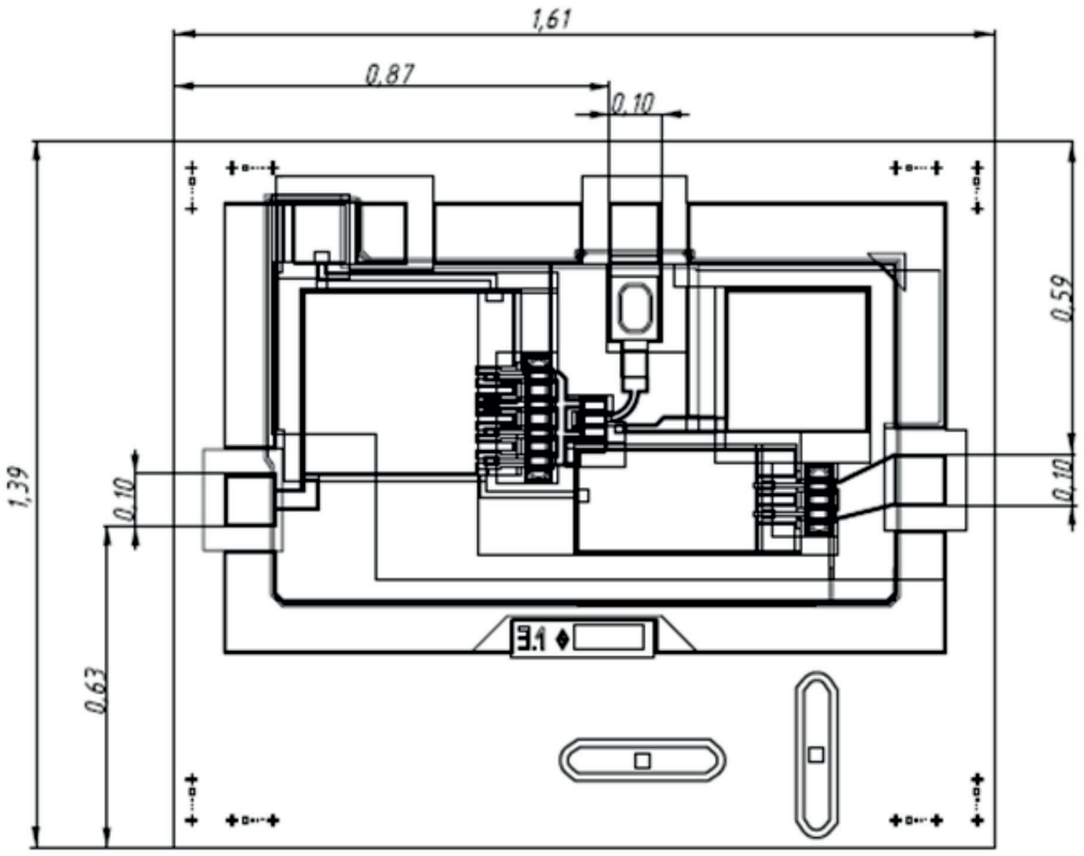


Рис. П2.4. Габаритные и установочные размеры усилителя промежуточной частоты 5411УР01Н

Электрические параметры

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра		
	Не менее	Номинал	Не более
Малошумящий усилитель 5411УВ03Н			
Коэффициент шума, дБ	–	–	7
Коэффициент передачи, дБ	18	–	25
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики (по уменьшению коэффициента передачи на 1 дБ) на выходе, мВт	4	–	–
КСВН входа	–	–	2
КСВН выхода	–	–	2
Ток потребления от источника положительной полярности, мА	–	–	110
Ток потребления от источника отрицательной полярности, мА	–	–	5
Двойной балансный смеситель 5411МС01Н			
Рабочий диапазон частот выходных сигналов, МГц	100	–	2100
Коэффициент преобразования, дБ	Минус 10	–	–
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики (по уменьшению коэффициента передачи на 1 дБ) на входе, мВт	4	–	–

1(544).indd 41 18.03.2020 10:56:41

Окончание таблицы

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра		
	Не менее	Номинал	Не более
Подавление зеркального канала приёма, дБ	25	–	–
Развязка сигнал-гетеродин, дБ	30	–	–
Развязка гетеродин-ПЧ, дБ	20	–	–
Развязка сигнал-ПЧ, дБ	20	–	–
Мощность гетеродина, мВт	–	–	40
КСВН входа сигнала	–	–	2
КСВН входа гетеродина	–	–	2
КСВН выхода ПЧ	–	–	2
Ток потребления от источника отрицательной полярности, мА	–	–	5
Генератор, управляемый напряжением, 5411ММ01Н			
Рабочий диапазон частот выходных сигналов, ГГц	32	34	36
Выходная мощность, мВт	40	–	–
Диапазон перестройки частоты, ГГц	0,5	–	–
Диапазон управляющего напряжения, В	0	–	5
Ток потребления от источника положительной полярности, мА	–	–	110
Ток потребления от источника отрицательной полярности, мА	–	–	5
Усилитель промежуточной частоты 5411УР01Н			
Рабочий диапазон частот входных сигналов, МГц	100	–	2100
Коэффициент усиления, дБ	20	–	–
Коэффициент шума, дБ	–	–	3,5
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики (по уменьшению коэффициента передачи на 1 дБ) на выходе, мВт	20	–	–
Ток потребления от источника положительной полярности, мА	–	–	150
Ток потребления от источника отрицательной полярности, мА	–	–	10

Функциональные характеристики

Наименование характеристики, единица измерения	Значение характеристики
Малошумящий усилитель 5411УВ03Н	
Коэффициент шума, дБ, не более	7
Коэффициент передачи, дБ	18 – 25
Напряжение питания положительной полярности, В	От 6 до 15
Напряжение питания отрицательной полярности (смещение на затворах), В, не менее	Минус 5
Двойной балансный смеситель 5411МС01Н	
Рабочий диапазон частот выходных сигналов, МГц	100 – 2100
Коэффициент преобразования, дБ, не менее	Минус 10
Напряжение питания отрицательной полярности (смещение на затворах), В, не менее	Минус 5

1(544).indd 42 18.03.2020 10:56:41

Окончание таблицы

Наименование характеристики, единица измерения	Значение характеристики
Генератор, управляемый напряжением, 5411ММ01Н	
Рабочий диапазон частот выходных сигналов, ГГц	32 – 36
Выходная мощность, мВт, не менее	40
Диапазон перестройки частоты, ГГц, не менее	0,5
Напряжение питания положительной полярности, В	От 6 до 15
Напряжение питания отрицательной полярности (смещение на затворах), В, не менее	Минус 5
Усилитель промежуточной частоты 5411УР01Н	
Рабочий диапазон частот входных сигналов, МГц	100 – 2100
Коэффициент усиления, дБ, не менее	20
Напряжение питания положительной полярности, В	6 – 9
Напряжение питания отрицательной полярности (смещение на затворах), В, не менее	Минус 5

Стойкость к внешним воздействующим факторам

Наименование воздействующего фактора	Значение характеристики фактора
Механический удар одиночного действия: пиковое ударное ускорение, м/с^2 (g) длительность воздействия, мс	 15000 (1500) 0,1 – 2,0
Повышенная температура среды: максимальное значение при эксплуатации, ^{o}С	 85
Пониженная температура среды: минимальное значение при эксплуатации, ^{o}С минимальное значение при транспортировании и хранении, ^{o}С	 Минус 60 Минус 60
Изменение температуры среды: диапазон изменения температуры среды, ^{o}С	 От минус 60 до плюс 85
Специальные факторы: 7.И$_1$ 7.И$_6$, 7.И$_7$ 7.К$_1$, 7.К$_4$ 7.К$_{12}$	 3УС 3УС 0,1·1 К 40 МэВ·см^2/мг

Требования безотказности

Гамма-процентная наработка до отказа T_γ изделий при $\gamma = 95$ % в режимах и условиях, установленных в настоящем требовании к техническим характеристикам, должна быть не менее 20 000 ч в пределах срока службы 25 лет.

Требования сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости $T_{c\gamma}$ изделий при $\gamma = 95$ % при хранении в условиях отапливаемых хранилищ, хранилищ с кондиционированием воздуха, а также вмонтированных в защищенную аппаратуру или находящихся в защищенном комплекте ЗИП во всех местах хранения должен быть не менее 25 лет.

Указания по эксплуатации

При проектировании микросборок предусмотреть размещение в непосредственной близости от МИС керамических блокировочных конденсаторов 1,0 и 0,01 мкФ по цепям питания. Для защиты цепей смещения (питание отрицательной полярности) рекомендуется установить однонаправленные TVS-диоды напряжением срабатывания не более 10 В.

1(544).indd 43 18.03.2020 10:56:42

При работе с МИС и при их монтаже необходимо предусматривать защиту от воздействия статического электричества.

При работе с МИС не допускается касание незащищенными руками, твердым инструментом и другими предметами. МИС следует брать вакуумным пинцетом.

При монтаже МИС в микросборках необходимо выполнение следующих условий:

– кристалл МИС устанавливается на СВЧ печатную плату с иммерсионным золочением или иной золоченый носитель. Перед установкой провести промывку платы в ультразвуковой ванне в течение 5 мин;

– монтаж МИС должен осуществляться методом наклейки, способ монтажа кристалла прямой. При наклейке следует использовать клей ЭЧЭ-С (ЫУО.028.052ТУ). Допустима температура при наклейке 175 °С, время выдержки – 2 ч;

– присоединение выводов к контактным площадкам производится методом термоультразвуковой сварки. В качестве выводов должна применяться золотая проволока марки Зл ПД 2,5 (ТУ 48-1-415-77) или Зл 999,9 (ТУ 48-1-353-86);

– разварку проводников к контактным площадкам осуществлять согласно чертежу общего вида;

– выводы после сварки не должны касаться структуры МИС и боковых ребер МИС;

– не допускается смещение сварных точек, так как это может привести к замыканию или разрушению элементов схемы;

– не допускается сильное натяжение и провисание выводов;

– не допускается разрыв (пережатие) вывода на месте сварки.

В случае использования части МИС из общей упаковки, неиспользованные МИС должны быть повторно упакованы в тару с сохранением ее защитных свойств.

МИС после снятия с эксплуатации (аппаратуры, в которую входят МИС) подлежат утилизации в порядке и методами, устанавливаемыми в контракте на поставку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фёдоров, Ю. В.** Технология изготовления и разработки монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия / Ю. В. Фёдоров, А. С. Бугаев, А. Ю. Павлов и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 19, № 5. – С. 273 – 293.

2. **Фёдоров, Ю. В.** Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaN/GaN HEMT / Ю. В. Федоров, С. В. Михайлович // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 10. – С. 12 – 17.

3. **Фёдоров, Ю. В.** Нитридные HEMT против арсенидных: последняя битва? / Ю. В. Федоров, С. В. Михайлович // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 16 – 22.

4. **Галиев, Р. Р.** Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн / Р. Р. Галиев, Д. Л. Гнатюк, А. В. Зуев и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 2. – С. 21 – 32.

5. **Фёдоров, Ю. В.** Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные / Ю. В. Федоров, С. В. Михайлович // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 217 – 226.

6. **Павлов, В. Ю.** Влияние методов формирования омических контактов на частотные характеристики полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN / В. Ю. Павлов, А. Ю. Павлов, Д. Н. Слаповский и др. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 53 – 56.

7. **Lei, M.** Comparison of different gan etching techniques / M. Lei, K. F. Adeni, Z. Chang et al. // Proceedings of the CSMANTECH Conference, Vancouver, British Columbai, Canada, april 24 – 27, 2006. – P. 105 – 108.

8. **Павлов, В. Ю.** Технология сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN: обзор / В. Ю. Павлов, А. Ю. Павлов // Нано- и микросистемная техника. – Т. 18, № 10. – С. 635 – 644.

9. **Слаповский, Д. Н.** Сплавные омические контакты на основе Si/Al к нитридным гетеросистемам AlGaN/GaN / Д. Н. Слаповский, А. Ю. Павлов, В. Ю. Павлов, А. В. Клековкин // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 4. – С. 461 – 466.

10. **Слаповский, Д. Н.** Исследование морфологии сплавных омических контактов с контактным слоем кремния к гетероструктуре AlGaN/GaN / Д. Н. Слаповский, А. Ю. Павлов, В. Ю. Павлов, А. В. Клековкин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 77 – 80.

1(544).indd 44 18.03.2020 10:56:42

11. **Yoon, S.** Localized TiSi and TiN phases in Si/Ti/Al/Cu ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / S. Yoon, Y. Song, S. M. Lee et al. // Semiconductor Science and Technology. – 2016. – No 31. – P. 055002.

12. **Mohammed, F. M.** Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts on *n*-GaN and AlGaN/GaN epilayers / F. M. Mohammed, L. Wang, I. Adesida // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 101, No 1. – P. 013702.

13. **Guodong, G.** Low ohmic contact AlN/GaN HEMTs grown by MOCVD / G.Guodong, D. Shaobo, L. Yuanjie // Journal of Semiconductors. – 2013. – Vol. 34, No 11. – P. 114004.

14. **Liu, Y.** Mechanisms of ohmic contact formation and carrier transport of low temperature annealed Hf/Al/Ta on $In_{0.18}Al_{0.82}N$/GaN-on-Si / Y. Liu, S. P. Singh, L. M. Kyaw et al. // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2015. – Vol. 4, No 2. – P. 30 – 35.

15. **Pang, L.** Analysis of AlGaN/GaN high electron mobility transistors with nonalloyed ohmic contacts achieved by selective area growth using plasma assisted molecular beam epitaxy / L. Pang, K. Kim // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). – 2014. – Vol. 4, No 2. – P. 8 – 13.

16. **Арутюнян, С. С.** Двухслойная диэлектрическая маска Si_3N_4/SiO_2 для создания низкоомных омических контактов к AlGaN/GaN HEMT / С. С. Арутюнян, А. Ю. Павлов, В. Ю. Павлов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 8. – С. 1138 – 1142.

17. **Мокеров, В. Г.** AlGaN/GaN СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц / В. Г. Мокеров, А. Л. Кузнецов, Ю. В. Федоров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 4. – С. 561 – 567.

18. **Томош, К. Н.** Исследование процессов изготовления HEMT AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si_3N_4 in situ / К. Н. Томош, А. Ю. Павлов, В. Ю. Павлов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 10. – С. 1434 – 1438.

19. **Федоров, Ю. В.** МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах / Ю. В. Федоров, П. П. Мальцев, О. С. Матвеенко и др. // Наноиндустрия. – 2015. – № 3. – С. 44 – 51.

20. **Фёдоров, Ю. В.** Разработка монолитных интегральных схем для *Ka*-, *V*- и *W*-диапазонов на основе нитрида галлия / Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк, А. С. Бугаев и др. // Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45, № 2. – С. 135 – 143.

21. **Мальцев, П. П.** Монолитная интегральная схема ГУН *V*-диапазона / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 10. – С. 645 – 648.

22. **Фёдоров, Ю. В.** Создание СВЧ монолитных ИС 5-миллиметрового диапазона для применения в перспективных КС / Ю. В. Федоров, П. П. Мальцев, Д. Л. Гнатюк и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – № 2. – С. 73 – 78.

23. Системы на кристалле со встроенными антеннами на наногетероструктурах A_3B_5 / Под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2018. – 524 с.

24. **Свид. о гос. рег. № 2013630159.** Топология ИМС. Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57…64 ГГц / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк и др. – 06.11.2013.

25. **Свид. о гос. рег. № 2013630171.** Топология ИМС. Преобразователь сигнала для диапазона 57…64 ГГц / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк и др. – 05.12.2013.

26. **Свид. о гос. рег. № 2015630131.** Топология ИМС. Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57…64 ГГц / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк и др. – 02.12.2015.

27. **Свид. о гос. рег. № 2015630131.** Топология ИМС. Интегрированный приемопередающий модуль для диапазона частот 57…64 ГГц / П. П. Мальцев, Ю. В. Федоров, Д. Л. Гнатюк и др. – 12.07.2016.

28. **Свид. о гос. рег. № 2017630085.** Топология ИМС. Двойной балансный смеситель для диапазона частот 32…36 ГГц / Ю. В. Федоров. – 05.02.2017.

29. **Свид. о гос. рег. № 2017630087.** Топология ИМС. Усилитель промежуточной частоты / Ю. В. Федоров, А. В. Зуев. – 05.03.2017.

30. **Свид. о гос. рег. № 2017630088.** Топология ИМС. Генератор, управляемый напряжением, для диапазона частот 32…36 ГГц / Ю. В. Федоров, О. С. Матвеенко. – 05.03.2017.

31. **Свид. о гос. рег. № 2017630089.** Топология ИМС. Малошумящий усилитель для диапазона частот 32…36 ГГц / Ю. В. Федоров. – 05.03.2017.

Статья поступила 8 ноября 2019 г.

1(544).indd 45 18.03.2020 10:56:42

УДК 621.385.73

ПАРАМЕТРЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ И ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ КАТОДОВ

Г. А. Жабин[1], Д. Ю. Архипов[1], Д. М. Седловец[2], М. П. Темирязева[3]

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

[2]*ИПТМ РАН, г. Черноголовка*

[3]*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

Представлены результаты исследования влияния температуры мишени и давления газа при ионно-плазменном напылении эмиссионных покрытий на морфологию, микроструктуру и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК). Используя методы растровой электронной и атомно-силовой микроскопии, показано, что с уменьшением давления в диапазоне 0,13…0,08 Па возрастают плотность покрытия и размер зерен, уменьшается шероховатость, а это влияет на эмиссионные свойства. При уменьшении температуры мишени менее 740 °С эмиссионные свойства МНОК ухудшаются. На основании данных спектроскопии комбинационного рассеяния изучен состав покрытий, осажденных на разных расстояниях и при разных давлениях газа.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), недокальные характеристики, долговечность, М-покрытие, КР-спектры, растровая электронная микроскопия (РЭМ), энергодисперсионный микроанализ (ЭДМА), атомно-силовая электронная микроскопия (АСМ)

PARAMETERS OF ION-PLASMA DEPOSITION OF OXIDE COATINGS AND EMISSION PROPERTIES OF SPUTTER-DEPOSITED CATHODES

G. A. Zhabin[1], D. Yu. Arkhipov[1], D. M. Sedlovets[2], M. P. Temiryazeva[3]

[1]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

[2]*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials Russian Academy of Sciences (IMT RAS), Chernogolovka*

[3]*Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino*

The results of studying the effect of target temperature, gas pressure and gas composition during ion-plasma deposition of oxide coatings on the morphology, microstructure and the emission properties of molecular sputter-deposited oxide cathodes are presented. Scanning electron microscopy and atomic force microscopy have been used. It is shown that with a decrease in pressure in the range 0.13...0.08 Pa, the coating density and grain size increase, the roughness decreases, which affects the emission properties. With a decrease in the target temperature below 740°C, the emission properties of the cathodes deteriorate. The composition of coatings deposited at different distances and gas pressures was studied using Raman spectra.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, emission characteristics, working life, M-coating, Raman spectra, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray analysis (EDXA), atomic force electron microscopy (AFM)

1(544).indd 46 18.03.2020 10:56:42

1. ВВЕДЕНИЕ

В СВЧ-технике для изготовления узлов и деталей в настоящее время широко применяются различные методы нанесения покрытий [1, 2]. При изготовлении эмиттеров циклотронных защитных устройств нанесение эмиссионного покрытия (М-покрытия) происходит методом реактивного ионно-плазменного напыления из нагретой мишени $(BaSrCa)CO_3$ [3, 4]. Размер зерен оксидного покрытия мишени составляет 1…2 мкм. В зависимости от технологических условий напыления, размер зерен синтезированного М-покрытия составляет 10…100 нм [4].

Применение реактивного ионно-плазменного метода напыления на поверхность молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК) позволяет повысить плотность оксидного покрытия, увеличить электропроводность и токоотбор, уменьшить рабочую температуру катодов, поскольку возрастает величина поверхностного соприкосновения кристаллов и уменьшается контактное сопротивление эмиссионного слоя [1, 3, 4].

Преимуществом ионно-плазменного нанесения эмиссионных покрытий является получение на миниатюрном керне равномерных по толщине тонких пленок, совпадающих по составу с мишенью, а также хорошая адгезия и возможность управления процессом.

В работе [4] показано, что при ионно-плазменном напылении МНОК в конструкции с горячей мишенью повышение температуры подложки с образцами более 250 °С ухудшает эмиссионные и адгезионные свойства М-покрытий.

Нанесение покрытия при низких давлениях повышает чистоту эмиссионного покрытия. Влияние изменения режимов ионно-плазменного осаждения М-покрытий на химический состав и эмиссионные свойства МНОК рассматривалось в работе [5].

В данной работе приведены результаты исследования влияния давления, состава рабочего газа, температуры мишени и расстояния до напыляемой пленки на морфологию и микроструктуру М-покрытий и эмиссионные свойства МНОК.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Исследование влияния давления и состава рабочего газа

Объектами исследований являлись образцы кремния КЭФ-18 и фольги из сплава ВР-27 ВП толщиной 50 мкм и размерами 5×5 мм, предварительно химически очищенные от органических загрязнений. В установке напыления на исследуемые образцы и катоды, расположенные на расстоянии 33…36 мм от центра электронно-оптической оси, проводилось осаждение М-покрытий с мишени на никелевом керне диаметром 42 мм, стандартного состава $(BaSrCa)CO_3$ по методике, описанной в [3, 4]. Давление в установке напыления перед напуском рабочего газа составляло $4{,}2\cdot10^{-4}$ Па. Скорость откачки газа из вакуумной системы равнялась около 500 л/с. Напыление М-покрытий проводилось на образцы и катоды толщиной 0,8…1 мкм при трех различных диапазонах давления рабочего газа (смесь Ar/CO_2 или Xe/CO_2) в магнитном поле при постоянном токе на мишени с «заземленной» подложкой. Содержание CO_2 в рабочей смеси газа составляло 45…50 %. Мощность разряда при напылении в режиме постоянного тока составляла около 160 Вт. Расстояние между распыляемой мишенью и образцами равнялось 24 мм. Температура мишени, измеряемая оптическим пирометром, поднималась при напылении до 750…760 °С. Температура подложки во время напыления составляла 175…220 °С. Измерение температуры подложки осуществлялось с помощью термопары.

1(544).indd 47 18.03.2020 10:56:42

Рабочее давление смеси газов Xe/CO_2 при напылении покрытий составляло 0,11…0,13 и 0,075…0,08 Па. Рабочее давление смеси газов Ar/CO_2 – 0,1 Па.

Элементный состав М-покрытий определялся методом рентгеновского спектрального микроанализа (РСМА), с использованием микроанализатора INCA Penta FETx3 Oxford Instruments в качестве приставки к растровому электронному микроскопу. Морфологию поверхности исследовали на растровом электронном микроскопе производства JEOL и атомно-силовом микроскопе фирмы АИСТ-НТ.

2.2. Исследование влияния температуры мишени

При напылении М-покрытия на образцы и катод № 1 температура мишени составляла 750…760 °С. При напылении М-покрытия на образцы и катод № 2 температура мишени равнялась 720…740 °С. Мишени имели одинаковый состав, толщина карбонатного покрытия составляла 125…130 мкм. Предварительное разложение карбонатов мишени проводилось в течение 90 мин. На данные образцы и катоды производилось напыление М-покрытия толщиной 0,8…1 мкм при постоянном давлении газа Ar/CO_2 0,1 Па и температуре медной подложки 175…200 °С. Варьируемым параметром была температура мишени. Нагрев мишени осуществлялся посредством накаливания вольфрамовой спирали подогревателя. Для определения элементного состава М-покрытия образцов применяли электронную Ожэ-спектроскопию, используя методику, описанную в работах [6, 7].

2.3. Влияние расстояния до распыляемой мишени на состав и эмиссионные свойства осажденного покрытия

Подложки из сапфира диаметром 6 мм располагали на расстоянии 24 и 20 мм от распыляемой мишени. После напыления пленок толщиной около 2,2 мкм данные образцы исследовали на растровом электронном микроскопе марки «Phenom» с энергодисперсионным детектором для микроанализа. Разрешение микроскопа – до 8 нм, ускоряющее напряжение – 4,8…20 кВ, увеличение – 150,000.

2.4. Влияние радиального расстояния до электронно-оптической оси распыляемой мишени на состав и эмиссионные свойства М-покрытия

Расстояние от осаждаемых пленок до мишени составляло 21…22 мм. Подложки из сапфира диаметром 6 мм располагали на расстоянии 27 мм от электронно-оптической оси. Подложки из ВР-27 ВП размерами 5×5 мм находились на расстоянии 33…36 мм от электронно-оптической оси. Поверхность напыленных образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе. Для исследования фазового состава М-покрытий, напыленных на разных радиальных расстояниях и при разных давлениях газа, проведен анализ спектров комбинационного рассеяния (КР), записанных на приборе «Bruker Senterra micro-Raman system» на длине волны лазерного излучения 532 нм. Диаметр пучка – 50 мкм, мощность – 20 мВт.

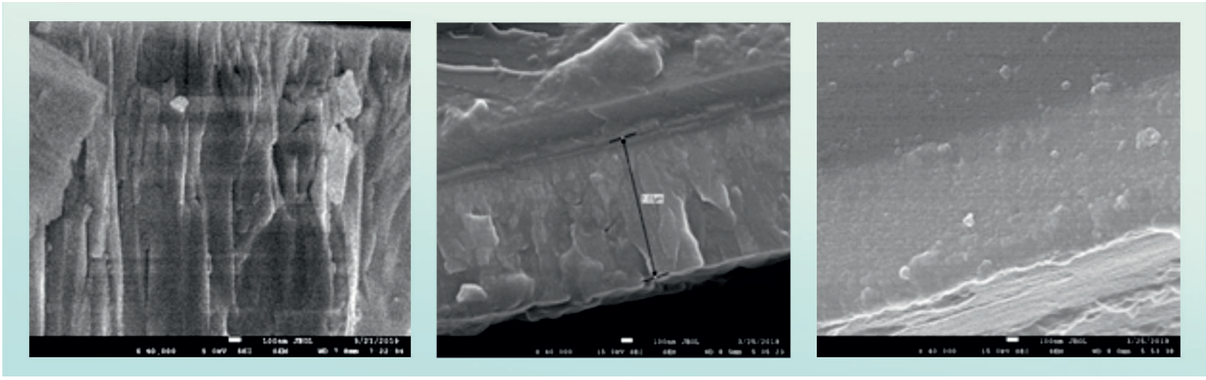
Измерение толщины пленок осуществлялось с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Эмиссионные свойства МНОК исследовали на макетах СВЧ-приборов на стенде термотренировки по стандартной методике [3].

1(544).indd 48 18.03.2020 10:56:42

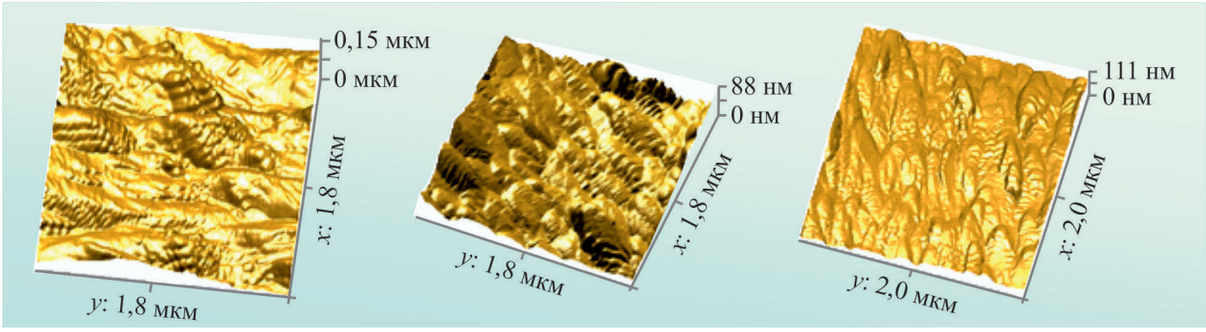
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 показаны результаты исследования морфологии поверхности М-покрытий и поперечного скола методами атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ).



а) *б*) *в*)

Рис. 1. РЭМ-изображения поперечного сечения М-покрытий на подложках ВР-27 ВП (*а*) и Si (*б*, *в*). Рабочее давление смеси газов Xe/CO_2 – 0,11…0,13 Па (*а*), Ar/CO_2 – 0,1 Па (*б*), Xe/CO_2 – 0,075…0,08 Па (*в*)



а) *б*) *в*)

Рис. 2. АСМ-изображение поверхности М-покрытий на подложке Si при давлении газа Xe/CO_2 – 0,11…0,13 Па (а), Ar/CO_2 – 0,1 Па (*б*), Xe/CO_2 – 0,075…0,08 Па (*в*)

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что с изменением давления рабочего газа морфология поверхности М-покрытий и микроструктура в поперечном сколе изменяются.

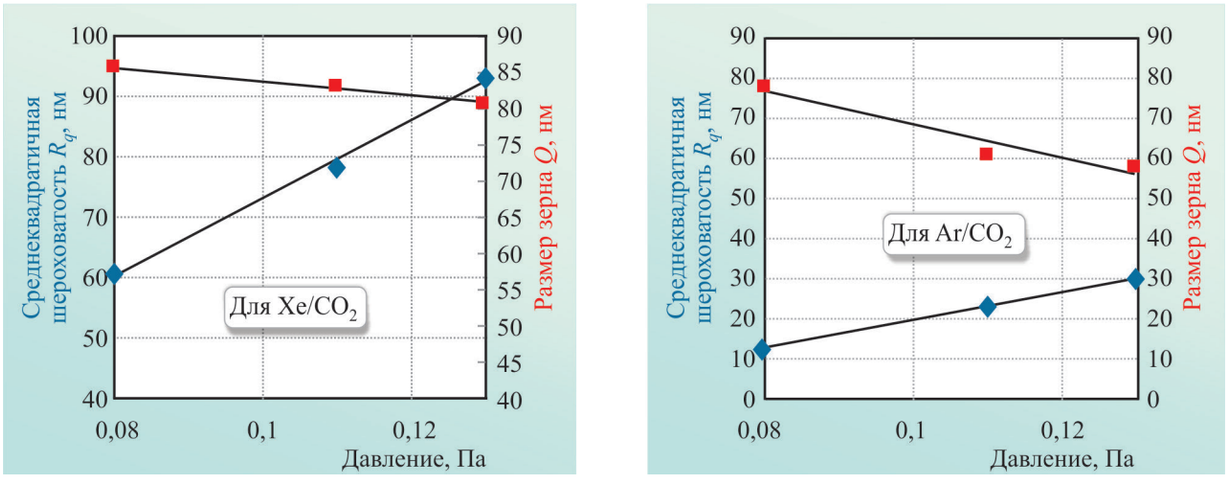
Покрытие образца № 1 в случае напыления при давлении 0,13 Па является более шероховатым, чем поверхность образца № 2 при давлении 0,1 Па (рис. 2), поперечный скол образца № 1 имеет «столбчатую» структуру. Поперечный скол М-покрытия образца № 2 на рис. 1 имеет «переходную» структуру. Наиболее плотным является покрытие образца № 3. При АСМ-исследовании морфологии М-покрытий выявлено, что с понижением давления рабочего газа шероховатость уменьшается (рис. 2, 3) [5].

С помощью программы анализа [8] АСМ-изображений были получены результаты о размере зерен Q и среднеквадратичной шероховатости R_q М-покрытий, осажденных при различных давлениях. По полученным данным построены графики зависимостей шероховатости и размера зерен от давления (рис. 3).

1(544).indd 49 18.03.2020 10:56:42

Элементный состав М-покрытий, определенный методом РСМА, показал, что процентное отношение масс Ba/Sr для образца № 1 составило 1,7; для образца № 2 – 3,6; для образца № 3 – 1,9 [5, 9].

Из рис. 3 следует, что с уменьшением давления газа шероховатость М-покрытия уменьшается. Это связано с возрастанием длины свободного пробега и энергии осаждаемых на подложку частиц. Увеличение энергии частиц приводит к увеличению размера зерен и плотности М-покрытия. Изменение давления при ионно-плазменном напылении приводит к изменению длины свободного пробега, механизма адсорбции и коалесценции на поверхности [10]. Среднеквадратичная шероховатость покрытия составила 78…93 нм для смеси Xe/CO_2 и 30 нм для смеси Ar/CO_2 [5].



а) *б*)

Рис. 3. Графики изменения шероховатости R_q и размера зерен Q от давления рабочего газа Xe/CO_2 (*а*) и Ar/CO_2 (*б*) [9]

При низкой скорости осаждения М-покрытия (P = 0,13…0,15 Па) возрастает рассеяние распыляемых частиц на атомах газа, что уменьшает миграционную подвижность осаждаемых частиц и приводит к понижению плотности пленки. Поперечный скол пленки имеет столбчатую микроструктуру, что согласуется с моделью структурных зон [11].

При более высокой подвижности частиц (P = 0,11…0,13 Па) микроструктура покрытия состоит из колонн, разделенных границами зерен. Размер зерен М-покрытия составил 50…58 нм для смеси Ar/CO_2 и более 80 нм для смеси газов Xe/CO_2. Среднеквадратичная шероховатость покрытия составила 78…93 нм для смеси Xe/CO_2 и 30 нм для смеси Ar/CO_2 [5].

При средней скорости осаждения (P = 0,87…0,1 Па) М-покрытие имеет «переходную» структуру (см. рис. 2).

При высокой скорости осаждения (P = 0,065…0,087 Па) М-покрытие имеет более плотную структуру (см. рис. 1, *в* и 2, *в*). Размер зерен увеличился до 78 нм при напылении в смеси Ar/CO_2 и до 85 нм – в смеси с ксеноном. Среднеквадратичная шероховатость покрытия составила 60 нм для смеси Xe/CO_2 и 12 нм для Ar/CO_2. С увеличением скорости осаждения концентрация атомов углерода в М-покрытии повысилась [9].

Анализ М-покрытий методами АСМ и РЭМ показал, что при напылении в атмосфере с аргоном покрытие имеет более мелкие зерна по сравнению с напылением в атмосфере Xe [5, 9].

1(544).indd 50 18.03.2020 10:56:42

Отношение атомных концентраций Ba/Sr для образцов № 1…3 равно 1,1; 2,3 и 1,2 соответственно. На эмиссионные свойства МНОК кроме активных щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) влияет содержание в покрытии соединений углерода. В работах [4, 5] было показано, что эмиссионная активность МНОК возрастает с увеличением концентрации углерода в М-покрытии.

При дальнейших исследованиях установлено, что катоды с эмиссионным покрытием, нанесенным в среде Xe/CO_2, показали большую эмиссионную активность по сравнению с покрытием, осажденным в среде Ar/CO_2 (рис. 4).

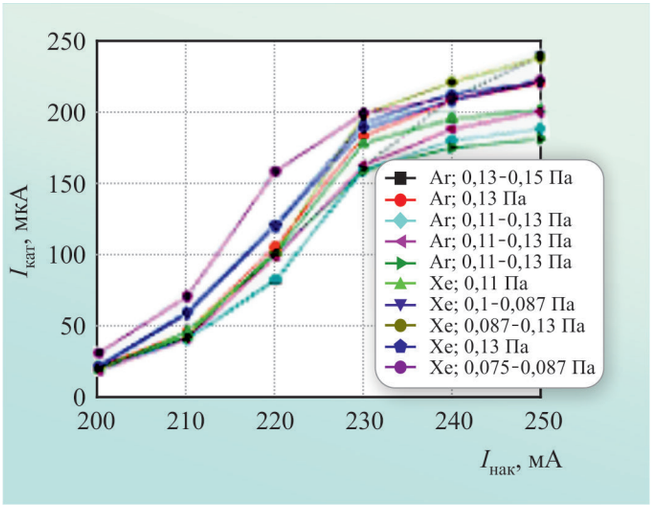


Рис. 4. Эмиссионные характеристики катодов с покрытием, осажденным при разных давлениях рабочего газа Xe/CO_2 и Ar/CO_2

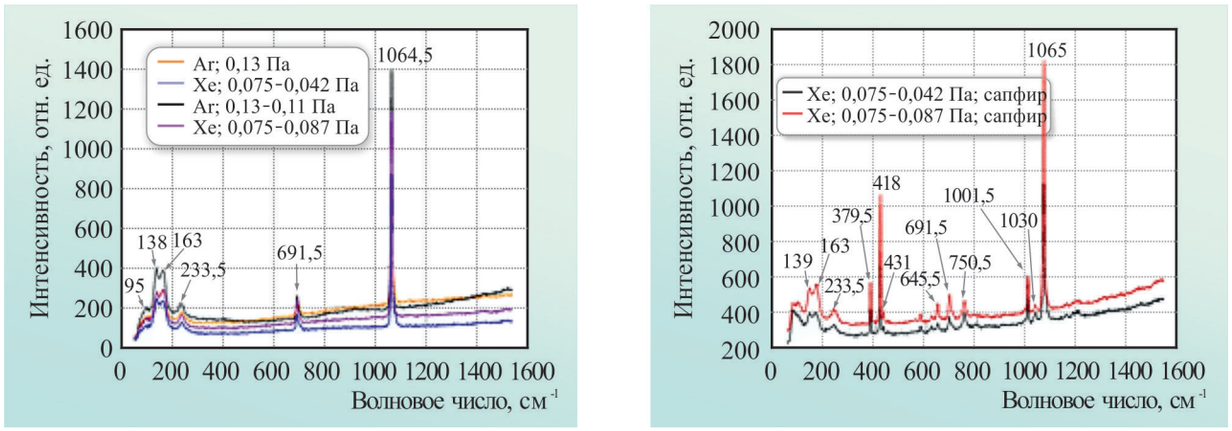
Следует отметить, что повышение давления газа в процессе напыления более 0,13…0,15 Па приводит к пробоям мишени. Понижение давления реактивного газа менее 0,07…0,06 Па приводит к нестационарным процессам распыления мишени и ухудшению эмиссионных свойств покрытий из-за уменьшения угла рассеяния газа.

Испытания на долговечность МНОК с покрытием толщиной 1,2 мкм, осажденным при давлении рабочего газа Xe/CO_2 0,075…0,08 Па, показали, что срок службы катода с плотностью тока 3 А/см^2 в непрерывном режиме при рабочей температуре 661…732 °С составил более 9000 ч.

На рис. 5, *а* изображены КР-спектры М-покрытий, осажденных на подложках ВР-27 ВП, которые расположены на радиальном расстоянии 33…36 мм, при изменении давления реактивных газов Xe/CO_2 и Ar/CO_2 в диапазоне 0,04…0,13 Па. Пики спектров 691,5 и 1064,5 см$^{-1}$ относятся к карбонат-иону CO_3^{-2}. Широкие полосы 233,5 см$^{-1}$, 163,5 см$^{-1}$ и 138 см$^{-1}$ (две последние перекрываются) – «коллективные» моды смеси $(BaSrCa)CO_3$ [12]. На графиках видно небольшое различие в относительных интенсивностях полос 163 и 138 см$^{-1}$. Положения полос в спектрах почти одинаковые, из чего следует вывод, что состав и кристаллическая структура плёнок в исследуемом диапазоне давлений сильно не изменяются.

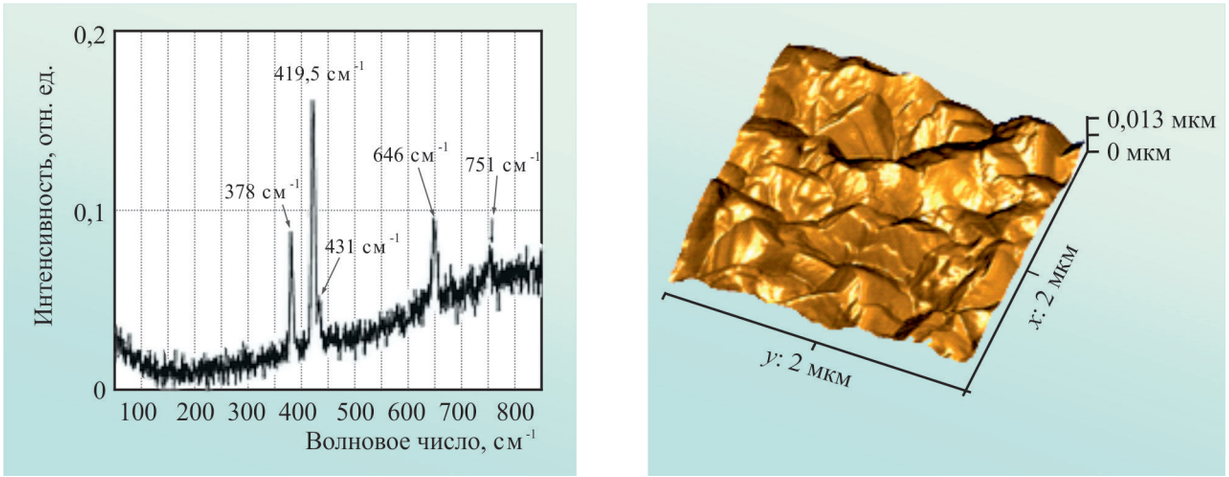
На рис. 5, *б* показаны КР-спектры М-покрытия, осажденного на подложках из сапфира, которые расположены на расстоянии 26…28 мм от электронно-оптической оси напыления. В [4] показано, что М-покрытия, напыленные на данном расстоянии, имеют дефекты (микротрещины). Поэтому спектры пленок включают сигналы от подложки сапфира.

1(544).indd 51 18.03.2020 10:56:43



а) *б*)

Рис. 5. КР-спектры М-покрытий на подложках ВР-27 ВП (*а*) и на подложках из сапфира (*б*) при разном давлении газа в среде Xe/CO_2 и Ar/CO_2



а) *б*)

Рис. 6. КР-спектры сапфира (α-Al_2O_3) [14] (*а*) и АСМ-изображение поверхности М-покрытия на сапфире, расположенном на расстоянии 26…28 мм от электронно-оптической оси (*б*)

Пики 379,5; 418; 431; 645,5; 750,5 $см^{-1}$ относятся к подложке из сапфира (α-Al_2O_3) (рис. 6, *а*) [14]. Смещение пика 1064,5 $см^{-1}$ в высокочастотную область на подложке из сапфира, видимо, связано с изменением содержания в пленке карбонат-иона. При АСМ-анализе изображения установлено, что среднеквадратичная шероховатость пленки составляет 20,3 нм, размер зерен покрытия на сапфире – 117,4 нм (рис. 6, *б*). Покрытия, осажденные на расстоянии 26…28 мм от электронно-оптической оси, показали неудовлетворительные эмиссионные характеристики.

Для исключения пробоя оксидной мишени в процессе ионно-плазменного распыления ее поверхность должна иметь хорошую проводимость и достаточно высокую температуру. При реактивном распылении мишени с повышением ее температуры степень ее покрытия диэлектрическим слоем понижается, что увеличивает скорость распыления [7]. В таблице показан элементный состав М-покрытия, рассчитанный из Ожэ-спектров [7].

1(544).indd 52 18.03.2020 10:56:43

№ катода	Элементный состав М-покрытия катодов, % (масс.)								
	Ar	C	O	Cu	Ni	Ca	Sr	Ba	Na
1	0,12	2,43	4,93	0,19	0,10	3,54	17,9	67,4	0,058
2	–	9,21	26,75	0,10	0,05	10,89	16,78	31,65	0,045

С увеличением температуры мишени в процессе ионно-плазменного напыления происходит увеличение в М-покрытии концентрации атомов Ba и уменьшение концентрации атомов Ca, а концентрация атомов Sr изменяется незначительно (17,9 и 16,8 % (масс.)). Коэффициент распыления возрастает с увеличением массы распыляемых атомов. Состав М-покрытия зависит от состава поверхности распыляемой мишени.

На рис. 7 изображены недокальные характеристики МНОК № 1 и 2.

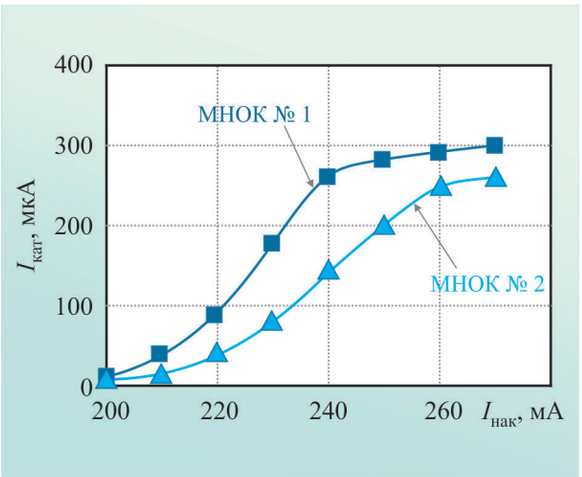


Рис. 7. Недокальные характеристики МНОК с покрытием, осажденным при разных температурах мишени:
1 – *T* = 750…780 °C; *2* – *T* = 720…740 °C

Анализ РЭМ-изображений (рис. 8, 9) показал, что образцы, находившиеся на расстоянии 20 мм от мишени, имеют микротрещины на поверхности покрытия. Элементный анализ показал, что

Элемент	Относительная атомная масса	Массовая доля
O	81,57	42,29
Ba	7,45	33,15
Sr	7,76	22,03
Ca	1,41	1,83
C	1,81	0,71

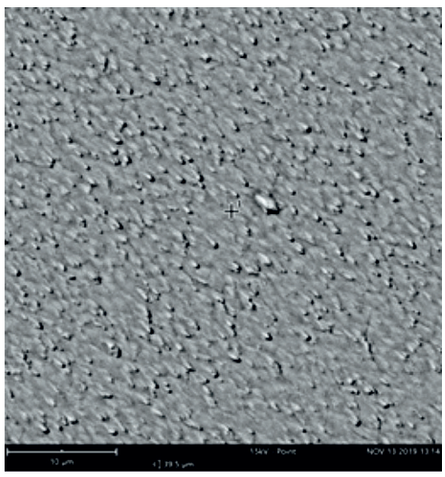
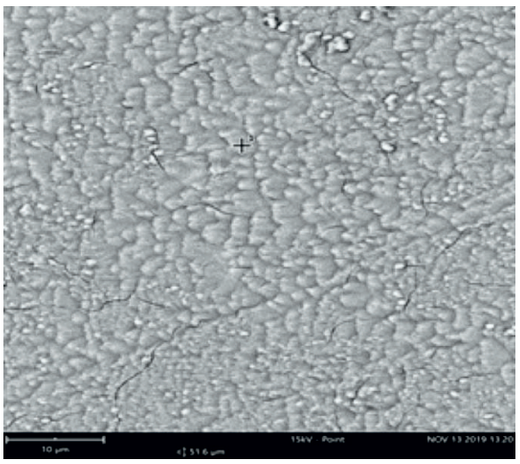


Рис. 8. РЭМ-изображение поверхности и элементный состав образца сапфира, находившегося при напылении покрытия на расстоянии 24 мм от мишени

1(544).indd 53 18.03.2020 10:56:43

данные образцы имеют более высокое содержание по ЩЗМ и меньшее содержание по углероду и кислороду по сравнению с образцами, находившимися на расстоянии 24 мм. Катоды с морфологией покрытия образца на рис. 8, показали хорошие эмиссионные свойства. Катоды с морфологией поверхности образца на рис. 9 показали низкие эмиссионные свойства. Возможной причиной является декарбонизация покрытия во время напыления при уменьшении расстояния до мишени из-за температурного влияния мишени и последующая гидратация его на воздухе.



Элемент	Относительная атомная масса	Массовая доля
O	77,56	36,09
Ba	9,17	36,64
Sr	9,56	24,35
Ca	1,98	2,31
C	1,73	0,60

Рис. 9. РЭМ-изображение поверхности и элементный состав образца сапфира, находившегося при напылении покрытия на расстоянии 20 мм от мишени

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состав, микроструктура, толщина и эмиссионные свойства синтезируемых М-покрытий изменяются в зависимости от условий осаждения покрытий (температуры подложки, температуры мишени, давления и состава газа, расстояния пленки до мишени и до центра электронно-оптической оси).

Показано, что изменение давления рабочего газа в диапазоне 0,075…0,13 Па при осаждении М-покрытий влияет на морфологию и микроструктуру поверхности и эмиссионные свойства МНОК.

Получены зависимости шероховатости и размера зерен М-покрытия от давления и состава газа при реактивном ионно-плазменном напылении. Плотность М-покрытия и латеральный размер зерен возрастают с уменьшением давления газа, а шероховатость поверхности уменьшается. М-покрытие, синтезированное в смеси Ar/CO_2, имеет более мелкие зерна по сравнению с напыленным в смеси с Xe/CO_2. Катоды с более плотным М-покрытием, осажденным в атмосфере Xe/CO_2 при давлении 0,075…0,08 Па, имели повышенное содержание карбонатов и показали повышенную эмиссионную активность.

Применение АСМ, РЭМ и РСМА и измерение температуры термопарой в разных точках подложки показали, что в процессе распыления мишени размером 42 мм на расстоянии от оси менее 26…28 мм температура подложки превышает 250…270 °С, что приводит к укрупнению зерен покрытия, появлению дефектов и изменению состава поверхности пленки [4]. Поэтому М-покрытия, осажденные в данной зоне установки напыления, имеют неудовлетворительные эмиссионные характеристики.

Для получения МНОК с оптимальными эмиссионными и эксплуатационными характеристиками необходимо, чтобы в процессе осаждения покрытия температура кернов не пре-

1(544).indd 54 18.03.2020 10:56:43

вышала 250 °С, температура распыляемой мишени при осаждении в смеси газов Ar/CO_2 (Xe/CO_2) и давлении 0,075…0,13 Па находилась в диапазоне 750…780 °С. При этих условиях радиальное расстояние от кернов катодов до центра подложки должно составлять 33…36 мм, расстояние до мишени – не менее 21…24 мм.

Авторы выражают признательность Ю. А. Будзинскому и А. В. Галдецкому за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев, А. Б.** Металлооксидные катоды электронных приборов /А. Б. Киселев. – Москва: МФТИ, 2001. – 240 с.

2. **Zhabin, G. A.** On the possibility of using detonation ceramic coatings as microwave energy absorbers / S. A. Vashin, S. V. Evseev, G. A. Zhabin et al. // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1313. – P. 012057.

3. **Жабин, Г. А.** Молекулярно-напыленный оксидный катод с повышенной до 10 А/см^2 плотностью тока / Г. А. Жабин, З. М. Магамеднебиев, А. Н. Пашков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 50 – 58.

4. **Жабин, Г. А.** Морфология поверхности, фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных покрытий / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 44 – 50.

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

6. **Жабин, Г. А.** Влияние повышенного отбора тока на состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 4 (543). – С. 45 – 49.

7. **Жабин, Г. А.** Влияние температуры мишени при ионно-плазменном напылении на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Тезисы докладов 29-й Международной Крымской конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2019. Севастополь, Россия. – С. 35 – 36.

8. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM) data analysis software. – 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gwyddion.net/documentation/user-guide-ru (дата обращения: 01.12.2019).

9. **Zhabin, G. A.** The effect of gas pressure during ion-plasma deposition on the microstructure of M-coatings and the emission properties of molecular sputter-deposited oxide cathodes / G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov // ITM Web of Conferences. – 2019. – Vol. 30. – P. 02006.

10. **Dzhumaliev, A. S.** Effect of the pressure of working gas on the microcrystalline structure and magnetic properties of the Co film deposited with the aid of magnetron sputtering / A. S. Dzhumaliev, Yu. V. Nikulin, Yu. A. Filimonov // Radiotekhnika i Elektronika. – 2018. – Vol. 63, No 1. – P. 90 – 96.

11. **Mahieu, S.** Biaxial alignment in sputter deposited thin films / S. Mahieu, P. Ghekiere, D. Depla, R. De Gryse // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 515. – P. 1229 – 1249.

12. **Kaabar, W.** Raman spectroscopic study of mixed carbonate materials / W. Kaabar, S. Bott, R. Devonshire // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2011. – Vol. 78 (1). – P. 136 – 141.

13. **Берлин, Е. В.** Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.

14. **Berezhinsky, L. I.** Investigation of Al-Zerodur interface by Raman and secondary ion mass-spectroscopy / L. I. Berezhinsky, V. P. Maslov, V. V. Tetyorkin et al. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2005. – Vol. 8, No 2. – P. 37 – 40.

Статья поступила 24 декабря 2019 г.

1(544).indd 55 18.03.2020 10:56:44

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.77

О ПРОБЛЕМЕ ВЫПУСКА КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

Н. С. Данилин, Д. М. Димитров

ЗАО «Космос Комплект», г. Москва

Проблема выпуска электронной компонентной базы для космической аппаратуры все еще актуальна и резко возрастает в связи с развитием новой космической индустрии серийного массового производства малых космических аппаратов на основе стандартных модулей.

КС: качество, микросхема, применение, космическая аппаратура

ON THE ISSUE OF PRODUCING HIGH-QUALITY DOMESTIC MICROCIRCUITS FOR USE IN SPACE EQUIPMENT

N. S. Danilin, D. M. Dimitrov

CJSC «Cosmos Complect», Moscow

The problem of producing an electronic component base for space equipment is still urgent and is growing dramatically in connection with the development of a new space industry for the large-scale mass production of small spacecraft based on standard modules.

Keywords: quality, microcircuit, application, space equipment

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема выпуска качественной и долговечной космической микроэлектроники была в эпицентре внимания и деятельности МОМ постоянно. В этой связи, помимо вопросов технологии разработки и выпуска микросхем, особое внимание всегда уделялось вопросам качества и надежности. Так, еще в 1979 г. была попытка создания Института надежности космического приборостроения (ИНКП) ракетной и космической техники, ежегодно проводится Международная научно-техническая конференция «Электронная компонентная база космических систем» и т. п. По тематике электронной компонентной базы (ЭКБ) для космической аппаратуры выпущено множество монографий.

Тем не менее, проблема выпуска ЭКБ для космической аппаратуры все еще актуальна и резко возрастает в связи с развитием новой космической индустрии серийного массового производства малых космических аппаратов на основе стандартных модулей.

2. «БЕЛЫЕ ПЯТНА» В МИРЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКБ И ВОПРОСЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Прежде всего, необходимо определить, что такое «белые пятна» в отечественной ЭКБ для космического и специального применения. Это те микросхемы и электронные модули, которые нужны разработчикам аппаратуры, но которые нельзя найти в отечественных перечнях (или они есть, но недоступны для применения по ряду причин в конкретном проекте) либо их нельзя

1(544).indd 56 18.03.2020 10:56:44

импортировать. Выбор какого-то типономинала ЭКБ определяется требованиями к его техническим и надежностным параметрам, срокам поставки и периоду применения.

Известно, что разработчики ведущих мировых производителей космической и специальной аппаратуры пользуются широким набором типономиналов ЭКБ – около 5 000.

Еще до введения санкций на поставку ЭКБ из-за рубежа, в Роскосмосе была проведена работа по оптимизации перечня ЭКБ иностранного происхождения (ИП) для космического применения с целью его сокращения и исключения изделий разных производителей с похожими параметрами. Это привело к созданию перечня ЭКБ ИП из 1680 наименований, который был утвержден действующим тогда главой Роскосмоса О. Н. Остапенко. Этот перечень после последующих сокращений был доведен до примерно 900 позиции и утвержден СГК по микроэлектронике (акад. Г. Я. Красников). Перечень стал ориентиром в программе импортозамещения под эгидой Минпромторга РФ. Работа по импортозамещению была регламентирована введением системы выполнения ОКР по каналу «заказчик ЭКБ – ГНИУ РКС – МНИИРИП – Минпромторг».

Оценку результатов перечисленных мероприятий к 2019 г. можно свести в самом общем виде к следующему – запущено более 170 ОКР по перечню из 900 ЭКБ. Завершено с десяток работ, а в потребительской доступности и того меньше. Разработанный Микроном «минимально необходимый и достаточный» набор микросхем для разработки космической аппаратуры пока не позволяет создавать инновационные по мировым понятиям изделия в этой области.

Причин для такого состояния дел несколько:

– высокая стоимость ОКР;

– длительные сроки проведения ОКР и процесс внедрения в производстве;

– высокая себестоимость изделий ввиду малой востребованной серийности и нерегулярных закупочных запросов.

Таким образом, надо понимать, что отечественным производителям невыгодно производить ЭКБ для космоса и спецпроектов. В то же самое время значительно выгоднее для них заниматься ОКР и использовать услуги иностранных производителей на этапе создания опытных образцов. И даже с этой позиции надо отметить, что возможное число ОКР, которые они могут взять на себя в год, весьма ограниченно по сравнению с потенциальным объемом ОКР, который ожидает свою очередь.

3. ТЕХНОЛОГИЯ «СИСТЕМА В КОРПУСЕ» И ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

«Система в корпусе» (СвК) включает широкий набор ЭКБ – от однокристальной микросхемы до многокристальных модулей с интеграцией дискретных, фотонных и пассивных компонентов, МЭМС и др. СвК собрана в одном стандартном или специализированном микроэлектронном корпусе и представляет собой законченное изделие.

Для практической реализации этой технологии необходимо только организовать банк полупроводниковых кристаллов и иметь доступ к участку сборки интегральных схем. Банк кристаллов предполагает наличие шкафов хранения кристаллов в азотной контролируемой среде (срок хранения – до 20 лет), которые расположены в климатизированном помещении с чистотой среды 10 000.

Для получения инженерного образца любой микросхемы потребуется ОКР в рамках 1…3 месяцев с участием схемотехника, технолога и конструктора. После проведения испытаний можно начинать сборку требуемого количества изделий. Весь вопрос в наличии подходящего кристалла, поскольку почти всегда находится стандартный отечественный корпус.

Накопление кристаллов в банке – процесс постоянный и целенаправленный. Это не разовое

1(544).indd 57 18.03.2020 10:56:44

мероприятие, а объект специализированной деятельности по всему отечественному и мировому рынку. К примеру, компания ООО «Космос Комплект», после организации своего банка кристаллов в 2015 г., за 5 лет работы накопила более 30 типов кристаллов с различным размером партии (от 150 до 5000 шт.), в том числе СОЗУ, MRAM, Flash, операционные усилители, контроллеры, микропроцессоры и др., которые отвечают спецтребованиям космической промышленности. Компания уже собрала на базе своего банка кристаллов и предлагает на отечественном рынке 8-канальный датчик тока с выходом по напряжению, 16М СОЗУ и 16М MRAM.

Имея кристаллы и налаженный процесс сборки, можно в течение нескольких месяцев удовлетворить запрос разработчика аппаратуры на заказанную микросхему.

Технология СвК – самый эффективный на сегодня со всех точек зрения подход к реализации инновационной стратегии «системная микроминиатюризация» при разработке аппаратуры космического назначения. Ведь в одном корпусе можно собрать целые узлы и даже устройства с редуцированными габаритами, массой, энергопотреблением и одновременно с этим при значительно увеличенной функциональности на единицу конструктивного объема.

4. ВЫВОДЫ

На основании вышеуказанного, можно сделать несколько выводов.

1. Воспроизводить микросхемы, которые продаются на мировом рынке и которые востребованы в малом количестве и при большом числе типономиналов, – дорого и долго, а следовательно, и весьма нецелесообразно. При таком подходе блокируются большие отечественные ресурсы по проектированию и производству, что приводит к гарантированному отставанию и выпуску морально устаревших изделий. Стоит разрабатывать только новые для рынка изделия.

2. Нужно срочно определить структуры, которые целенаправленно и постоянно собирают кристаллы по всем отечественным и мировым рынкам и сохраняют их в соответствующих банках. Заказы на кристаллы формируются прибористами по текущим потребностям, установленными перспективными перечнями и потребностями перспективных исследований.

3. К структурам, которые связаны с содержанием банков кристаллов, необходимо сформировать группы для разработки инженерных образцов по технологии СвК (в составе схемотехник, технолог и конструктор) с последующей передачей на сборочное производство.

4. При выполнении указанных рекомендаций получаем несколько эффектов: длительность цикла «проектирование – производство» партии микросхем – от 6 до 12 месяцев; снижение себестоимости продукции в несколько раз; возможность начать производство новой партии микросхем в течение нескольких дней после заявки; возможность избежать неблагоприятных стечений обстоятельств на мировом рынке и др.

5. Банки с кристаллами и технологии СвК нужно немедленно вводить в практику отечественной микроэлектроники, что обеспечит высокую экономическую эффективность воспроизведения стандартных для рынка микросхем и возможность реализации инновационных решений.

В списке литературы приводим перечень некоторых монографии по данной тематике с участием авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин, Н. С.** Инновационные космические микросистемы в корпусе / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 70 с.

2. **Данилин, Н. С.** Системная микроминиатюризация и малые спутники. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 54 с.

3. **Данилин, Н. С.** Практическая методология разработки систем в корпусе / Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, М. Д. Димитров, И. Х. Сабиров. – М.: Издательский дом «Спектр», 2019. – 110 с.

Статья поступила 27 января 2020 г.

1(544).indd 58 18.03.2020 10:56:44

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.389

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА ЧАСТОТНОГО КОМПАРАТОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ БОРТОВЫХ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

М. Н. Уткин

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

Рассмотрена схема частотного компаратора на основе преобразователя временных интервалов в цифровой код. Представлены результаты анализа влияния характеристик преобразователя на погрешность оценки нестабильности частоты квантового стандарта частоты. Предложена и экспериментально исследована схема ПДА-преобразователя временных интервалов в цифровой код, которая позволяет существенно улучшить точностные характеристики частотного компаратора данного типа.

КС: частотный компаратор, преобразователь временных интервалов в цифровой код, ГЛОНАСС, погрешность оценки, передискретизация, дизеринг, автокалибровка

SYNTHESIS AND IMPLEMENTATION OF FREQUENCY COMPARATOR BREADBOARD USED FOR STABILITY MEASUREMENT OF SPACE VEHICLE ATOMIC FREQUENCY STANDARDS

M. N. Utkin

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

The paper deals with frequency comparator structure based on time to digital converter. An analysis of converter characteristics influence on stability measurement error is presented. A new converter structure is proposed and experimentally studied that allows to significantly reduce frequency comparator noise floor.

Keywords: frequency comparator, time to digital converter, GLONASS, measurement error, oversampling, dithering, self-calibration

Спутниковая навигация, предоставляемая системой ГЛОНАСС, нашла широкое применение в навигационно-временном обеспечении (НВО) широкого круга потребителей. Необходимым условием достижения высокой точности НВО является использование бортовых квантовых стандартов частоты (КСЧ) для поддержания прецизионной взаимной синхронизации шкал времени навигационных космических аппаратов (НКА) [1]. Аномалии в работе КСЧ, вызванные воздействием внешних факторов, а также внутренними процессами, протекающими в КСЧ, приводят к изменению нестабильности и действительного значения частоты выходного сигнала генератора, что снижает точность навигационного поля, создаваемого системой ГЛОНАСС, и требует непрерывного контроля частоты КСЧ. Существующие ограничения на местоположе-

1(544).indd 59 18.03.2020 10:56:44

ние наземных средств системы ГЛОНАСС приводят к появлению протяженных участков траектории НКА, на которых контроль шкал времени наземными средствами невозможен, как следствие, время обнаружения аномалии составляет 16 ч [2].

Наиболее рациональным решением задачи непрерывного контроля характеристик КСЧ является установка на НКА автономной системы для обнаружения нарушений в работе КСЧ [3]. Обобщенная структурная схема системы представлена на рис. 1. В основу работы положен принцип непрерывного контроля расхождения шкал времени (РШВ), формируемых на основе сигналов ансамбля КСЧ. Выявление значительного изменения величины взаимного РШВ или ухудшение стабильности сигналов указывает на аномальный режим работы одного из КСЧ, который выявляется и исключается из процедуры формирования системной частоты.

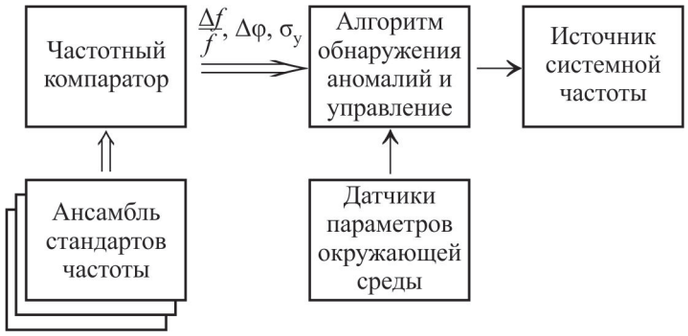


Рис. 1. Структурная схема автономной системы контроля НКА

Одним из основных элементов системы является бортовой частотный компаратор (ЧК). Повышение стабильности частоты бортовых КСЧ, а также ужесточение требований потребителей к оперативности контроля их характеристик делают необходимой разработку ЧК с вносимой погрешностью оценки среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения (СКДО) измеренного значения частоты на уровне $3\cdot10^{-14}$ при времени измерения 1 с. Создание указанного прибора позволит обеспечить оперативное (не более 100 с) обнаружение скачков частоты величиной $5\cdot10^{-14}\ldots1\cdot10^{-13}$ отн. ед., а также контроль кратковременной нестабильности частоты перспективных бортовых КСЧ.

Анализ открытых источников показывает (табл. 1), что современные цифровые ЧК удовлетворяют требованию к точности оценки СКДО частоты перспективных КСЧ при условии применения кросскорреляционной обработки. ЧК данного типа содержит не менее четырех каналов измерения частоты, в каждом из которых используются быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок цифровой обработки, характеризующиеся значительной потребляемой мощностью. Это определяет неудовлетворительные массогабаритные и энергетические характеристики прибора в целом.

Таблица 1

Сравнительные характеристики измерителей стабильности частоты

Название прибора (авторы)	Метод измерения	$\sigma_y^{ИС}$ ($\tau_и$ = 1 с)	Год	Источник
PO7D-2	Умножения разности частот	$1{,}4\cdot10^{-12}$	2012	[4]
VCH-314	Умножения разности частот	$1{,}1\cdot10^{-13}$	2004	[5]

1(544).indd 60 18.03.2020 10:56:44

Окончание табл. 1

Название прибора (авторы)	Метод измерения	$\sigma_y^{ИС}$ ($\tau_И$ = 1 с)	Год	Источник
PicoTime-1U	Биений	$1{,}5\cdot10^{-12}$	2018	[6]
М. Н. Уткин, С. Ю. Шкадов	Двойного смешивания частоты (ДСЧ) (цифровая реализация)	$5\cdot10^{-14}$	2014	[7]
K. Mochizuki, M. Uchino, T. Morikawa	ДСЧ (цифровая реализация)	$4\cdot10^{-14}$	2007	[8]
Y. Liu, X. H. Li, W. L. Wang	ДСЧ (смешанная реализация)	$6{,}6\cdot10^{-14}$	2011	[9]
X. Li, Y. Liu, D. Wang, Y. Bian	Биений + цифровой тригонометрический детектор	$3{,}5\cdot10^{-14}$	2007	[10]
VCH-321	ДСЧ (цифровая реализация и кросскорреляционная обработка)	$1\cdot10^{-14}$	2011	[11]
Microsemi 5120A	ДСЧ (цифровая реализация и кросскорреляционная обработка)	$3\cdot10^{-15}$	2018	[12]

Известно [7], что при использовании тригонометрического цифрового детектора погрешность оценки СКДО в каждой паре каналов измерения частоты преимущественно определяется шумами АЦП:

$$\sigma_y^{ИС} = \frac{2^{-N+1} T_0 \sqrt{\Delta F}}{\tau_и \sqrt{3 F_T}}, \qquad (1)$$

где N – разрядность АЦП; T_0 – период колебания измеряемого генератора; ΔF – полоса анализа шумов; F_T – частота дискретизации АЦП.

Таким образом, основным элементом бортового ЧК, который определяет его характеристики, является АЦП. В настоящее время основным направлением улучшения характеристик АЦП [13] является повышение частоты дискретизации без расширения динамического диапазона, что не позволяет удовлетворить перспективным требованиям к точности оценок СКДО в ЧК, поскольку вносимая ЧК погрешность оценок СКДО слабо зависит от частоты дискретизации (см. (1)).

Анализ альтернативных схемных решений по построению ЧК показал, что повышение точности оценки СКДО может быть достигнуто путем применения интегрального преобразователя временных интервалов в цифровой код в схеме ЧК с предварительным частотным преобразованием, которая не содержит АЦП. При этом из традиционной схемы ЧК с предварительным частотным преобразованием исключается преобразователь частоты, а грубый фазовый детектор заменяется на прецизионный преобразователь временных интервалов в цифровой код (ПВИЦК) – устройство для определения временного интервала между двумя импульсами напряжения с погрешностью не более единиц пикосекунд. Схема ЧК изображена на рис. 2 и включает в себя преобразователь «временной интервал – цифровой код», на входы которого поступают импульсные сигналы исследуемого генератора (ИГ) и опорного генератора (ОГ), запоминающее устройство (ЗУ) для хранения результатов преобразования, блок СКДО для оценки СКДО по массиву результатов

1(544).indd 61 18.03.2020 10:56:44

преобразования, хранящихся в ЗУ. Тактированием схемы управляет генератор тактовых импульсов, который с периодом $\tau_И$ формирует импульсы разрешения работы для остальных частей схемы.

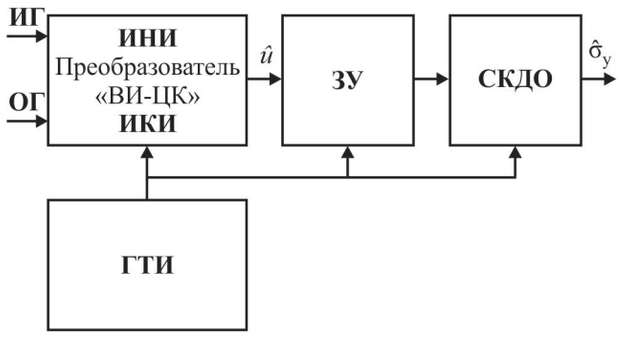


Рис. 2. Структурная схема частотного компаратора
на основе преобразователя «временной интервал – цифровой код»

С использованием ранее предложенной автором математической модели ЧК на основе ПВИЦК [14], которая описывает влияние характеристик функции преобразования ПВИЦК на погрешность оценки СКДО частоты в ЧК, были выявлены основные источники ошибок в оценке нестабильности частоты: ошибка квантования, дифференциальная нелинейность преобразования, температурные флуктуации погрешности полной шкалы.

В аналитической форме зависимость оценки СКДО частоты от указанных характеристик преобразователя имеет следующий вид

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\left(\sigma_y^{ИГ}\right)^2 + \frac{\tau_{EMP}^2}{6\tau_И^2} + \frac{2\sigma_{ЛД}^2}{\tau_И^2} + \left(s_{\tau 0} + s_{ПШ}\frac{u_0}{\tau_{ДИ}}\right)^2 \sigma_T^2}, \qquad (2)$$

где $\sigma_y^{ИГ}$ – СКДО частоты исследуемого генератора; τ_{EMP} – шаг квантования ПВИЦК; $\tau_И$ – интервал измерения СКДО частоты; $\sigma_{ЛД}$ – средняя квадратическая дифференциальная нелинейность; $s_{\tau 0}$ – крутизна зависимости погрешности начала шкалы от температуры; $s_{ПШ}$ – крутизна зависимости погрешности полной шкалы от температуры; u_0 – средняя поправка часов на входе ПВИЦК на интервале наблюдения; $\tau_{ДИ}$ – диапазон преобразуемых ПВИЦК входных интервалов времени; σ_T – СКДО температуры корпуса ПВИЦК.

С использованием полученного выражения был сформирован бюджет ошибок с равным вкладом каждой составляющей ошибки и определены основные требования к преобразователю временных интервалов в цифровой код: $\tau_{ДИ} \geq 200$ нс, $\tau_{EMP} \leq 35$ фс, $\sigma_{ЛД} \leq 10$ фс, $s_{\tau 0} + s_{ПШ} \leq 1{,}44$ пс/°С.

Анализ характеристик современных ПВИЦК, представленных в литературе (табл. 2), показал, что заданным требованиям не удовлетворяет ни один тип преобразователей. Для достижения заданных характеристик ПВИЦК синтезирована модифицированная структурная схема преобразователя, которая представлена на рис. 3 и включает в себя коммутатор (К), линию задержки (ЛЗ), временной дискриминатор (ВД), блок двойной коррелированной выборки и автокалибровки (ДКВиАК), а также цифровой децимирующий фильтр (ДФ). Назовем данную структуру ПДА-преобразователем (сокращение от слов передискретизация, дизеринг, автокалибровка). Основу ПДА-преобразователя составляют ВД и ДФ. В ВД осуществляется относительно грубое квантование интервала времени между фронтами импульсов на входах импульса

1(544).indd 62 18.03.2020 10:56:44

начала интервала времени (ИНИ) и импульса конца интервала времени (ИКИ). ВД может быть построен по любой схеме однотактного ПВИЦК, которая обеспечивает необходимый диапазон преобразуемых интервалов.

Таблица 2

Статические характеристики преобразователей различных типов

Тип	$\tau_{ЕМР}$, пс	$\tau_{ДИ}$, нс	$\delta_{ЛД}$, ЕМР	$\sigma_y \cdot 10^{-12}$	Год	Источник
Простая линия задержки	10,5	27	10	43,1	2012	[15]
Простая линия задержки	12,6	0,5	0,15	5,2	2011	[16]
Простая линия задержки	74	9	1	42,7	2013	[17]
Простая линия задержки	7,4	7,6	0,7	3,7	2017	[18]
Простая линия задержки	5	2	0,27	2,1	2018	[19]
10 параллельных линий задержки	10	6,7	2,5	11	2010	[20]
Нониусная линия задержки	8	32	0,5	3,7	2010	[21]
Двойная нониусная линия	4,8	0,6	1	2,8	2010	[22]
С растяжением временного интервала	1,25	0,64	0,8	0,7	2008	[23]
С растяжением временного интервала	9	320	1,5	6,6	2011	[24]
Конвейерный: счетный + + линия задержки	110	$4 \cdot 10^5$	0,49	50	2012	[25]
Конвейерный: счетный + + линия задержки	20	$1 \cdot 10^5$	2	9,1	2013	[26]
Конвейерный: кольцевая и простая линии	36	$1 \cdot 10^6$	0,5	16,4	2009	[27]
Конвейерный: счетный + + простая + нониусная	10	160	0,04	4,1	2013	[28]
Конвейерный: счетный + + нониусная	19,5	40	0,5	8,9	2017	[29]
Конвейерный: счетный + + нониусная	23	50	0,4	10,1	2017	[30]

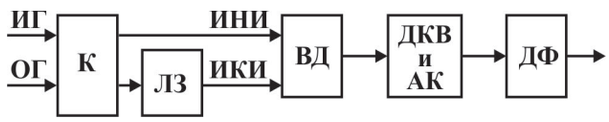


Рис. 3. Обобщенная структурная схема ПДА-преобразователя

Спектр полезного сигнала, который описывает стабильность частоты квантового генератора, лежит в области частот от постоянного тока до 10 Гц. Частота следования импульсов на входах ИНИ и ИКИ существенно превышает удвоенную полосу частот анализа, что позволяет

1(544).indd 63 18.03.2020 10:56:45

использовать эффект передискретизации, благодаря которому мощность шума квантования распределяется в широкой полосе частот, уменьшая мощность шума в полосе анализа. ДФ выделяет интересующую полосу частот и уменьшает высокую частоту следования отсчетов сигнала примерно до удвоенной верхней частоты спектра исследуемого сигнала [31]. За счет подавления шума квантования вне полосы частот анализа повышается отношение «сигнал/шум квантования», что эквивалентно уменьшению шага квантования.

Для уменьшения $s_{\tau 0}$ использован метод автокалибровки способом двойной коррелированной выборки (ДКВ) [32], который заключается в последовательном проведении двух преобразований различных интервалов времени. На первом шаге производится оценка исследуемого интервала времени, искаженного ошибкой квантования $e_{\text{Кв1}}$ и погрешностью начала шкалы $\delta_{\tau 0}$:

$$\hat{\tau}_1 = \delta_{\tau 0} + \tau + e_{\text{Кв1}}. \tag{3}$$

На втором шаге оценивается погрешность смещения начала шкалы:

$$\hat{\tau}_2 = \delta_{\tau 0} + e_{\text{Кв2}}. \tag{4}$$

Из результата первого преобразования вычитается результат второго. Разность двух выборок оказывается свободной от постоянной погрешности начала шкалы

$$\hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2 = \tau + e_{\text{Кв1}} - e_{\text{Кв2}}. \tag{5}$$

Для уменьшения $s_{\text{ПШ}}$ в схеме реализован метод автокалибровки [33], который заключается в оценке методом ДКВ интервала времени заранее известной длительности T_0:

$$\hat{T}_0 = \hat{\tau}_3 - \hat{\tau}_2 = T_0 + e_{\text{Кв3}} - e_{\text{Кв2}}. \tag{6}$$

Результаты данной оценки позволяют определить реальный наклон функции преобразования, который затем используется для коррекции результатов преобразования исследуемого интервала времени:

$$\hat{\tau} = (\hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2)\frac{T_0}{\hat{T}_0} = \frac{\hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2}{\hat{\tau}_3 - \hat{\tau}_2} T_0. \tag{7}$$

Улучшение разрешающей способности преобразования с помощью метода передискретизации возможно при условии некоррелированности шума квантования, которое не всегда выполняется на практике. Для декорреляции шума квантования в линии сигнала ИКИ используется ЛЗ с управляемым временем распространения. Метод ДКВ устраняет чувствительность ПВИЦК к погрешности начала шкалы, при этом она входит в результаты каждого преобразования дискриминатора ($\hat{\tau}_i$, см. (3), (4)). Таким образом, изменяя $\delta_{\tau 0}$ с помощью ЛЗ, можно менять длительность интервала времени на входе дискриминатора. При случайном характере изменения $\delta_{\tau 0}$ в широком диапазоне значений шум квантования становится независимым с равномерной спектральной плотностью средней мощности.

Можно показать [34], что в ПДА-преобразователе основные статические ошибки ВД не оказывают влияния на статические ошибки ПВИЦК в целом, а приводят к увеличению шумовой составляющей преобразования, величина которой снижается в $\sqrt{K}$ раз, где $K = F_{\text{Д}}/2\Delta F$ – коэффициент передискретизации. Применение метода ДКВ в предположении использования идеализированного коммутатора полностью устраняет погрешность начала шкалы и ее температурную чувствительность. Применение метода автокалибровки приводит к уменьшению температурной чувствительности погрешности полной шкалы (основного источника ошибки СКДО частоты на больших интервалах времени) в $\tau_{\text{и}}/4\tau_{\text{ДИ}}$ раз, т. е. на несколько порядков.

1(544).indd 64 18.03.2020 10:56:45

Для подтверждения корректности разработанных предложений выполнены разработка и экспериментальное исследование характеристик ЧК на основе ПДА-преобразователя временных интервалов в цифровой код. Бортовые приборы космического аппарата должны гарантировать стойкость к факторам космического пространства, что обеспечивается применением специализированной электронной компонентной базы (ЭКБ). Для сокращения времени и стоимости создания прибора, работы выполнены на макете, изготовленном на ЭКБ категории качества «Industrial», основные характеристики которой подобраны таким образом, чтобы обеспечить с необходимой точностью соответствие основным параметрам специальной элементной базы: вместо базового матричного кристалла 5400ТР045А (АЕНВ.431260.237ТУ) использована программируемая логическая схема (ПЛИС) семейства Cyclone IV фирмы Altera.

Структурная схема разработанного и изготовленного макета ЧК на основе ПДА-преобразователя представлена на рис. 4. Макет реализует полностью законченный ПВИЦК и систему обработки результатов на базе ПЭВМ. Функционально прибор состоит из двух компараторов напряжения, ПЛИС, управляемой ЛЗ и интерфейсной микросхемы. Компараторы напряжения используются для преобразования синусоидальных входных сигналов в последовательность прямоугольных импульсов с требуемыми уровнями напряжений. ПЛИС используется для реализации ПДА-преобразователя временных интервалов в цифровой код на базе конвейерного ВД, реализации функций управления работой ПВИЦК и обмена по последовательному интерфейсу. ЛЗ обеспечивает изменение длительности преобразуемого интервала времени. Интерфейсная микросхема используется для передачи на ПЭВМ результатов преобразования исследуемого интервала времени, интервала нулевой длительности и периода опорного сигнала. В ПЭВМ широко известными способами выполняются следующие вычисления: низкочастотная фильтрация отсчетов сигнала, децимация, оценивание статистических характеристик.

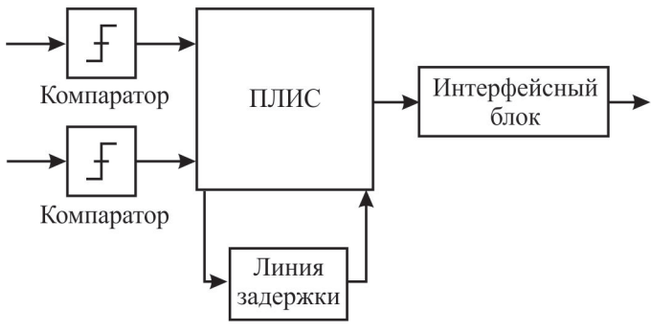


Рис. 4. Структурная схема макета ПДА-преобразователя

ВД строится по конвейерной схеме (рис. 5) и состоит из двух каскадов: грубого и точного. Принцип работы грубого каскада ВД основан на реализации счетного метода измерения длительности интервала времени: по сигналу ИНИ происходит запуск ждущего мультивибратора, построенного на основе кольцевой линии логических инверторов, счетчик грубого кода подсчитывает число $N_{гр}$ полных периодов колебания ждущего мультивибратора до прихода сигнала ИКИ. Схема формирования сигнала ошибки формирует сигналы для точного каскада преобразователя.

Точный каскад построен на основе нониусной схемы и состоит из двух ждущих мультивибраторов, в которых периоды формируемых сигналов отличаются на Q = 150 пс, где Q – шаг квантования. Мультивибратор с бóльшим периодом частоты запускается импульсом начала сигнала ошибки («медленный сигнал»), второй мультивибратор – импульсом окончания сигнала

1(544).indd 65 18.03.2020 10:56:45

ошибки («быстрый сигнал»). За один период колебаний сигнала мультивибраторов фронты их сигналов сближаются на Q. Схема сравнения фиксирует момент времени, когда положения передних фронтов быстрого и медленного сигналов совпадают, и останавливает счетчик точного кода. В счетчике фиксируется число $N_{\text{точ}}$ периодов сигнала мультивибратора, необходимое для сокращения до нуля длительности временного интервала ошибки. Результат преобразования интервала времени в код формируется как

$$n_i = N_{\text{точ}}^{(i)} + R \cdot N_{\text{гр}}^{(i)}, \tag{8}$$

где R – отношение ЕМР грубого и точного каскадов.

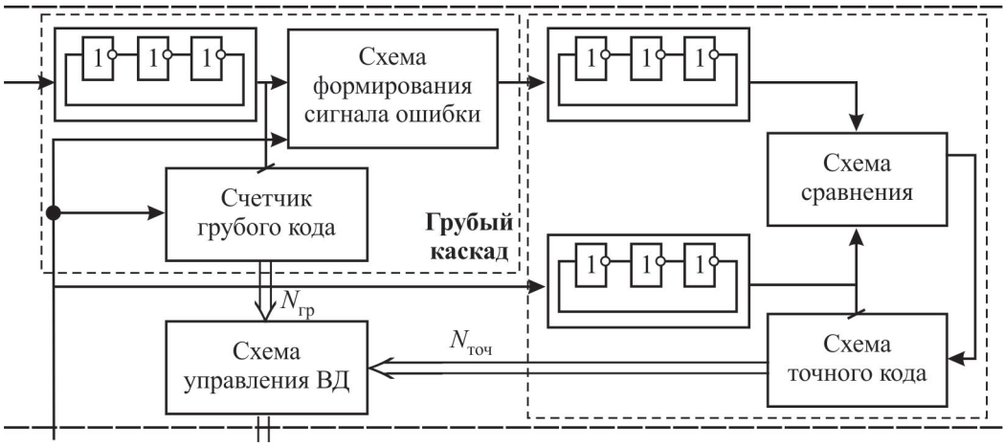


Рис. 5. Структурная схема временного дискриминатора

Для экспериментального подтверждения характеристик прибора была создана установка, изображенная на рис. 6. Установка включает в себя источник синусоидального сигнала (опорный генератор), делитель мощности, плату ПДА-преобразователя, ПЭВМ с программным обеспечением Matlab, а также необходимые жгуты и кабели. Сигнал опорного генератора поступает на пассивный делитель мощности, с плеч которого два номинально одинаковых сигнала поступают на входы ПДА-преобразователя, где осуществляется преобразование в цифровой код интервала времени между передними фронтами этих сигналов. Результаты преобразования передаются по последовательному интерфейсу в ПЭВМ и подвергаются статистической обработке. По результатам обработки в программном обеспечении на базе Matlab определяется величина R, которая передается в соответствующий регистр управления ПДА-преобразователя.

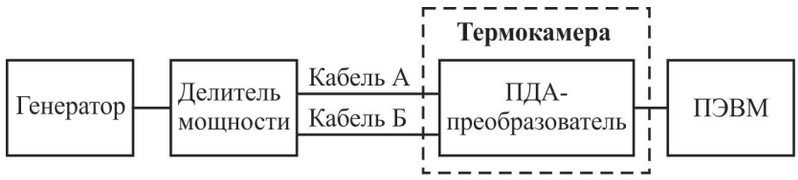


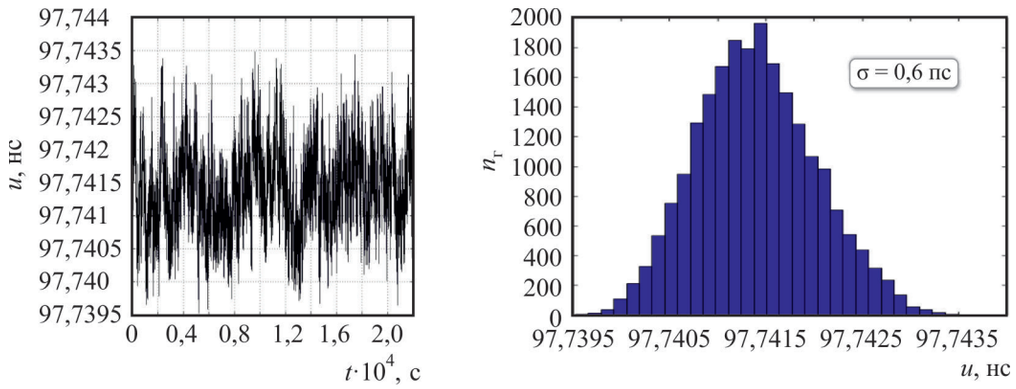
Рис. 6. Схема экспериментальной установки

Использование делителя мощности для формирования входных сигналов ПДА-преобразователя позволяет исключить влияние нестабильности частоты опорного генератора на оценку характеристик ЧК в целом. Изменение величины взаимной задержки сигналов на входах ПДА-

1(544).indd 66 18.03.2020 10:56:45

преобразователя достигается изменением длины коаксиального кабеля Б, соединяющего выход делителя мощности и вход опорного генератора ПДА-преобразователя.

В результате эксперимента получены выборки выходных отсчетов ПВИЦК на интервалах наблюдения от 1 до 10 суток при постоянной температуре. Данные измерения позволяют оценить дисперсию измерений временного интервала и дисперсию Аллана на различных интервалах наблюдения. В качестве иллюстрации на рис. 7 представлены результаты измерения интервала времени номинальной длительностью 100 нс ПДА-преобразователем с шагом квантования $Q = 150$ пс, а также гистограмма распределения результатов измерения. Среднеквадратическое отклонение результатов измерения составляет 0,6 пс. Погрешность оценки СКДО на интервале измерения $\tau_и = 1$ с, вносимая частотным компаратором, построенным на основе данного преобразователя, составляет $\sigma_y = 3{,}5 \cdot 10^{-13}$. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с расчетной величиной, которая составляет $\sigma_y = 2 \cdot 10^{-13}$.



а) *б*)

Рис. 7. Временная реализация (*а*) и гистограмма распределения (*б*) результатов измерения временного интервала

Для измерения крутизны зависимости погрешности полной шкалы от температуры плата ПДА-преобразователя помещена в камеру тепла и холода. Выполнены измерения постоянного интервала времени длительностью около 100 нс при температуре +25 °С и +45 °С. Температурная чувствительность погрешности полной шкалы составила 1,5 пс/°С, для вычислений использовано выражение

$$\hat{\delta}_{\text{ПШ}} = \frac{\Delta\hat{\tau}}{\hat{\tau}\Delta T^{\circ}} \tau_{\text{ди}}, \qquad (9)$$

где $\Delta\hat{\tau}$ – изменение оценки поправки часов при изменении температуры; $\hat{\tau}$ – оценка поправки часов при начальной температуре; ΔT^0 – изменение температуры окружающей среды; $\tau_{\text{ди}}$ – диапазон измерений.

Для проверки возможности создания ЧК с вносимой погрешностью оценки СКДО частоты не более $3 \cdot 10^{-14}$ при интервале времени измерения 1 с был синтезирован ряд ПДА-преобразователей с шагом квантования $Q = 20$, 50, 150, 300 пс и экспериментально определена вносимая ЧК погрешность оценки СКДО. Результаты эксперимента представлены на рис. 8, здесь же изображены расчетные значения. Как видно из графика, хорошее совпадение расчетных и полученных экспериментально значений достигается при величине шага квантования 300 пс и более. Анализ причин расхождения экспериментальных и расчетных характеристик при меньшей величине Q

1(544).indd 67 18.03.2020 10:56:46

показал, что достижимая величина погрешности оценки СКДО частоты в ЧК рассматриваемого типа ограничена собственными шумами элементов схемы ПДА-преобразователя. ПЛИС, используемая для построения преобразователя, оптимизирована по критерию минимума потребляемой мощности при заданном быстродействии [35]. Можно показать, что для уменьшения собственных шумов элементов схемы необходимо увеличивать ток стока транзисторов логических элементов, что приводит к росту потребляемой схемой мощности и поэтому не реализуется в ПЛИС. Среднее квадратическое значение джиттера сигнала, вносимого логической цепочкой в ПЛИС Cyclone IV, составляет 60…100 пс [36], что соответствует вносимой погрешности оценки СКДО частоты $(1{,}5…2{,}5)\cdot10^{-13}$ и хорошо согласуется с результатами эксперимента. Типовой ток стока открытого транзистора в ПЛИС составляет 100…200 мкА. При использовании специализированной ЭКБ допустимо увеличение тока стока до 10 мА, при этом средняя квадратическая величина вносимых схемой шумов уменьшится в 10 раз, что обеспечит необходимую величину погрешности оценки СКДО частоты в ЧК.

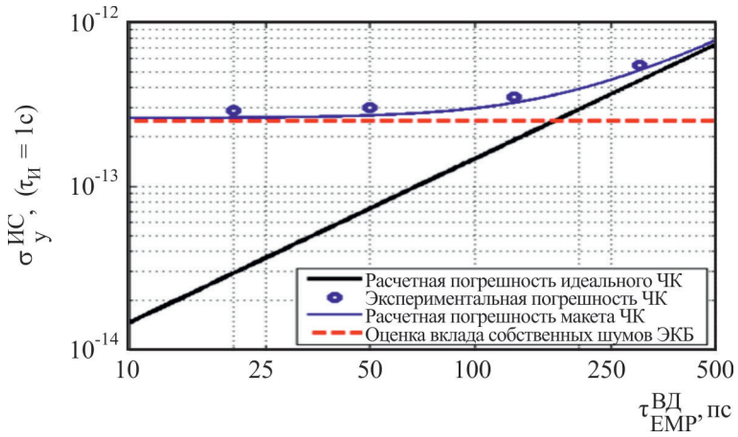


Рис. 8. Зависимость вносимой погрешности оценки СКДО частоты от шага квантования

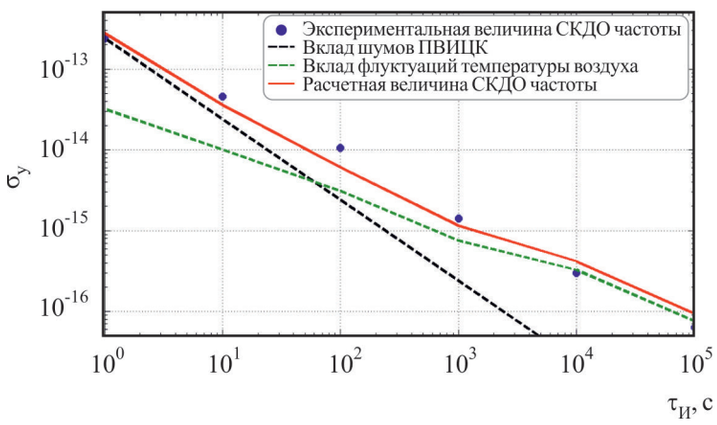


Рис. 9. Экспериментальная оценка погрешности определения СКДО частоты с помощью макета прибора

Для оценки достижимых характеристик оценки СКДО с помощью макета прибора были записаны результаты преобразования постоянного интервала времени (около 45 нс) за десять суток. На основании полученных результатов определена вносимая прибором погрешность определения СКДО частоты на различных интервалах наблюдения (рис. 9). Здесь же представлена расчетная величина погрешности оценки СКДО, которая учитывает как влияние собственных шумов ПВИЦК, так и изменение задержки распространения сигнала в кабеле Б (см. рис. 6)

1(544).indd 68 18.03.2020 10:56:46

из-за флуктуаций температуры в лабораторном помещении. Экспериментальные данные хорошо совпадают с расчетными.

В табл. 3 представлены характеристики ранее созданных ПВИЦК, а также экспериментально подтвержденные характеристики макета ПДА-преобразователя и ЧК на его основе. Как видно, разработанный преобразователь обладает существенно лучшей разрешающей способностью и обеспечивает улучшение до десяти раз погрешности оценки СКДО частоты по сравнению с известными типами преобразователей.

Таблица 3

Сравнение статических характеристик макета и известных ПВИЦК

Тип	$\tau_{ЕМР}$, пс	$\tau_{ДИ}$, нс	$\delta_{ЛД}$, ЕМР	$\sigma_y \cdot 10^{-12}$ ($\tau_И$ = 1 с)	Год	Источник
Конвейерный: кольцевая и простая линии задержки	36	$1 \cdot 10^6$	0,5	16,4	2009	[27]
Конвейерный: счетный + линия задержки	110	$4{,}1 \cdot 10^5$	0,49	50	2012	[25]
Конвейерный: счетный + линия задержки	20	$1 \cdot 10^5$	2	9,1	2013	[26]
Конвейерный: счетный + простая линия + + нониусная линия	10	160	0,04	4,1	2013	[28]
Конвейерный: счетный + нониусная линия	19,5	40	0,5	8,9	2017	[29]
Конвейерный: счетный + нониусная линия	23	50	0,4	10,1	2017	[30]
ПДА-преобразователь (макет)	1	200	0,1	0,4	2019	–

Результаты сравнения крутизны зависимости от температуры погрешности полной шкалы ПДА-преобразователя с ранее разработанными ПВИЦК представлены в табл. 4. Разработанный прибор обладает температурной стабильностью характеристик в 60…500 раз выше, чем у ранее созданных преобразователей, что обеспечивает необходимую погрешность оценки нестабильности частоты КСЧ.

Таблица 4

Крутизна зависимости от температуры погрешности полной шкалы преобразователей различных типов и вносимая погрешность оценки СКДО

Тип	$S_{ПШ}$, $10^{-6} \cdot \tau_{ДИ}$/°С	$\sigma_y \cdot 10^{-14}$	Год	Источник
Сжатие импульса	500	100	2005	[37]
Сжатие импульса	3000	600	2006	[38]
Нониусный	1800	350	2010	[21]
Конвейерный: линия задержки + счетный	1400	280	2013	[17]
Конвейерный: линия задержки + счетный	2000	400	2013	[26]
Сжатие импульса	3700	740	2014	[39]
ПДА-преобразователь (макет)	7,7	1,5	2019	–

1(544).indd 69 18.03.2020 10:56:46

Таким образом, синтезирован ПДА-преобразователь временных интервалов в цифровой код и ЧК на его основе. С использованием макета ПВИЦК экспериментально определена погрешность оценки СКДО частоты на интервале измерения 1 с, которая составляет $2{,}4 \cdot 10^{-13}$. Достигнутые характеристики обеспечивают с достаточной точностью оценку нестабильности частоты (на интервалах измерения от 1 с до 1 суток) всех типов бортовых КСЧ, использующихся на НКА системы ГЛОНАСС. Применение полузаказной ЭКБ позволит улучшить характеристики ЧК и достичь погрешности оценки СКДО частоты не более $2 \cdot 10^{-14}$ на интервале измерения 1 с, что обеспечит возможность контроля нестабильности частоты также и перспективных КСЧ, создаваемых в рамках работ по повышению точности НВО потребителей ГЛОНАСС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Богданов, П. П.** Основные направления повышения точности частотно-временного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС / П. П. Богданов и др. // Сибирский журнал науки и технологий. – 2013. – С. 38 – 41.

2. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах *L1*, *L2* (редакция 5.1). – М.: РНИИКП, 2008. – 72 с.

3. **Уткин, М. Н.** Модернизация аппаратуры управления бортовой шкалой времени космических аппаратов «ГЛОНАСС-К2» / М. Н. Уткин, А. Г. Сайбель // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 2 (28). – С. 94 – 100.

4. Beijing Time&Frequency Technology Co., Ltd. PO7D-2 // Manual. – 2012. – С. 2.

5. Время-Ч. Компаратор частотный VCH-314 // Руководство по эксплуатации ЯКУР.411146.014 РЭ. – 2004. – С. 46.

6. Spectratime iTEST+ Picotime 1U Spec. – Swizerland: Orolia Group, 2018. – 7 с.

7. **Уткин, М. Н.** Прототип бортового частотного компаратора для перспективных космических аппаратов ГЛОНАСС / М. Н. Уткин, С. Ю. Шкадов // Сб. тр. V Молодежной науч.-техн. конференции «Инновационный арсенал молодежи». – 2014. – № 1. – С. 151 – 153.

8. **Mochizuki, K.** Frequency-stability measurement system using high-speed ADCs and digital signal processing / K. Mochizuki, M. Uchino // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2007. – Vol. 56, No 5. – P. 1887 – 1893.

9. **Liu, Y.** High-precision frequency measurement using digital signal processing / Y. Liu, X. H. Li, W. L. Wang. – s.l.: IntechOpen, 2011 (https://www.intechopen.com/books/applications-of-digital-signal-processing/high-precision-frequency-measurement-using-digital-signal-processing).

10. **Li, X.** Heterodyne frequency measurement method based on virtual instrument / X. Li et al. // IEEE IFCS Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. – 2007. – P. 220 – 222.

11. **Дюкин, А. Б.** Перспективный цифровой частотный компаратор/анализатор фазовых шумов / А. Б. Дюкин, С. Ю. Медведев, К. Г. Мишагин // Вестник метролога. – 2011. – С. 18 – 20.

12. Microsemi corp. Microsemi_5120A_Datasheet_900-00481-000C-1 // [сайт] URL: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133388-5120a-datasheet (дата обращения: 31.03.2019).

13. **Murmann, B.** [ADC Performance Survey 1997-2019] URL: http://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html (дата обращения: 05.05.2019).

14. **Уткин, М. Н.** Математическая модель частотного компаратора на основе преобразователя «временной интервал – цифровой код», учитывающая нелинейные статические характеристики преобразователя / М. Н. Уткин // Метрология времени и пространства. Доклады IX Международного симпозиума. – Менделеево, 2019. – С. 207 – 213.

15. **Peca, M.** Time-to-digit converter based on radiation-tolerant FPGA / M. Peca, M. Vacek, V. Michálek // European Frequency and Time Forum. – 2012. – P. 286 – 289.

16. **Effendrik, P.** Time-to-digital converter (TDC) for WiMAX ADPLL in 40-nm CMOS / P. Effendrik et al. // 20th European Conference on Circuit Theory and Design. – 2011. – P. 365 – 368.

17. **Qin, X.** Development of a high resolution TDC for implementation in flash-based and anti-fuse FPGAs for aerospace application / X. Qin et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60, No 5. – P. 3550 – 3556.

1(544).indd 70 18.03.2020 10:56:46

18. **Zhang, M.** A 7.4 ps FPGA-based TDC with a 1024-unit measurement matrix / M. Zhang, H. Wang, Y. Liu // Sensors. – 2017. – Vol. 17, No 4. – P. 1–18.

19. **Chen, H.** Multichannel, low nonlinearity time-to-digital converters based on 20 and 28 nm FPGAs / H. Chen, D. D. Li // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – Vol. 66, No 4. – P. 3265 – 3274.

20. **Daigneault, M.** A novel 10 ps resolution TDC architecture implemented in a 130 nm process FPGA / M. Daigneault, J. P. David // Proceedings of the 8th IEEE International NEWCAS Conference 2010. – 2010. – P. 281 – 284.

21. **Yu, J.** A 12-bit vernier ring time-to-digital converter in 0.13 um CMOS technology / J. Yu, F. F. Dai, R. C. Jaeger // IEEE Journal of Solid State Circuits. – 2010. – Vol. 45, No 4. – P. 830 – 842.

22. **Vercesi, L.** Two-dimensions vernier time-to-digital converter / L. Vercesi, A. Liscidini, R. Castello // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2010. – Vol. 45, No 8. – P. 1504 – 1512.

23. **Lee, M.** A 9 b, 1.25 ps resolution coarse-fine time-to-digital converter in 90 nm CMOS that amplifies a time residue / M. Lee, A. A. Abidi // IEEE Journal of Solid State Circuits. – 2008. – Vol. 43, No 4. – P. 769 – 777.

24. **Mandai, S.** A 128-channel, 9ps column-parallel two-stage TDC based on time difference amplification for time-resolved imaging / S. Mandai, E. Charbon // Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC). – 2011. – P. 119 – 122.

25. **Guo, J.** A 22-bit 110 ps time-interpolated time-to-digital converter / J. Guo, S. Sonkusale // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2012. – C. 3166 – 3169.

26. **Fishburn, M.** A 19.6 ps, FPGA-based TDC with multiple channels for open source applications / M. Fishburn et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60, No 3. – P. 2203 – 2208.

27. **Jansson, J.** Synchronization in a multilevel CMOS time-to-digital converter / J. Jansson, A. Mantyniemi, J. Kostamovaara // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2009. – Vol. 56, No 8. – P. 1622 – 1634.

28. **Markovic, B.** A high-linearity, 17 ps precision time-to-digital converter based on a single-stage vernier delay loop fine interpolation / B. Markovic et al.// IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2013. – Vol. 60, No 3. – P. 557 – 569.

29. **Kim, M. S.** A 19.5 ps-LSB vernier-type time-to-digital converter for PET / M. S. Kim et al.// Journal of Semiconductor Technology and Science. – 2017. – Vol. 17, No 7. – P. 800 – 805.

30. **Cui, K.** Toward implementing multichannels, ring-oscillator-based, vernier time-to-digital converter in FPGAs: key design points and construction method / K. Cui и др.// IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences. – 2017. – Vol. 1, No 5. – P. 391 – 399.

31. **Коротков, А. С.** Аналого-цифровые преобразователи на основе дельта-сигма модуляторов / А. С. Коротков, М. В. Теленков // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – С. 53 – 72.

32. **Wey, H. M.** Noise transier characteristics of a correlated double sampling circuit / H. M. Wey, W. Guggenbuhl // IEEE TCAS. – 1986. – Vol. CAS-33, No 10. – P. 1028 – 1030.

33. **Henzler, S.** Time-to-digital converters / S. Henzler. – Dordrecht: Springer, 2010. – 124 c.

34. **Уткин, М. Н.** Разработка и моделирование критических элементов систем диагностики бортового синхронизирующего устройства / М. Н. Уткин // Труды Северо-Западного регионального центра Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2018. – Т. 4, вып. 12. – С. 63 – 73.

35. Altera corp. cyclone IV // Device Datasheet. – 2016. – C. 1 – 44.

36. **Dadouche, F.** Design methodology of TDC on low cost FPGA targets / F. Dadouche et al.// The Ninth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2015. – P. 29 – 34.

37. **Chen, C. C.** A precise cyclic CMOS time-to-digital converter with low thermal sensitivity / C. C. Chen et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Vol. 52, No 4. – P. 834 – 838.

38. **Chen, P.** A low-cost low-power CMOS time-to-digital converter based on pulse stretching / P. Chen, C. C. Chen, Y. S. Shen // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53, No 4. – P. 2215 – 2220.

39. **Chen, C. C.** An area-efficient CMOS time-to-digital converter based on a pulse-shrinking scheme / C. C. Chen, S. H. Lin, C. S. Hwang // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 2014. – Vol. 61, No 3. – P. 163 – 167.

Статья поступила 11 ноября 2019 г.

1(544).indd 71 18.03.2020 10:56:46

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВЧ-ДИАПАЗОНЕ НА КЛЕТКИ ЦЕЛЬНОЙ КРОВИ

К. Д. Казаринов[1], И. И. Власова[2], Е. В. Михальчик[2], И. Г. Полников[1], В. А. Щелконогов[3,4], А. В. Чеканов[4]

[1]*ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

[2]*ФНКЦ физико-химической медицины ФМБА, г. Москва*

[3]*МИРЭА – Российский технологический университет (ИТХТ), г. Москва*

[4]*ФГАОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова Минздрава России, г. Москва*

Показано, что КВЧ-облучение низкой интенсивности усиливает реакцию нейтрофилов крови человека на агониста иммунных клеток. Экспериментально установлено, что увеличение выработки активных форм кислорода в крови вызывается прямой активацией нейтрофилов при КВЧ-облучении, а не опосредованно активацией других клеток или белков, что подтверждает также измерение активности миелопероксидазы – основного фермента нейтрофилов, секретируемого при активации.

КС: микроволновое излучение, нейтрофилы крови человека, оксидативный стресс, хемилюминесценция, активные формы кислорода, миелопероксидаза, КВЧ-диапазон

STUDYING THE MECHANISM OF MICROWAVE RADIATION ACTION ON WHOLE BLOOD CELLS IN EHF-RANGE

K. D. Kazarinov[1], I. I. Vlasova[2], E. V. Mikhalchik[2], I. G. Polnikov[1], V. A. Shchelkonogov[3,4], A. V. Chekanov[4]

[1]*FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino*

[2]*FRCC of Physical-Chemical Medicine FMBA, Moscow*

[3]*MIREA Russian Technological University (IFCT), Moscow*

[4]*FSAEI HE Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health, Moscow*

It was shown that EHF irradiation of low intensity enhanced the response of human blood neutrophils to an agonist of immune cells. It was experimentally established that an increase in the production of reactive oxygen species in the blood is caused by direct activation of neutrophils during EHF-irradiation and not indirectly by activation of other cells or proteins, which is also confirmed by measurement of the activity of myeloperoxidase – the main neutrophil enzyme, secreted during activation.

Keywords: microwave radiation, human blood neutrophils, oxidative stress, chemiluminescence, reactive oxygen species, myeloperoxidase, EHF-range

1(544).indd 72 18.03.2020 10:56:46

1. ВВЕДЕНИЕ

Следует признать, что до сих пор биологическим эффектам КВЧ-излучения (30…300 ГГц) уделялось гораздо меньшее внимание, чем остальному спектру микроволнового диапазона. Это обусловлено тем, что КВЧ-излучение до сих пор незначительно использовалось в бытовых приборах и технике. Теперь же ситуация начинает кардинально меняться. Это вызвано тем, что из-за огромного роста во всем мире мобильного трафика руководители многих стран и частных компаний привлекают значительные ресурсы для развития системы связи пятого поколения (G5), которая характеризуется использованием волн миллиметрового диапазона [1]. Однако и этот стандарт уже рассматривается как промежуточный на пути к системе связи шестого поколения (G6), в которой будут задействованы колебания коротковолновой части миллиметрового диапазона, или, как часто ее называют, субтерагерцового диапазона. Возникшая ситуация ставит вопрос о дополнительных мерах по защите здоровья населения, и особенно специалистов, занятых в производстве и внедрении этой техники. Другое направление исследований биологического действия КВЧ-излучения стимулируется положительным опытом использования его в медицинской практике [2–4]. Считается, что воздействие на организм человека происходит при интенсивностях облучения, которые вызывают слабое нагревание ткани, но биохимические механизмы эффектов облучения не совсем понятны. Известно, что окислительный стресс играет существенную роль при патологических процессах (ишемии, воспалении), токсических воздействиях и т. п. В тканях окислительный стресс приводит к гибели клеток, основным механизмом которой является апоптоз (генетически запрограммированный процесс гибели клетки). Авторы работы [5] считают, что воздействие микроволнового излучения на клетки человека может вызывать апоптоз. Образование свободных радикалов в организме, или окислительный (оксидативный) стресс, стимулированный воздействием микроволнового излучения, рассматривается многими специалистами как один из основных механизмов биологической активности данного вида излучения [6]. В ряде исследований показано, что микроволны могут влиять на различные процессы, связанные с развитием окислительного стресса: изменение структуры и функции ферментов, в частности усиление активности пероксидаз, интенсивность свободнорадикальных процессов в клетках и тканях и усиление активации клеток, изменение ответа клеток иммунной системы и модуляцию иммунного ответа организма в целом [7].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты наших предшествующих экспериментов следует отнести к изучению влияния микроволнового излучения на клетки человека, которые находились в стрессовом состоянии [8]. Так, в частности, было показано, что активация комплекса кардиолипин-цитохром *c* микроволновым излучением в клетках может повысить чувствительность клеток к апоптотическим (в том числе противораковым) агентам и позволит модулировать ответ клеток на различные воздействия.

В работе [9] представлены экспериментальные результаты по изучению влияния микроволнового излучения на активацию нейтрофилов в образцах цельной крови. Следует отметить, что к настоящему времени слишком мало работ посвящено изучению влияния микроволнового излучения на функциональную активность нейтрофилов, причем данные этих работ противоречивы [10]. Мы изучали влияние микроволн с длиной волны 7,7 мм (37 ГГц) на активацию нейтрофилов. Для характеристики продукции свободных радикалов и оксидантов активиро-

1(544).indd 73 18.03.2020 10:56:46

ванными нейтрофилами мы выбрали метод люминол-зависимой хемилюминесценции (ХЛ), который позволяет оценивать степень активации нейтрофилов немедленно после прекращения облучения образца крови. Для активации нейтрофилов к образцам цельной крови добавляли опсонизированный зимозан (ОЗ; 0,6 мг/мл) или лабораторный штамм E. coli (25 или 50 млн клеток в 1 мл), после чего сравнивали активность нейтрофилов в контрольных пробах крови и образцах, подвергшихся воздействию микроволнового облучения в течение 5, 15 и 30 мин. По окончании инкубации брали пробы для измерения кинетики люминол-зависимой ХЛ крови. Кинетику люминол-зависимой ХЛ измеряли после добавления крови в раствор Кребса Рингера, содержащий 300 мкМ люминола. В четырех независимых экспериментах показано, что радикал-генерирующая активность нейтрофилов выше на 20…30 % в пробах крови, которые были подвергнуты облучению в течение 15 мин. В то же время КВЧ не вызывало активации нейтрофилов в крови, не содержащей индуктор активации нейтрофилов. Наши эксперименты показали, что излучение с длиной волны 7,7 мм усиливает радикально-генерирующую способность активированных нейтрофилов, когда агонист добавляли к крови до облучения [9].

На основании экспериментальных данных было установлено, что уровень ХЛ был гораздо выше в случае КВЧ-облучения образца по сравнению с контрольным образцом. Разница была более очевидной в течение первых нескольких минут ХЛ-замера. В отсутствие активаторов нейтрофилов (ОЗ или бактерий) параметры ХЛ контрольного образца и облученного были одинаковыми и практически не отличались от исходного значения ХЛ. Поэтому облучение цельной крови не вызывает активации нейтрофилов в крови, но усиливает радикально-генерирующую способность активированных нейтрофилов, когда агонист добавляли к крови до облучения [9].

В настоящей работе, чтобы подтвердить, что увеличение выработки активных форм кислорода (АФК) в крови было вызвано прямой активацией нейтрофилов при КВЧ-облучении, а не опосредованно активацией других клеток или белков, мы провели эксперименты с изолированными нейтрофилами и измерили активность миелопероксидазы (МПО) – основного фермента нейтрофилов, секретируемого при активации.

ОЗ или бактерии были добавлены к суспензии изолированных нейтрофилов в плазме. Подобно нашим экспериментам с цельной кровью, мы сравнили кинетику ХЛ контрольного образца и образца, подвергнутого КВЧ-воздействию в течение 15 мин. Для обоих агонистов в виде частиц величина ХЛ облученных образцов была выше в течение первых нескольких минут измерений по сравнению с контрольными образцами. Это различие показало достоверное увеличение продукции АФК в суспензии облученных нейтрофилов.

Активность МПО в плазме измеряли двумя независимыми методами: окисление о-дианизидина (ОД) субстрата пероксидазы и контроль свободных тиолов в разбавленной плазме, инкубированной с МПО и глюкозо-глюкозооксидазой, которая является источником перекиси водорода. Окисление SH-групп или ОД не было обнаружено без добавления МПО и/или глюкозооксидазы в плазму.

Временной ход окисления ОД регистрировали путем измерения накопления в растворе продукта окисления с максимумом поглощения при 450 нм (рис. 1). В плазме, дополненной ферментами, после 1-минутного латентного периода продукты окисления начинали накапливаться и поглощение раствора увеличивалось. В случае облучения скорость накопления продукта была выше. Значимость различий между контрольным окисления $p < 0,05$.

SH-группы являются высокоэффективными антиоксидантами в плазме крови. МПО образцом и облученным была подтверждена в пяти независимых экспериментах.

1(544).indd 74 18.03.2020 10:56:46

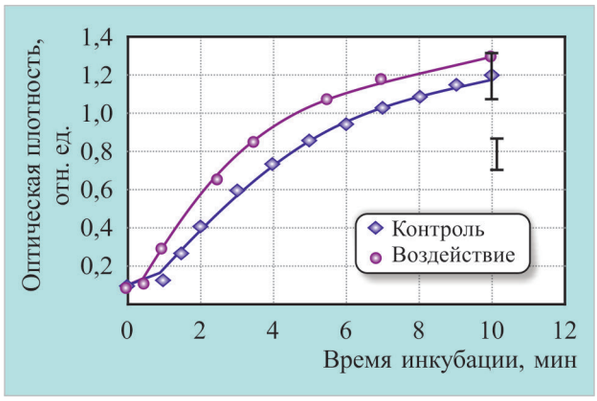


Рис. 1. Временной ход окисления ОД, измеренный путем регистрации накопления в растворе продукта окисления с максимумом поглощения при 450 нм. Индуцированное КВЧ-излучением увеличение активности МПО в плазме крови анализировали по увеличению продуктов окисления ОД

Глюкоза или глюкозооксидаза, добавленные одновременно, вызывали уменьшение количества свободных тиолов в разбавленной плазме. Если плазму подвергали воздействию КВЧ-излучения, концентрация групп SH уменьшалась быстрее (рис. 2). Концентрация свободных SH-групп в экспонированных образцах составляла (110±2) % от концентрации в контрольных образцах после 45-минутной инкубации, как было измерено в шести независимых экспериментах. Критерий Уилкоксона со знаком ранга выявил разницу между контрольными и экспонированными образцами в течение как 20, так и 45 мин инкубации.

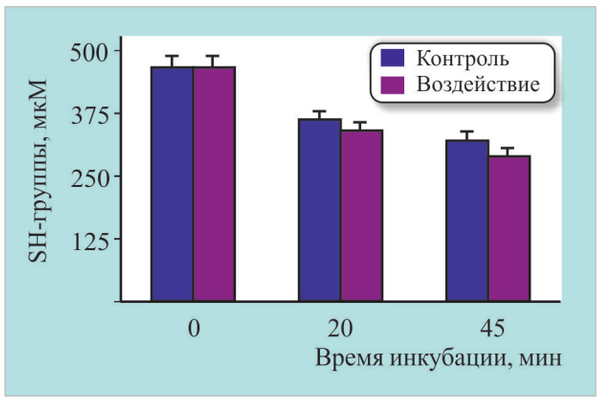


Рис. 2. Концентрация свободных SH-групп в экспонированных образцах в течение 20 и 45 мин инкубации. Индуцированное КВЧ-излучением увеличение активности МПО в плазме анализировали по уменьшению количества SH-групп. МПО и глюкозо-глюкозооксидазу добавляли в разбавленную плазму и измеряли окисление тиолов в разные промежутки времени (λ = 450 нм)

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известным применением микроволнового излучения КВЧ-диапазона является использование его в медицине для лечения определенных заболеваний. Несмотря на то, что КВЧ-излучение проникает в кожу неглубоко, оно обеспечивает терапевтические эффекты при лечении сердечно-

1(544).indd 75 18.03.2020 10:56:47

сосудистых заболеваний, дерматитов, при заживлении, облегчении боли и т. д. Нагрев считается основным механизмом биоэффектов КВЧ-излучения. Нагревание в небольших кровеносных сосудах из-за максимального SAR (удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии) может быть более чем в 30 раз больше, чем в коже. Для терапевтических интенсивностей 10…40 мВт/см^2 максимальный SAR в кровеносных сосудах, проходящих подкожно-жировой слой, может составлять 2000…6000 Вт/кг [11]. Увеличение поглощения микроволновой энергии кровеносными сосудами может привести к изменениям морфологии и функций клеток крови и тромбоцитов. Поэтому изучение КВЧ-облучения на клетках крови имеет большое значение [12].

Исследование влияния КВЧ-излучения на нейтрофилы было выполнено для изолированных мышечных перитонеальных нейтрофилов при низких интенсивностях излучения (<150 мкВт/кг). ХЛ применяли для обнаружения продукции АФК активированными нейтрофилами. Показано, что КВЧ-облучение (41,8…42,05 ГГц) ингибирует продукцию АФК нейтрофилами, активированными ОЗ в зоне ближнего поля излучателя [13]. Напротив, Сафронова с сотрудниками в 2002 г. продемонстрировали увеличение N-формил-метионил-лейцил-фенилаланина (fMLP) – ответа праймированных (но не интактных) клеток при воздействии КВЧ низкой интенсивности частотой 42,2 ГГц [14]. В этом исследовании КВЧ-облучение суспензии нейтрофилов проводилось в дальней зоне облучающей рупорной антенны при контроле температуры.

Расхождения между результатами авторов могут быть обусловлены различными экспериментальными условиями относительно как источника излучения (длина волны, доза облучения, модуляция, импульсы и т. д.), так и объекта облучения. Что касается экспериментов с клетками, то важными точками экспериментальных протоколов являются изоляция клеток (включая антикоагулянт) и/или культивирование клеток, выбор агониста, анализы измерений активности и т. д. Нейтрофилы быстро реагируют на широкий спектр агонистов, поэтому функциональное состояние этих клеток до воздействия излучения, выбор времени экспозиции и методы тестирования активности имеют большое значение. Даже разные флюоресцентные зонды, используемые для измерений активации нейтрофилов, могут давать разные результаты [10].

Чтобы обойти проблемы изоляции клеток, мы провели эксперименты с цельной кровью, которые более достоверны по сравнению с ситуацией *in vivo*. Кроме того, мы использовали методы, которые позволяют нам определять статус активации клеток сразу после облучения, а именно измерение люминол-зависимого ХЛ. В нашей работе мы показали, что излучение КВЧ с длиной волны около 7,7 мм может усиливать реакцию нейтрофилов в крови на агонисты в виде частиц – ОЗ или бактерии. Подобно экспериментам, изучающим возможности терапевтического использования КВЧ-излучения [15, 16], наши испытуемые образцы были подвергнуты воздействию КВЧ-излучения в ближнем поле рупорной антенны волновода, создающего узкое излучение пучка при 7 мВт/см^2. Контрольные образцы инкубировали одновременно при комнатной температуре без КВЧ-обработки. Кинетика люминол-зависимой ХЛ обоих образцов свидетельствует о том, что продуцирование АФК в крови определяется активацией нейтрофилов.

Известно, что реакция нейтрофилов на активатор в цельной крови составляет около 30 мин. После нескольких минут увеличения ХЛ и, следовательно, при производстве АФК самый высокий уровень ХЛ наблюдался при времени инкубации 10…20 мин с последующим медленным спадом люминесценции. Соответственно в наших экспериментах 15-минутная инкубация с агонистом была оптимальным временем для обнаружения разницы между контрольными и экспонированными образцами. На этом временном интервале нейтрофилы были активированы значительно, но ответ на агонист не достиг максимума. Наши данные показали, что нейтрофилы активировались агонистом в большей степени, если образец подвергался КВЧ-облучению.

1(544).indd 76 18.03.2020 10:56:47

Активационное состояние нейтрофилов в начале воздействия может иметь решающее значение для регистрации эффектов КВЧ-излучения. Сафронова с сотрудниками ранее показали, что начальный функциональный статус биообъектов определил их чувствительность к КВЧ-облучению низкой интенсивности [14]. Ряд исследований, касающихся биологической чувствительности к микроволновому облучению в широком диапазоне длин волн, также показал, что излучение само по себе может не влиять на лейкоциты, но усиливает реакцию клеток на индуктор. Исследования *in vitro* мононуклеарных клеток периферической крови, подвергнутых воздействию СВЧ-сигналов, не выявили статистически значимых изменений параметров функциональной активности лимфоцитов, моноцитов и других иммунных клеток, измеренных после воздействия [17, 18]. Тем не менее, иммунная активность лимфоцитов и моноцитов может быть дополнительно усилена микроволнами 900 МГц: микрокультуры моноядерных клеток, подвергнутых воздействию микроволн, показали значительно более высокий ответ на митогены [19]. Было показано, что низкочастотная ЭМИ (<200 Гц) усиливает активацию нейтрофилов только в том случае, если клетки были инкубированы с низкими дозами миристатацетата, но не в случае нестимулированных клеток [19].

Было продемонстрировано, что основным механизмом, лежащим в основе воздействия ЭМИ на биологические объекты, является нагрев, при котором из кожи выделяются регуляторы, оказывающие влияние на весь организм. Как тепловое воздействие окружающей среды, так и воздействие КВЧ-облучения 35 ГГц вызывает высвобождение медиаторов, активирующих макрофаги в плазме крыс, приводящее к последующим ответам в клетках и тканях [20]. Хотя мы не исключаем нетепловые эффекты, наше исследование ясно показало, что нагрев крови, вызванный КВЧ-облучением, является основным механизмом усиления реакции нейтрофилов на агонисты в наших экспериментальных условиях.

Чтобы выяснить источник повышенной продукции АФК в крови при КВЧ-воздействии, мы провели исследование влияния КВЧ-излучения на изолированные нейтрофилы и на функциональную активность МПО. КВЧ-воздействие на неочищенные изолированные нейтрофилы в плазме крови не вызывало активации клеток. Если в суспензию нейтрофилов добавляли агонист, КВЧ-излучение усиливало генерацию АФК клетками, о чем свидетельствует повышенный уровень люминол-зависимой ХЛ. Облучение плазмы, содержащей МПО и глюкозооксидазу (в качестве источника H_2O_2), привело к небольшому (10…15 %), но статистически значимому увеличению окислительной активности МПО. Как было показано ранее, воздействие на растворы белка КВЧ-излучения может вызвать изменения в структуре и функциях фермента и повысить активность пероксидаз [21].

Известно, что КВЧ-излучение плохо проникает в биологические ткани, поэтому прогрев тканей может происходить на глубине не более нескольких миллиметров. Повышение температуры происходит медленно и незначительно. Неглубокое проникновение КВЧ в биологические ткани открывает возможности использования его для целевой локальной терапии с минимальными побочными эффектами и повреждением окружающих тканей.

Наша работа показывает возможность применения КВЧ-излучения для направленной регуляции локальных воспалительных процессов на небольших участках кожи без повреждения здоровых тканей. КВЧ-облучение зараженной области может способствовать активации нейтрофилов в ране, что приведет к локальному усилению противомикробной активности нейтрофилов. С другой стороны, наши результаты показывают необходимость осторожного использования КВЧ-излучения для терапии пациентов с инфекционными заболеваниями.

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

1(544).indd 77 18.03.2020 10:56:47

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие микроволнового излучения на все тело приводит к нагреву кожи, подкожного жирового слоя, а также капилляров и мелких кровеносных сосудов в дерме и жировом слое. Из-за сложности биохимических реакций и взаимодействий в живых тканях и в биологических жидкостях нельзя однозначно предсказать реакцию каких-либо клеток или биологических систем на нагревание, вызванное КВЧ-излучением. Исследования клеток крови в образцах цельной крови – лучший способ смоделировать ситуацию *in vivo* в крови. В настоящей работе, чтобы подтвердить, что увеличение выработки АФК в крови было вызвано прямой активацией нейтрофилов при КВЧ-облучении, а не опосредованно активацией других клеток или белков, мы провели эксперименты с изолированными нейтрофилами и измерили активность МПО – основного фермента нейтрофилов, секретируемого при активации.

ОЗ или бактерии были добавлены к суспензии изолированных нейтрофилов в плазме. Подобно нашим экспериментам с цельной кровью, мы сравнили кинетику ХЛ контрольного образца и образца, подвергнутого КВЧ-воздействию в течение 15 мин. Для обоих агонистов в виде частиц величина ХЛ облученных образцов была выше в течение первых нескольких минут измерений по сравнению с контрольными образцами. Это различие показало достоверное увеличение продукции АФК в суспензии облученных нейтрофилов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Agiwal, M.** Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey / M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // IEEE Commun. Surveys. Tuts. – 2016. – Vol. 18. – P. 1617 – 1655.

2. **Ордынская, Т. А.** Волновая терапия / Т. А. Ордынская, П. В. Поручиков, П. В. Ордынский. – М.: Эксмо, 2008. – 496 с.

3. **Teppone, M.** Extremely high-frequency therapy in oncology / M. Teppone, R. Avakyan // J. Altern / Complement Med. – 2010. – Vol.16 (11). – P. 1211 – 1216.

4. **Балчугов, В. А.** КВЧ-терапия низкоинтенсивным шумовым излучением / В. А. Балчугов, А. Г. Полякова, С. И. Анисимов и др. // М-во образования Рос. Федерации. Нижегор. гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского, Воен.-мед. ин-т погранич. службы Рос. Федерации. – Н. Новгород : Изд-во Нижегор. госуниверситета (тип. ун-та), 2002. – 189 с.

5. **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.

6. **Meena, R.** Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats / R. Meena, K. Kajal, J. Kumar, P. Rajamani, H. N. Verma, K. K. Kesari // Electromagnetic Biology Medicine. – 2014. – Vol. 33. – P. 81 – 91.

7. **Koyama, S.** Effect of a 2.45-GHz radiofrequency electromagnetic field on neutrophil chemotaxis and phagocytosis in differentiated human HL-60 cells / S. Koyama, E. Narita, Y. Suzuki, M. Taki, N. Shinohara, J. Miyakoshi // Journal of Radiation Research. – 2015. – Vol. 56. – P. 30 – 36.

8. **Казаринов, К. Д.** Влияние ЭМИ низкой интенсивности микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 1 (536). – С. 60 – 68.

9. **Казаринов, К. Д.** Хемилюминесцентные исследования влияния микроволнового излучения на активацию нейтрофилов / К. Д. Казаринов, И. И. Власова, Е. В. Михальчик // VI съезд биофизиков России: сб. науч. тр. – 2019. – Т. 2. – С. 37.

10. **Poniedzialek, B.** The effect of electromagnetic field on reactive oxygen species production in human neutrophils in vitro / B. Poniedzialek, P. Rzymski, H. Nawrocka-Bogusz, F. Jaroszyk, K. Wiktorowicz // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2013. – Vol. 32, No 3. – P. 333 – 341.

1(544).indd 78 18.03.2020 10:56:47

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, No 5. – P. 358 – 364.

12. **Alekseev, S. I.** Enhanced absorption of millimeter wave energy in murine subcutaneous blood vessels / S. I. Alekseev, M. C. Ziskin // Bioelectromagnetics. – 2011. – Vol. 32, No 6. – P. 423 – 433.

13. **Gapeyev, A. B.** Inhibition of the production of reactive oxygen species in mouse peritoneal neutrophils by millimeter wave radiation in the near and far field zones of the radiator / A. B. Gapeyev, V. G. Safronova, N. K. Chemeris, E. E. Fesenko // Bioelectrochemistry Bioenergetics. – 1997. – Vol. 43, No 2. – P. 217 – 220.

14. **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, No 8. – P. 599 – 606.

15. **Alekseev, S. I.** Local heating of human skin by millimeter waves: A kinetics study / S. I. Alekseev, M. C. Ziskin // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, No 8. – P. 571 – 581.

16. **Ziskin, M. C.** Millimeter waves: acoustic and electromagnetic / M. C. Ziskin // Bioelectromagnetics. – 2013. – Vol. 34, No 1. – P. 3 – 14.

17. **Tuschl, H.** *In vitro* effects of GSM modulated radiofrequency fields on human immune cells / H. Tuschl, W. Novak, H. Molla-Djafari // Bioelectromagnetics. – 2006. – Vol. 27, No 3. – P. 188 – 196.

18. **Lantow, M.** ROS release and Hsp70 expression after exposure to 1,800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in primary human monocytes and lymphocytes / M. Lantow, M. Lupke, J. Frahm, M. O. Mattsson, N. Kuster, M. Simko // Radiation Environmental Biophysics. – 2006. – Vol. 45, No 1. – P. 55 – 62.

19. **Stankiewicz, W.** Immunotropic influence of 900 MHz microwave GSM signal on human blood immune cells activated *in vitro* / W. Stankiewicz, M. P. Dabrowski, R. Kubacki, E. Sobiczewska, S. Szmigielski // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2006. – Vol. 25, No 1. – P. 45 – 51.

20. **Sypniewska, R. K.** Protein changes in macrophages induced by plasma from rats exposed to 35 GHz millimeter waves / R. K. Sypniewska, N. J. Millenbaugh, J. L. Kiel, R. V. Blystone, H. N. Ringham, P. A. Mason, F. A. Witzmann // Bioelectromagnetics. – 2010. – Vol. 31, No 8. – P. 656 – 663.

21. **Barteri, M.** Effects of microwaves (900 MHz) on peroxidase systems: A comparison between lactoperoxidase and horseradish peroxidase / M. Barteri, R. De Carolis, F. Marinelli, G. Tomassetti, L. C. Montemiglio // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2016. – Vol. 35. – P. 126 – 133.

Статья поступила 19 ноября 2019 г.

1(544).indd 79 18.03.2020 10:56:47

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.293

СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНИЗИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ С ТРЕУГОЛЬНИКОМ ПАСКАЛЯ

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

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

Показано, что выражения для коэффициентов ионизации электронов в лавине при ударной ионизации в полупроводнике совпадают с произведением биномиальных коэффициентов.

КС: число ионизированных частиц в лавине, биномиальные коэффициенты

RELATIONSHIP BETWEEN THE DISTRIBUTION OF IONIZED PARTICLES IN SEMICONDUCTOR WITH A PASCAL TRIANGLE

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

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

The paper shows that the expressions for ionization coefficients of electrons in an avalanche during an impact ionization in semiconductor coincide with the product of binominal coefficients.

Keywords: number of ionized particles in avalanche, binominal coefficients

Описанный в работе [1] метод расчета вероятности вылета из слоя умножения n электронов основан на том представлении, что каждый акт ионизации атома, производимый одним электроном, представляет собой случайное событие, поэтому вероятность того, что электрон, вошедший в слой умножения, произведет m ионизаций, определяется формулой Пуассона $p_m = u^m e^{-u}/m!$, где u – среднее число ионизаций, совершаемых электроном в слое умножения. Вероятность вылета одного электрона из слоя равна вероятности того, что он пройдет слой без ионизации $P(1) = p_0 = e^{-u}$. Если электрон совершит в слое умножения одну ионизацию и после этого он и рожденный им электрон пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета двух электронов будет равна $P(2) = p_1 \cdot p_0 = u \cdot e^{-2u}/1!$. Если первичный электрон совершит в слое умножения две ионизации и после этого он и рожденные при этом электроны пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета трех электронов будет равна $p_2 p_0^2$; если первичный электрон совершит в слое умножения одну ионизацию и после этого пройдет слой без ионизации, а рожденный им электрон также совершит одну ионизацию, после которой два электрона пройдут слой без ионизации, то вероятность вылета трех электронов будет равна $p_1^2 p_0$. Таким образом, выражение для суммарной вероятности имеет вид $P(3) = p_2 \cdot p_0^2 + p_1^2 \cdot p_0 = u^2 \cdot e^{-3u}[1/2! + 1/(1!)^2]$.

Начиная с $n = 4$, расчет вероятности существенно усложняется, поскольку множится число вариантов схем ионизаций [2]. В частности, для $n = 4$ возможны следующие варианты комбинаций. Если первичный электрон произвел три ионизации и далее этот электрон и рожденные им три

1(544).indd 80 18.03.2020 10:56:47

электрона пройдут слой без ионизаций, то в этом случае вероятность вылета четырех электронов равна $p_3 \cdot p_0^3$. Если первичный электрон произвел две ионизации, а рожденный электрон произвел одну ионизацию, то возможны две комбинации схемы. В этом случае вероятность вылета четырех электронов равна $2p_2 \cdot p_1 \cdot p_0^2$. Если первичный электрон произвел одну ионизация, а рожденный – две ионизации, то вероятность вылета четырех электронов равна $p_1 \cdot p_2 \cdot p_0^2$. Если первичный электрон произвел одну ионизацию, рожденный им – еще одну ионизацию и им рожденный электрон произвел еще одну ионизацию, то вероятность равна $p_1^3 p_0$. Суммируя эти вероятности, получаем $P(4) = p_3 \cdot p_0^3 + 2p_2 \cdot p_1 \cdot p_0^2 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_0^2 + p_1^3 \cdot p_0 = u^3 \cdot e^{-4u} \cdot C_4$, где $C_4 = 1/1!^3 + 3/(2!\,1!) + 1/3! = 8/3 = 4^3/4!$.

В работе [2] были рассмотрены возможные варианты комбинаций для различных n и получены общее выражение для коэффициентов $C_n = \dfrac{n^{n-1}}{n!}$ и аналитическое выражение для распределения вероятности вылета из слоя умножения n электронов $P(n) = \dfrac{(u \cdot n)^{n-1} \cdot e^{-u \cdot n}}{n!}$. Существенно, что, в отличие от [1], в этом выражении нет числовых коэффициентов, поэтому его можно использовать для любого сколь угодно большого числа электронов.

В той же работе [2] было замечено, что выражение для коэффициентов носит общий характер: имеет место не только в полупроводниковой электронике, но и в других областях техники, например электротехнике, теории цепей, теории графов и т. п. В частности, в работе [3] было получено аналитическое выражение для числа корневых ветвящихся деревьев в теории графов. Пусть n – число помеченных вершин графа, k – число ребер в корне, $r_n(k)$ – число деревьев с k ребрами в корне, r_n – число деревьев с n помеченными вершинами. Для $n > 1$ имеем $r_n = \sum_{k=1}^{n-1} r_n(k)$. Граф с двумя вершинами ($n = 2$) имеет одно ребро ($k = 1$), а поскольку корнем может быть либо первая, либо вторая вершина, то число деревьев $r_2 = r_2(1) = 2! = \dfrac{2!}{1!} = 2^{2-1}$. Для графа с $n = 3$ корень дерева может быть соединен либо с двумя ребрами ($k = 2$), тогда число таких деревьев равно числу вершин $r_3(2) = 3$, либо с одним ребром ($k = 1$), тогда число таких деревьев равно числу сочетаний из 3 по 1, то есть $r_3(1) = 3!$, а общее число таких деревьев

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

Рассуждая далее аналогичным образом, определим число деревьев:

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

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

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

Существенно отметить, что отношение $q_n = \dfrac{r_n}{n!} = \dfrac{n^{n-1}}{n!}$ в точности совпадает с коэффициентами $C_n = \dfrac{n^{n-1}}{n!}$, полученными при рассмотрении ударной ионизации в полупроводнике, хотя подсчет числа деревьев графа и числа ионизированных частиц проводится различным способом. Выражения для C_n и q_n, начиная с $n = 4$, разнятся существенно.

1(544).indd 81 18.03.2020 10:56:48

В частности,

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

$q_4 = 2/1! + 1/2! + 1/3! = 8/3$,

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

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

В работе [3] было показано, что возможны и другие выражения для отношения $\frac{n^{n-1}}{n!}$. В работе [4] приводится выражение для числа деревьев $r_n(k)$ с n вершинами и k ребрами у корневой вершины $r_n(k) = \frac{1}{k!}\cdot \sum_{j_1+j_2+\ldots j_k=n-1} \frac{n!}{j_1!\cdot j_2!\ldots j_k!}\cdot r_{j_1}\cdot r_{j_2}\ldots r_{j_k}$, где суммирование проводится по всем индексам $(j_1, j_2,\ldots j_k)$, таким, что $j_1 + j_2 +\ldots+ j_k = n - 1$. Для примера вычислим величину $r_4 = \sum_{k=1}^{3} r_4(k)$ с помощью приведенной формулы. Для трех значений числа вершин в корне дерева (k = 1, 2, 3) получаем $r_4(1) = \frac{1}{1!}\cdot \sum_{j_1=3} \frac{4!}{j_1!}\cdot r_{j_1} = \frac{4!}{1!}\cdot\frac{r_3}{3!}$, $r_4(2) = \frac{4!}{2!}\cdot 2\frac{r_1\cdot r_2}{1!\cdot 2!}$, $r_4(3) = \frac{4!}{3!}\cdot\left(\frac{r_1}{1!}\right)^3$. Сумма этих величин дает $r_4 = \sum_{k=1}^{3} r_4(k) = 4!\cdot\left(\frac{r_3}{3!\cdot 1!}+\frac{2\cdot r_1\cdot r_2}{1!\cdot(2!)^2}+\frac{r_1^3}{(1!)^3\cdot 3!}\right) = 4!\cdot\left(\frac{9}{6}+\frac{2\cdot 2}{4}+\frac{1}{6}\right) = 64 = 4^3 = 4^{4-1}$.

Отметим, что отношение $q_n = \frac{r_n}{n!}$ в данном случае имеет вид: $q_4 = \frac{q_3}{1!}+\frac{2\cdot q_2\cdot q_1}{2!}+\frac{q_1^3}{3!}$.

Если рассчитать q_n для последующих значений n:

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

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

и т. д., то можно заметить, что суммы числовых коэффициентов в числителях дробей совпадают с числами горизонтальных строк треугольника Паскаля или, что одно и то же, с биномиальными коэффициентами

1

1 1

1 2 1

1 3 3 1

1 4 6 4 1

1 5 10 10 5 1

1 6 15 20 15 6 1

1 7 21 35 35 21 7 1

1 8 28 56 70 56 28 8 1

……

Объяснить это можно тем, что индексы в q_j соответствуют разложению числа n – 1 на части, число которых, как было показано в работе [2], совпадает с числами горизонтальной строки треугольника Паскаля. Так, для n = 5 имеем

1(544).indd 82 18.03.2020 10:56:48

$$5 = 4+1 = 3+1+1 = 2+1+1+1 = 1+1+1+1+1$$
$$3+2 \quad 1+3+1 \quad 1+2+1+1$$
$$2+3 \quad 1+1+3 \quad 1+1+2+1$$
$$1+4 \quad 2+2+1 \quad 1+1+1+2$$
$$2+1+2$$
$$1+2+2$$
1 4 6 4 1

Поэтому представляет интерес рассмотреть свойства треугольника Паскаля.

1. Основное. Каждое число треугольника равно сумме двух расположенных над ним чисел.

2. Диагонали. Первая диагональ треугольника Паскаля, параллельная сторонам треугольника, – натуральные числа n (1, 2, 3, 4, …); вторая диагональ – треугольные числа вида $\frac{n\cdot(n+1)}{2}$ (1, 3, 6, 10, 15, …); третья диагональ – тетраидальные числа вида $\frac{n\cdot(n+1)\cdot(n+2)}{6}$ (1, 4, 10, 20, …) и т. д.

3. Горизонтали. Числа, стоящие на горизонтальных строках треугольника Паскаля, – это биномиальные коэффициенты $C_n^k = \frac{n!}{k!\cdot(n-k)!}$.

4. Суммы чисел. Сумма чисел в n-й строке треугольника равна 2^{n-1}; сумма чисел в n-й косой диагонали равна n-му числу Фибоначчи (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34...).

5. Разбиения числа. Каждое число n будем разбивать на слагаемые, различая при этом порядок слагаемых, например: разбиения 1 + 2 и 2 + 1 будем считать разными разбиениями. Количество разбиений натурального числа n совпадает с n – 1-й строкой треугольника Паскаля.

$n = 1$

Количество разбиений **1**

$n = 2 = 1 + 1$

Количество разбиений **1 1**

$n = 3 = 2 + 1 = 1 + 1 + 1$
$1 + 2$

Количество разбиений **1 2 1**

$n = 4 = 3 + 1 = 2 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 1$
$2 + 2 \quad 1 + 2 + 1$
$1 + 3 \quad 1 + 1 + 2$

Количество разбиений **1 3 3 1**

6. Вероятности. Пусть подбрасываются четыре монеты. Возможные варианты появления орла (О) или решки (Р) на каждой монете следующие: РРРР (один вариант), ОРРР, РОРР, РРОР, РРРО (4 варианта), ООРР, ОРРО, РРОО, ОРОР, РОРО, РООР (6 вариантов), РООО, ОРОО, ООРО, ОООР (4 варианта), ОООО (1 вариант). Число вариантов (**1, 4, 6, 4, 1**) – числа в 4-й строке треугольника Паскаля.

7. Системы уравнений. Рассмотрим выражение для следующей суммы [5]:

$$\sum_{k=1}^{n}(-1)^k\cdot k^m\cdot C_n^k = \begin{cases}-1, & m=0,\\ 0, & m=1,2,3,\ldots,n-1.\end{cases}$$

1(544).indd 83 18.03.2020 10:56:48

Обозначая $x_1 = C_n^1$, $x_2 = C_n^2$, $x_3 = C_n^3$,... $x_n = C_n^n$ и подставляя эти обозначения в формулу, получим систему линейных уравнений относительно x_j (j = 1, 2, 3... n):

$$-1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 - 1 \cdot x_3 - ... + (-1)^n \cdot x_n = -1,$$

$$-1 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 - 3 \cdot x_3 - ... + (-1)^n \cdot n \cdot x_n = 0,$$

$$-1^2 \cdot x_1 + 2^2 \cdot x_2 - 3^2 \cdot x_3 - ... + (-1)^n \cdot n^2 \cdot x_n = 0,$$

.....

$$-1^{n-1} \cdot x_1 + 2^{n-1} \cdot x_2 - 3^{n-1} \cdot x_3 - ... + (-1)^n \cdot n^{n-1} \cdot x_n = 0.$$

Решением системы будут числа треугольника Паскаля в строке с номером n.

8. Отличное от основного (п. 1) правило построения треугольника Паскаля. Запишем первое натуральное число n = 1. На второй строке запишем это число, сдвинутое относительно первого вправо на одну позицию, получим 1 1 – это вторая строка в треугольнике Паскаля. Затем сдвинем 1 1 на одну позицию и просуммируем, получим 1 2 1 – это третья строка в треугольнике Паскаля. Далее сдвинем 1 2 1 на одну позицию и просуммируем, получим следующую строку треугольника Паскаля: 1 3 3 1. Повторяя эту процедуру, получим все строки треугольника Паскаля.

9. Суммы квадратов. Обозначим сумму квадратов чисел в строке треугольника Паскаля S_n. Несложно подсчитать, что $S_1 = 1$, $S_2 = 1^2 + 1^2 = 2$, $S_3 = 1^2 + 2^2 + 1^2 = 6$, $S_4 = 1^2 + 3^2 + 3^2 + 1^2 = 20$, $S_5 = 1^2 + 4^2 + 6^2 + 4^2 + 1^2 = 70$ и т. д. Все эти числа располагаются по центральной вертикали треугольника Паскаля, а поскольку центральная вертикаль существует только для четных n, то $S_n = C_{2\cdot(n-1)}^{n-1}$. Эта формула получается из выражения для свертки Вандермонда [4] $C_n^m = \sum_{k=0}^{p} C_{n-p}^{m-k} \cdot C_p^k$. Полагая в ней $n - p = p$ и $m = p$, получаем $C_{2p}^p = \sum_{k=0}^{p} C_p^{p-k} \cdot C_p^k = \sum_{k=0}^{p} (C_p^k)^2$. Таким образом, $S_n = C_{2\cdot(n-1)}^{n-1} = \sum_{k=0}^{n-1} (C_{n-1}^k)^2$. Числа вида $K_n = \frac{1}{n+1} \cdot C_{2n}^n$ $(1, 2, 5, 14...)$ называются числами Каталана. Из треугольника Паскаля видно, что разности между числами основной (2, 6, 20, 70, …) и второй от основной (1, 4, 15, 56, …) вертикалей дают числа Каталана. Разности между числами первой (3, 10, 35, 126,…) и третьей от основной (1, 5, 21, 84, …) вертикалями – числа Каталана.

10. Квадраты в треугольнике Паскаля. Начиная от вершины треугольника Паскаля, выделим квадраты в треугольнике:

первый квадрат n = 1

1

второй квадрат n = 2

1

1 1

2

третий квадрат n = 3

1

1 1

1 2 1

3 3

6

и т. д.

1(544).indd 84 18.03.2020 10:56:48

Сумма чисел в этих квадратах: $n = 1$ (**1**), $n = 2$ (**5**), $n = 3$ (**19**), $n = 4$ (**69**),…. – уменьшенные на 1 числа главной вертикали треугольника Паскаля.

11. Сумма обратных величин чисел треугольника Паскаля. Обратимся теперь к суммам обратных величин чисел треугольника Паскаля. Поскольку биномиальные коэффициенты представляют собой произведения уменьшающихся на единицу линейных выражений от целого числа n, то их обратные величины могут быть разложены в суммы по обратным величинам этих линейных выражений. При этом числители сумм представляют собой также биномиальные коэффициенты

$$\frac{1}{C_j^m} = m \cdot \sum_{k=1}^{m} (-1)^{k+1} \cdot \frac{C_{m-1}^{m-k}}{j-m+k}.$$

Если просуммировать это выражение по числу j, изменяющемуся от m до n, то одинаковые слагаемые с противоположными знаками сократятся и в результате для $m > 1$ получится формула $\sum_{j=m}^{n} \frac{1}{C_j^m} = \frac{m}{m-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{C_n^{m-1}}\right)$. При $n \to \infty$ сумма равна $m/(m-1)$.

12. Замечательные последовательности. Развернем треугольник Паскаля и расположим числа следующим образом.

1	1	1	1	1	1	...
	1	2	3	4	5	...
		1	3	6	10	...
			1	4	10	...
				1	5	...
					1	...
1	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**	**…**

Суммы чисел по вертикали 2^{n-1} равны суммам чисел в строке треугольника Паскаля (n – номер строки).

Сдвинем числа в каждой строке на одну позицию вправо (косая диагональ в треугольнике Паскаля) и просуммируем числа в столбцах

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1...
		1	2	3	4	5	6	7	8	9...
				1	3	6	10	15	21	28...
						1	4	10	20	35...
								1	5	15...
										1...
1	**1**	**2**	**3**	**5**	**8**	**13**	**21**	**34**	**55**	**89…**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11...*n*

Получим (выделены жирным шрифтом) последовательность чисел Фибоначчи F_n. В ней каждое число, начиная с третьего, равно сумме двух предыдущих $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$. При увеличении n предел отношения F_n / F_{n-1} стремится к так называемой «золотой пропорции»

1(544).indd 85 18.03.2020 10:56:48

$\varphi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1{,}61803398875\ldots$, которая является решением квадратного уравнения $\varphi^2 = \varphi + 1$. Числа Фибоначчи нашли чрезвычайно широкое применение не только в математике, но и в физике, биологии, медицине, в различный областях техники (цифровой, электронной), криптографии, архитектуре, живописи. Интересны равенства с числами Фибоначчи, например, $F_n^{\,2} - F_{n-1} \cdot F_{n+1} = (-1)^{n+1}$ и др.

Сдвинем теперь числа в каждой строке треугольника Паскаля еще на одну позицию (двойная косая диагональ в треугольнике Паскаля) и просуммируем числа в столбцах

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1...
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11…..
						1	3	6	10	15	21	28	36….
									1	4	10	20	35…
												1	5…..
1	**1**	**1**	**2**	**3**	**4**	**6**	**9**	**13**	**19**	**28**	**41**	**60**	**88….**
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13….*n*

Получим новую последовательность (выделена жирным шрифтом), которую обозначим A_n. В ней каждое число, начиная с четвертого, равно сумме предыдущего числа и отстоящего от него на две позиции, что описывается основной формулой $A_n = A_{n-1} + A_{n-3}$. Если преобразовать ее к виду $A_n/A_{n-1} = 1 + 1/[(A_{n-1}/A_{n-2}) \cdot (A_{n-2}/A_{n-3})]$ и учесть, что при увеличении n отношение A_n/A_{n-1} стремится к некоторому числу α, то получим основное уравнение $\alpha^3 = \alpha^2 + 1$. Для его решения положим $\alpha = x + b$, подставим эту сумму в основное уравнение и приравняем к нулю коэффициент при α^2. В результате получим $b = 1/3$. Приведем полученное уравнение к виду $x^3 + 3px + 2q = 0$, где $p = -1/9$, $q = -29/54$. Дискриминант уравнения $D = q^2 + p^3 = 3127/(27 \cdot 4)$. Единственное действительное решение: $x = \left(\sqrt[3]{C} + 1/\sqrt[3]{C}\right)/3$, где $C = \left(29 + \sqrt{2731}\right)/2$. Окончательно получаем выражение $\alpha = \left(\sqrt[3]{C} + 1/\sqrt[3]{C} + 1\right)/3 = 1{,}4655711\ldots$ Отметим, что в C входят три числа, отличающихся на 2, это 27, 29, 31.

Формула $A_n = A_{n-1} + A_{n-3}$ справедлива и для отрицательных индексов.

0	**0**	**1**	**0**	**-1**	**1**	**1**	**-2**	**0**	**3**	**-2**	**-3**	**5**	**1….**
-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14….*n*

При $n = 2$ получаем: $A_{-1} = A_2 - A_1 = 0$ и далее $A_{-2} = A_1 - A_0 = 0$, $A_{-3} = A_0 - A_{-1} = 3\ldots$ (см. последнюю таблицу). Поскольку $\alpha^0 = 0 \cdot \alpha^2 + 0 \cdot \alpha + 1$, $\alpha^1 = 0 \cdot \alpha^2 + 1 \cdot \alpha + 0$, $\alpha^2 = 1 \cdot \alpha^2 + 0 \cdot \alpha + 0$, $\alpha^3 = 1 \cdot \alpha^2 + 0 \cdot \alpha + 1$ и, учитывая, что для высших степеней α степень можно понижать (например, $\alpha^4 = \alpha \cdot \alpha^3 = \alpha(\alpha^2 + 1) = \alpha^3 + \alpha = \alpha^2 + \alpha + 1$), получаем выражения $\alpha^5 = 2 \cdot \alpha^2 + 1 \cdot \alpha + 1$, $\alpha^6 = 3 \cdot \alpha^2 + 1 \cdot \alpha + 2$, $\alpha^7 = 4 \cdot \alpha^2 + 2 \cdot \alpha + 3\ldots$ и общую формулу, справедливую для любого n ($-\infty < n < \infty$): $\alpha^n = A_{n-1} \cdot \alpha^2 + A_{n-3} \cdot \alpha + A_{n-2}$.

Отсюда следуют формулы: $A^2_{n-1} - A_{n-2} \cdot A_n = A_{-2-n}$, $A_{n-4} \cdot A_{n-1} - A_{n-2} \cdot A_{n-3} = A_{-2-n}$ и др.

13. Произведения чисел строки треугольника Паскаля. Обозначим произведение чисел строки треугольника Паскаля $P_n = \prod_{k=0}^{n} C_n^k = \prod_{k=0}^{n} \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} = \frac{(n!)^{n+1}}{\prod_{k=0}^{n} (k!)^2}$. Поскольку отношение

1(544).indd 86 18.03.2020 10:56:49

$B_n = \frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{n^n}{n!}$, то отношение $\frac{B_{n+1}}{B_n} = \frac{(n+1)^{n+1}}{(n+1)!} \cdot \frac{n!}{n^n} = \left(1+\frac{1}{n}\right)^n$ при $n \to \infty$ будет стремиться к $e = 2{,}73...$

Найдем теперь отношение последовательных значений коэффициентов $C_n = \frac{n^{n-1}}{n!}$. Поскольку $\beta_n = \frac{C_{n+1}}{C_n} = (1+\frac{1}{n})^{n-1}$, то при $n \to \infty$ отношение β_n также будет стремиться к e.

Таким образом, выражение для коэффициентов C_n в формуле распределения n ионизированных частиц в полупроводнике связано с выражением для отношения последовательных произведений чисел строки треугольника Паскаля B_n формулой $C_n = \frac{1}{n} B_n$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тагер, А. С.** Флюктуации тока в полупроводнике (диэлектрике) в условиях ударной ионизации и лавинного пробоя / А. С. Тагер // ФТТ. – 1964. – Т. 6.

2. **Балыко, И. А.** Плотность распределения частиц в полупроводнике в условиях ударной ионизации / И. А. Балыко, А. К. Балыко // Электронная техника, Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 110 – 119.

3. **Балыко, И. А.** Число ветвящихся деревьев и число ионизированных частиц в полупроводнике / И. А. Балыко, А. К. Балыко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып.1 (536). – С. 75 – 82.

4. **Сачков, В. Н.** Введение в комбинаторные методы дискретной математики / В. Н. Сачков. – М.: Наука, 1982.

5. **Балыко, И. А.** Выражения для сумм рядов с биномиальными коэффициентами / И. А. Балыко, А. К. Балыко // Электронная техника, Сер. 1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып. 4 (515). – С. 49 – 54.

Статья поступила 6 декабря 2019 г.

1(544).indd 87 18.03.2020 10:56:49

ЭКОНОМИКА

УДК 004

СТРАТЕГИЯ-2030 КАК ПУТЬ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОГО ОБЩЕСТВА В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

М. Д. Джамалдинова[1], Н. О. Курдюкова[1], А. А. Вершинин[2]

[1]*МГОТУ, г. Москва*

[2]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

Рассматривается «Стратегия развития информационного общества на 2017 – 2030 годы», а также содержание программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Описаны подходы её реализации, которые позволят обеспечить системное развитие и внедрение цифровых технологий во все области жизни современной России. Приводится рейтинг развития электронного правительства.

КС: информационное общество, цифровая экономика, стратегическое развитие, формы развития, стратегия

STRATEGY-2030 AS A WAY TO DEVELOP A DIGITAL SOCIETY IN MODERN RUSSIA

M. D. Dzhamaldinova[1], N. O. Kurdyukova[1], A. A. Vershinin[2]

[1]*Moscow region Technological University (TU)*

[2]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

The development of the «Strategy of the information society for 2017 – 2030» as well as the content of the «Digital Economy of the Russian Federation» program are considered. The approaches to its implementation are described which will allow to provide systematic development and implementation of digital technologies in all areas of life in modern Russia. The rating of the development of e-government is given.

Keywords: information society, digital economy, strategic development, forms of development, strategy

Россия пока не входит в группу лидеров развития цифровой экономики по многим показателям. Не только по доле цифровой экономики в ВВП, удельной доле доходов от цифровизации в валовом внутреннем продукте, но и по расходам домохозяйств в цифровой сфере, по уровню инвестиций компаний в цифровизацию, а также по уровню государственных расходов на цифровизацию экономики. Однако Россия располагает необходимой интеллектуальной и научной базой; имеются оригинальные организационно-технологические решения по созданию эффективной инфраструктуры цифровой экономики.

В соответствии со «Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы» предполагается организовать системное развитие и внедрение цифровых технологий во всех областях жизни [1]: в экономике, предпринимательстве, социальной сфере,

1(544).indd 88 18.03.2020 10:56:49

а также в государственном управлении. В РФ первая Стратегия развития информационного общества была утверждена на исходе второго срока В. Путина, в феврале 2008 года (Совет безопасности одобрил ее в июле 2007 года) и действовала до 2015 года. Новая Стратегия будет реализовываться в период с 2017 по 2030 год (Стратегия-2030) и, таким образом, охватит на шесть лет больше, чем предыдущий документ.

Стратегия-2030 акцентируется на вопросах развития информационного общества, формирования национальной цифровой экономики, обеспечения национальных интересов и реализации стратегических национальных приоритетов. Основными принципами подписанного указа являются обеспечение прав граждан на доступ к информации, обеспечение свободы выбора при получении данных, а также «сохранение традиционных и привычных (в отличие от цифровых)» для граждан России «форм получения товаров и услуг».

Отдельное внимание должно быть уделено «критической информационной инфраструктуре» России, (см. рис. 1), элементы которой используются государственными органами, а также в сферах обороны, здравоохранения, транспорта, связи, финансов, энергетики и в различных отраслях промышленности. Критическая информационная система – объекты критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов [2]. Данную инфраструктуру, как отмечается в Стратегии-2030, необходимо защищать «с использованием государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на информационные ресурсы».

Рис. 1. Элементы критической информационной инфраструктуры России, согласно Стратегии-2030 (составлено авторами на основе источника [1])

В новом документе, Стратегии-2030, упор сделан на создание системы, обеспечивающей эффективную и оперативную передачу достоверной информации между элементами информационного общества: гражданами, организациями и госструктурами. Кроме того, Стратегия-2030 также предполагает вхождение России в двадцатку международных рейтингов в области развития информационного общества. Однако на сегодняшний день в рейтинге развития электронного правительства ООН (E-government Development Rank) Россия занимает 35-е место [7], в индексе развития ИКТ (ICT Development Index – IDI) – 44-е место [5], а в индексе готовности к сетевому обществу (Networked Readiness Index – NRI) – 41-е место [4].

Именно поэтому Стратегия-2030 ставит своей первостепенной целью повышение качества жизни (в частности, образования, медицинского обслуживания, социальной защиты населения) на основе развития и использования информационных и телекоммуникационных технологий. Следует отметить, что для выполнения этих задач предлагается создать новую технологическую основу в экономике и социальной сфере.

Стратегия-2030 планирует обеспечение 100%-го уровня доступности для граждан базовых телекоммуникационных услуг и технологий на всей территории страны, а также реализацию

1(544).indd 89 18.03.2020 10:56:49

задач по «интенсификации использования самих технологий». В неё вошли предложения, которые обсуждались с ведущими представителями IT-индустрии, а также положения Посланий главы государства Федеральному собранию и Доктрины информационной безопасности России. Кроме того, новая стратегия резонирует с программой «Цифровая экономика Российской Федерации» [6], утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р, которая должна стать основой для развития системы государственного управления, экономики, бизнеса, социальной сферы, всего общества. Следует отметить, что утвержденная Стратегия коррелирует с программой «Цифровая экономика Российской Федерации», разработанной с целью повышения эффективности системы государственного управления, экономики, бизнеса, социальной сферы, всего общества.

В Стратегии-2030 подчеркивается, что для нового этапа развития страны характерно возникновение цифровой экономики, ключевыми факторами производства в которой являются данные, представленные в цифровом виде. Технологии обработки таких данных становятся главными способами повышения эффективности современной экономики. Для решения данных проблем документ предлагает приоритетный сценарий развития информационного общества в России, который заключается в создании государством благоприятных условий для развития отечественных разработок в сфере IT. Российские компании должны создавать прорывные технологии, а государство – обеспечивать и защищать их интересы. В свою очередь, граждане должны быть осведомлены о преимуществах использования новых сервисов и товаров и иметь к ним недискриминационный доступ (то есть независимо от организационно-правовой формы и правовых отношений с лицом, оказывающим эти услуги).

Правительство РФ составило планы мероприятий (дорожные карты) по четырем направлениям программы «Цифровая экономика Российской Федерации»:

1. «Нормативное регулирование».
2. «Формирование исследовательских компетенций и технологических заделов».
3. «Информационная инфраструктура».
4. «Информационная безопасность».

В ближайшее время Минэкономразвития России, Минтруд России, Минобрнауки России совместно с АНО «Агентство стратегических инициатив» представят дорожную карту еще по одному направлению — «Кадры и образование». Отдельным направлением программы станет платформа «Умный город», представляющая единое решение в области безопасности, организации дорожного движения, управления жилищно-коммунальными и социально-бытовыми услугами в городе.

Помимо указанных направлений программы, Правительство РФ поручило Минкомсвязи России, Минэкономразвития России совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, АНО «Цифровая экономика» и АНО «Аналитический центр при Правительстве РФ» представить предложения по включению в программу «Цифровая экономика Российской Федерации» новых направлений в сфере здравоохранения, создания «умных городов», государственного управления.

До 2020 г. на реализацию дорожных карт по четырем направлениям исследуемой программы планируется израсходовать всего 521 млрд руб., в т. ч. 171 млрд руб. – бюджетное финансирование, 350 млрд руб. – внебюджетное финансирование.

Наибольшую долю средств планируется направить на финансирование направления «Информационная инфраструктура» – 436 млрд руб. до 2020 г. (100 млрд руб. – из бюджета и 336 млрд руб. – из внебюджетных средств).

1(544).indd 90 18.03.2020 10:56:49

Основным результатом деятельности по этому направлению должна стать разработка в Российской Федерации до 2024 г. генеральной схемы развития сетей связи и инфраструктуры хранения и обработки данных, а также концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020. Будет создана глобальная многофункциональная спутниковая система для покрытия территории России и всего мира. В дорожной карте содержится план мероприятий по развитию информационных систем государственной цифровой платформы предоставления гражданам государственных и муниципальных услуг в электронном виде. К 2024 году все данные планируется сделать доступными для использования на цифровых платформах.

Применение цифровых технологий улучшает деловой и инвестиционный климат благодаря повышению доступности и эффективности государственных услуг страны, что обусловлено созданием новых условий предоставления и получения государственных услуг (регистрация юридических лиц, аккредитация, получение разрешений, декларирование и уплата налогов, таможенное сопровождение), развитию экосистемы бизнес-сервисов (логистические услуги, мобильный банкинг), повышению прозрачности условий ведения бизнеса (электронные площадки для проведения тендеров и закупок, порталы обратной связи).

Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» включает в себя шесть федеральных проектов [8]:

1. «Нормативное регулирование цифровой среды».
2. «Информационная инфраструктура».
3. «Кадры для цифровой экономики».
4. «Информационная безопасность».
5. «Цифровые технологии».
6. «Цифровое государственное управление».

Ключевыми целями национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации» являются:

– увеличение внутренних затрат на развитие цифровой экономики;

– создание устойчивой и безопасной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры высокоскоростной передачи, обработки и хранения больших объемов данных, доступной для всех организаций и домохозяйств;

– использование преимущественно отечественного программного обеспечения государственными органами, органами местного самоуправления и организациями.

Правила выделения субсидий из федерального бюджета на внедрение «сквозных» цифровых технологий преобразования приоритетных отраслей экономики и социальной сферы утвердило Правительство РФ.

Субсидии будут предоставляться проектам по внедрению отечественных продуктов, сервисов и платформенных решений, созданных на базе «сквозных» цифровых технологий, заявленных в нацпроекте «Цифровая экономика Российской Федерации» по следующим направлениям:

1) «большие данные» (big data);
2) нейротехнологии и искусственный интеллект;
3) системы распределенного реестра (блокчейн);
4) квантовые технологии;
5) новые производственные технологии, инновационные технологии в производственной сфере;
6) промышленный интернет;
7) компоненты робототехники и сенсорика, инновационная робототехника;

1(544).indd 91 18.03.2020 10:56:49

8) технологии беспроводной связи (в частности, 5G);

9) технологии виртуальной и дополненной реальности (VR и AR).

По информации ТАСС, финансирование предусмотрено на организационно-методическое и информационно-аналитическое сопровождение реализации приоритетных проектов, включая поиск, экспертизу, отбор, финансовое обеспечение, мониторинг, а также на предоставление грантов на пилотные проекты. Финансовую поддержку из федерального бюджета должны получить не менее 500 организаций в сфере «сквозных» цифровых технологий. Деньги будет выделять Минкомсвязь через оператора, который будет определен в результате отбора. Минкомсвязь также будет определять максимальный размер гранта для каждой компании-получателя.

Следует обратить внимание на выделенные условия для получения субсидии, приведенные на рис. 2.

Рис. 2. Условия для получения субсидии
в рамках национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации»
(составлено авторами на основе источника [3])

Особо следует отметить использование международной методологии Technology Readiness Level (TRL) (см. рис. 2), представляющей собой программное средство для комплексной оценки технологической готовности инновационных научно-технологических проектов, используемое для экспертной оценки проектов Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического развития России на 2014 – 2020 годы». Программное средство разработано на основе клиент-серверных технологий и реализовано в виде Web-системы в сети Интернет. Функционал программного средства реализует модель комплексной оценки технологической готовности инновационных научно-технологических проектов, причем как самими исполнителями проектов для самостоятельной оценки уровня технологической готовности проекта, так и для его экспертной оценки. Кроме того, программное средство TRL может быть использовано для создания информационной системы или может быть интегрировано в существующие инструментальные системы распределенного доступа, в которых проводятся количественные оценки технологической готовности проектов.

В рамках нацпроекта «Цифровая экономика Российской Федерации» к 2022 году должны получить поддержку не менее 60 проектов по преобразованию приоритетных отраслей экономики и соцсферы и увеличению экспорта высокотехнологичной продукции, созданной с использованием «сквозных» цифровых технологий или коммерциализирующей российские разработки в области «сквозных» цифровых технологий.

1(544).indd 92 18.03.2020 10:56:49

Поддержку из федерального бюджета к указанному году также должны получить не менее 60 региональных проектов развития цифровой экономики. На это федеральным бюджетом предусмотрены ассигнования: 2019 год – 5 млрд рублей; 2020 год – 6 млрд рублей; 2021 год – 9,07 млрд рублей.

В России к 2025 г. цифровая экономика может достичь 8…10 % ВВП страны. Так, ВВП России в период 2011 – 2015 гг. вырос на 7 %, а объем цифровой экономики за тот же период – на 59 %, или на 1,2 трлн руб. в ценах 2015 г. Таким образом, за пять лет на цифровую экономику пришлось 24 % общего прироста ВВП России. По прогнозам аналитиков, потенциальный экономический эффект от цифровизации экономики России увеличит ВВП страны к 2025 г. на 4,1…8,9 трлн руб. (в ценах 2015 г.), что составит от 19 до 34 % общего ожидаемого роста ВВП.

Столь оптимистичные прогнозы обусловлены не только эффектом, получаемым от автоматизации существующих процессов, но и от внедрения новых, прорывных бизнес-моделей и технологий, среди которых цифровые платформы, цифровые экосистемы, углубленная аналитика больших массивов данных, технологии «Индустрия 4.0» (3*D*-печать, роботизация, интернет вещей).

Данные аналитические исследования установили прямую зависимость между процессом цифровизации экономики страны и ростом ее валового внутреннего продукта, при этом цифровизация является и будет являться одним из ключевых направлений перспективного развития.

Таким образом, при сохраняющихся темпах и динамике развития экономики России на период до 2025 года ВВП страны в результате внедрения новых и модернизации уже существующих цифровых процессов и технологий может вырасти на 4…9 трлн руб. (в ценах 2015 года), или на 19…34 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» [Электронный ресурс]. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201705100002 (дата обращения: 30.12.19).

2. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/c5051782233acca771e9adb35b47d3fb82c9ff1c/ (дата обращения: 23.12.19).

3. Постановление Правительства РФ от 03.05.2019 N 555 «Об утверждении Правил предоставления субсидии в рамках поддержки проектов по преобразованию приоритетных отраслей экономики и социальной сферы на основе внедрения отечественных продуктов, сервисов и платформенных решений, созданных на базе «сквозных» цифровых технологий» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/law/hotdocs/57734.html/ (дата обращения: 12.01.20).

4. Индекс готовности к сетевому обществу (Networked Readiness Index — NRI) [Электронный ресурс]. – URL: http://reports.weforum.org/global-information-technology-report-2016/networked-readiness-index/ (дата обращения: 13.01.20).

5. Индекс развития ИКТ (ICT Development Index — IDI) [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Индекс_развития_ИКТ (дата обращения: 13.12.19).

6. Новая стратегия развития информационного общества: что изменилось за 10 лет [Электронный ресурс]. – URL: https://tass.ru/politika/38699202 (дата обращения: 27.12.19).

7. Рейтинг развития электронного правительства ООН (E-government Development Rank) [Электронный ресурс]. – URL: https://publicadministration.un.org/egovkb/Portals/egovkb/Documents/un/2016-Survey/Annexes.pdf (дата обращения: 14.12.19).

8. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf (дата обращения: 10.01.20).

Статья поступила 29 января 2020 г.

1(544).indd 93 18.03.2020 10:56:49

ИСТОРИЯ

УДК 09

УЧЕНЫЕ «ИСТОКА» – ВЕТЕРАНЫ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

Т. А. Балыко, учитель истории, магистр теологии

Общеобразовательная средняя школа № 16, г. Щелково

А. К. Балыко, М. И. Сизоненко

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

SCIENTISTS OF «ISTOK» – VETERANS OF THE GREAT PATRIOTIC WAR

T. A. Balyko, history teacher, Master of Theology

Comprehensive secondary school № 16, Shchelkovo

A. K. Balyko, M. I. Sizonenko

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

В канун всенародного праздника – 75-летия Дня Победы, в память о великом народном подвиге необходимо было бы рассказать обо всех ветеранах и участниках Великой Отечественной войны. Однако только число погибших сотрудников «Истока», увековеченных на стеле мемориала предприятия, составляет 358 человек. Общее же число ветеранов войны – сотрудников НПП «Исток» равно 1000 человек. Мы выбрали биографии пяти ученых «Истока», каждый из которых, помимо ратного подвига, внес существенный вклад в укрепление обороноспособности нашей великой Родины. Начать статью о ветеранах Великой Отечественной войны – сотрудниках «Истока» надо было, конечно, с двух выдающихся наших ученых: Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии, академика Николая Дмитриевича Девяткова, чья биография вошла в энциклопедию «Великая Отечественная война 1941–1945 гг.» (М.: Советская энциклопедия, 1985), и лауреата Ленинской премии, кандидата технических наук Вадима Федоровича Коваленко, но их биографии недавно были опубликованы в нашем журнале (вып. 4, 2017 г. и вып. 1, 2019 г.).

АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ ХРАПКО

В течение своей жизни мы знакомимся со множеством людей. Однако лишь некоторые из них оказывают заметное влияние на нас. Иной раз для этого достаточно нескольких встреч.

Первая моя (А. К. Балыко. – *ред.*) встреча с Александром Михайловичем Храпко состоялась в самом начале моей работы на «Истоке», в 1973 году. Я, сотрудник лаборатории профессора А. С. Тагера, придумал метод измерения полных проводимостей полупроводниковых диодов, и мы вместе с Александром Семеновичем написали заявку на изобретение. За рецензией на заявку

1(544).indd 94 18.03.2020 10:56:49

А. М. Храпко

А. С. Тагер посоветовал обратиться к А. М. Храпко, одному из ведущих специалистов страны по вопросам метрики на СВЧ. Я созвонился с Александром Михайловичем и в назначенный час вошел к нему в лабораторию. Первое, что я отметил во внешности А. М. Храпко, – огромный сократовский лоб и длинные, спускающиеся до плеч волосы. И его вид, и его лаборатория с многочисленными измерительными приборами, шкафами с книгами и журналами – все это вдруг напомнило мне юношеское представление о великих русских исследователях Д. И. Менделееве, Н. А. Умове, А. Н. Столетове. Для меня он так и остался ученым из этой плеяды. Внимательно выслушав суть нашего изобретения, Александр Михайлович обещал написать рецензию. «Но прежде, – сказал он и по-отцовски добрым взглядом посмотрел на меня, – послушайте, что я вам расскажу». И экспромтом прочитал мне удивительную часовую лекцию о современных методах экспериментальных исследований и измерительной аппаратуре. При этом он несколько раз подходил к огромному шкафу с карточками, в котором им была собрана уникальная библиография печатных работ по измерительной технике. Из лаборатории я вышел совершенно потрясенный увиденным и услышанным. Такой объем информации, свалившийся на голову молодого специалиста, сразу спустил меня с облаков моих «уникальных» идей на реальную землю, исхоженную до меня изобретателями и исследователями всего мира. О своих впечатлениях я поделился с А. С. Тагером. В нескольких словах он рассказал о нелегкой жизни А. М. Храпко: «В детстве он стал сиротой. Во время Великой Отечественной войны принимал участие в боях на одном из самых тяжелых боевых участков – «Малой земле». После тяжелого ранения лишился ноги и был демобилизован из армии инвалидом. Но несмотря на это, поступил учиться на физико-математический факультет Ростовского государственного университета. Закончил его в 1950 году и с этого времени работает на нашем предприятии, в настоящее время – начальником лаборатории».

После моего первого с ним знакомства я стал внимательно следить за работами А. М. Храпко, его статьи в журналах всегда были очень интересными, содержащими множество новых оригинальных приемов. Александр Михайлович по праву считался одним из ведущих специалистов по измерительной технике, в том числе в области миллиметровых длин волн. Его уважали, с ним считались отечественные ученые. В начале 70-х годов А. М. Храпко одним из первых в стране начал исследование полосковых и микрополосковых линий передач. Это направление в технике СВЧ в те годы считалось едва ли не самым перспективным. Он был постоянным соавтором теоретиков Е. И. Нефедова и А. Т. Фиалковского, которые вскоре издали первую отечественную книгу, посвященную исследованию микрополосковых линий. А. М. Храпко всегда щедро делился с сотрудниками идеями, результатами, интересными мыслями и огромным практическим опытом. Перечислить все работы, выполненные Александром Михайловичем, невозможно. Они широко известны и высоко оценены специалистами. В 1977 го-

1(544).indd 95 18.03.2020 10:56:50

ду А. М. Храпко успешно защитил диссертацию и стал кандидатом технических наук, а позднее стал и лауреатом Государственной премии СССР. Мне всегда огромное удовольствие доставляло слушать его научные доклады на конференциях и семинарах. Он владел аудиторией, говорил красочно, выразительно, с большим артистизмом. Это придавало научному докладу свежесть и неповторимость. Западных ученых он называл «буржуями», а советских непременно возвышал и восхвалял. Патриотизм, закаленный в боях на «Малой земле», был неотъемлемой частью жизни ученого. Александр Михайлович был талантлив во многих сферах творческой деятельности. Готовя материалы к 50-летию великой Победы, заместитель председателя Совета ветеранов «Истока» И. И. Бродуленко попросил меня посмотреть и, если надо, «подработать» для печати воспоминания А. М. Храпко. Я начал их читать и понял, что никакой редакторской правки не надо, настолько правдивым и точным языком они написаны. Вот лишь небольшой отрывок из его воспоминаний:

«...На рассвете фашисты начали наступление на высоту. Растянувшись вдоль линии, они бежали прямо на нас и приближались к склону горы Колдун. Когда они оказались на середине лощины, последовала долгожданная команда: «Огонь!». Прицельный огонь пулеметов и автоматов заставил немцев залечь. Однако вслед за этим в них полетели наши гранаты. Оставив в лощине несколько десятков убитых и раненых, вражеские солдаты короткими перебежками ушли за поворот дороги. Через некоторое время они предприняли еще одну атаку. На этот раз впереди шел танк, а за ним бежали пехотинцы. Ураганный огонь из танка не достигал наших позиций, а когда гранаты наших бойцов начали разрываться в нескольких метрах от танка, немцы не выдержали и повернули обратно.

...К обеду немцы возобновили бомбежку всей «Малой земли». За эти дни мы настолько привыкли к страшному грохоту моторов, вою и визгу авиабомб, разрывам снарядов, что у большинства из нас появилось некоторое безразличие, и мы даже начали посмеиваться над нелепыми атаками фашистов.

...Несмотря на небывалые по своей силе бомбовые удары, которые не прекращались в течение целой недели ни днем, ни ночью, и следующие за ними атаки пехотинцев, а также частые штормы на море, затруднявшие подвоз боеприпасов и продовольствия, защитники «Малой земли» продолжали удерживать позиции, изматывать и уничтожать отборные фашистские части. Мы выстояли и победили».

За заслуги перед Отечеством в суровые дни войны А. М Храпко был награжден 12 боевыми орденами и медалями. Он часто выступал на торжественных митингах и собраниях, посвященных славной Победе нашего народа. За полгода до смерти Александр Михайлович сделал замечательный доклад, посвященный 50-летию Победы, вложив в него всю душу фронтовика, потерявшего в окопах на «Малой земле» здоровье, и выдающегося ученого, отдавшего всего себя служению отечественной науке. До последнего дня жизни он работал на предприятии в родном ему НПК-5, где встретил и свой 70-летний юбилей.

Для меня А. М. Храпко дорог еще и тем, что он побывал на моей малой родине – в далеком дальневосточном поселке. Любопытна история, связанная с этим. Даже, будучи молодым специалистом, в 1975 г. я позволял себе ежедневно обедать в ресторане «Фрязино». Обед тогда стоил 1 руб. 20 коп., так что при месячном окладе инженера в 110 руб. на такой ежедневный обед средств хватало. Однажды я подсел за стол к А. М. Храпко, который также часто обедал в ресторане. Разговорились, как говорится, по душам. «Вы откуда родом?» – спросил Александр Михайлович. «Да, из одного поселка в Хабаровском крае», – скороговоркой ответил я, считая,

1(544).indd 96 18.03.2020 10:56:50

что название поселка на далеком Дальнем Востоке мало что говорит фрязинскому ученому. «Из Хора, что ли?» – Александр Михайлович точно сказал название моего родного поселка. Я был потрясен. «Откуда вы его знаете?» – переведя дыхание, спросил я. Тогда А. М. Храпко рассказал мне, что в 1943 году после тяжелого ранения и длительной госпитализации государство дало ему возможность бесплатно поехать в любую точку страны. Он выбрал город Владивосток. Эшелон с такими же, как и он, бойцами-инвалидами шел неторопливо, пропуская составы с боеприпасами и сырьем, часто останавливался. На станции Хор тоже задержался. Бойцы прослышали, что в поселке есть гидролизный завод. Отправили посыльного, и тот принес «сучок» – неочищенный этиловый спирт. Бойцы в эшелоне собрались молодые. Кто без руки, кто без ноги, а молодость свое брала. Да и в войне к тому времени произошел существенный перелом. Было за что выпить. В дальнейшем, по словам Александра Михайловича, как только он слышал о Дальнем Востоке, так сразу вспоминал поселок Хор, о тостах фронтовиков: «За Победу!», «За Родину!»…

Коллектив лаборатории разработки миллиметровой аппаратуры, 1987 г.
Слева направо сидят: В. А. Маслихин, И. В. Аверкиева, С. В. Беляков, Т. Н. Писаренко;
стоят: К. А. Шумарина, А. М. Храпко, С. В. Шумарин, Л. Н. Вершинина, О. А. Городайкина

Александр Михайлович Храпко внимательно и благосклонно относился и к моим газетным статьям. Открыто высказывал мне критические замечания. Но непременно говорил: «Надо рассказывать о выдающихся «истоковцах», ученых, инженерах, рабочих. То, что было сделано ими, будет удивлять не одно поколение. В их самоотверженной работе была истинная сила народа. Каждый из них достоин пусть не каменного, но хотя бы словесного памятника».

1(544).indd 97 18.03.2020 10:56:52

ИВАН ИВАНОВИЧ БРОДУЛЕНКО

И. И. Бродуленко

Иван Иванович Бродуленко – почетный гражданин Фрязино, ветеран Великой Отечественной войны, лауреат Ленинской премии, кандидат технических наук.

Напомним эпизод полувековой давности. В приемной Главы города ждал очереди И. И. Бродуленко. Хорошо зная скромность Ивана Ивановича, все понимали, что ученый, лауреат Ленинской премии, один из руководителей Совета ветеранов войны и труда на прием к Главе города вряд ли пришел с личной просьбой, хотя в свое время Глава города В. П. Савченко и начинал свою трудовую деятельность в НПК-17 «Истока», начальником которого был И. И. Бродуленко. Скорее всего, привела его сюда чья-то просьба.

«Дело в том, – рассказал позднее Иван Иванович, – что в Совет ветеранов обратилась сестра Героя Советского Союза А. Г. Дудкина с просьбой помочь изыскать место на Фрязинском кладбище для перезахоронения брата, могила которого в настоящее время находится в ближнем зарубежье. Мне же эта просьба дорога еще и тем, что волей судьбы я оказался как-бы первооткрывателем имени славного фрязинца. В канун празднования 27-й годовщины Дня Победы мой заместитель по НПК-17 М. Ф. Филькин сообщил, что у проживающей в нашем городе Т. Г. Дудкиной имеются документы о присвоении звания Героя Советского Союза ее брату. Мы встретились с Тамарой Григорьевной, поговорили. На следующий же день я пошел в партком предприятия и предложил увековечить память героя-фрязинца. Поддержка была получена сразу и на всех уровнях власти. Примерно в это же время начались работы по увековечению памяти Героя Советского Союза И. И. Иванова».

Надо отдать должное Ивану Ивановичу. Ни одна памятная дата войны не проходила мимо его внимания, ни один фронтовик не оставался незамеченным. Отзывчивое, внимательное отношение И. И. Бродуленко к людям со всей полнотой проявлялось в канун празднования Дня Победы. На протяжении нескольких месяцев в каждом номере многотиражки предприятия «За передовую науку» появлялись его публикации о дорогих всем нам ветеранах Великой Отечественной войны.

Работа Фрязинского Совета ветеранов заинтересовала зарубежных коллег. Иван Иванович рассказывал: «В МГУ из Кембриджского университета приехал Джон Пиккер, занимающийся изучением деятельности Советов ветеранов войны в разных странах. Он подружился с внуком сотрудника нашего предприятия, ветерана Великой Отечественной войны А. А. Учителя и посетил наш город. Арнольд Абрамович вместе со своей дочерью-переводчицей познакомили его со мной. Во время знакомства англичанин, протягивая мне руку, назвался Джоном, а я, на английский манер, назвался Джон Джонычем, так как Джон и Иван – синонимы на разных языках. С шутки, развеселившей присутствующих, и началось наше общение. На память Джон подарил мне красочный альбом с интересной информацией о том, чем занимается общество ветеранов войны в Англии».

1(544).indd 98 18.03.2020 10:56:53

Несмотря на почтенный возраст, И. И. Бродуленко стремился всегда быть в строю. Передав бразды правления НПК-17 новому начальнику, А. Г. Михальченкову, он, по многолетней привычке, приходил на работу в свой коллектив в 7 часов утра, а уходит вместе со всеми. Помогал молодым специалистам найти свое место в науке. Его аспиранты А. И. Абраменков и Д. А. Ковтунов успешно защитили кандидатские диссертации. Да и сам Иван Иванович практически до конца своей жизни продолжал активную творческую деятельность. Совместно с коллегами готовил обзоры работ для издания в журнале «СВЧ-техника», работ, описывающих результаты деятельности родного НПК-17, которому отдал все свои лучшие годы жизни. А вот как начинался его путь к знаниям.

«Я родился 10 мая 1924 г. на Кубани, в богатом казачьем крае, в семье потомственных крестьян, – рассказывал Иван Иванович. – Уже во времена перестройки Кубанское казачество выдало мне удостоверение почетного подъесаула, подтверждающее мою принадлежность к могучему народу. Детство, особенно в 1932–1933 годах, было трудное. Даже в этом благодатном крае свирепствовал голод. Люди пухли от голода, многие умирали. Почти всех, и меня в том числе, одолевала малярия. Затем жизнь понемногу начала улучшаться. В памяти навсегда остались широкие и просторные степи, необозримый золотой ковер пшеницы, желтая бурная река Кубань, а рядом тихая речушка Зеленчук, в которой руками можно было ловить раков. На ее берегах мы пропадали день и ночь. Хорошо помню отдых в пионерских лагерях, в степи. Жили в землянках, питались скромно. Но кто это замечал. Допоздна в степной тиши звучали наши песни под гитару...

Постоянных школ вблизи моего места жительства тогда еще не было, поэтому часто приходилось менять школы. От дома они находились на расстоянии от 5 до 25 км, и их приходилось преодолевать пешком при любых погодных условиях. Десятилетку со сверстниками закончить не удалось – в 1941 году ушел рыть противотанковые окопы».

С окоп начался труднейший период в жизни кубанского юноши. В том же 41-м он был зачислен в Ростовское артиллерийское училище, которое закончил 18-летним лейтенантом. О своем боевом пути на фронтах Великой Отечественной войны И. И. Бродуленко рассказывает сдержанно. Сражался на Калининском, 1-м и 2-м Прибалтийских фронтах. Дважды был ранен и несколько раз контужен. День Победы встретил в госпитале на Урале. После излечения был уволен в запас по инвалидности. Имеет 16 боевых и трудовых наград, в том числе ордена Красной Звезды, Отечественной войны I и II степени и Трудового Красного Знамени. Вот так всего лишь в несколько строк укладывается сейчас биография фронтовика.

Иван Иванович принадлежал к тому поколению, которое росло и воспитывалось в тяжелых условиях довоенного времени и закалялось на полях сражений за Родину. Военные годы – суровое и беспощадное время испытания человека на прочность, выносливость и способность противостоять сильному и коварному врагу и собственной смерти, которая в годы войны преследовала ежеминутно. Без мужества, стойкости, деловитости и конкретности целеустремленных действий в бою, без железной дисциплины и инициативы, без круглосуточной боевой готовности невозможно было победить...

Истосковавшись на фронте по покою, решил И. И. Бродуленко приобрести спокойную и тихую профессию лесника и поступил в Майкопский лесомеханический техникум. А параллельно продолжил учебу в 10-м классе школы рабочей молодежи. Окунувшись в науку, неожиданно для себя ощутил неутолимую тягу к более глубокому изучению физики и математики. Да такую, что, закончив школу с золотой медалью, прервал учебу в техникуме и поехал поступать в Ростовский

1(544).indd 99 18.03.2020 10:56:53

государственный университет. Принят в университет был без разговоров – помогли боевые награды и отличная учеба в школе. После 4-го курса его, как одного из лучших студентов, перевели в МГУ. Здесь он познакомился со сравнительно новым научным направлением электроники – электровакуумными приборами сверхвысоких частот (СВЧ). Распределившись во Фрязино, Иван Иванович с большим интересом продолжил исследования в этой области и активно приступил к разработке электронных изделий малой мощности. Большое влияние на становление молодого специалиста оказали признанные во всем мире ученые Н. Д. Девятков и В. Ф. Коваленко, а также его ровесники: Л. А. Парышкуро, М. Б. Голант, Е. С. Евтифеева. Упорство, огромное трудолюбие и природные качества исследователя позволили ему за короткое время пройти путь от инженера до уважаемого в научной среде ученого. Уже через четыре года И. И. Бродуленко назначают начальником лаборатории, а еще через три – начальником крупнейшего на предприятии отдела 170, ныне НПК-17. В эти же годы он успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Слева направо: М. Б. Голант, В. С. Савельев, Л. А. Парышкуро и И. И. Бродуленко

«Руководить большим коллективом разрабатывающего подразделения непросто, – делился своими размышлениями Иван Иванович, – но трудность и ответственность в какой-то мере скрашивались тем, что рядом я ощущал всемерную поддержку большого числа поистине выдающихся специалистов, ученых и руководителей, которые никогда не подводили, какие бы сложные задачи перед ними не ставились. Это, прежде всего, Герой Социалистического Труда Л. А. Парышкуро и лауреат Ленинской и Государственной премий, профессор М. Б. Голант. Люди они неординарные, каждый из них имел свой подход к разработке СВЧ-приборов и каждый по праву мог бы быть на моем месте. Не скрою, была между ними творческая конкуренция, и мне предстояло направлять эту конкуренцию в нужном для общего дела направлении. Интересно было работать и с другими разработчиками: А. М. Алексеенко, А. А. Негиревым, З. Ф. Каплуном, И. П. Чепкасовой, В. М. Доличем, В. С. Савельевым, В. Н. Русаковым, В. Н. Лебедевым, А. И. Иткиным. Огромный объем работ выполняли мои заместители М. Ф. Филькин и А. А. Зиновьев. Все они любили свою работу, трудились, скорее, не ради денег, а из интереса к познанию, к науч-

1(544).indd 100 18.03.2020 10:56:54

ному поиску. На их долю пришелся многотрудный, но и интересный период, связанный с зарождением и развитием электроники СВЧ. Работали, забывая об отдыхе, потому что было интересно, потому что знали – Родине нужны их приборы. С такой же самоотдачей трудились техники, монтажники, слесари, токари, фрезеровщики, радисты, экономисты. Отделение постоянно пополнялось талантливой молодежью. А. И. Абраменков, А. И. Афанасьев, А. П. Гусев, Д. А. Ковтунов, В. А. Мальцев, В. Ю. Мякиньков, В. П. Савченко, А. М. Сергиенко, А. С. Федоров, А. П. Чугуй – вот далеко не полный перечень молодых специалистов, ставших впоследствии руководителями научных направлений, начальниками лабораторий и отделов».

За 25 лет из руководимого И. И. Бродуленко подразделения вышло более 100 типов электронных приборов, и почти все они были внедрены на заводах отрасли при активном участии И. М. Панаса, Н. И. Прохорова, В. И. Чибисова, начальников и технологов завода «Рений» и ряда специалистов отрасли на многих предприятиях страны. Коллектив специалистов, руководимый И. И. Бродуленко, один из первых в СССР разработал оригинальные ИЭТ СВЧ, используемые более 40 лет в ракетно-зенитных радиотехнических комплексах, которые еще в 1960 г. обнаружили и сбили над нашей территорией пилотируемый самолет США. И. И. Бродуленко – автор более 150-ти научно-технических трудов и 30-ти авторских свидетельств на изобретения. Он руководил отечественной программой по твердотельным СВЧ-генераторам, положившей начало нового этапа миниатюризации.

И. И. Бродуленко скончался 1 июля 2005 г. Для нас он был ученым, глубоко преданным отечественной науке, руководителем, искренне уважающим своих сотрудников и результаты их труда, ветераном, служившим примером для молодого поколения, человеком, чья душевная теплота и отзывчивость придавала нам уверенность в своих силах. Его ученики Д. А. Ковтунов и В. Ю. Мякиньков с участием заместителя Главы города А. А. Курова установили памятник на могиле прославленного ветерана войны и труда.

Как-то на заре реформ И. И. Бродуленко высказал пожелание молодым специалистам: «Не поддаваться соблазну дешевой наживы в ущерб научно-техническому росту и престижу, не ронять человеческое достоинство». Этим же принципам он остался верен до конца своей жизни.

МИХАИЛ БОРИСОВИЧ ГОЛАНТ

В советское время Ленинская премия дважды одному человеку не присваивалась, каким бы он выдающимся не был. В современной России Ленинская премия была заменена на Государственную премию Российской Федерации с сохранением всех почестей и привилегий. Академик Николай Дмитриевич Девятков и профессор Михаил Борисович Голант – единственные ученые «Истока», награжденные и Ленинской премией, и Государственной премией Российской Федерации.

М. Б. Голант родился 3 февраля 1923 года в Москве в семье служащих. Отец – известный химик-пищевик, мать – врач. Несмотря на трудные годы, родители делали все возможное, чтобы сыновья получили высшее образование. Об уникальности семьи Голантов говорит тот факт, что все дети: родной брат Михаила Борисовича, его двоюродные братья и сестра, как и он сам, стали докторами наук.

В 1940-м году М. Б. Голант поступил в Московский энергетический институт (МЭИ). Но учиться пришлось недолго. Уже 22 июня 1941 года его, восемнадцатилетнего студента, Московский горвоенкомат призвал в армию. Михаил Борисович защищал Родину от начала Великой Отечественной войны до ее победного окончания. Его боевой путь проходил через

1(544).indd 101 18.03.2020 10:56:54

М. Б. Голант

Волхов, Ленинград, Ригу, Мудацзян, Пхеньян. Судьба выбрала ему непростую военную профессию сапера, где, помимо бесстрашия, необходимо было иметь светлую голову и изобретательность. Но полностью избежать опасности все же не удалось. М. Б. Голант три раза был ранен, но вновь возвращался в строй. Начинал войну он красноармейцем, а закончил старшим техником – лейтенантом.

Михаил Борисович был истинным патриотом Родины, и государство по достоинству отметило его ратные заслуги. Он был награжден двумя орденами Красной Звезды, медалями «За оборону Ленинграда», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За победу над Японией».

В апреле 1946 года Михаил Борисович был демобилизован из армии и продолжил учебу в родном институте – МЭИ, который закончил в 1951 году с красным дипломом. Уже в институте у М. Б. Голанта проявилась тяга к научному поиску. Среди студентов он отличался тем, что всегда старался найти оригинальное решение математических и физических задач. По распределению его должны были направить на работу в Новосибирск. Однако его учитель и научный руководитель дипломной работы профессор МЭИ Н. Д. Девятков, по достоинству оценив талант молодого человека и его склонность к исследовательской работе, настоял на переводе его во Фрязино, где в те годы решались важнейшие проблемы электронной техники.

Выдающееся качество исследователя – идти своим путем – Михаил Борисович пронес через все годы жизни. Особенно остро это качество исследователя проявилось у него в НПК-17 на «Истоке», куда он был распределен после окончания МЭИ. Ему было по силам решать как глубокие теоретические задачи, так и разрабатывать уникальные приборы. И всегда он старался найти свой оригинальный путь решения проблем, всеми силами противился копированию чужого, тем более иностранного. Как правило, на этом пути встречались большие трудности, и, чтобы доказать свою правоту, ему приходилось преодолевать их с фанатичной настойчивостью и упорством.

Успешно защитив кандидатскую диссертацию, Михаил Борисович возглавил одно из важнейших научно-технических направлений по созданию СВЧ-генераторов с широкой электрической перестройкой частоты, без которых немыслимо создание помехозащищенных радиолокационных станций, систем связи, станций радиоразведки и радиопротиводействия, радиовысотомеров, радиоизмерительной аппаратуры.

Из теоретических вопросов начального периода работы М. Б. Голанта на предприятии отметим исследования, связанные с механизмами группировки электронов в одно- и многолучевых электронно-волновых лампах; новые результаты по описанию механизма работы параметрических усилителей СВЧ, использующих потоки свободных электронов; разработку методов снижения шумов, основанных на «противофазной компенсации» и другие. Под руководством Михаил Борисовича создан целый ряд оригинальных приборов с улучшенными характеристиками. Он по праву считается родоначальником целых направлений в СВЧ-электронике. Уже к середине 50-х годов М. Б. Голантом был разработан уникальный прибор –

1(544).indd 102 18.03.2020 10:56:55

отражательный клистрон с широким диапазоном электронной настройки (до 10 %), что привело к поистине революционному повороту в производстве этих приборов.

В эти же годы вокруг начальника лаборатории, а позднее и крупного отдела в НПК-17 М. Б. Голанта концентрируется группа ученых, которая начинает осваивать миллиметровый диапазон длин волн. Усилиями этой группы на «Истоке» разрабатываются теория, методика конструирования, измерительная техника – возводится мощная база для создания первых в мире образцов ламп обратной волны (ЛОВ) миллиметрового диапазона. Результаты этих работ были обобщены М. Б. Голантом в его докторской диссертации в 1961 году. Кропотливо, шаг за шагом шло продвижение вверх по диапазону, так что к середине 70-х годов были впервые в мире разработаны ЛОВ, перекрывающие миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны (от 40 до 1500 ГГц). Эти работы до настоящего времени продолжают оставаться актуальными из многочисленных публикаций М. Б. Голанта и позволяют до сих пор сохранять за «Истоком» лидирующее положение в мире в области производства ЛОВ субмиллиметрового диапазона длин волн. Большой вклад Михаил Борисович внес также и в создание высокоэмиссионных катодно-подогревательных узлов с плотностью тока до сотен ампер на квадратный сантиметр, методов химической очистки миниатюрных замедляющих систем, а также в решение ряда других проблем. Работая над совершенствованием ЛОВ, М. Б. Голант с сотрудниками (Б. Ставицким и Ю. Шевелевым) предложили новый способ электроискровой обработки металлов и сплавов непрофилированным электродом (движущейся проволокой), который позволял с необходимой (микронной) точностью осуществить нарезку многоканальной замедляющей системы. Этот способ вырос позднее в целое направление обработки металлов.

В 60-е годы, когда началось бурное развитие твердотельных приборов, доктор технических наук М. Б. Голант, отстаивая преимущества электровакуумных приборов, связанные, прежде всего, с надежной их работой в условиях повышенной радиации, начинает цикл работ по миниатюризации ЭВП СВЧ. Итогом многолетних теоретических и экспериментальных исследований явилось создание десятка типов оригинальных приборов, не имеющих аналогов в мировой практике, в том числе миниатюрных и сверхминиатюрных клистронов, получивших название «минитронов», с массой от единиц и даже долей граммов и низкими (в несколько десятков вольт) питающими напряжениями. Доложенные на международных конференциях по вакуумной микроэлектронике в 1989 и 1990 гг. результаты работ по миниатюризации ЭВП СВЧ, выполненных в нашей стране, получили высокую оценку ведущих зарубежных специалистов, отметивших значительное (порядка 10 лет) отставание США в этой области электроники.

С 1965 года, используя «голантовские» миллиметровые ЛОВ с широкой перестройкой частоты, на нашем предприятии, в других институтах и в клиниках страны начинаются исследования воздействия малоинтенсивных электромагнитных колебаний на живые биологические объекты. Зародилось новое научное направление, одним из основоположников которого стал Михаил Борисович Голант. Под его руководством были разработаны терапевтические аппараты типа «Явь» на основе твердотельных генераторов миллиметрового диапазона. Развитию этого направления М. Б. Голант посвятил последние десятилетия своей жизни. Его публикации в медицинских журналах помогали медикам разобраться в сути процессов, происходящих в организме человека под воздействием КВЧ-излучения. Совместно с рядом медицинских организаций было показано, что воздействие модулированных по частоте малоинтенсивных мм-волн на человека при различных заболеваниях (таких, как язва желудка и 12-перстной кишки, трофические язвы, травмы мягких и костных тканей, ишемическая болезнь сердца и

1(544).indd 103 18.03.2020 10:56:55

ряде других) приводит к ускорению излечения. Проводились исследования воздействия СВЧ-излучения с зерновыми культурами, животными, кровью человека для диагностики заболеваний, проводились исследования по замерам излучения человеческого организма в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн и многие другие.

Кроме того, в отделе М. Б. Голанта проводились исследования сверхпроводимости материалов (с охлаждением до температуры жидкого гелия) и получена добротность резонатора из ниобия $3{,}3\times10^9$. Созданы образцы вакуумных и твердотельных генераторов со сверхнизкими шумами (порядка минус 140 дБ/Гц на 1 кГц от несущей 10 ГГц) на основе резонаторов типа «шепчущей галереи» из лейкосапфира, выращенного и изготовленного на «Истоке», с добротностью около 4-х миллионов. Проводились исследования по созданию принципиально новых, с высочайшим быстродействием компьютеров на основе сверхминиатюрных ЛОВ на «острийных» катодах и многие другие.

Он, в буквальном смысле слова, жил этими идеями, не переставая думать о них даже во время отдыха. Эта работа была высоко оценена Правительством России. Незадолго до смерти ему была присуждена Государственная премия Российской Федерации.

М. Б. Голант

В течение многолетней научной деятельности М. Б. Голант концентрировал вокруг себя талантливых специалистов, внесших большой вклад в развитие отечественной электровакуумной техники. Это кандидаты технических наук, лауреаты Государственной премии А. А. Негирев и В. С. Савельев, лауреат Государственной премии Российской Федерации Ю. В. Дедик, кандидаты технических наук А. М. Алексеенко, В. А. Парилов, З. Ф. Каплун, В. М. Долич, А. П. Кузнецов, А. С. Федоров, В. Ю. Мякиньков, ведущие разработчики и технологи В. И. Рогов, З. М. Алексеенко, Р. Виленская, Т. Б. Реброва, Е. Зюлина, З. Короткова, Н. Ермакова и многие другие. Велик вклад М. Б. Голанта в воспитание научных кадров. Более двух десятилетий под его руководством работал научный семинар, на котором обсуждались важнейшие проблемы развития СВЧ-электроники, конкретные конструкции создаваемых приборов, возможности их практического применения. Атмосфера поиска истины, жаркие научные споры, обмен идеями и опытом между молодыми и маститыми специалистами – в таком режиме проходило большинство заседаний семинаров.

Михаил Борисович был выдающимся ученым. Но это не мешало ему в быту оставаться простым в общении и безотказным человеком. Он безропотно оказывал помощь любому сотруднику, всегда находил время на обучение тонкостям обращения с СВЧ-приборами молодых специалистов, техников, рабочих. Много лет М. Б. Голант преподавал во втузе. С глубоким почтением отзываются о нем его бывшие воспитанники и ученики. Он искренне уважал молодых людей, посвятивших себя науке. Он был научным руководителем диссертационных работ почти у 50-ти соискателей.

Михаил Борисович с любовью относился к супруге Людмиле Евгеньевне, много лет проработавшей ведущим инженером в НПК-2, своим детям, внукам и правнукам. Выдающийся ученый

1(544).indd 104 18.03.2020 10:56:55

не знал, что такое покой и отдых. Уходя в отпуск, он забирал домой стопки книг, продолжал совершенствовать свои знания, размышлять о новых приборах и явлениях, писать статьи и монографии.

М. Б. Голант скончался 7 февраля 2001 года на 79-м году жизни. Он «сгорел» в работе, до конца отдав служению науке и технике все свои физические, духовные и моральные силы. В нашей памяти всегда будет храниться облик фронтовика и ученого, стремившегося познать природу и человека, – Михаила Борисовича Голанта.

ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА ТАГЕР

Страна отметила очередную годовщину со дня снятия блокады Ленинграда. Этот эпохальный поворот в Великой Отечественной войне – праздник не только для жителей Петербурга. Сотни тысяч ленинградцев, переживших блокаду, разъехались по всей нашей необъятной родине. Фрязинское предприятие «Исток» с первого дня своего существования несколько раз пополнялось сотрудниками «Светланы» и других ленинградских предприятий, поэтому многие ленинградцы, пережившие блокаду, жили и, слава богу, некоторые продолжают жить во Фрязине.

Т. Н. Тагер

15 лет назад нам позвонила Т. Н. Тагер. Во Фрязино она приехала из Ленинграда. Пережила блокаду, окончила Ленинградский политехнический институт. Много лет она вместе с супругом – известным ученым, доктором технических наук, профессором, лауреатом Ленинской премии Александром Семеновичем Тагером проработала на «Истоке». С успехом защитила кандидатскую диссертацию и по праву считалась одной из лучших среди разработчиков электронных приборов.

«Я разбирала свои старые бумаги, – сказала Татьяна Николаевна, – и неожиданно нашла дневник, который я школьницей вела с начала войны (в те годы ее фамилия была Александрова. – *Т. Б.*). Мне казалось, что я его потеряла бесследно. Посмотрите, возможно, вам это будет интересно». Взять с собой домой дневники она не дала, но разрешила их прочитать и переписать все, что считаем интересным. На одном дыхании, не отрываясь, мы прочитали дневники ленинградской школьницы Тани, а один из авторов настоящей статьи, собиравший в то время материалы для книги о роли фрязинцев в военные годы, сделал выписки из дневника. К юбилею Дня Победы советского народа в Великой Отечественной войне в самиздате вышла книга Т. А. Балыко «Поколение войны», в которую были включены дневники Тани. Издать книгу помог бывший главный инженер фрязинского НПО «Электронприбор» лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор В. В. Симаков.

Татьяна Николаевна Тагер прожила 87 лет.

«Сейчас мне 16 лет, я еще девочка. Все, все впереди. А когда-нибудь я состарюсь, все пройдет – молодость, веселье, интерес к жизни, а впереди будет одна скучная, пустая старость, холодная, живущая одними воспоминаниям. Какой ужас! Я ни за что на свете не хочу жить дольше, чем до 50 лет.

…Зато сейчас жизнь интересна и полна. Сегодня мы дежурили в школе. Было очень весело. Играли в волейбол, в карты, грузили песок, а завтра будем таскать его наверх, на чердак, чтобы гасить зажигалки. Сегодня опять собираемся в кино.

1(544).indd 105 18.03.2020 10:56:55

…Нашу школу заняли под лазарет. Это было позавчера. Так быстро все произошло, вызвали ребят таскать парты. Мы все здорово потрудились.

…Дома я не сказала, что иду в кино – это мне было запрещено, после того как мы с Кирой и Люсей вернулись из кино в 11-м часу. Я сказала, что иду в райком. Приехали мы в «Аврору», а там идет не «Высокая награда», а «Праздник святого Иоргена». Мы подумали, подумали и купили билеты по 3 руб. Стояли, дожидались девочек. Вдруг тревога. Мы думаем, что если она долго будет, то опять домой опоздаем. Взяли и продали билеты. И очень хорошо сделали, тревога кончилась в 8 часов, выходим из «Авроры» и видим клубы дыма по всему небу, тут уж кто что скажет. Кто говорит – пожар, кто – дымовая завеса. Потом выяснилось, что пожар. Мы решили пойти посмотреть, где это горит. Нам показалось, что очень близко. Оказалось, что это на Обводном канале. Троллейбуса долго не было, и мы отправились пешком домой. Стало уже темно. И зарево было такое огромное и жуткое. У нас сразу опустилось настроение. Прихожу я домой, а дома все знают, что я была в кино, а не в военкомате и райкоме, как пыталась я соврать. Это Люся, не найдя нас в «Авроре», пришла ко мне и, не зная, что я соврала, все рассказала.

…Ура! Нас отправляют на 3 дня на картошку в Ораниенбаум. 7 человек. Леля, Люся, Зина, я, Колька, Шурка и Юрка. Девочки все очень рады, а мальчишки – не знаю, мы с ними еще не говорили.…Мальчишек отправили на окопы на 15 дней.

…Кончилось спокойное время, начались бомбежки. Сегодня тоже, наверное, будут.

…Мы все время мечтаем, чтобы не было войны. Дядя Леша пишет, что, когда его отправляли на фронт, он шел по тем улицам, где он гулял с сыном Славиком, и думал, повторится ли это. Я тоже вспоминаю школу и думаю, повторится ли это. И так хочется, чтобы повторилось. Вспоминаю то время с какой-то нежностью, не хочется думать, что этого не будет. Чтобы не было войны! Это постоянно в голове. Это самая дорогая, любимая мечта, которая, кажется, никогда не воплотится. Положение наше далеко не блестящее. Ленинград – фронт. За Нарвской заставой – у Кировского завода – баррикады. Несколько ночей были налеты и бомбежки Ленинграда. Вчера налет был даже днем, и очень сильный. Настроение падает. Почти голод. 200 грамм хлеба – это голодный паек. В столовых грандиозные очереди. За каждой мелочью – очередь. По карточкам всего дают такие количества, что это похоже на насмешку. На третью декаду сентября служащим дают 150 грамм мяса, 200 грамм крупы. А иждивенцам – 50 грамм мяса, а крупы и вовсе не дают. Керосину мало, дров нет, на электроэнергию наложили жесткий лимит. Пользоваться электронагревательными приборами строжайше запрещено. В общем, весело…

…Бабушка, как только начинают обстрелы, уходит вниз. А больше никто не уходит. Я нисколько не боюсь оставаться дома, вообще я не боюсь смерти. Я не хочу умереть, нет, я очень хочу жить. Мне всегда противно было, когда люди говорили: «Ой, хоть бы умереть». Я не хочу умирать, но смерти все же не боюсь и горжусь этим. Как-то мы все это переживем? Чем кончится? Вспоминает ли обо мне Шурик, помнит ли меня, любит? Мне так хочется чего-нибудь сладкого! Неужели будет настоящий голод?…

…3 месяца с начала войны. Киев взят. Скоро, вероятно, и Ленинград постигнет та же участь. Вчера, придя после ночного дежурства, я пошла в очередь и простояла все утро. Достала конфет и вермишель. Потом пришла домой, поела и улеглась спать. А ключа не было ни у бабушки, ни у мамы. Дома я была одна. И вот они у меня часа полтора звонили в дверь. Сегодня 23-е, дня через 2-3 придет с фронта Шурик. Неужели, когда он придет, мы опять будем так, будто между нами ничего не было, будто мы совсем чужие. Я часто вспоминаю тот вечер, после объяснения.

1(544).indd 106 18.03.2020 10:56:55

…Уже сентябрь кончается. Как быстро летит время! Летит, а ничего хорошего не происходит. И школу занимает госпиталь. Где мы теперь будем и будем ли вообще где-нибудь – неизвестно. Мне бы хотелось, чтобы нигде не были. Мы с девчонками поступили бы тогда в госпиталь. Хочу в госпиталь.

…Сегодня выходной день, а как глупо и бестолково он проходит. От выходного я всегда жду чего-нибудь хорошего, а от этого выходного особенно ждала. А он обманул все мои ожидания. Я даже не пойму, что мне больше всего хочется – сидеть дома или бежать, куда глаза глядят. Ни шить, ни штопать, ни обвязывать – ничего этого не хочется. Думаю, выстирать чулки и уйти поскорее, да вода все не греется. Сегодня погода хорошая, небо ясное, а тревога была всего одна. Мне почему-то скучно, одиноко и хочется плакать.

…Было воскресенье, выходной день. Мы ходили к Юрке в госпиталь. Он уже поправляется. Впуск с 4 до 6 часов. А мы опоздали и приехали в 5.30. У Юрки были отец с матерью, Вовка, да еще 2 девушки из интеллигенции. Мы свезли ему плитку шоколада – Люська достала. Мы с девчонками хотим сегодня за карточками сходить – может быть готовы, на счастье. Вчера Люська была у меня, играли в козла. От нового дня хочется новых событий. Давно не видела Шурика. И девчонки его не видят. Тоскливо.

…Бомбежки Ленинграда продолжаются. Но все уже настолько привыкли, что спят и не думают вставать. Я так вообще ничего не слышу. Раньше Васильевский немцы минировали, а теперь нет. В церковь напротив нашего дома ударила бомба, но, к счастью, не взорвалась. Огромная тоновая бомба. И вот она уже вторую неделю лежит, никак не вытащат, а говорят, может разорваться.

…Я дежурю в школе. Делать все равно нечего, так вот я и взяла дневник. Я за собой замечаю, что мне надо чем-нибудь жить, чего-нибудь ждать, например, фотокарточек, начала занятий в школе. Когда фотокарточки я получила, а на занятия в школе потеряла надежду, я сразу потеряла себя, загрустила, пока не выдумаю что-нибудь новое. Я как будто хочу от больших общих горестей спрятаться за своими маленькими радостными случаями, я выдумываю какую-нибудь мелочь, вроде кино и встречи с девочками, и жду этого. Если ждать вообще нечего – живу воспоминаниями. А воспоминаний много. Может быть, Шурик меня разлюбил, совсем забыл, но я рада хоть тому, что он раньше любил меня, что я ему нравилась.

…Уже третий день, как мы занимаемся. В классе 41 человек. Ничего себе классик! Здоровый. Больше всего ребят из 20-й школы. Потом из нашей. В 20-й школе нам всем очень не нравится ведущая группа девочек. Воображают. Мы все мечтаем, чтобы в нашем старом классе учиться. Вот хорошо было бы. Учителя все новые, строгие. У 19-го магазина разорвался снаряд, ранило учителя математики Сабинина.

…Да, сегодня 7 ноября! Но как этот день не похож на тот, что мы обычно представляли себе при словах «7 ноября». Нет ни демонстрации, ни обычного праздничного настроения. Веселая толпа, яркая, пестрая, с флагами и цветами не заполняет улицы. Прохожие спешат по улицам, на их лицах не то что праздничное, веселое и торжественное настроение, нет, лица суровы, угрюмы, даже озлобленны. Праздника нет. Этот день хуже, чем будни. Чувствуется что-то особенно тяжелое, давящее и грустное.

…Хлеба 150 грамм, есть скоро будет нечего. Хочу есть. Варю обед – хряпу и кашу. Крупы и макарон только на несколько дней. А что потом – представляю очень туманно.

…Голод. Да, голод. Настоящий. Последние дни и я это очень чувствую. До сих пор у нас хоть кое-что старое было, а сейчас все на исходе. Приходится жестоко экономить. Везде грандиозные

1(544).indd 107 18.03.2020 10:56:55

очереди; не выкупить даже тот мизерный паек, который дают по карточкам. Даже соевых бобов нет. Сегодня не пошла в школу – пошла в очередь. Встала в 6 утра, но все же ничего не достала. Ужас, что делается. Все злые, голодные. Что будет дальше? Не знаю. Но плохо. Неужели мы и паек не выкупим. А очень возможно. Ведь сегодня уже 25-е число. Сейчас тревога. Мы с мамой собрались в кино на «Маскарад», но, очевидно, не удастся. Сейчас уже 4-й час, а отбоя все нет. Придется, видимо, нам с мамой голодными сидеть, а паек пропадет. Если я все это переживу, то непременно напишу об этом воспоминания.

…Сегодня в двух местах могла достать крупы и не достала. Я просто заплакала по самому настоящему от злости и обиды. Завтра придется опять не идти в школу, а идти в очередь. Не хочется. Я обещала принести деньги за школу, их нет, может быть, меня даже исключат из списков. Ну и пусть, пусть, все равно голодной много не научишься.

…Продукты достала. Уже хожу в школу. Но теперь снова надо доставать, даже не знаю, что делать. Если опять пропускать школу, потом уже не догнать будет. А если не стоять – могут пропасть продукты. Мне кажется, вообще не будет того времени, когда могу наесться хлеба досыта. Кажется, что уже не пережить эту зиму. А она вся еще впереди. Голодная, холодная.

…Еще весь декабрь впереди, и январь, и февраль. Нет, не пережить. Сейчас мама уехала к родственникам, мне оставила свою долю хлеба. Я ее всю не съела, оставила на завтра, на утро, и вот весь день на одном супе из хряпа. Есть хочется, а жаль, надо оставить до завтра. Господи, хлеба бы досыта.

…Скоро новый год. Как-то это не радует. Только хочется, чтобы поскорее это все кончилось. Такая жизнь, что хуже быть не может. Голодно, холодно, темно, трамваи не ходят, а как грустно, тоскливо, пишу и ничего от слез не вижу. Люди пухнут от голода, мерзнут, мрут, как мухи. Но говорят, недели через две, самое большее через три блокаду прорвут. Хорошо бы, а то больше и не выдержать. Наш класс разделили, нас всех перевели в 7-ю школу, а в 7-й еще холоднее, чем у нас было. Все такие слабые, вялые, даже наши девочки, которые были самыми веселыми и шумными, стали тоже скучными и вялыми. Я теперь часто вспоминаю школу и наши домашние дела, как иногда собиралась наши большая родня вечерами, так хорошо было. Все это представляется в каком-то новом, замечательном свете. Вспоминаю и плачу.

…Хлеба прибавили – 200 грамм. Завтра Новый год. Как много мы от него ждем. Мне не хочется описывать все, что происходит каждый день, кажется, так впишется в память, что его колом оттуда не вышибить (если живы останемся).

…Сейчас вечер. Сегодня мы изрядно поработали, пилили и таскали дрова, все перетащили, их осталось не так уж и много. Скоро и это кончится. Что творится, ужас просто. Люди на ходу падают. Сегодня у нас в прачечной нашли мертвого человека. Лежит, и не хоронят. А я достала круглого хлеба. Такой же, как и в мирное время. До чего вкусный. И со сливочным маслом. Мечта! 3 января у нас должна быть елка. В Малом оперном театре. Спектакль «Машенька», обед, игры и танцы под джаз. Но елку перенесли на 7-е, так как не было топлива. Все желания и помыслы крутятся вокруг еды. До сих пор у меня в глазах стояла пшеничная каша с маслом. Что называется, во сне и наяву. А сейчас мечтаю о блинах со сметаной и вареньем. Это ли не идеал жизни? Сейчас мне кажется, что это и есть идеал. А сегодня у нас каша из кофейной гущи с «мукой» по 1 руб. 80 коп. за килограмм, она вкусная, но похожа на все, кроме муки. Я наелась, но прошел час, и я опять есть хочу. Дядя Леша ранен. Прислал письмо из госпиталя-

1(544).indd 108 18.03.2020 10:56:55

распределителя. Я ходила туда, это в Александро-Невской Лавре, а мороз 29 градусов, но ничего не узнала. Послезавтра опять надо идти. Мне хочется все запомнить из этого времени, каждую минуту, а сейчас только мечтаешь о будущем. Это хорошо, это единственная отрада. Потом, может быть, будем вспоминать это время и ужасаться. Ну, ничего, только бы скорее, скорее. Вся надежда на генералов Мерецкова и Федюнского.

…Дни проходят очень однообразно. Один за одним, как заведенная машина. Встаю часов в пять, в шесть, иду в очередь за хлебом. С хлебом временные затруднения из-за воды и транспорта. Затем иду в школу или выкупать другие продукты, после школы – за водой на Неву да за дровами, потом пилить дрова с бабушкой, часов в пять приходит мама, затапливаем печку, вечером что-нибудь читаю или принимаюсь за починку, так как все износилось, ничего не стираем, так как жалко воды, даже не моемся, баки не работают. Совершаем скупые утренние омовения. В воскресенье навещаем дядю Лешу в госпитале, носим ему кое-что. Мама приходит с работы иногда совсем замороженная, ее приходится отогревать утюгами, печкой, горячим чаем, вином. А утром мы поджариваем в печке хлеб на олифе и касторке, так вкусно, просто мечта. А сегодня не жарили, так как я получила пшеничный хлеб, замечательный, со сливочным маслом, нам его дали по 50 грамм.

…Иногда понемногу я все же думаю о Шурике и мечтаю о встрече с ним. Никого из ребят я давно не видела, только Юрка заходил ко мне, еще помог дров наколоть.

…Морская спецшкола эвакуировалась, а вместе с ней Юра и Вася. Все разбросались, растерялись, забыли друг друга. Я-то не забыла никого и ничего. Все, все помню, только от этих воспоминаний плакать хочется. Как мы замечательно жили, и все разрушилось. У нас наверху умер Борис, молодой парень. Хороший такой. Да, неужели Шурик умрет. Как бы мне хотелось увидеть его. Да нет, видно пока не придется. Но воспоминания о нем будут лучшими в моей юности».

Слева направо: А. А. Малинин, Т. Н. Тагер, А. С. Тагер

1(544).indd 109 18.03.2020 10:56:55

ВИКТОР СТЕПАНОВИЧ МОРОЗОВ

В. С. Морозов

В жизни не раз приходилось читать и слышать о людях, которые, в силу каких-то жизненных обстоятельств, становились инвалидам, но находили в себе силы продолжать полнокровно жить и трудиться. Во все времена это по праву считалось человеческим подвигом…

Виктор Степанович Морозов родился в Сталинграде. Тяжелые испытания легли на плечи мальчика. В 1942 году он с матерью и братом попал в плен к фашистам. Пленных погрузили на открытую железнодорожную платформу и повезли в Германию. В дороге их застала зима. Брат простудился, заболел и умер. Маленький Витя выжил, но сильно обморозил руки и ноги. К счастью, до Германии их не довезли. Эшелон с пленными отбили партизаны. Витя с матерью возвратились в освобожденный Сталинград. Однако радоваться пришлось недолго. Разорвавшийся снаряд навсегда отнял у мальчика зрение. Убитая горем мать всеми силами пыталась вернуть сыну возможность видеть. Возила его в Одессу к профессору Филатову, но даже такой светила-офтальмолог оказался не в силах помочь мальчику. После войны с огромным трудом ей удалось устроить Витю в Саратовскую школу-интернат для незрячих детей. С первых же дней учебы, к радости матери, у сына проявились незаурядные способности ко многим дисциплинам. Он закончил школу-интернат с золотой медалью. Имел первый разряд по шахматам. Самостоятельно научился играть на фортепиано, аккордеоне и кларнете. Пытливый ум юноши приводил в восторг учителей.

А в 1956 году В. Морозов уже поступил на механико-математический факультет Саратовского государственного университета. Учеба в университете давалась ему легко, и юноша в знаниях не отличался, а часто и превосходил своих сокурсников. Особенно привлекала его одна из сложнейших ветвей математики – теория чисел. Именно ей и была посвящена его дипломная работа «Аналитические элементы в полных неархимедовых нормированных полях». В 1961 году, за год до окончания университета, Виктор женился на своей однокурснице Вере. В этой трудолюбивой, умной и благородной женщине он нашел заботливую супругу и помощницу, пройдя с ней многолетний жизненный путь. Во Фрязино супруги Морозовы попали, можно сказать, по воле случая. В университет за талантливыми специалистами приехали молодые сотрудники теоретического отдела Р. А. Силин и А. Н. Захарова. И хотя с Морозовыми они не встретились, отзывы пришлись по душе представителям «Истока».

Первые свои задачи молодые математики получали от теоретиков. В основном они касались создания простеньких программ для расчета устройств на ЭВМ типа «Урал-1» и «Урал-2». В. С. Морозову такая роль не всегда нравилась. Хотелось творить, искать более полноценное применение своих знаний. И такая область была найдена.

Познакомившись ближе с основными направлениями работы предприятия, с проблемами производства изделий электронной техники, а главное, со специалистами, занимающимися этими проблемами: Ф. М. Шапиро, В. В. Лиссом, В. И. Бацевым и другими, он открыл для себя

1(544).indd 110 18.03.2020 10:56:56

целый комплекс задач, требующих для своего решения методов статистического анализа. Ему удалось обобщить, на первый взгляд, разрозненные проблемы и применить для исследования мощные методы классификации объектов. Вместе с супругой им был создан комплекс программ для выделения информативных признаков объектов, кодирования статистической информации и построения оптимальных координатных систем для решения задач классификации. Ему приходилось запоминать все свои программы наизусть. Память его приводила окружающих в изумление. Неоценимую помощь в становлении молодого специалиста сыграл выдающийся ученый, прекрасный педагог и человек, профессор В. С. Лукошков. Он стал научным руководителем В. С. Морозова во время учебы в аспирантуре. Сама учеба потребовала немало сил как у аспиранта, так и у его супруги. Вера Алексеевна начитывала на магнитофон задания по немецкому языку, философии, а Виктор Степанович затем прослушивал записи и запоминал текст. Труд и упорство не прошли даром. В 1975 году он успешно защитил кандидатскую диссертацию. Методы классификации объектов использовались им для диагностики злокачественных новообразований пищевода и желудка – в Институте гастроэнтерологии. В. С. Морозов является соавтором изобретения нового способа диагностики заболеваний пищевода. В свое время он тесно сотрудничал с профессором Раппопортом, впоследствии лечащим врачом Б. Н. Ельцина. В Институте психиатрии им. Сербского он применил методы для определения сроков реабилитации психически больных людей. Его работы были опубликованы в журналах «Клиническая медицина», «Химико-фармацевтический журнал» и других. Им были проведены исследования оптимального процесса получения аспирина, пригодного для использования в жарких странах Африки.

В эти годы Виктор Степанович с супругой Верой Алексеевной были буквально поглощены медицинской тематикой. Атмосфера глубокого духовного отношения к жизни и здоровью людей несомненно повлияла на выбор профессии их дочери Натальи. После окончания с золотой медалью школы она поступила в 1-й Медицинский институт им. И. Сеченова и закончила его с красным дипломом. Наталья Викторовна работает главным аллергологом Московской области, заведует кабинетом в консультативной поликлинике при МОНИКах.

Помимо медицинской тематики, супруги Морозовы интенсивно работали над исследованием информативности параметров приборов, изготавливаемых на опытном заводе, и программированием надежности и долговечности изделий электронной техники. Особенно впечатляющими были результаты по выявлению и устранению отказов лавинно-пролетных диодов, полученные ими совместно с Ф. Шапиро и В. В. Сапрынским. В. С. Морозов несколько лет работал в лаборатории А. Н. Королева. Здесь в подлинно творческой атмосфере им с С. Михайловой были созданы оригинальные программы по вычислению параметров распределения вероятностей. Просматривая список научных трудов Виктора Степановича, не перестаешь удивляться огромному трудолюбию и широте интересов ученого. Он регулярно посещал в Москве семинары по методам планирования эксперимента и постоянно стремился внедрить эти методы в разработку изделий электронной техники. Совместно с А. В. Белицким и другими сотрудниками он исследовал и провел оптимизацию процесса спекания новых ферритовых материалов. Только по одному этому направлению им было опубликовано 5 статей и написано столько же отчетов. Разработчикам хорошо известны программы расчета волноводных электродинамических узлов приборов и программы для отображения с помощью графики топологической структуры многополосковых линий передачи, соавтором которых является

1(544).indd 111 18.03.2020 10:56:56

В. С. Морозов. Непостижимо, как может человек, утративший в детстве зрение, детально разбираться в сложнейшем графическом отображении предмета.

Работая в теоретическом отделении, Виктору Степановичу пришлось глубоко изучить возможности графопостроителей различных типов. Эти знания позволили ему в период начала реформ, когда остро стояла проблема финансирования, предложить совместить имеющийся в отделении графопостроитель, лазер, разработанный в НПК-3, и персональный компьютер. На таком устройстве было предложено проводить раскрой различных материалов. Каждое новое изделие, созданное на этих установках, приносило Виктору Степановичу радость. Ему, лишенному возможности видеть, доставляло удовольствие слышать отзывы о красоте изделий от других людей.

В. С. Морозов во втором ряду второй слева,
А. Н. Королев и С. А. Зайцев в третьем ряду посередине

В течение последних лет им были предложены и защищены патентами способ очистки текстильных материалов; способ изготовления ГИС СВЧ на подложке из нитрида алюминия; способ извлечения ртути из ртутных ламп; корпус для мощного транзистора.

Его любимым занятием во внерабочее время была работа на приусадебном участке, где он знал каждую грядку, помнил, где и что посажено. Любил плотничать и слесарить. Но еще больше любил помогать другим. И здесь, как и в научной работе, со всей силой проявилась самая главная черта В. С. Морозова – стремление помочь людям всеми доступными способами. От того у него так много было друзей.

В 2007 г. Виктору Степановичу Морозову в числе других было присвоено звание «Ветеран – участник Великой Отечественной войны».

Виктор Степанович умер 12 сентября 2017 года, прожив более 80 лет.

Биография В. С. Морозова описана в книге Т. А. Балько «Поколение войны».

1(544).indd 112 18.03.2020 10:56:57

Ветераны Великой Отечественной войны «Истока», 70-е годы

1(544).indd 113 18.03.2020 10:56:58

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

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

2. Статья должна содержать:

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

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

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

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

Сложные формулы набираются только в «Редакторе формул» Word. Непосредственно в 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.

1(544).indd 114 18.03.2020 10:56:58

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2020 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 5050108496, КПП 774550001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, 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.

З А К А З

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2020 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 16.3.2020 г.	Усл. п. л. 14,0	Формат $60\times88^{1/8}$
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Уч.-изд. л. 14,5	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	11 статей

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

1(544).indd 115 18.03.2020 10:56:58

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2020, вып. 1(544), с. 114

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

1(544).indd 116 18.03.2020 10:56:59