ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (545)

2020

2(545).indd 1 03.06.2020 9:05:58

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2(545) **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 2(545) **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

Радиоэлектронные устройства

Карасев М.С. – Приемопередающий модуль *X*-диапазона с внутренней проверкой электрических параметров приемного и передающего каналов..... 6

Семенов А.С., Налогин А.Г., Алексеев А.А. – Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры *Ka*-диапазона частот..... 12

Твердотельная электроника

Богданов С.А., Богданов Ю.М., Викторова Н.О., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рожкова Е.Г., Федоров Н.А., Журавлёв К.С. – Фазовые шумы автогенераторов на основе полевых транзисторов с повышенной линейностью передаточных характеристик..... 22

Технология и материаловедение

Побединский В.В., Рогозин Н.В., Бормонтов Е.Н. – Исследование кинетики растворения платины в расплавленных припоях. Свойства смачиваемости поверхности платины расплавленным эвтектическим припоем..... 29

Электровакуумные приборы

Медведков И.П., Семенов С.О., Роговин В.И. – Расчет характеристик спутниковой ЛБВ *Ka*-диапазона с высоким КПД и охлаждением коллектора излучением..... 37

Духина Н.Г., Мирющенко Н.И., Орехов А.А., Плешанов С.А., Ревенко К.В., Чугунов В.В. – Системы магнитного экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ..... 48

Петросян А.И., Роговин В.И., Семёнов С.О. – Уменьшение величины напряжения модуляции в приборах СВЧ..... 62

Журавлев С.Д., Шестеркин В.И., Горбачева М.В., Бессонов Д.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л. – Сеточные электроды из высокоплотного пиролитического графита для мощных импульсных ЛБВ..... 67

Краткие сообщения

Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А. – Определение неизвестного числа флюктуирующих сигналов..... 73

История

Балыко А.К., Балыко Т.А. – Ученые «Истока» – ветераны Великой Отечественной войны. Часть 2..... 77

2(545).indd 4 03.06.2020 9:05:58

CONTENTS

Radioelectronic devices

Karasev M.S. – *X*-band transceiver module with internal verification of electrical parameters of the receiving and transmitting channels..... 6

Semenov A.S., Nalogin A.G., Alekseev A.A. – Microstrip ferrite decoupling devices for microwave *Ka*-frequencyrange..... 12

Solid-state electronics

Bogdanov S.A., Bogdanov Yu.M., Viktorova N.O., Lapin V.G., Lukashin V.M., Pashkovsky A.B., Rozhkova E.G., Fedorov N.A., Zhuravlev K.S. – Phase noise of self-oscillators based on field effect transistors with increased linearity of transfer characteristics..... 22

Technology and material science

Pobedinsky V.V., Rogozin N.V., Bormontov E.N. – Investigation of kinetics of platinum dissolution in molten solders. Properties of platinum surface wettability by molten eutectic solder..... 29

Electrovacuum devices

Medvedkov I.P., Semenov S.O., Rogovin V.I. – Calculation of characteristics of *Ka*-band satellite TWT with high efficiency and cooling the collector by radiation..... 37

Dukhina N.G., Miryushchenko N.I., Orekhov A.A., Pleshanov S.A., Revenko K.V., Chugunov V.V. – Magnetic screening systems for precision on-board cesium ABTs..... 48

Petrosyan A.I., Rogovin V.I., Semenov S.O. – The diminution of modulation voltage in microvawe devices..... 62

Zhuravlev S.D., Shesterkin V.I., Gorbacheva M.V., Bessonov D.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L. – Grid electrodes made of high-density pyrolytic graphite for high-power pulsed TWTs..... 67

News in brief

Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A. – Determination of an unknown number of fluctuating signals..... 73

History

Balyko A.K., Balyko T.A. – Scientists of «Istok» – veterans of the great patriotic war. Part 2... 77

2(545).indd 5 03.06.2020 9:05:58

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.62

ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ *X*-ДИАПАЗОНА С ВНУТРЕННЕЙ ПРОВЕРКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛОВ

М. С. Карасев

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

Описана структурная схема проверки работоспособности приемного и передающего каналов в составе приемопередающего модуля. Рассмотрен принцип работы узлов проверки работоспособности приемного и передающего каналов. Проанализированы результаты работы созданной схемы.

КС: приемопередающий модуль, схема проверки работоспособности, система контроля мощности, положительная обратная связь, экспериментальная проверка

X-BAND TRANSCEIVER MODULE WITH INTERNAL VERIFICATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF THE RECEIVING AND TRANSMITTING CHANNELS

M. S. Karasev

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

The block diagram of the operability of the receiving and transmitting channels as part of the transceiver module is described. The principle of operation of nodes for checking the operability of the receiving and transmitting channels is considered. The results of the developed diagram operation are analyzed.

Keywords: transceiver module, diagram of operability verification, power control system, positive feedback, experimental verification

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные фазированные антенные решетки включают в свой состав приемопередающие модули (ППМ) [1, 2], обеспечивающие различные режимы работы [3, 4] и контроль параметров системы. Улучшение электрических параметров и повышение функциональности таких устройств позволяет увеличить обзор сканируемого пространства, повысить дальность действия и разрешающую способность приемопередающей антенны.

Для обеспечения быстрой проверки работоспособности ППМ необходимо применять встроенные функциональные узлы, позволяющие получить данные об электрических параметрах без использования дополнительного оборудования. Такими узлами могут быть направленные ответвители с системой контроля мощности (СКМ), формирующие цепи обратной связи, с по-

2(545).indd 6 03.06.2020 9:05:58

мощью которых, при управлении аттенюаторами и фазовращателями, обеспечивается получение информации о работоспособности канала.

В работе приведен принцип проверки работоспособности приемного и передающего каналов с использованием узлов направленного ответвления сигналов.

2. ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ С ФУНКЦИЕЙ ПРОВЕРКИ ПРИЕМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛОВ

Структурная схема ППМ представлена на рис. 1.

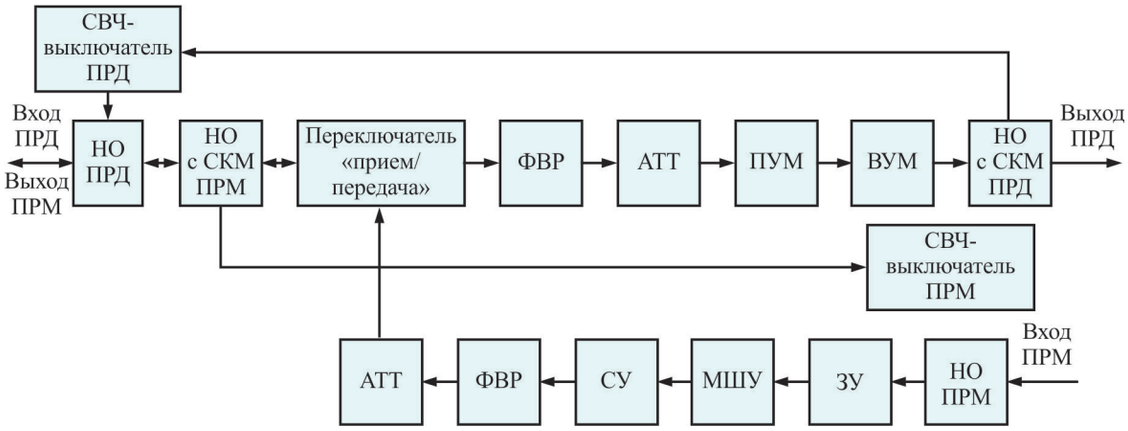


Рис. 1. Структурная схема ППМ
с функцией проверки работоспособности приемного и передающего каналов

Структурная схема включает в свой состав следующие элементы: сверхвысокочастотный выключатель передающего канала (СВЧ-выключатель ПРД); направленный ответвитель передающего канала (НО ПРД); направленный ответвитель с системой контроля мощности приемного канала (НО с СКМ ПРМ); переключатель «прием/передача»; фазовращатели (ФВР); аттенюаторы (АТТ); предварительный усилитель мощности (ПУМ); выходной усилитель мощности (ВУМ); направленный ответвитель с системой контроля мощности передающего канала (НО с СКМ ПРД); сверхвысокочастотный выключатель приемного канала (СВЧ-выключатель ПРМ); согласующий усилитель (СУ); малошумящий усилитель (МШУ); защитное устройство (ЗУ); направленный ответвитель приемного канала (НО ПРМ).

Принцип проверки работоспособности передающего канала

На вход передающего канала, при замыкании СВЧ-переключателя ПРД через направленный ответвитель ПРД (НО ПРД), проникает часть СВЧ-мощности, ответвленной с выходного усилителя мощности через направленный ответвитель с системой контроля мощности ПРД (НО с СКМ ПРД).

НО с СКМ подробно рассмотрен на рис. 2.

Возникает самовозбуждение передающего канала из-за положительной обратной связи. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРД-тракта изображено на рис. 3.

Ответвление петли имеет постоянное рассчитанное значение относительно коэффициента усиления тракта.

2(545).indd 7 03.06.2020 9:05:58

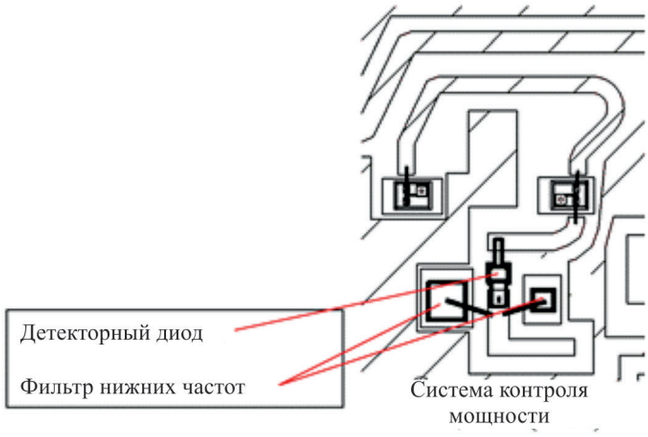


Рис. 2. Направленный ответвитель с системой контроля мощности

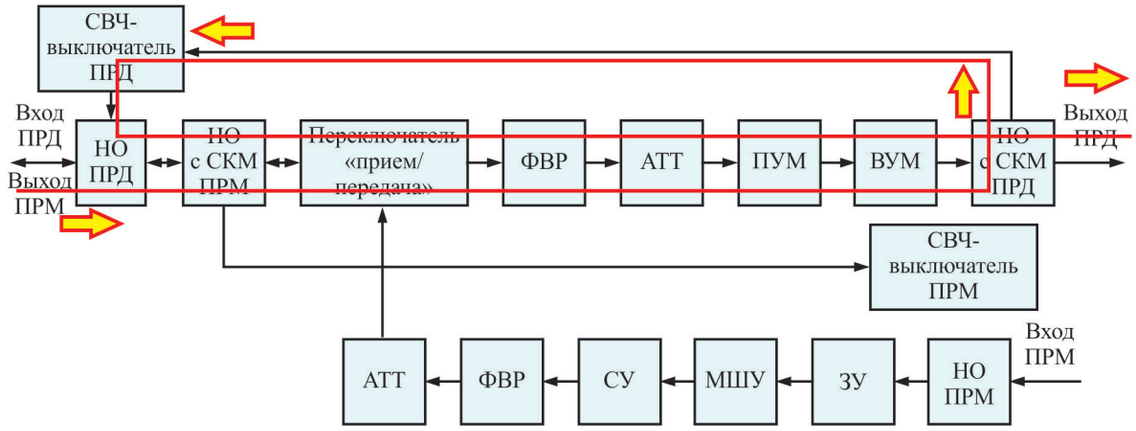


Рис. 3. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРД-тракта

Ввод ослабления в передающий тракт при помощи аттенюаторов ПРД позволяет убрать самовозбуждение тракта. Расчет по формуле (1) позволяет вычислить коэффициент усиления ПРД, а соответственно подтвердить работоспособность передающего канала.

$$K_{\text{у.ПРД}} = |K_{\text{у.ОС}}| + \sum R_{\text{атт}}. \quad (1)$$

Проверка самовозбуждения канала обеспечивается системой контроля мощности на детекторном диоде, на выходе которого возникает напряжение при самовозбуждении тракта ПРД.

При замыкании СВЧ-переключателя ПРД самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi = 0$. Для возникновения самовозбуждения тракта требуется вводить разряды фазовращателей до появления самовозбуждения.

В случае отсутствия возбуждения канала ПРД при всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов, канал ПРД является неисправным.

Принцип проверки работоспособности приемного канала

На вход приемного канала, при замыкании СВЧ-переключателя ПРМ через направленный ответвитель ПРМ (НО ПРМ), проникает часть СВЧ-мощности, ответвленной с выхода приемного

2(545).indd 8 03.06.2020 9:05:59

канала через направленный ответвитель с системой контроля мощности ПРМ (НО с СКМ ПРМ, см. рис. 2). Возникает самовозбуждение приемного канала из-за положительной обратной связи. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРМ-тракта изображено на рис. 4.

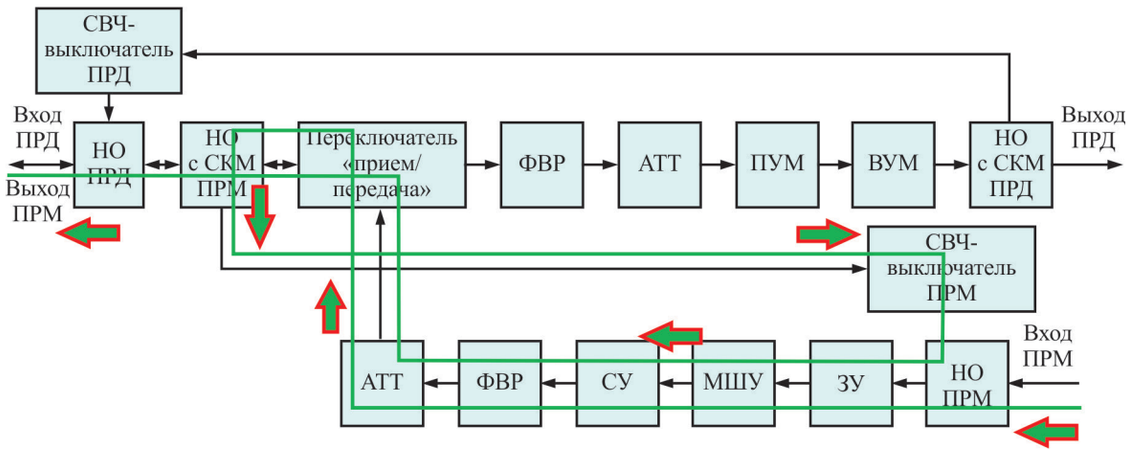


Рис. 4. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРМ-тракта

Ответвление петли имеет постоянное рассчитанное значение относительно коэффициента усиления тракта.

Ввод ослабления в тракт при помощи аттенюаторов ПРМ позволяет убрать самовозбуждение тракта. Расчет по формуле (2) позволяет вычислить коэффициент усиления ПРМ, а также подтвердить работоспособность приемного канала.

$$K_{\text{у.ПРМ}} = |K_{\text{у.ОС}}| + \sum R_{\text{атт}}. \quad (2)$$

Проверка самовозбуждения канала обеспечивается системой контроля мощности на детекторном диоде, на выходе которого возникает напряжение при самовозбуждении тракта ПРМ.

При замыкании СВЧ-переключателя ПРМ самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi = 0$. Для возникновения самовозбуждения тракта требуется вводить разряды фазовращателей до появления самовозбуждения.

В случае отсутствия возбуждения канала ПРМ при всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов, канал ПРМ является неисправным.

3. СТЕНД ИМИТАЦИИ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КАНАЛОВ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

Стенд, имитирующий проверку работоспособности каналов модуля, показан на рис. 5.

Регулируемый аттенюатор используется для задания величины ответвления петли обратной связи. Вход и выход модуля в составе стенда могут меняться в зависимости от проверки канала ПРМ или ПРД.

Пример

Коэффициент усиления тракта модуля (ПРД или ПРМ) неизвестен. Ответвление петли, заданное с помощью регулируемого аттенюатора, составляет -20 дБ. При замыкании СВЧ-выклю-

2(545).indd 9 03.06.2020 9:05:59

чателя (ПРД или ПРМ) возникает самовозбуждение канала. Уровень сигнала с детекторного диода при возникновении самовозбуждения канала ПРД или ПРМ изображен на рис. 6.

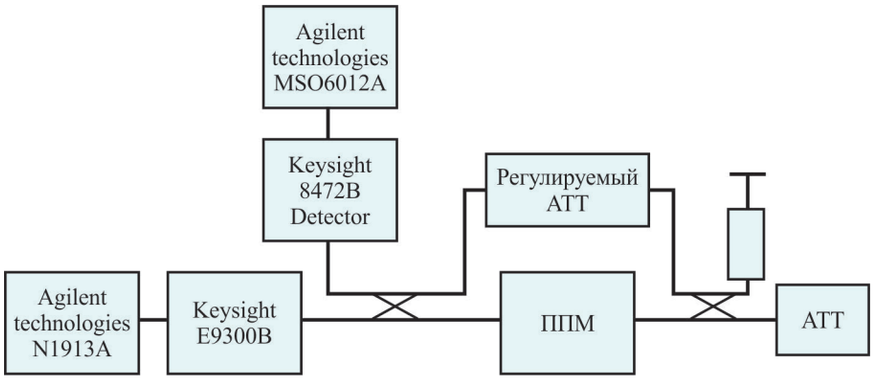


Рис. 5. Структурная схема стенда имитации проверки работоспособности каналов модуля

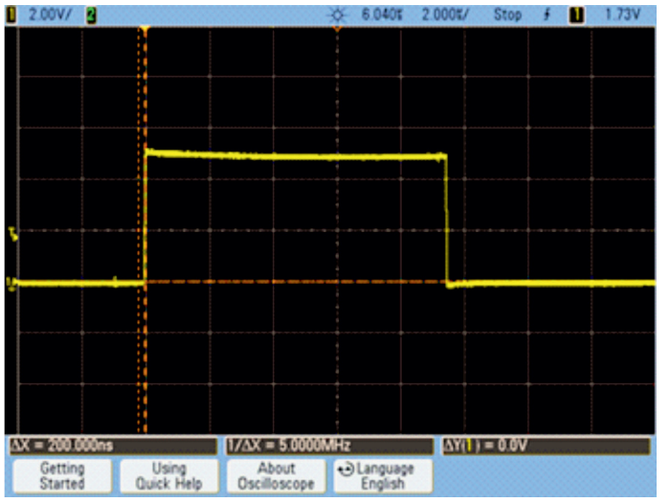


Рис. 6. Уровень сигнала с детекторного диода при возникновении самовозбуждения канала ПРД

При вводе суммы разрядов ослабления в 5 дБ (разряды 1 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала пропадает. Уровень сигнала с детекторного диода при исчезновении самовозбуждения канала ПРД или ПРМ изображен на рис. 7.

Прокрутив все состояния фазовращателей и убедившись, что самовозбуждение не появляется, производится расчет по формулам (1), (2) и вычисляется коэффициент усиления СВЧ-тракта:

$$K_{\text{у.ПРМ/ПРД}} = |K_{\text{у.ОС}}| + \sum R_{\text{атт}} = 20 + 5 = 25, \text{ дБ}.$$

Коэффициент усиления измеряемого канала модуля составляет 25 дБ. Погрешность измерения коэффициента усиления данным методом составляет величину младшего разряда СВЧ-аттенюатора в составе тракта.

Полученные в ходе экспериментальной проверки результаты позволяют сделать вывод о корректной работе схемы проверки работоспособности каналов ППМ.

2(545).indd 10 03.06.2020 9:05:59

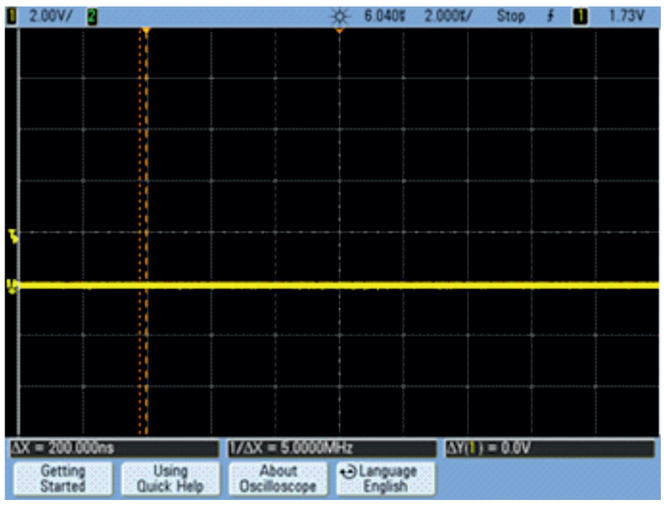


Рис. 7. Уровень сигнала с детекторного диода
при возникновении самовозбуждения канала ПРД или ПРМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование разработанной схемы в составе современных приемопередающих модулей позволяет получить информацию о работоспособности каналов приемопередающего модуля с высокой скоростью, с точностью до значения младшего разряда аттенюатора, затратив минимум времени и дополнительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карасев, М. С.** Многофункциональный приемопередающий модуль *X*-диапазона частот / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, С. А. Щеголев, А. В. Адиатулин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 51 – 54.

2. **Карасев, М. С.** Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4(531). – С. 37 – 44.

3. **Карасев, М. С.** Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР *X*-диапазона / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1 (532). – С. 45 – 48.

4. **Карасев, М. С.** Многофункциональный приемопередающий модуль АФАР нового поколения / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, В. А. Жерновенков, Е. А. Синькова, С. А. Щеголев // Сборник трудов конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2018. – С. 239 – 242.

Статья поступила 6 февраля 2020 г.

2(545).indd 11 03.06.2020 9:05:59

УДК 621.396.966.9

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФЕРРИТОВЫЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ СВЧ-АППАРАТУРЫ *Ka*-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

А. С. Семенов, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев

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

Описан процесс разработки и последующего изготовления микрополосковых ферритовых развязывающих приборов *Ka*-диапазона, рассмотрены конструктивные и технологические особенности, возникающие перед разработчиком. Приведены результаты разработок микрополосковых ферритовых циркулятора и вентиля *Ka*-диапазона частот.

КС: Ka-диапазон, микрополосковый циркулятор, микрополосковый вентиль, СВЧ-феррит

MICROSTRIP FERRITE DECOUPLING DEVICES FOR MICROWAVE *Ka*-FREQUENCY RANGE

A. S. Semenov, A. G. Nalogin, A. A. Alekseev

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

This article describes the development and subsequent manufacture of microstrip ferrite decoupling devices of the *Ka*-frequency range, and also discusses the design and technological features that arise before the developer. The results of the development of *K*a frequency range microstrip ferrite circulator and isolator are presented.

Keywords: Ka frequency range, microstrip circulator, microstrip isolator, microwave ferrite

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся разработки радиоаппаратуры миллиметрового диапазона. Аппаратура предназначена для систем связи, навигации железнодорожного транспорта и авиации, интроскопии объектов в системах контроля безопасности, автомобильной промышленности – в разрабатываемых системах безопасности движения и др. Переход в миллиметровый диапазон дает следующие преимущества: уменьшение габаритов радиоаппаратуры, повышение разрешающей способности радионавигационных систем, возможность скрытой передачи данных.

Важное место во всех радиосистемах занимают ферритовые развязывающие приборы, которые обеспечивают работу СВЧ-генераторов на переменные нагрузки, устойчивость работы усилительных цепочек, позволяют осуществлять управление сигналом в РЛС.

За последние годы сильно вырос интерес к разработке миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов (МФРП), работающих в мм-диапазоне. Создание таких изделий – сложный процесс, для успешной реализации которого разработчику необходимо решить ряд задач:

– выбор оптимального ферритового материала в качестве подложки;
– точное измерение электромагнитных характеристик ферритового материала;
– расчёт конструкции разрабатываемых ферритовых приборов;

2(545).indd 12 03.06.2020 9:05:59

– разработка технологии изготовления ферритовых приборов;

– измерение электрических параметров ферритовых приборов, доработка их конструкции и проведение испытаний.

Решение этих задач было выполнено в процессе разработки микрополосковых циркулятора и вентиля *Ка*-диапазона частот, требования к электрическим параметрам которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Требования к разрабатываемым МФРП

Тип прибора	Диапазон рабочих частот Δf, ГГц	КСВН	Прямые потери $\alpha_{пр}$, дБ	Развязка / обратные потери $\alpha_{раз}/\alpha_{обр}$, дБ	Входная непрерывная мощность $P_{вх}$, Вт
Циркулятор *Ка*-диапазона	36,5 – 38,5	< 1,4	< 0,8	> 20	0,1
Вентиль *Ка*-диапазона	33 – 37	< 1,4	< 1	> 20	2

2. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ФЕРРИТОВОГО ПРИБОРА

Ключевым элементом любого ферритового развязывающего прибора является ферритовый материал, за счёт которого удаётся достичь невзаимных свойств у прибора в заданном диапазоне частот. Существующие ферритовые материалы вносят свои особенности при разработке ферритовых приборов мм-диапазона, определяя в них предельно достижимые параметры и характеристики [1].

Известно, что за счёт увеличения намагниченности насыщения ферритового материала M_s удается достичь большей широкополосности у приборов на его основе. Феррогранаты, нашедшие широкое применение в качестве подложек для микрополосковых ферритовых приборов в см-диапазоне длин волн, из-за низкого значения намагниченности насыщения малоэффективны. Поэтому при разработке МФРП мм-диапазона необходимо выбирать ферритовые материалы с большим значением намагниченности насыщения – ферриты с кристаллической структурой шпинели [2].

В качестве материала подложек для разрабатываемых приборов *Ка*-диапазона частот были выбраны ферриты с кристаллической структурой шпинели: литий-цинковая шпинель марки ЛЦ-380 (ТС0.734.002 ТУ) и никель-цинковая шпинель марки НЦВ (ТС0.734.002 ТУ).

С помощью методики, разработанной в АО «НПП «Исток» им. Шокина» [3], измерения эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{эфф}$ и тангенса угла суммарных потерь $tg\delta_{\Sigma}$ плоскопараллельных заготовок магнитодиэлектриков в 3-мм диапазоне длин волн были измерены $\varepsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{\Sigma}$ ферритов марок ЛЦ-380 и НЦВ.

А с помощью методики определения намагниченности насыщения ферритов с использованием катушек Гельмгольца [3] была проведена точная оценка намагниченности насыщения M_s данных ферритов-шпинелей.

Измеренные электромагнитные параметры ферритов-шпинелей НЦВ и ЛЦ-380 представлены в табл. 2.

2(545).indd 13 03.06.2020 9:05:59

Таблица 2

Характеристики ферритов

Наименование характеристики, единица измерения	НЦВ	ЛЦ-380
Диэлектрическая проницаемость ε	13,0 ± 4 %	15,1 ± 4 %
Тангенс угла суммарных потерь $tg\delta_{\Sigma}$	$1{,}5\cdot10^{-3} \pm 3{,}7\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-3} \pm 3{,}7\cdot10^{-4}$
Намагниченность насыщения M_s, кА/м	380 ± 4 %	380 ± 4%

Для выбора наиболее подходящего ферритового материала подложки была рассчитана топология и проведено математическое моделирование *Y*-циркуляторов 8-мм диапазона в зависимости от материала подложки (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики математических моделей *Y*-циркуляторов

Марка феррита	Толщина подложки, мкм	Рабочий диапазон частот Δf, ГГц	Прямые потери $\alpha_{пр}$, дБ	Развязка между плечами $\alpha_{раз}$, дБ	КСВН входов прибора
ЛЦ-380	250	36 – 39	0,7	17	1,3
НЦВ	250	36 – 39	0,7	22	1,22

Из табл. 3 видно, что наилучшими электрическими характеристиками обладает модель *Y*-циркулятора на подложке из никель-цинковой шпинели, поэтому она была выбрана в качестве подложки для разрабатываемых конструкций МФРП мм-диапазона.

Никель-цинковая шпинель также обладает большим значением намагниченности насыщения (380 кА/м) по сравнению с ферритами со структурой граната (140 кА/м), что позволит обеспечить достаточно большую полосу рабочих частот разрабатываемых приборов. Низкий уровень тангенса угла суммарных потерь феррита марки НЦВ, в свою очередь, позволит обеспечить малые потери в прямом направлении прохождения СВЧ-сигнала через невзаимные приборы. Никель-цинковые шпинели более устойчивы к технологическим процессам напыления плёнок Cr/Cu и Ta, чем литиевые шпинели [4].

3. РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ ЦИРКУЛЯТОРА И ВЕНТИЛЯ *Ka*-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Недостаточно изготовить качественный ферритовый материал и точно измерить его параметры. Ключевым этапом при разработке любого ферритового развязывающего прибора является расчёт его конструкции. Чем точнее будет выполнен расчёт, тем меньше итераций изготовления макетов придется произвести, прежде чем получить конструкцию, которая удовлетворяла бы всем требованиям технического задания (ТЗ).

При разработке МФРП немаловажным является выбор толщины ферритовой подложки *h* для изготовления плат.

2(545).indd 14 03.06.2020 9:05:59

С одной стороны, уменьшение толщины подложки обеспечивает:

1) малые потери на излучение;

2) снижение вероятности возбуждения поверхностных волн, что особенно актуально для подложек с большой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon > 10$);

3) увеличение плотности монтажа микрополосковых приборов за счёт сужения полосковых проводников.

Однако при уменьшении толщины подложки h и сохранении при этом постоянного волнового сопротивления Z_0 необходимо уменьшать ширину полосковых проводников w, а это, в свою очередь, приводит к увеличению потерь в проводниках, снижению добротности и, как следствие, к увеличению потерь в развязывающих приборах [5].

Таким образом, при определении толщины ферритовой подложки необходимо идти на компромисс, исходя из изложенных выше факторов.

3.1. Расчёт конструкции *Y*-циркулятора

Для определения наиболее подходящей толщины ферритовой подложки с использованием полученной физической модели ферритового материала (НЦВ), были произведены расчёты топологии плат *Y*-циркуляторов при трех разных толщинах подложки и последующее моделирование методом конечных элементов их конструкций.

Модель *Y*-циркулятора (рис. 1) представляет собой ферритовую плату размерами 5×9,2 мм, на которую нанесена топология. При построении математических моделей МФРП методом конечных элементов используются следующие граничные условия [6]:

1) рисунок топологии и обратная сторона ферритовой платы считаются идеальными проводниками (за исключением танталовой нагрузки у вентилей), что исключает из расчёта потери на излучение в свободное пространство;

2) внешнее магнитное поле считается однородным и прикладывается только к области под диском циркуляции приборов;

3) согласно модели, приборы возбуждаются сосредоточенными портами с входным сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом.

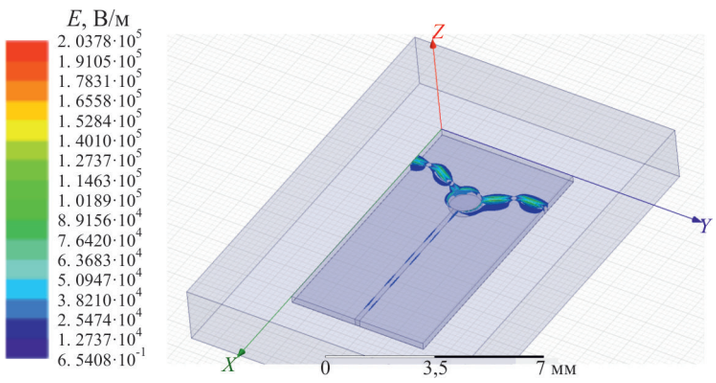


Рис. 1. Электродинамическая модель *Y*-циркулятора *Ка*-диапазона

В табл. 4 приведено сравнение электрических параметров трех полученных моделей *Y*-циркуляторов *Ка*-диапазона с электрическими параметрами, заданными в ТЗ.

2(545).indd 15 03.06.2020 9:06:00

Таблица 4

Параметры моделей *Y*-циркуляторов

Наименование параметра, единица измерения	Значение по ТЗ	Полученное значение при толщине подложки		
		h = 200 мкм	h = 250 мкм	h = 300 мкм
Диапазон рабочих частот Δf, ГГц	36,5 – 38,5	36 – 39	36 – 39	36 – 39
Вносимые потери в прямом направлении $\alpha_{пр}$, дБ	Не более 0,8	Не более 0,55	Не более 0,7	Не более 1,15
Развязка $\alpha_{раз}$, дБ	Не менее 20	Не менее 18	Не менее 22	Не менее 17
КСВН $K_{стU}$	Не более 1,3	Не более 1,22	Не более 1,22	Не более 1,35

Из табл. 4 видно, что только модель *Y*-циркулятора на платах из НЦВ толщиной h = 250 мкм удовлетворяет требованиям ТЗ.

Важным критерием при разработке любого прибора является его надежность при эксплуатации. Ферритовые приборы на платах толщиной 250 мкм достаточно хрупкие, поэтому для улучшения их прочностных характеристик используют субподложку из магнитомягкого материала (железа).

По результатам расчетов и моделирования была разработана конструкция *Y*-циркулятора *Ka*-диапазона частот (рис. 2).

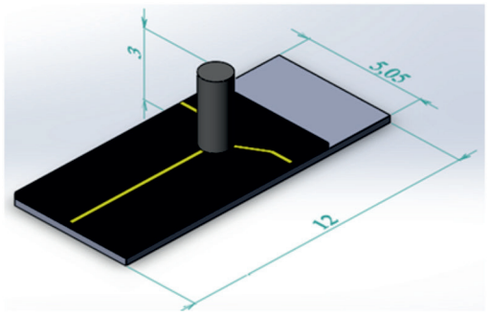


Рис. 2. 3*D*-модель *Y*-циркулятора *Ka*-диапазона

3.2. Расчёт конструкции микрополоскового вентиля

Как правило, при разработке микрополосковых ферритовых вентилей используют нагрузку, резистивный слой которой выполнен из тантала, с таким значением поверхностного сопротивления R_s, чтобы электромагнитная волна, попав в нагрузку, полностью в ней затухала и при этом не возникали паразитные отражения от нагрузки. С одной стороны, чем меньше сопротивление нагрузки, тем более плавно в ней поглощается СВЧ-энергия, но при этом необходимо увеличивать длину пути прохождения СВЧ-энергии для обеспечения требуемого уровня обратных потерь вентиля. Уменьшения габаритов планарной нагрузки вентиля можно достичь за счёт увеличения её сопротивления, но это, в свою очередь, приводит к увеличению собственного КСВН нагрузки за счёт увеличения разницы входных сопротивлений подводящих полосков и танталовой нагрузки. Поэтому необходимо учитывать, что чем больше величина R_s, тем больше рассогласованность нагрузки и диска циркуляции вентиля [5].

2(545).indd 16 03.06.2020 9:06:00

Исходя из вышесказанного, нами была выбрана конфигурация планарной нагрузки типа «сектор» (рис. 3), нагрузка представляет собой сектор, выполненный из тонкого слоя тантала.

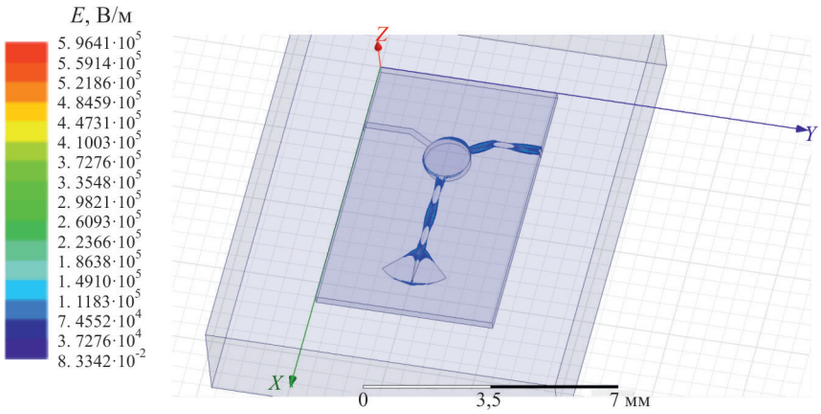


Рис. 3. Электродинамическая модель вентиля *Ka*-диапазона

Тантал используется в качестве поглощающего материала. Для определения оптимальной величины поверхностного сопротивления R_s планарной танталовой нагрузки было проведено математическое моделирование микрополоскового вентиля в зависимости от величины R_s. Моделирование показало (табл. 5), что необходимый уровень обратных потерь удаётся достичь, если поверхностное сопротивление танталовой нагрузки будет равно 60 Ом/□.

Таблица 5

Параметры моделей вентилей

Наименование параметра, единица измерения	Значение по ТЗ	Параметры модели вентиля		
		R_s = 45 Ом/□	R_s = 60 Ом/□	R_s = 75 Ом/□
Диапазон рабочих частот Δf, ГГц	33 – 37	33 – 37	33 – 37	33 – 37
Прямые потери $\alpha_{пр}$, дБ	Не более 1,0	Не более 0,7	Не более 0,7	Не более 0,7
Обратные потери $\alpha_{обр}$, дБ	Не менее 20	Не менее 16	Не менее 20	Не менее 17
КСВН $K_{стU}$	Не более 1,4	Не более 1,2	Не более 1,25	Не более 1,3

Таким образом, в результате проведенных расчетов и моделирования была разработана конструкция вентиля *Ka*-диапазона частот (рис. 4).

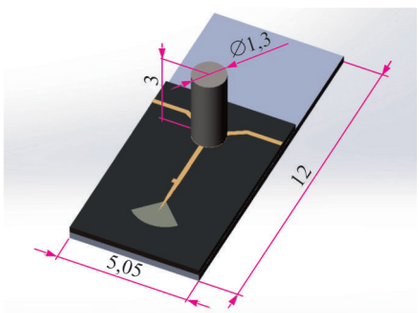


Рис. 4. 3*D*-модель вентиля *Ka*-диапазона

2(545).indd 17 03.06.2020 9:06:00

4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ ПРИБОРОВ, ДОРАБОТКА ИХ КОНСТРУКЦИИ

Технологический процесс изготовления МФРП *Ka*-диапазона включает в себя 4 этапа.

1. Изготовление ферритовых заготовок по керамической технологии, включающей в себя такие операции, как сушка исходных компонентов и их смешивание, сушка шихты, предварительный обжиг, размол шихты, прессование заготовок и спекание заготовок в электропечах камерных.

2. Изготовление ферритовых подложек с уменьшенной толщиной. Этот этап включает в себя такие операции, как резка ферритовых заготовок на пластины, шлифовка и полировка подложек и последующая их резка под необходимый размер (24×30×0,25 мм). Особенностью данной операции является использование субподложек из поликора для предотвращения растрескивания тонких пластин во время их шлифовки и полировки.

3. Изготовление ферритовых плат для МФРП *Ka*-диапазона по тонкопленочной групповой технологии: резистивный слой Та наносят методом магнетронного распыления, проводящие слои Cr/Cu на подложку наносят термическим напылением в вакууме, формирование рисунка топологии платы производят методами фотолитографии, защитное покрытие топологии – гальваническим нанесением Au, разделение подложек на платы осуществляют на станках дисковой алмазной резки.

4. Сборка и настройка МФРП *Ka*-диапазона включает в себя такие операции, как пайка ферритовой платы к основанию, намагничивание магнитной системы и приклеивание её к ферритовой плате, контроль электрических параметров изделия.

По отработанной технологии были изготовлены макеты *Y*-циркулятора и вентиля *Ka*-диапазона частот.

Измерение электрических параметров микрополосковых вентилей и циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн осуществляется на стенде, структурная схема которого представлена на рис. 5.

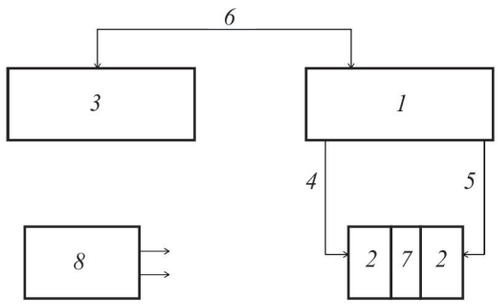


Рис. 5. Структурная схема стенда для измерения параметров МФРП мм-диапазона:
1 – векторный анализатор цепей; *2* – подключающее устройство Anritsu; *3* – монитор;
4, *5* – СВЧ-кабели; *6* – соединительный кабель; *7* – исследуемый прибор;
8 – камера тепла и холода UC-20CE

Макет *Y*-циркулятора 8-мм диапазона длин волн изображен на рис. 6.

Макет *Y*-циркулятора представляет собой ферритовую плату толщиной 250 мкм, напаянную на металлическое основание толщиной 300 мкм. К ферритовой плате на область резонатора приклеен магнит из сплава КС-25 диаметром 1,2 мм и высотой 3 мм. При измерении

2(545).indd 18 03.06.2020 9:06:00

Y-циркулятора на 2-портовом анализаторе цепей, для согласования на его 3-е плечо устанавливается согласованная нагрузка из поглощающего электромагнитную энергию материала.

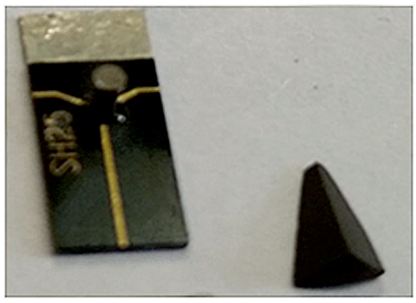


Рис. 6. Макет *Y*-циркулятора и ферроэпоксидная нагрузка

Электрические характеристики макета *Y*-циркулятора, измеренные с помощью векторного анализатора цепей, представлены на рис. 7.

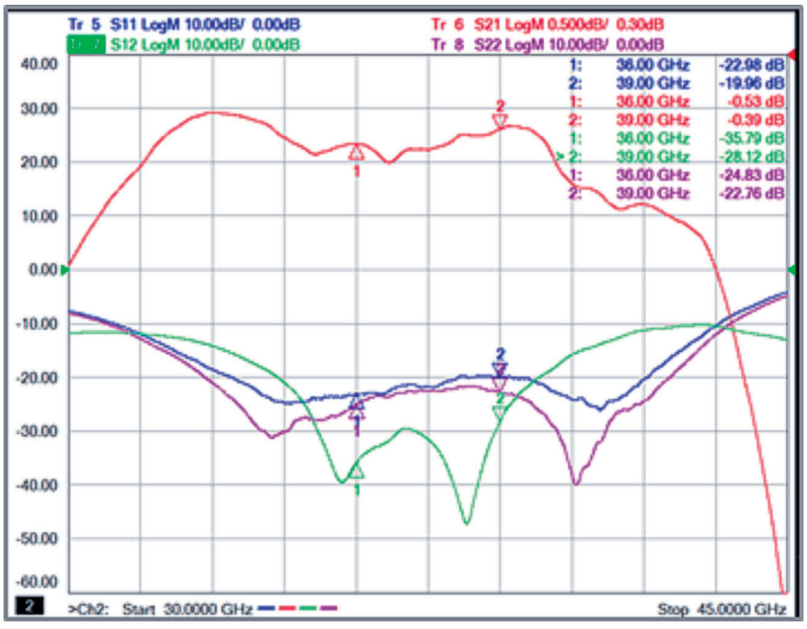


Рис. 7. *S*-параметры макета *Y*-циркулятора *Ka*-диапазона частот

Не всегда макеты ФРП, изготовленные на основе расчётных данных, полностью удовлетворяют требованиям ТЗ. В большинстве случаев разработчику приходится дорабатывать их конструкцию с целью улучшения их параметров.

Так, например, в случае с микрополосковым вентилем *Ka*-диапазона было установлено, что его обратные потери не удовлетворяют требованиям ТЗ ($\alpha_{обр} \approx 12$ дБ) в заданном диапазоне частот, вследствие плохого согласования *Y*-циркулятора и планарной нагрузки, расположенной в 3-м плече.

Для решения этой проблемы топология вентиля была скорректирована экспериментальным путём (рис. 8), что позволило добиться необходимого уровня обратных потерь ($\alpha_{обр} \geq 20$ дБ) в диапазоне частот 33…37 ГГц.

2(545).indd 19 03.06.2020 9:06:00

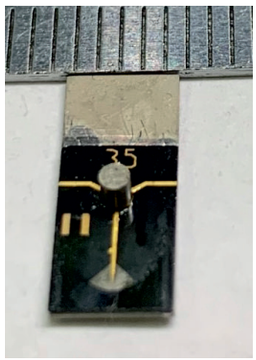


Рис. 8. Макет вентиля *Ka*-диапазона частот с корректированной топологией планарной нагрузки

С целью более равномерного распределения поля в области циркуляции и улучшения характеристик разрабатываемых приборов мм-диапазона в их конструкцию была добавлена субподложка из магнитомягкого материала БТ-ПН-05 (ГОСТ 19904-90) (железо), кроме того, из конструкции магнитной системы МФРП мм-диапазона был исключён диэлектрический диск.

Исключение из конструкции разрабатываемых приборов диэлектрического диска возможно за счёт равенства диаметров магнита и диска области циркуляции платы прибора. Также для микрополосковых ферритовых приборов, работающих в мм-диапазоне длин волн, диэлектрический слой клея толщиной 20…40 мкм между магнитом и ферритовой платой, по сути, играет роль миниатюрной диэлектрической прокладки, которая делает распределение магнитного поля на поверхности магнитной системы, а следовательно, и внутри феррита более однородным и позволяет уменьшить габариты магнита за счёт сокращения фактического расстояния до ферритовой платы прибора.

Для оптимизации работы прибора также было необходимо подобрать такую магнитную систему, чтобы, с одной стороны, она была как можно меньше, а с другой – чтобы обеспечивала необходимые электрические характеристики вентиля. Было проведено исследование зависимости электрических характеристик вентиля от его магнитной системы (рис. 9 и 10).

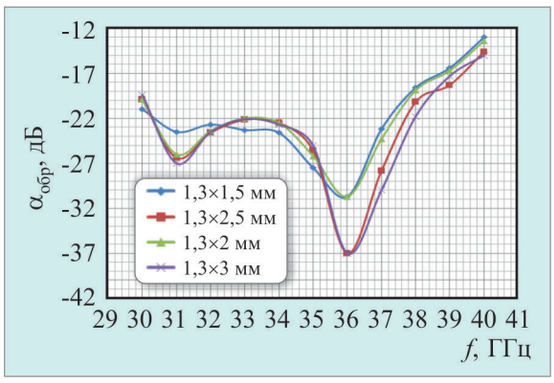


Рис. 9. Зависимости обратных потерь вентиля от размеров магнитов

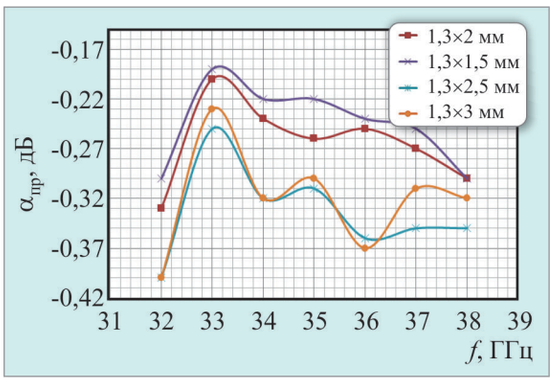


Рис. 10. Зависимости прямых потерь вентиля от размеров магнитов

Как видно из проведенного анализа, наиболее оптимальной магнитной системой является система, состоящая из магнита диаметром 1,3 мм и высотой 1,5 мм, который приклеивается к резонаторному диску вентиля. Вентиль с данной магнитной системой обладает наименьшими прямыми потерями и имеет при этом необходимый уровень обратных потерь.

2(545).indd 20 03.06.2020 9:06:01

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных работ разработаны *Y*-циркулятор и вентиль *Ka*-диапазона частот и выработан общий подход к разработке МФРП *Ka*-диапазона частот.

Электрические параметры разработанных МФРП *Ka*-диапазона частот представлены в табл. 6.

Таблица 6

Электрические параметры МФРП *Ka*-диапазона

Наименование параметра, единица измерения	*Y*-циркулятор	Вентиль
Диапазон рабочих частот Δf, ГГц	36 – 39	33 – 37
Прямые потери $\alpha_{пр}$, дБ	Не более 0,7	Не более 0,8
Развязка (обратные потери) $\alpha_{раз(обр)}$, дБ	Не менее 22	Не менее 20
КСВН вх./вых. $K_{ст}U$	Не более 1,3	Не более 1,4
Входная непрерывная мощность $P_{вх.\ ср}$, Вт	0,1	2

Разработанные вентиль и циркулятор успешно прошли все испытания на воздействие внешних факторов, в том числе воздействие входной непрерывной мощности.

Разработанные микрополосковые циркулятор и вентиль *Ka*-диапазона частот имеют электрические характеристики на уровне существующих отечественных и зарубежных аналогов, что позволяет эффективно применять их при разработке перспективной СВЧ-техники нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуревич, А. Г.** Ферриты на сверхвысоких частотах / А. Г. Гуревич. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1960.

2. **Абрамов, В. П.** Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах / В. П. Абрамов, В. А. Дмитриев, С. А. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1989.

3. **Семенов, А. С.** Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А. С. Семенов, М. Г. Семенов, А. В. Мясников, А. Г. Налогин // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. статей VI Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – С. 27.

4. **Налогин, А. Г.** Некоторые особенности изготовления СВЧ микрополосковых ферритовых приборов на подложках из литиевой шпинели / А. Г. Налогин, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 63 – 69.

5. **Малорацкий, Л. Г.** Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л. Г. Малорацкий. – М.: Советское радио, 1976. – С. 216.

6. **Кондратьева, Л. Е.** Основы метода конечных элементов: конспект лекций / Л. Е. Кондратьева. – Владимир: Владим. гос. ун-т., 2007.

Статья поступила 10 марта 2020 г.

2(545).indd 21 03.06.2020 9:06:01

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.42

ФАЗОВЫЕ ШУМЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЛИНЕЙНОСТЬЮ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

С. А. Богданов[1], Ю. М. Богданов[1], Н. О. Викторова[1], В. Г. Лапин[1], В. М. Лукашин[1], А. Б. Пашковский[1], Е. Г. Рожкова[1], Н. А. Федоров[1], К. С. Журавлёв[2]

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

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск*

Рассмотрена возможность снижения фазовых шумов автогенераторов на основе полевых транзисторов (ПТ) путем замены ПТ с однородным профилем на ПТ со специальным профилем легирования, обеспечивающим повышенную линейность передаточной характеристики транзистора. Приведены сравнительные результаты низкочастотных шумовых измерений транзисторов и результаты моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов автогенераторов на их основе. Показано, что даже при собственных низкочастотных шумах ПТ со специальным профилем легирования, существенно превосходящих шумы обычного ПТ, выигрыш в фазовых шумах устройств на нём может составить около 10 дБ. Кроме того, имеется потенциальная возможность дополнительного снижения фазовых шумов на 10 дБ при отстройке 10 кГц путем отработки технологического процесса изготовления ПТ со специальным профилем легирования, что позволит таким автогенераторам выйти на уровень приборов на биполярных транзисторах.

КС: автогенератор, фазовый шум, полевой транзистор со специальным профилем легирования, полевой транзистор с линейной передаточной характеристикой, полевой транзистор с постоянной крутизной

PHASE NOISE OF SELF-OSCILLATORS BASED ON FIELD EFFECT TRANSISTORS WITH INCREASED LINEARITY OF TRANSFER CHARACTERISTICS

S. A. Bogdanov[1], Yu. M. Bogdanov[1], N. O. Viktorova[1], V. G. Lapin[1], V. M. Lukashin[1], A. B. Pashkovsky[1], E. G. Rozhkova[1], N. A. Fedorov[1], K. S. Zhuravlev[2]

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

[2]*Federal State Budget Educational Institution of Science Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

A possibility of reducing the phase noise of self-oscillators based on field effect transistors (FET) by replacing FETs with a homogeneous profile by FETs with special doping profiles providing increased linearity of the

2(545).indd 22 03.06.2020 9:06:01

transistor transfer characteristics has been considered. Comparative results of low-frequency noise measurements of transistors and the results of modeling the spectral power density of phase noises of self-oscillators based on them are presented. It is shown that even with intrinsic low-frequency noise of the FET with a special doping profile, significantly exceeding the noise of the conventional one, the advantage in phase noise of devices on it, can be about 10 dB. Besides, there is a potential for additional reduction of phase noise by 10 dB during a 10 kHz offset by testing the technological process of manufacturing FET with a special doping profile, which will allow such self-oscillators to reach the level of devices using bipolar transistors.

Keywords: self-oscillator, phase noise, field-effect transistor with a special doping profile, field-effect transistor with linear transfer characteristics, field-effect transistor with a constant transconductance

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкому применению полевых транзисторов (ПТ) в целом ряде устройств, например в автогенераторах, препятствует высокая интенсивность низкочастотных шумов вида $1/f$. Присутствующая в цепях питания шумовая составляющая напряжения в совокупности с собственными шумами активного элемента (АЭ) автогенератора приводит к модуляции полезного сигнала низкочастотным шумом и существенно увеличивает спектральную плотность мощности фазового шума (СПМФШ) [1, 2]. Это приводит к тому, что СПМФШ автогенераторов на основе ПТ с однородным профилем легирования превышает СПМФШ автогенераторов на основе биполярных транзисторов более чем на 20 дБ, что не позволяет ПТ в полной мере раскрыть преимущества перед биполярными транзисторами.

Проблеме влияния различных факторов на СПМФШ автогенераторов посвящен ряд работ. Установлено, что спектральная чистота колебаний определяется не только нелинейностью режима генератора и свойствами АЭ, но и характеристиками частотно-зависимой цепи обратной связи, цепей питания, и рабочей точкой АЭ, температурной стабильностью параметров элементов, а также механической прочностью узлов и деталей автогенератора [1, 2]. При этом к числу основных факторов, вызывающих нестабильность частоты, относится изменение напряжения источника питания генератора по постоянному току [2], приводящее к изменению рабочей точки АЭ.

Известны схемотехнические решения [3, 4] по установке рабочей точки АЭ автогенератора, позволяющие повысить частотную стабильность автогенераторов за счет компенсации температурного дрейфа параметров АЭ и наличия отрицательной обратной связи по НЧ-шумам [4]. Эффективность предложенных схем подтверждается рядом патентов [5–7], в которых продемонстрировано снижение СПМФШ вблизи несущей на величину порядка 10 дБ.

Существуют и другие схемотехнические методы снижения СПМФШ автогенераторов, которые также существенно влияют на стоимость, габаритные размеры и энергопотребление изделий на их основе.

Тем временем недостаточное внимание уделяется технологическим методам, позволяющим формировать АЭ автогенераторов с улучшенными значениями отдельных параметров. Одним из таких АЭ является полевой транзистор со специальным профилем легирования [8].

Таким образом, поиск возможностей снижения СПМФШ автогенераторов за счет технологических методов формирования ПТ с улучшенными значениями отдельных параметров и характеристик является актуальной задачей.

2(545).indd 23 03.06.2020 9:06:01

2. МЕХАНИЗМ СНИЖЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ

Основным фактором, вызывающим модуляции фазы в СВЧ-устройствах на ПТ, является флуктуация входной емкости транзистора [8]. Флуктуация входной емкости и ее нелинейность зависят от профиля легирования рабочего слоя ПТ, поэтому при рациональном выборе этого профиля шумовые характеристики СВЧ-устройств заметно улучшаются.

В работе предложен способ снижения СПМФШ автогенераторов, заключающийся в применении в качестве активного элемента ПТ с оптимизированным профилем легирования в подзатворной области. В результате исследований ПТ со специальным профилем легирования установлено, что в таких приборах реализуется низкая модуляционная чувствительность параметров транзисторов к первичным НЧ-флуктуациям зарядовых состояний на поверхности и в объеме канала. Это позволяет существенно снизить СПМФШ автогенераторов на основе таких транзисторов.

Добиться линейности передаточной характеристики в ПТ можно, используя различные профили легирования канала. Главное, сформировать такой профиль легирования, при котором глубина обеднения оказывается слабо меняющейся функцией напряжения на затворе [9]. Один из простейших вариантов, использованный далее в эксперименте, – двухступенчатый профиль легирования, в котором концентрация легирующей примеси между затвором и каналом постоянна и в несколько раз меньше концентрации примеси в однородно легированном канале.

Таким образом, если в обычном ПТ с однородным профилем легирования величины входной емкости C и крутизны S заметно изменяются с ростом входного напряжения, то в ПТ со специальным профилем легирования рациональный выбор профиля легирования определяет диапазон изменения входного напряжения, при котором величины C и S остаются практически постоянными (рис. 1), а также сами значения величин C и S.

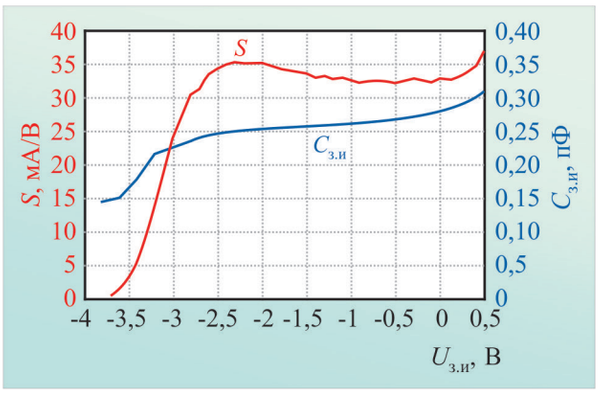


Рис. 1. Экспериментальные зависимости входной емкости и крутизны от напряжения на затворе для ПТ со специальным профилем легирования

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами экспериментальных исследований являлись ПТ с шириной и длиной затвора 300 и 0,5 мкм соответственно, с однородным (FET) и специальным (FET SP) профилями легирования, а также автогенераторы СВЧ-диапазона на их основе.

2(545).indd 24 03.06.2020 9:06:01

В работе проведены измерения прямым методом низкочастотных шумов вида $1/f$ для ПТ с однородным и специальным профилями легирования (рис. 2). СПМФШ ($А^2$/Гц) при различных значениях тока стока ПТ аппроксимировалась зависимостью [10]

$$S_I(f) = \frac{K_I I^{\alpha}}{f^{\gamma}} \qquad (1)$$

при $\alpha = 2$, $\gamma = 1$ с помощью метода наименьших квадратов.

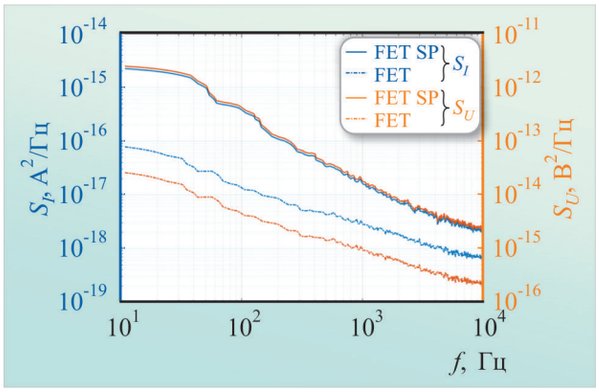


Рис. 2. Спектральная плотность тока шумов в цепи стока $S_I(f)$ и эквивалентного источника напряжения шумов в цепи затвора $S_U(f)$ (эксперимент, ток стока – 10 мА)

Для упрощения сравнения шумов транзисторов источники шума пересчитывались в эквивалентные источники шумового напряжения в цепи затвора ($В^2$/Гц):

$$S_U(f) = \frac{S_I(f)}{g^2},$$

где g – крутизна проходной ВАХ транзистора в рабочей точке.

Видно, что спектральная плотность $1/f$ шумов ПТ со специальным профилем легирования существенно превышает спектральную плотнсть $1/f$ шумов ПТ с однородным легированием.

Для диапазона частот 80 Гц…10 кГц был проведен анализ низкочастотных $1/f$ шумов. В соответствии с выражением (1) определены средние значения коэффициентов K_I при токах стока ПТ в диапазоне 10…50 мА. Для ПТ с однородным профилем легирования $K_I = 2 \cdot 10^{-11}$, для ПТ со специальным профилем легирования $K_I = 1{,}8 \cdot 10^{-10}$. Результаты НЧ шумовых измерений используются при моделировании СПМФШ автогенераторов, при этом наблюдается хорошее согласие с экспериментом.

Одним из параметров, позволяющих по результатам измерения шумов вида $1/f$ классифицировать приборы по потенциальной надежности как в процессе производства, так и на входном контроле у потребителя, является показатель формы спектра γ. Для шума вида $1/f^{\gamma}$ он может быть определен экспериментально как тангенс угла наклона спектральной плотности шума в зависимости от частоты, построенной в логарифмических координатах: $\gamma = \Delta \lg S / \Delta \lg f$. Экспери-ментально установлены критерии [10], в соответствии с которыми приборы со средним значением $\gamma > 1{,}4$ имеют параметрические отказы, а со значением $\gamma < 1{,}1$ имеют повышенную надежность.

Для исследуемых ПТ проведена оценка формы спектра. Для ПТ с однородным профилем

2(545).indd 25 03.06.2020 9:06:01

легирования $\gamma = 1{,}1$, а полученное для ПТ со специальным профилем легирования $\gamma = 1{,}2$ указывает на наличие в данных экземплярах ПТ большего количества скрытых дефектов. Поскольку на уровень низкочастотных шумов существенное влияние оказывает качество обработки поверхностей и изготовления всей структуры в целом, перспективность работы по дальнейшему улучшению ПТ со специальным профилем легирования очевидна.

Экспериментальные исследования СПМФШ проводились для автогенераторов с диэлектрическим резонатором, включенным в цепь затвора ПТ (рис. 3). Дополнительные меры по снижению фазового шума не принимались. Величина нагруженной добротности диэлектрического резонатора составляла 1500, частота – 8 ГГц. Установлено, что даже при собственных низкочастотных шумах нового транзистора, существенно превосходящих шумы обычного, выигрыш в фазовых шумах устройств на нём может составить около 10 дБ при отстройке 10 кГц.

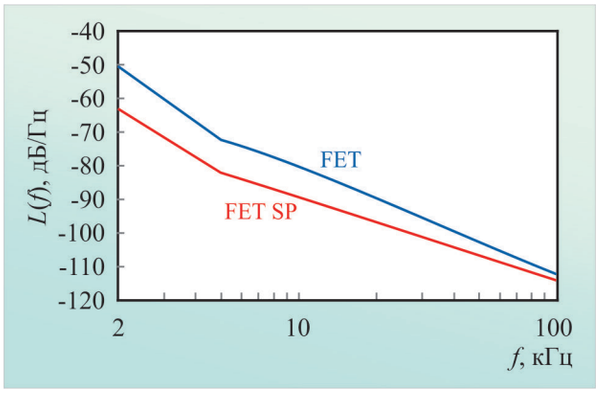


Рис. 3. Относительная СПМФШ автогенераторов на основе ПТ
с однородным (FET) и специальным (FET SP) профилями легирования

СПМФШ в зависимости от частоты отстройки $L(f)$ в окрестности частоты автоколебаний f_0 можно оценить аналитически, пользуясь модифицированной формулой Лисона [11–13]:

$$L(f) = 10\log\left(\frac{GFkT}{2P}\left[\left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2 \cdot \frac{f_a}{f^3} + \left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2 \cdot \frac{1}{f^2} + \frac{f_a}{f} + 1\right]\right), \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления активного элемента; F – шум-фактор активного элемента; k – постоянная Больцмана; T – температура; P – мощность, рассеиваемая на резонаторе; Q – нагруженная добротность резонатора; f_a – верхняя граничная частота области доминирования фликкер-шума в СПМФШ активного прибора (граничная фликкерная частота). Анализ выражения (2) позволяет оценить эффективность различных способов снижения фазового шума автогенератора. Рекомендации по снижению СПМФШ подробно описаны в работах [14, 15].

Выражение (2) также позволяет оценить влияние на СПМФШ величины K_I из (1), учитывая, что $f_a \sim K_I$. Так, из (2) следует, что в области доминирования фликкер-шума СПМФШ будет изменяться на 10 дБ при изменении величины K_I на порядок. Учитывая, что для ПТ с однородным профилем легирования $K_I = 2 \cdot 10^{-11}$, а для ПТ со специальным профилем легирования $K_I = 1{,}8 \cdot 10^{-10}$, существует потенциальная возможность дополнительного снижения СПМФШ автогенераторов на основе ПТ со специальным профилем легирования на величину порядка 10 дБ за счет совершенствования технологического процесса их изготовления.

2(545).indd 26 03.06.2020 9:06:01

Более точная оценка влияния K_I на СПМФШ проводилась путем моделирования характеристик автогенератора с учетом восстановленной нелинейной модели ПТ со специальным профилем легирования. Результаты моделирования зависимости СПМФШ при различных отстройках от несущей от величины коэффициента K_I приведены на рис. 4. Точками обозначены границы участков, где СПМФШ изменяется на 10 дБ при изменении величины K_I на порядок. Видно, что эта зависимость для отстройки 10 кГц сохраняется при снижении K_I до величины $3 \cdot 10^{-10}$, а дальнейшее снижение K_I не приводит к существенному уменьшению СПМФШ.

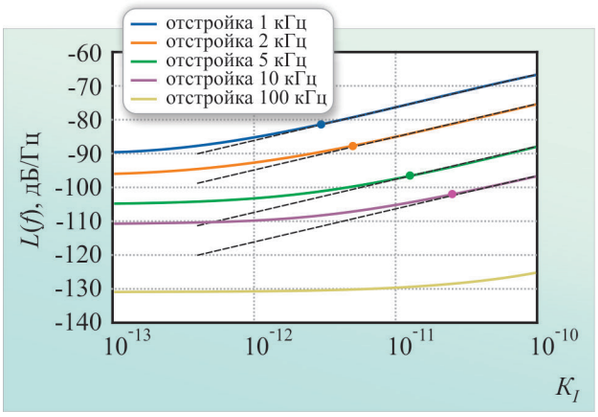


Рис. 4. Зависимость относительной СПМФШ от величины коэффициента K_I

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность снижения фазовых шумов автогенераторов на полевых транзисторах за счет использования специального профиля легирования. Приведены результаты использования данных приборов в автогенераторах СВЧ-диапазона, а также низкочастотные шумовые измерения транзисторов и результаты моделирования СПМФШ автогенераторов на их основе. Показано, что даже при собственных низкочастотных шумах нового транзистора, существенно превосходящих шумы обычного, выигрыш в фазовых шумах устройств на нём может составить около 10 дБ. Анализ результатов теоретических исследований указывает на возможность дополнительного снижения СПМФШ автогенераторов на основе ПТ со специальным профилем легирования на величину порядка 10 дБ при отстройке 10 кГц в случае снижения низкочастотного шума вида $1/f$ в ПТ со специальным профилем до уровня НЧ-шума ПТ с однородным легированием за счет отработки технологического процесса их изготовления. Это позволит автогенераторам на основе ПТ со специальным профилем легирования выйти на уровень аналогичных автогенераторов на биполярных транзисторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рыжков, А. В.** Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А. В. Рыжков, В. Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

2. **Горшелев, В. Д.** Основы проектирования радиоприемников / В. Д. Горшелев, З. Г. Красноцветова, Б. Ф. Федорцов. – Л.: Энергия, 1977. – 384 с.

3. **Ред, Э.** Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника / Э. Ред. – М.: Мир, 1990. – 256 с.

2(545).indd 27 03.06.2020 9:06:01

4. **Rohde, Ulrich L.** The design of modern microwave oscillators for wireless applications: theory and optimization / Ulrich L. Rohde, Ajay Kumar Poddar, Georg Böck . – John Wiley & Sons, 2005. – 544 p.

5. **Patent US 7365612 B2.** Low noise, hybrid tuned wideband voltage controlled oscillator / Ulrich L. Rohde, Ajay Kumar Poddar, Reimund Rebel et al.

6. **Patent US 7586381 B2.** User-definable, low cost, low phase hit and spectrally pure tunable oscillator / Ulrich L. Rohde, Ajay Kumar Poddar, Klaus Juergen Schoepf et al.

7. **Patent US 7605670 B2.** User-definable low cost, low noise and phase hit insensitive multi-octave-band tunable oscillator / Ulrich L. Rohde, Ajay Kumar Poddar, Klaus Juergen Schoepf et al.

8. **Богданов, Ю. М.** Полевой транзистор с низкой модуляционной чувствительностью для малошумящих СВЧ-устройств / Ю. М. Богданов, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 2. – С. 346 – 355.

9. **Williams, R. E.** Graded channel FET's improved linearity and noise figure / R. E. Williams, D. W. Shaw // IEEE Trans. Electron Devices. – 1978. – Vol. ED-25, No 6. – P. 600 – 605.

10. **Жигальский, Г. П.** Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах / Г. П. Жигальский. – М.: Физматлит, 2012. – 512 с.

11. **Leeson, D.** A simple model of feedback oscillator noise spectrum / D. Leeson // IEEE Proceedings. – February 1966. – Vol. 54, No 2. – P. 329 – 332.

12. **Parzen, B.** Clarification and a generalized restatement of leeson's oscillator noise model / B. Parzen // IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, 1988. – P. 348 –351.

13. **Nallatamby, J.** Extension of the leeson formula to phase noise calculation in transistor oscillators with complex tanks / J. Nallatamby, M. Prigent, M. Camiade and J. Obregon // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – March 2003. – Vol. 51, No 3. – P. 690 –696.

14. **Бельчиков, С.** Фазовый шум: как спуститься ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы / С. Бельчиков // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 139 – 146.

15. **Ченакин, А.** Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы / А. Ченакин // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 4. – С. 52 – 61.

Статья поступила 6 марта 2020 г.

2(545).indd 28 03.06.2020 9:06:01

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ ПЛАТИНЫ В РАСПЛАВЛЕННЫХ ПРИПОЯХ. СВОЙСТВА СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАТИНЫ РАСПЛАВЛЕННЫМ ЭВТЕКТИЧЕСКИМ ПРИПОЕМ

В. В. Побединский[1, 2], Н. В. Рогозин[1], Е. Н. Бормонтов[2]

[1]*АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж*

[2]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»*

Платина как химический элемент не подвержена окислению и имеет медленную скорость реакции с широко применяемыми в микроэлектронике припоями на основе Pb–Sn, Sn–Cu и Sn–Ag–Cu, что позволяет заменить одним слоем платины два слоя металлизации контактных площадок под припойные шариковые выводы на кристалле для монтажа методом flip-chip: слой защиты от окисления и диффузионный барьерный слой. В статье исследована способность платины к смачиванию припоем, а также скорость растворения платины в припое на основе олова в сравнении с никелем, самым распространённым в настоящее время материалом для барьерных слоев.

КС: платина, никель, припой, смачивание припоем, растворяемость

INVESTIGATION OF KINETICS OF PLATINUM DISSOLUTION IN MOLTEN SOLDERS. PROPERTIES OF PLATINUM SURFACE WETTABILITY BY MOLTEN EUTECTIC SOLDER

V. V. Pobedinsky[1, 2], N. V. Rogozin[1], E. N. Bormontov[2]

[1]*Joint Stock Company «Scientific Research Institute of Electronics», Voronezh*

[2]*Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Voronezh State University»*

Platinum as a chemical element is not susceptible to oxidation and has a slow reaction rate with solders based on Pb–Sn, Sn–Cu widely used in microelectronics and Sn–Ag–Cu that allows it to replace two layers of metallization in solder balls contact pads with only one platinum layer on semiconductor die for flip-chip surface mount method: oxidation protection layer and diffusion barrier layer. Platinum solder wetting ability and tin-based solder dissolution rate of platinum in comparison with nickel – the most common material for barrier layers were investigated in this article.

Keywords: platinum, nickel, solder, wetting with solder, solubility

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной микроэлектронике контактные площадки полупроводниковых кристаллов под пайку имеют многослойную структуру, которая обычно включает в себя адгезионный, барьерный, смачивающий и защитный слои. Примером такой многослойной структуры является трёхслой-

2(545).indd 29 03.06.2020 9:06:02

ная структура Au/Ni/Cu, где слой золота Au используется для защиты от окисления, слой никеля Ni – диффузионный барьерный слой, а медь Cu – материал для смачивания припоем [1]. Использование многослойной структуры контактных площадок приводит не только к увеличению стоимости производства конечных изделий, но и увеличивает сложность их проектирования и изготовления. Повышение сложности приводит к увеличению проблем с надёжностью, что в свою очередь ведет к необходимости упрощения многослойной металлической структуры. Альтернативой применения многослойной структуры под пайку может выступать металлизированная структура на основе платины Pt.

Платина как химический элемент не подвержена окислению и имеет медленную скорость реакции с припоями на основе Pb–Sn, Sn–Cu и Sn–Ag–Cu [2–4] и на основе чистого олова Sn [5]. Кроме того, температура плавления платины составляет 1769 °C, а отжиг происходит при температуре (1200±20) °C, что превосходит свойства широко применяемых под пайку материалов [6]. Таким образом, один слой Pt-металлизации может выполнять функции как защищающего от окисления слоя, так и диффузионного барьерного слоя. Значит, применение платиновых контактных площадок под припойные шариковые выводы для монтажа кристаллов методом flip-chip [3] технически и экономически оправдано.

Для дальнейшего исследования возможности применения Pt в качестве металлизации контактных площадок, во-первых, рассмотрим кинетику процесса растворения Pt в расплавленных припоях. Данное исследование интересно тем, что в ходе сборочных операций полупроводниковых приборов паяные соединения должны проходить несколько циклов оплавления. Во-вторых, для получения надежных паяных соединений необходимо исследование свойств смачиваемости поверхности Pt расплавленным припоем. Данные о кинетике процесса растворения Pt в расплавленных припоях были получены путем взаимодействия платины с чистым оловом. Также были сравнены данные о кинетике процессов растворения Ni в расплавленном припое, исследованы свойства смачиваемости поверхности Pt расплавленным эвтектическим припоем SAC [7, 8] с использованием метода баланса смачиваемости [9].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения эксперимента по исследованию кинетики процессов растворения Ni и Pt в расплавленных припоях были подготовлены ванны с расплавленным припоем на основе 99,99 % Sn. Каждая ванна с припоем содержала 10 г Sn, помещённого в сосуд с внутренним диаметром 30 мм. Для наблюдения за реакцией взаимодействия расплавленного припоя в ваннах были выбраны следующие образцы:

– диски из никеля (99,99 % Ni) диаметром 15 мм;

– образцы фольги из платины (99,99 % Pt) размерами 10×20 мм и толщиной 0,1 мм.

Перед проведением эксперимента каждый образец был отполирован со всех сторон на прецизионной шлифовально-полировальной системе MultiPrep с использованием абразива на основе алмазной крошки с величиной зерна в 5 мкм. После чего измерялась исходная толщина каждого образца с помощью механического микрометра с точностью в 1 мкм, проведено 10 замеров толщины каждого образца на разных участках поверхности, фиксировалась средняя величина замеров. Образцы подвергались отмывке в ацетоне и травлению в 50%-ном растворе хлористого водорода HCl–H_2O в течение 30 с, а затем – флюсованию в канифоли. Каждый образец помещался в ванну с расплавленным оловом. Для эксперимента были выбраны следующие

2(545).indd 30 03.06.2020 9:06:02

температуры ванны с расплавленным оловом: 240, 260, 280 и 300 °С. Продолжительность нахождения образцов варьировалась от 1 до 20 ч, после выдержки образцов в ванне в течение заданного времени ванна вместе с образцами охлаждалась до комнатной температуры. Кристаллизованное олово с образцами извлекали из ванн, монтировали на адгезионную пленку, разделяли на части с помощью дисковой резки DISCO DAD 3350 и полировали на прецизионной шлифовально-полировальной системе MultiPrep для дальнейшего изучения.

Для исследования свойств смачиваемости поверхности расплавленным эвтектическим припоем SAC305 использовались образцы Ni и Pt размерами 5×10 мм и толщиной 0,1 мм с содержанием никеля и платины соответственно 99,99 %. Аналогично с первым экспериментом тестовые образцы полировались, обезжиривались в 50%-ном растворе хлористого водорода $HCl–H_2O$ в течение 30 с, а затем подвергались флюсованию. Для каждого образца готовилась отдельная ванна с расплавленным эвтектическим припоем SAC, температура припоя поддерживалась в пределах 230 °С. Для флюсования образцов использовалось 2 типа флюса: водорастворимый флюс и канифоль. Исследование проводилось при следующих режимах: скорость погружения образцов в расплавленный припой – 5 мм/с, глубина погружения – 5 мм, время выдержки в припое – 10 с. Свойства смачиваемости исследованы с помощью метода баланса смачиваемости.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ НИКЕЛЯ И ПЛАТИНЫ В РАСПЛАВЛЕННЫХ ПРИПОЯХ

Полученные зависимости растворенной толщины образцов Ni и Pt от времени выдержки в ванне с расплавленным оловом при температуре 240 °С (рис.1) демонстрируют меньшую скорость растворения платины в расплавленном олове по сравнению с никелем, что подтверждается во всем исследуемом диапазоне температур 240…300 °С (рис. 2).

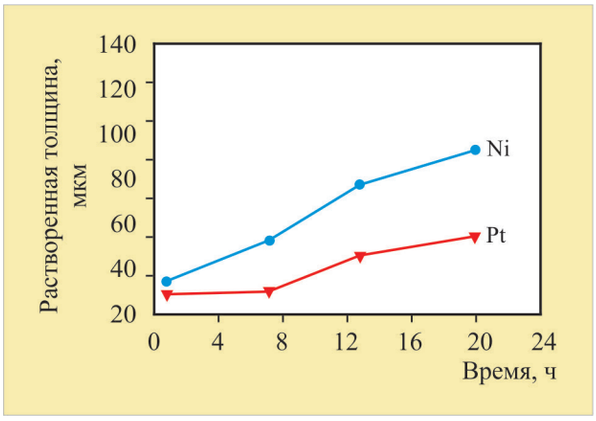


Рис. 1. Зависимости растворяемости образцов Pt и Ni в ванне с расплавленным оловом при температуре 240 °С

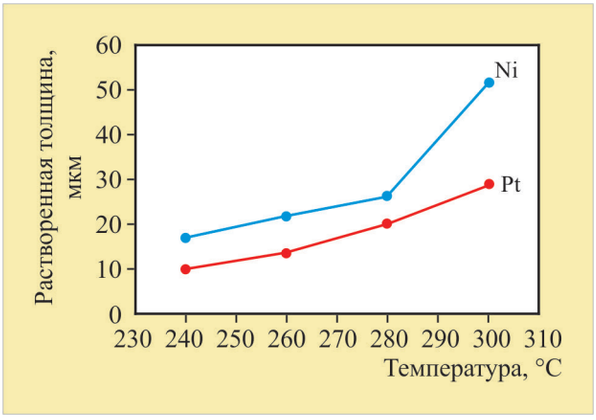


Рис. 2. Зависимости растворяемости образцов Pt и Ni в ванне с расплавленным оловом в течение 60 мин с момента начала растворения

Данные результаты позволяют утверждать, что при исследуемых температурных режимах Pt-слой в составе металлизации контактных площадок полупроводниковых кристаллов под припойные шариковые вывода или в качестве материала покрытия поверхности может прослужить дольше, чем слой Ni той же толщины. Таким образом, в случае, когда скорость

2(545).indd 31 03.06.2020 9:06:02

растворения диффузионного барьерного слоя важна, применение Pt в качестве материала диффузионного барьерного слоя имеет преимущества по сравнению с аналогичным слоем Ni. Обобщенная кинетика процесса растворения Pt в расплавленном олове в выбранном диапазоне температур 240…300 °С и в диапазоне выдержки 1…20 ч представлена на рис. 3.

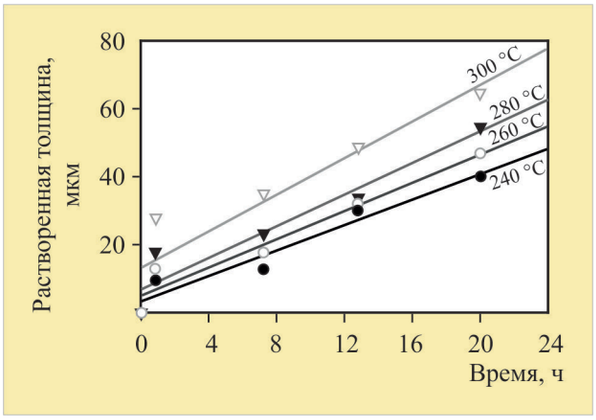


Рис. 3. Растворяемость Pt-образцов от времени при различных температурах

Кинетика процесса, по результатам эксперимента, описывается не параболической, а линейной зависимостью, что позволяет описать зависимость толщины образцов от времени реакции с расплавленным оловом уравнением

$$d = kt, \tag{1}$$

где d – утраченная, растворенная толщина Pt в результате реакции; t – время взаимодействия образца с расплавленным оловом; k – коэффициент роста. По графику Аррениуса (рис. 4) определена энергия активации k, которая составляет 16 кДж/моль.

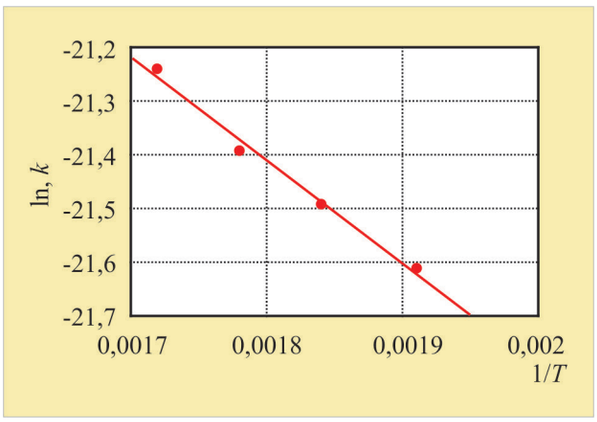


Рис. 4. График Аррениуса скорости растворения Pt-образца от температуры

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБРАЗЦОВ ПЛАТИНЫ И НИКЕЛЯ РАСПЛАВЛЕННЫМ ЭВТЕКТИЧЕСКИМ ПРИПОЕМ SAC

Перед началом эксперимента усилие, определяемое по балансу, было выставлено на ноль – исследуемый образец свободно удерживался. С помощью кривой смачиваемости может быть оп-

2(545).indd 32 03.06.2020 9:06:02

ределено четыре типа данных: время смачивания t_0, сила смачивания F_m, выталкивающее усилие F_w, остаточное усилие F_d, однако время смачивания и усилие смачивания – ключевые показатели для измерения смачиваемости. Согласно кривой смачиваемости поверхности образцов платины в эвтектическом припое SAC при температуре 230 °C с использованием водорастворимого флюса (рис. 5), время смачивания, определяемое как время, необходимое для возврата к нулевой силе смачивания, составляет 1,53 с.

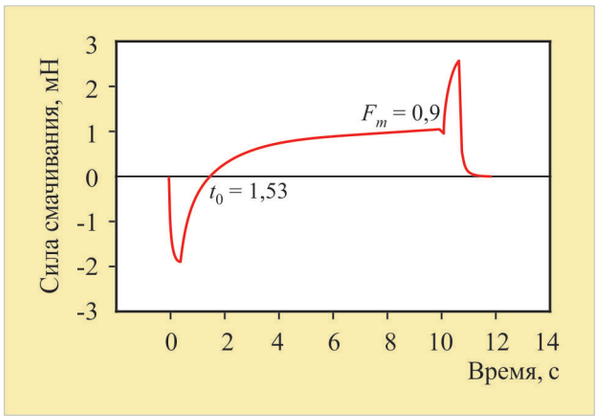


Рис. 5. Кривая смачиваемости поверхности Pt эвтектическим припоем SAC при температуре 230 °C с использованием водорастворимого флюса

Чем меньше время смачивания, тем быстрее распространяется припой по образцу, что говорит о хорошей смачиваемости и способности образца к пайке. Сила смачивания, представленная на рис. 5, определяется как максимальное значение пологого участка кривой смачиваемости и составляет 0,9 мН. По аналогии со временем смачивания – чем больше сила смачивания, тем лучше смачиваемость и способность образца к пайке. На рис. 6 приведены средние значения времени смачивания образцов Ni и Pt в эвтектическом припое SAC при температуре 230 °C в случае флюсования образцов водорастворимым флюсом и флюсом на основе канифоли.

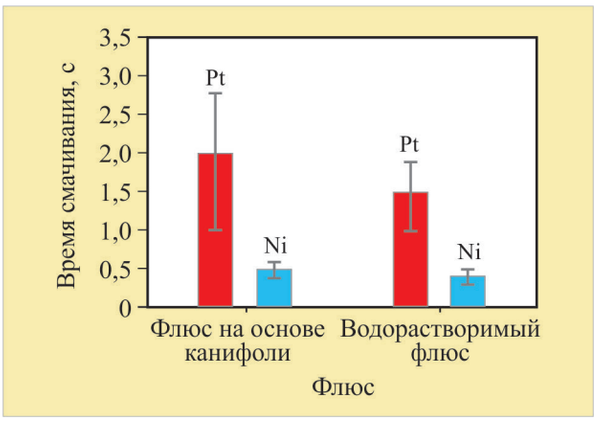


Рис. 6. Средние значения времени смачивания образцов Ni и Pt эвтектическим припоем SAC при температуре 230 °C в случае флюсования образцов водорастворимым флюсом и флюсом на основе канифоли

2(545).indd 33 03.06.2020 9:06:02

Так как меньшее время смачивания соответствует лучшей смачиваемости и хорошей способности к пайке, то из гистограмм, представленных на рис. 6, можно сделать вывод, что образцы Ni показывают лучшую смачиваемость, чем образцы Pt. Несмотря на то что время смачивания образцов Pt меньше, чем у образцов Ni, оно остаётся приемлемым и находится близко к допустимому в промышленности диапазону; промышленный стандарт по времени смачиваемости – менее 1 с [9]. Необходимо учесть, что используемые в эксперименте флюсы предназначены для конкретной задачи – пайки Ni и Cu. При разработке и внедрении новых типов флюса, оптимизированных под пайку Pt, возможно удастся уменьшить время смачивания Pt припоем. На рис. 7 показаны средние значения силы смачивания для образцов Ni и Pt в эвтектическом припое SAC при температуре 230 °C в случае флюсования образцов водорастворимым флюсом, а также флюсом на основе канифоли.

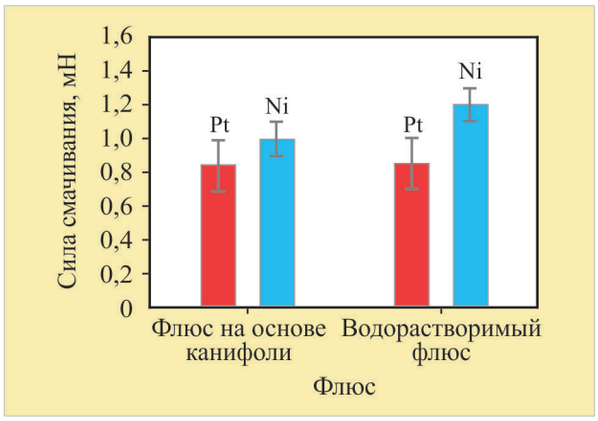


Рис. 7. Средние значения силы смачивания для образцов Ni и Pt эвтектическим припоем SAC при температуре 230 °C в случае флюсования образцов водорастворимым флюсом и флюсом на основе канифоли

На гистограмме видно, что образцы Ni показывают немного большую силу смачивания, чем образцы Pt. Но для практического применения эта разница не играет существенной роли, так как оба значения силы смачивания превосходят допустимые для промышленного применения. Стоит отметить, что применение водорастворимого флюса для определения времени и силы смачивания привело к лучшим результатам, чем флюса на основе канифоли, так как в его состав входят кислотные компоненты.

Результаты исследования кинетики процессов растворения платины в расплавленном олове относятся только к области границы раздела Pt–Sn, где олово уже насыщено платиной. Для исследования кинетики процессов растворения в областях, удалённых от границы раздела Pt–Sn, необходимо проводить отдельные эксперименты. Например, в качестве образцов можно использовать тонкую Pt-проволоку, а масса ванны с припоем может выбираться таким образом, что припой всегда будет далёк от насыщения платиной, даже если весь объём Pt-проволоки растворится в объёме припоя.

Энергия активации, равная 16 кДж/моль, установленная в нашем исследовании, является сравнительно меньшей величиной, чем описывается в аналогичных экспериментах. В литературе говорится о значении 85,4 кДж/моль для растворения Pt в припое ПОС-60 в диапазоне температур 485…534 °C [2]. Известны исследования [10], в которых приводится значение энергии

2(545).indd 34 03.06.2020 9:06:02

активации платины 60 кДж/моль для растворения платины в припое ПОС-60 в диапазоне температур 200…320 °С. В эксперименте [10] тонкий слой припоя ПОС-60 (100 мкм) укладывается на поверхность платиновой пластинки. Объём припоя небольшой, и он довольно быстро насыщается Pt, в результате чего выявляется параболическая характеристика кинетики процесса растворения платины в расплавленном припое. Из вышесказанного становится ясно, что условия проведения экспериментов слишком важны и не следует сводить результаты экспериментов, проведённых при разных условиях. Во всех предыдущих экспериментах Pt исследовалась сама по себе. В наших экспериментах Pt исследуется параллельно с Ni при одних и тех же условиях, это подтверждает, что кинетика процесса растворения Pt в расплавленном припое при прочих равных условиях лучше, чем у Ni, с точки зрения надёжности и долговечности паяных соединений на контактных площадках с металлизацией под припойные шариковые выводы.

Эксперимент по исследованию смачиваемости образцов Pt эвтектическим припоем SAC305 показал не такие хорошие результаты, как у образцов Ni, при флюсовании водорастворимым флюсом и флюсом на основе канифоли. Однако, как отмечено в литературе [11–14], характеристики смачивания зависят не только от материала и качества смачиваемой припоем поверхности, но и от типа применяемого флюса. Часто при определении свойств смачиваемости поверхности образцов различными припоями использование разных флюсов де-факто эквивалентно использованию различных материалов самих образцов, так как межфазное поверхностное натяжение варьируется в зависимости от типа применяемого флюса [11, 13]. Таким образом, для достижения хорошей смачиваемости тип применяемого флюса не менее важен, чем сам исследуемый образец. Следовательно, если применить специальный флюс для пайки Pt, то характеристики смачиваемости могут быть лучше, чем те, которые получены в результате нашего эксперимента.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам эксперимента по исследованию свойств смачиваемости поверхностей образцов из платины и никеля расплавленным эвтектическим припоем SAC305, установлено, что время смачивания Pt больше, чем у Ni, тем не менее, характеристики смачиваемости Pt являются приемлемыми для применения Pt в электронной промышленности в качестве материала металлизации контактных площадок под припойные шариковые выводы полупроводниковых кристаллов/пластин. При прочих равных условиях скорость растворения Pt в расплавленном Sn в диапазоне температур 240…300 °С на 50 % ниже, чем у Ni. Установлено, что кинетика растворения Pt в расплавленном олове имеет линейную зависимость с энергией активации в 16 кДж/моль.

Учитывая физико-химические свойства платины, можно говорить, что единственный слой Pt является эффективным слоем для использования в качестве металлизации контактных площадок под припойные шариковые выводы полупроводниковых кристаллов/пластин и может заменить оба слоя – диффузионный барьерный слой и слой защиты от окисления, а также может быть использован в качестве материала финишного покрытия под пайку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зенин, В. В**. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий / В. В. Зенин, В. А. Емельянов, В. Л. Ланин. – Минск: Интегралполиграф, 2015. – С. 380.

2. **Miagher, B.** Compound growth in platinum/tin-lead solder diffusion couples / B. Miagher, D. Schwarez, M. Ohreng // Journal of Materials Science. – 1996. – Vol. 31, No 20. – P. 5479 – 5486.

2(545).indd 35 03.06.2020 9:06:02

3. **Kulojärvi, K.** Effect of dissolution and intermetallic formation on the reliability of FC joints / K. Kulojärvi, V. Vuorinen, J. Kivilahti // Microelectronics International. – 1998. – Vol. 15, No 2. – P. 20 – 24.

4. **Bannert, P.** Bleifreies loten in der elektroindus trie / P. Bannert // Bracke. – 2001. – No 1. – P. 22 – 23.

5. **Huang, M. L.** Morphology and growth kinetics of intermetallic compounds in solid-state interfacial reaction of electroless Ni–P with Sn-based lead-free solders / M. L. Huang, T. Loeher, D. Manessis, L. Boettcher, A. Ostmann, H. Reichl // Journal of Electronic Materials. – 2006. – Vol. 35, No 1. – P. 181 – 188.

6. **ГОСТ 13498-2010.** Платина и сплавы на ее основе. Марки. – Введ. 2012–04–06. – М.: Стандартинформ, 2012. – С. 7.

7. **ОСТ 4Г 0.033.200.** Припои и флюсы для пайки, припойные пасты. Марки, состав, свойства и область применения (редакция 1-78). – Введ. 1980–01–01. – М., 2011. – С. 131.

8. Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications: IPC J-STD-006 with Amendments 1&2. – October 2009 IPC: – P. 21.

9. Environmental testing. Part 2-54: Tests - Test Ta: Solderability testing of electronic components by the wetting balance method: IEC 60068-2-54 – 04.05.2006. – TC 91. – P. 21.

10. **Kuhmann, J.** Pt thin-film metallization for FC-bonding using SnPb 60/40 solder bump metallurgy / J. Kuhmann, C.-H. Chiang, P. Harde, F. Reier, W. Oesterle, I. Urban // Materials Science and Engineering: A. – 1998. – No 1–2. – P. 22 – 25.

11. **Vianco, P. T.** Proceedings of the NEPCON West 1992 Conference, Anaheim, CA / P. T. Vianco, F. M. Hosking and J. A. Rejent // National Electronic and Production Conference, Caners Exposition Group, Des Plaines, IL. – 1992. – P. 1730 – 1738.

12. **Lee, S.-W.** Reactive wetting between molten Sn–Bi and Ni substrate / S.-W. Lee, C.-M. Chang // Journal of Electronic Materials. – 2003. – No 3. – P. 117 – 122.

13. **Wong, D. S.** Determination of reactive wetting properties of Sn, Sn–Cu, Sn–Ag and Sn–Pb alloys using a wetting balance technique / D. S. Wong, H.-F. Hsu // Journal of Materials Research. – 2003. – No 6. – P. 1420 – 1428.

14. **Wang, S. J.** Coupling effect in Pt/Sn/Cu sandwich solder joint structures / S. J. Wang, C. Y. Liu // Acta Materialia. – 2007. – No 10. – P. 3327 – 3335.

Статья поступила 27 марта 2020 г.

2(545).indd 36 03.06.2020 9:06:03

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СПУТНИКОВОЙ ЛБВ *Ka*-ДИАПАЗОНА С ВЫСОКИМ КПД И ОХЛАЖДЕНИЕМ КОЛЛЕКТОРА ИЗЛУЧЕНИЕМ

И. П. Медведков[1], **С. О. Семенов**[1, 2], **В. И. Роговин**[1, 2]

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

[2]*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет»*

Проведено проектирование ЛБВ *Ka*-диапазона с выходной мощностью 135 Вт и охлаждением четырехступенчатого коллектора излучением с техническим КПД 60 %. Рассмотрены режимы работы коллектора при различных уровнях входного сигнала и возможности улучшения его характеристик за счет снижения вторичной эмиссии и применения поперечного магнитного поля. Тепловые расчеты позволили определить уровень температур электродов коллектора и радиатора при различных вариантах солнечного освещения.

КС: ЛБВ Ка-диапазона, многоступенчатый коллектор, технический КПД, охлаждение излучением

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF *Ka*-BAND SATELLITE TWT WITH HIGH EFFICIENCY AND COOLING THE COLLECTOR BY RADIATION

I. P. Medvedkov[1], **S. O. Semenov**[1, 2], **V. I. Rogovin**[1, 2]

[1]*JSC «RPC «Almaz», Saratov*

[2]*Saratov State University*

A *Ka*-band TWT with an output power of 135 W and cooling of a four-stage collector by radiation with a technical efficiency of 60 % was designed. The collector modes of operation at various levels of input signal and the possibilities of improving its characteristics due to reducing the secondary emission and using a transverse magnetic field were considered. Thermal calculations made it possible to determine the temperature level of the collector and radiator electrodes in various variants of solar lighting.

Keywords: Ka-band TWT, multi-stage collector, technical efficiency, cooling by radiation

1. ВВЕДЕНИЕ

ЛБВ традиционно применяются в ретрансляторах спутников связи, и, пока их использование будет продолжаться, задача достижения максимального КПД приборов также будет оставаться актуальной. Уровень КПД ЛБВ в основном определяется характеристиками двух узлов: замедляющей системы и коллектора.

Для достижения высокого технического КПД ЛБВ в [1, 2] было предложено проводить оптимизацию параметров замедляющей системы (ЗС) непосредственно по этому параметру с учетом многоступенчатой рекуперации и показано, что полученный закон изменения шага спиральной ЗС отличается от закона, оптимального для достижения максимального электронного КПД, меньшими значениями параметра несинхронности на выходном участке ЗС и соответственно меньшими значениями электронного КПД.

2(545).indd 37 03.06.2020 9:06:03

Фактором, определяющим предельно возможный технический КПД ЛБВ, является отношение высокочастотной (ВЧ) выходной мощности ЛБВ к мощности пучка, преобразованной в ВЧ-энергию, которая, помимо выходной мощности, включает и величину ВЧ-потерь в ЗС и ВЧ-гармоники. Это отношение обычно называют КПД ЗС [3]. В [3] также было показано, что максимум технического КПД ЛБВ достигается на длине, меньшей длины насыщения выходной мощности, когда при меньшем электронном КПД значение КПД ЗС больше за счет меньших ВЧ-потерь, интервал энергий электронов в отработанном пучке у́же и минимальная энергия электронов больше, чем на длине насыщения выходной мощности, что позволяет при том же числе ступеней коллектора получить больший КПД коллектора и соответственно больший технический КПД. Результаты целого ряда исследований показывают, что для достижения высокого технического КПД необходимы одновременно как высокие значения электронного КПД и КПД ЗС, так и высокий КПД коллектора, достижение которого не менее трудно.

Необходимо отметить, что целью разработки космической ЛБВ является получение заданной выходной мощности при минимальной потребляемой мощности, а технический КПД является лишь результатом отношения двух величин. Любое превышение выходной мощности относительно требуемой при постоянной мощности пучка будет также увеличивать и потребляемую мощность. Поэтому и целью оптимизации всех узлов ЛБВ должна являться минимальная потребляемая мощность при фиксированной выходной мощности.

Другим способом повышения эффективности, но уже не самой ЛБВ, а ретранслятора в целом является отвод тепла от самого теплонагруженного элемента ЛБВ – коллектора – излучением в окружающее пространство, что позволяет упростить, уменьшить массу и габариты системы термостабилизации спутника. Из всех предлагавшихся ранее конструкций отвода тепла излучением от коллектора [4] в современных ЛБВ используется самая технологичная – передача тепла от электродов коллектора на внешний радиатор осуществляется за счет теплопроводности и далее с радиатора излучением в окружающее пространство.

Целью настоящей работы является расчет спиральной ЛБВ *Ka*-диапазона с выходной мощностью 135 Вт, высоким КПД и коллектором с радиационным охлаждением.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В результате проведенных расчетов была определена конструкция ЛБВ с неоднородной спиральной ЗС, поперечное сечение которой приведено на рис. 1. Стержни из BeO имеют Т-образное сечение. График изменения параметра несинхронности по длине показан на рис. 2, *а*. Расчетный электронный КПД в режиме насыщения выходной мощности составил 20,6 %, выходная мощность – 135,2 Вт, коэффициент усиления равен 55,5 дБ, ВЧ-потери – 3,88 %, КПД ЗС – 84,16 %.

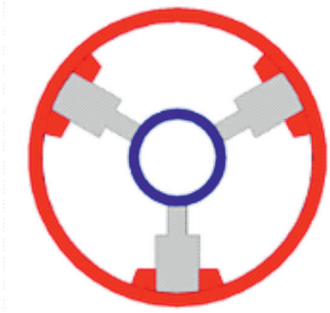
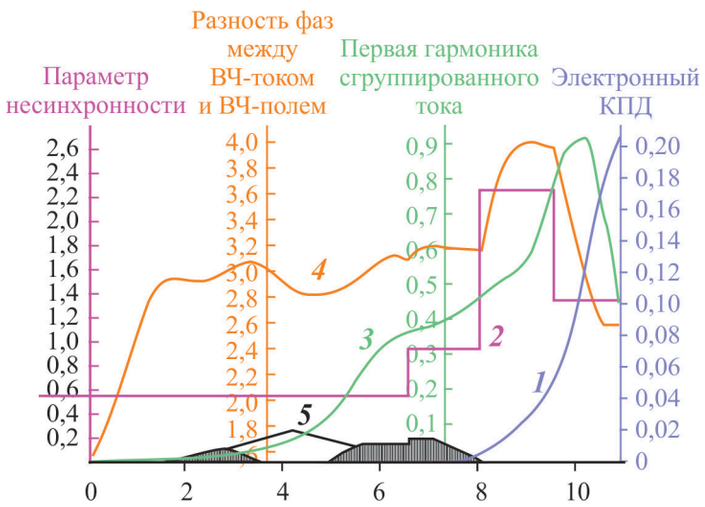
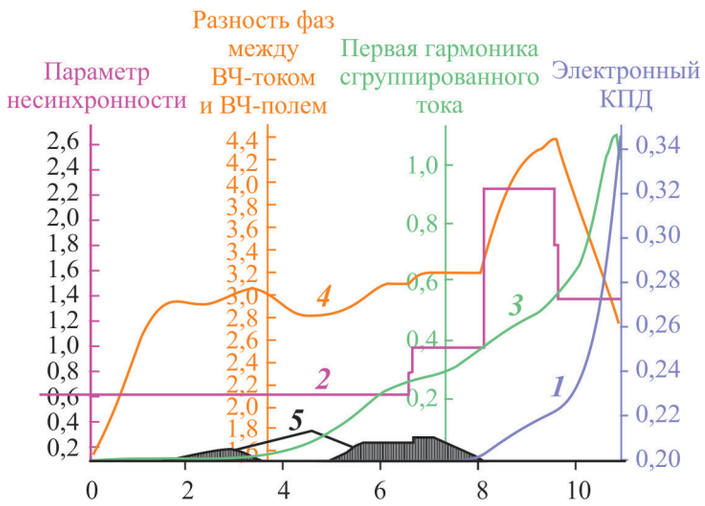


Рис. 1. Поперечное сечение замедляющей системы

2(545).indd 38 03.06.2020 9:06:03



а)



б)

Рис. 2. Зависимости параметров взаимодействия по длине ЗС:
1 – электронный КПД; *2* – параметр несинхронности; *3* – первая гармоника сгруппированного тока; *4* – разность фаз между ВЧ-током и ВЧ-полем; *5* – положение поглотителей; *а* – $P_{вх} = P_{вх.нас}$; *б* – $P_{вх}/P_{вх.нас}$ = -3 дБ

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОГО КОЛЛЕКТОРА

Поскольку величина входной мощности ЛБВ может изменяться в интервале от +6 дБ относительно режима насыщения выходной мощности до нулевого значения, т. е. при $P_{вх}$, больших $P_{вх.нас}$, ЛБВ работает в режиме перенасыщения, были проведены расчеты характеристик ЛБВ при различных уровнях входной мощности. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

2(545).indd 39 03.06.2020 9:06:03

Таблица 1

Расчетные характеристики ЛБВ

Параметр	Отношение входной мощности к входной мощности насыщения, дБ							
	-15	-12	-9	-6	-3	0	+3	+6
Выходная мощность, Вт	1,4	3,3	8	28,2	95,9	135,2	85,9	9,6
Потребляемая мощность, Вт	72,1	72,1	72,1	99,4	161,3	206,5	162,3	95,1
Технический КПД, %	2	4,6	12,1	28,5	59,4	65,5	53	10,1

Интегральные распределения электронов по энергиям в отработанном пучке показаны на рис. 3. Оптимальные потенциалы ступеней четырехступенчатого коллектора, выбранные по критерию минимума максимальной потребляемой мощности во всех режимах, составили 3254, 2242, 1572 и 759 В.

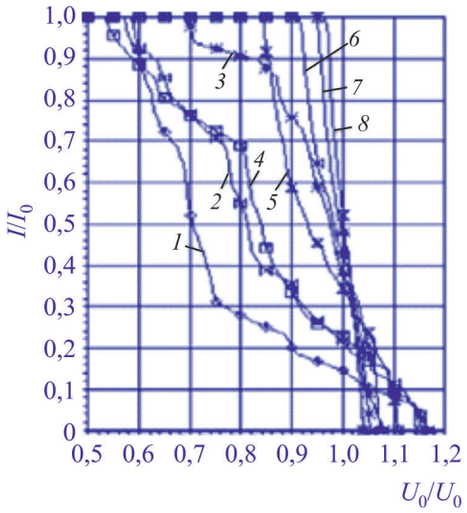


Рис. 3. Интегральные распределения электронов по энергиям:
1 – $P_{вх} = P_{вх.нас}$; *2* – $P_{вх}/P_{вх.нас}$ = 3 дБ; *3* – 6 дБ; *4* – -3 дБ; *5* – -6 дБ; *6* – -9 дБ; *7* – -12 дБ; *8* – -15 дБ

Потребляемая мощность имеет максимальное значение 206,5 Вт без учета накала катода в режиме насыщения выходной мощности и уменьшается при изменении входной мощности. Тепловая мощность, выделяемая в коллекторе и определенная по распределениям электронов по энергиям в режиме насыщения, минимальна.

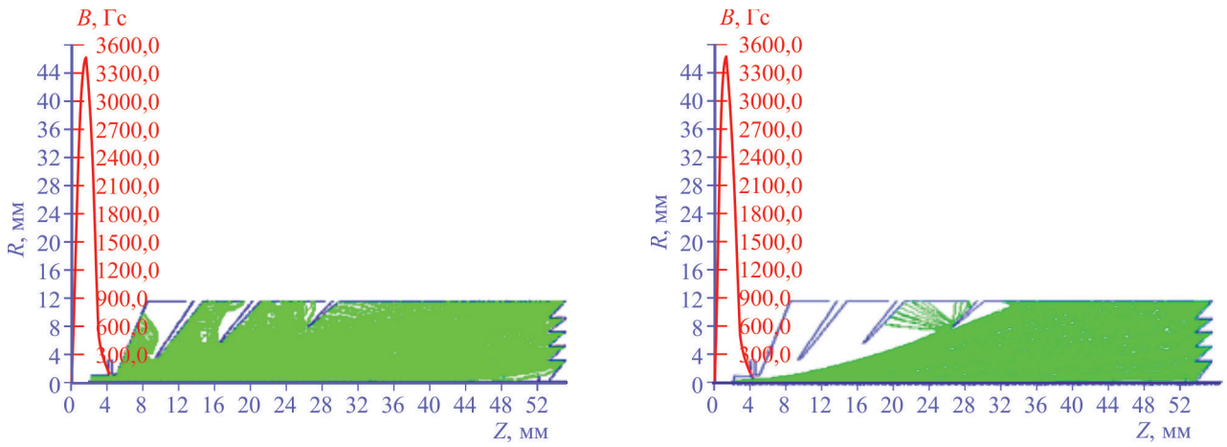
Анализ расчетных кривых на рис. 3 показал, что в режиме насыщения минимальная энергия электронов в отработанном пучке составила 0,58 от ускоряющего напряжения, а в режиме $P_{вх}/P_{вх.нас}$ = -3 дБ – 0,54, что и определило выбор потенциала первой ступени. В этом режиме первая гармоника сгруппированного тока достигает максимального значения в области вывода энергии (рис. 2, *б*) и поле сгустка дополнительно замедляет самые медленные электроны, находящиеся в задней части сгустка. Подробно механизм такого воздействия рассмотрен в [5].

2(545).indd 40 03.06.2020 9:06:03

Анализ поведения первой гармоники тока в этом режиме в области дрейфа пучка в предколлекторе показал, что происходит интенсивная разгруппировка сгустка и величина гармоники на входе в коллектор уменьшается до 0,5. В других режимах по $P_{вх}$ в области дрейфа также происходит уменьшение первой гармоники.

Знание величины группировки пучка на входе в коллектор необходимо для выбора метода расчета характеристик коллектора. Т. к. во всех режимах работы ЛБВ величина первой гармоники сгруппированного тока на входе в коллектор имеет небольшую величину и поперечные и продольные размеры разработанного коллектора во много раз превышают длину замедленной ВЧ-волны, в соответствии с результатами работы [6] расчет коллектора может проводиться с использованием стационарной модели электронного пучка.

На рис. 4, *а* показана конфигурация разработанного четырехступенчатого коллектора с осесимметричными электродами и траектории крупных частиц в режиме насыщения выходной мощности. При коэффициенте вторичной электронной эмиссии, равном 1, что соответствует медным электродам коллектора без специальной обработки, величина обратного потока из коллектора составила 1,3 мА, потребляемая мощность ЛБВ без учета накала катода – 232,2 Вт и технический КПД – 58,1 % (табл. 2). Учет мощности накала 3 Вт уменьшает КПД ЛБВ на 0,7 % по абсолютной величине. Уменьшение коэффициента вторичной эмиссии материала электродов позволит при использовании этого же коллектора увеличить технический КПД ЛБВ до 60 %. Во всех рассмотренных случаях расчетный КПД коллектора составил от 88 до 88,7 %. Тепловая нагрузка на коллектор изменялась от 72,2 до 62,4 Вт.



а) *б*)

Рис. 4. Конфигурация четырехступенчатого коллектора, распределение магнитного поля и траектории первичных и вторичных частиц в режиме насыщения выходной мощности (*а*) и в режиме без входного сигнала (*б*)

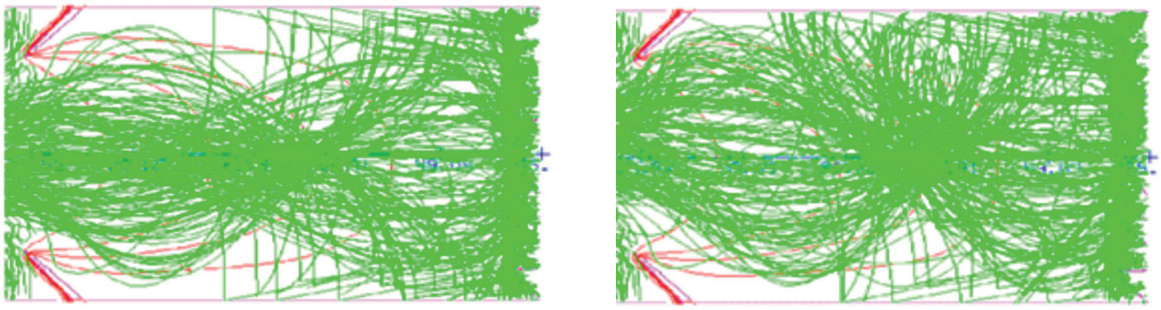
Таблица 2

Коэффициент вторичной эмиссии	Потребляемая мощность, Вт	Технический КПД, %	Тепловая мощность, Вт
1	232,2	58,1	72,2
0,5	225,2	60,0	64,4
0,3	223	60,6	62,4

2(545).indd 41 03.06.2020 9:06:03

В режиме без входного сигнала практически весь пучок оседает в четвертой ступени коллектора (рис. 4, *б*), тепловая мощность на которую в этом режиме максимальна, и соответственно размеры ступени были выбраны из этих соображений.

Анализ траекторий крупных частиц в коллекторе в режиме насыщения выходной мощности показал, что без учета влияния вторичной эмиссии конфигурация электродов обеспечивает сортировку частиц по энергиям, близкую к предельно возможной. Величина потребляемой мощности составила всего 220,8 Вт, что незначительно больше определенной по кривой на рис. 3 величины 206,5 Вт. Уменьшение КПД коллектора связано с выходом вторичных частиц с входных частей ступеней, уменьшить число которых можно только за счет снижения коэффициента вторичной эмиссии, а также с выходом вторичных электронов с цилиндрической части и дна четвертой ступени. Вторичные частицы, выходящие с указанных поверхностей четвертой ступени, попадают в ускоряющее электрическое поле и оседают на ступени с высоким потенциалом или предколлектор (рис. 5, *а*).



а) *б*)

Рис. 5. Эквипотенциали и траектории вторичных частиц в четвертой ступени коллектора в плоскости *YOZ*:
а – без магнитного поля; *б* – с поперечным магнитным полем

Для уменьшения выхода вторичный частиц из четвертой ступени могут применяться различные способы. Например, можно использовать электрод с нулевым потенциалом в виде иглы или конуса, но это приведет к локализации тепловой мощности и повышению максимальной температуры электрода. Поперечное магнитное поле, локализованное в области дна второй ступени, было применено в работе [6]. Рассчитанное распределение магнитного поля прямоугольной плитки, намагниченной в направлении больших граней, использовалось при 3*D*-траекторном анализе коллектора. Плитка располагалась на корпусе коллектора в направлении *X*, поэтому основное влияние на траектории частиц происходило в плоскости *YOZ*. Оптимальным оказалось расположение плитки в области дна четвертой ступени с величиной поперечного поля на оси 8 мТл. Слабое магнитное поля почти не оказывало влияния на траектории первичных частиц, но отклоняло медленные вторичные частицы (рис. 5, *б*). Применение поперечного магнитного поля позволило на 24 % уменьшить величину обратного потока из коллектора, увеличить ток ступеней с низким потенциалом и уменьшить величину потребляемой мощности на 4,5 Вт.

Изменение входной мощности меняет характеристики отработанного пучка и соответственно распределение тепловых нагрузок на электроды коллектора. Нагрузка на первую и вторую ступени достигает максимального значения в режиме насыщения выходной мощности (рис. 6). При $P_{вх}/P_{вх.нас}$ = -6 дБ на третьей ступени тепловая мощность имеет максимальное значение, также максимума достигает суммарная тепловая мощность, выделяемая в коллекторе.

2(545).indd 42 03.06.2020 9:06:04

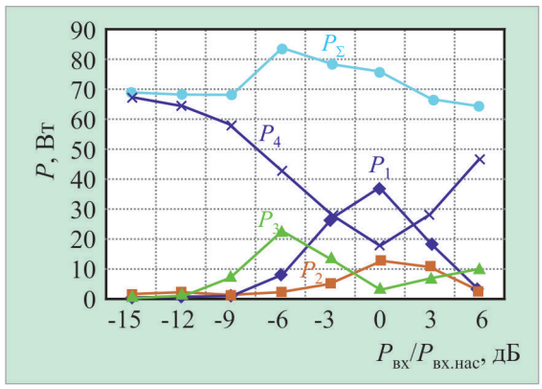
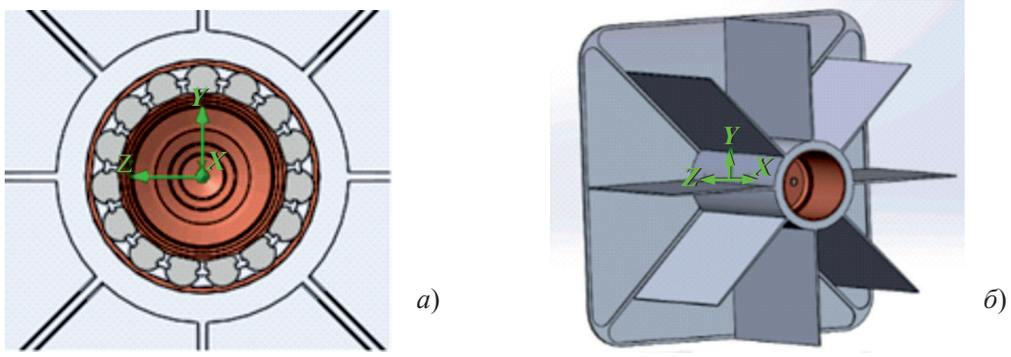


Рис. 6. Зависимости тепловой мощности на ступени коллектора $P_1...P_4$ и суммарной тепловой мощности на коллектор P_Σ от величины входной мощности

Чтобы оценить возможность дальнейшего уменьшения потребляемой мощности ЛБВ, был рассчитан вариант ЗС той же конструкции со стержнями из нитрида бора (ε = 4,3) и спиралью, покрытой медью. Для сохранения того же коэффициента усиления при увеличении сопротивления связи и уменьшении затухания длина ЗС соответственно была уменьшена. Та же выходная мощность 135 Вт была получена при меньшем токе пучка. Электронный КПД ЛБВ составил 21,26 %, ВЧ-потери – 2,67 %. КПД ЗС увеличился до 88,84 %. Распределение электронов по энергиям отработанного пучка в режиме насыщения мощности практически не отличалось от приведенного на рис. 3. Рассчитанная при тех же потенциалах ступеней и коэффициенте вторичной эмиссии, равном 1, величина потребляемой мощности рассмотренного ЛБВ уменьшилась до 224,1 Вт, а технический КПД увеличился с 58,1 (см. табл. 1) до 60,2 %. Снижение коэффициента вторичной эмиссии электродов коллектора позволит увеличить КПД до 63 %.

4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КОЛЛЕКТОРА

Для анализа теплового режима была выбрана следующая конструкция коллектора. В качестве изоляторов использовались керамические стержни, шлифованные с одной стороны и имеющие боковые пазы для увеличения электропрочности (рис. 7, *а*). Внешние поверхности медных электродов коллектора имели в поперечном сечении вид многогранников для лучшего прилегания стержней. Электроды и стержни закреплены в медной оболочке коллектора обжатием. На оболочке коллектора установлены радиатор с 8 пластинами, имеющими трапецеидальное поперечное сечение, и дополнительный экран, изготовленные из материала Д16 (рис. 7, *б*). Передача тепла за счет теплопроводности от корпуса коллектора к экрану отсутствовала. Все контакты между элементами конструкции считались идеальными.



а) *б*)

Рис. 7. Поперечное сечение коллектора (*а*) и конструкция радиатора и экрана (*б*)

2(545).indd 43 03.06.2020 9:06:04

Распределение тепловой нагрузки по электродам задавалось по результатам траекторного анализа коллектора. В качестве основного материала стержней рассматривалась окись бериллия. Все характеристики материалов задавались таблицами, с учетом их температурных изменений. Расчеты проводились по инженерному пакету Solid Works.

При степени черноты внешней поверхности радиатора и обращенной к радиатору поверхности экрана, равной 0,8, и температуре окружающей среды 0 °С в режиме насыщения выходной мощности максимальную температуру 165,8 °С имеет наиболее теплонагруженная входная часть первой ступени (рис. 8, табл. 3). Наибольшая температура радиатора в районе первой ступени – 140,8 °С и наименьшая – 128,4 °С. Следует также отметить небольшой перепад температур по высоте конусных ребер радиатора. Температура экрана, нагреваемого только за счет излучения радиатора, составила 43,6…45,2 °С.

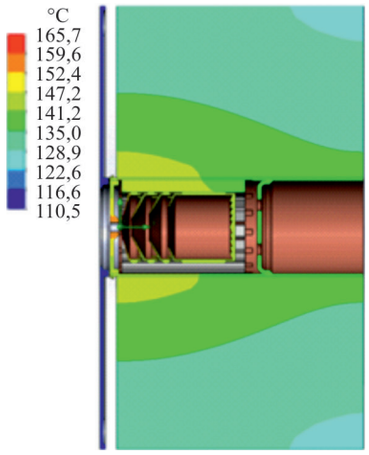


Рис. 8. Температура коллектора в режиме насыщения выходной мощности

Таблица 3

Температура коллектора, °С

Входной сигнал	1 ступень	2 ступень	3 ступень	4 ступень	Радиатор
$P_{вх.нас}$ (стержни BeO)	165,8	148,9	143,7	144,5	128,4 – 140,8
$P_{вх}/P_{вх.нас}$ = -6 дБ (стержни BeO)	152,9	150,0	152,0	153,6	134,2 – 147,1
Без входного сигнала (стержни BeO)	120,3	120,5	121,1	127,2	110,8 – 117,7
$P_{вх.нас}$ (стержни Al_2O_3)	181,0	156,3	146,6	147,0	128,3 – 141,1

При изменении входного сигнала от уровня насыщения распределение тепловой нагрузки смещается в сторону четвертой ступени и соответственно увеличивается температура ступеней с низким потенциалом. При $P_{вх}/P_{вх.нас}$ = -6 дБ тепловая нагрузка и соответственно температура радиатора на коллекторе имеет максимальное для всех режимов значение.

Замена стержней из BeO на стержни Al_2O_3 привела к росту температуры первой ступени в режиме насыщения до 181 °С, для ступеней 2…4 – на меньшую величину, температура радиатора практически не изменилась (табл. 3).

2(545).indd 44 03.06.2020 9:06:04

Оценка влияния неидеальности тепловых контактов электрод – стержень и стержень – оболочка коллектора проводилась путем задания в местах контактов тонкого слоя материала с заданным коэффициентом теплопроводности. Так, при значении λ = 65 Вт/(м·К) (для меди λ = 380 Вт/(м·К)) максимальная температура первой ступени увеличилась всего на 2, 7 °С, а при λ = 16 Вт/(м·К) – на 10,7 °С (табл. 4). Малое влияние тепловых контактов в рассматриваемой конструкции коллектора связано с большой площадью контактов и малой величиной тепловой мощности. Соответственно контактное сопротивление между оболочкой коллектора и корпусом радиатора окажет незначительное влияние на распределение температур.

Таблица 4

Температура коллектора, °С

Контакт	1 ступень	2 ступень	3 ступень	4 ступень
Идеальный контакт	165,8	148,9	143,7	144,5
λ = 65 Вт/(м·К)	168,5	149,9	144	145,5
λ = 16 Вт/(м·К)	176,5	153,0	144,9	146,5

Существенное влияние на уровень температур коллектора оказывает степень черноты поверхности радиатора. Например, уменьшение ε с 0,8 до 0,6 привело к росту температуры радиатора с 128,4…140,8 до 143,6…155,8 °С (табл. 5).

Таблица 5

Температура коллектора, °С

ε	1 ступень	2 ступень	3 ступень	4 ступень	Радиатор
0,8	165,8	148,9	143,7	144,5	128,4 – 140,8
0,7	172,6	155,7	150,5	152,8	135,2 – 145,8
0,6	180,9	164,0	158,8	159,5	143,6 – 155,8
0,5	191,4	174,5	169,2	170,0	154,2 – 166,3

Обращенная к коллектору поверхность теплового экрана имела в расчетах ту же степень черноты, что и поверхность радиатора, нагрев экрана происходил только за счет излучения радиатора, и его температура во всех рассмотренных режимах не превышала 37…45 °С.

Наиболее полно требованиям высокой степени черноты (0,8 и выше) для теплового излучения, а также небольшой поглощательной способности солнечного излучения, которое происходит в более коротковолновом частотном диапазоне, удовлетворяет покрытие алюминия, например, микродуговым оксидированием [7].

Уменьшение площади пластин радиатора на 40 % при тепловой нагрузке, соответствующей режиму насыщения мощности и ε = 0,8, привело к увеличению максимальной температуры первой ступени коллектора до 264 °С и минимальной температуры радиатора – до 220 °С.

На коллектор, помещенный на внешнюю поверхность космического аппарата, воздействуют тепловой поток солнечного излучения, мощность которого не зависит от орбиты спутника и примерно равна 1400 Вт/м^2 [8], и тепловой поток отраженного от Земли излучения Солнца, величина которого от орбиты спутника зависит. Если перевести солнечную постоянную в тем-

2(545).indd 45 03.06.2020 9:06:04

пературу поверхности, излучающей указанную мощность, ее величина составит около 130 °С. В случае же нахождения спутника в тени Земли температура окружающей среды обычно принимается равной -180 °С.

Для анализа такого режима коллектор был помещен внутрь цилиндрической оболочки. При температуре оболочки 130 °С температура радиатора увеличилась до 195,4…209,6 °С и значения максимальных температур ступеней увеличились относительно приведенных в табл. 3 на 66…69 °С: до 232,9, 215,9, 210,2 и 210,9 °С соответственно (рис. 9). При температуре оболочки -180 °С температура радиатора уменьшилась до 114,9…129,9 °С, а максимальная температура ступеней – до 150,3, 134,9, 130,1 и 136,9 °С.

Поскольку Солнце может освещать коллектор под разными углами, был проведен расчет температурного режима коллектора в случае максимальной падающей мощности – лучи Солнца направлены по нормали к плоскости *Y*0*X*, причем ось *X* совпадает с осью коллектора (рис. 10). Поглощательная способность соответствовала степени черноты поверхности радиатора – 0,8, т. е. дополнительная тепловая нагрузка на поперечное сечение радиатора коллектора не превысила 23 Вт. Максимальная температура радиатора возросла с 140,8 (табл. 3) до 164,5 °С, а минимальная температура ребер, расположенных в плоскости *Y*0*X*, составила 155,3 °С, в плоскости *Z*0*X* – 149,2 °С (рис. 9), т. е. несимметрия в распределении температуры по ребрам радиатора оказалась небольшой. Соответственно и распределение температуры по электродам коллектора осталось практически симметричным. Максимальная температура первой ступени возросла до 190,2 °С и примерно на 20…24 °С увеличились температуры всех электродов.

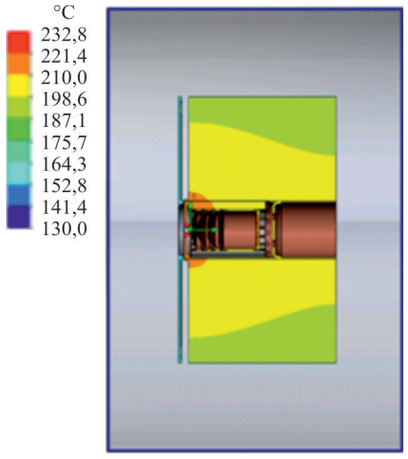


Рис. 9. Температура коллектора с дополнительной оболочкой в режиме насыщения выходной мощности

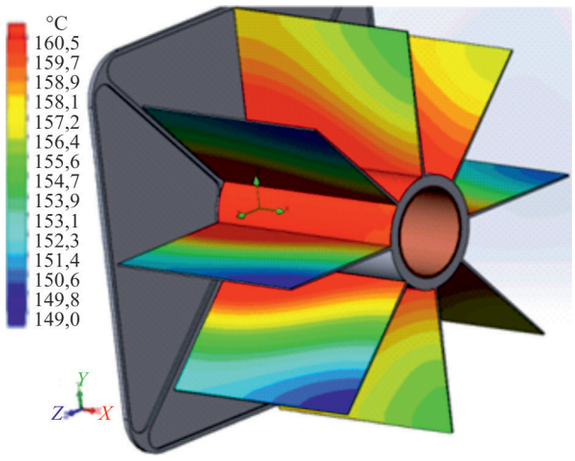


Рис. 10. Температура радиатора при боковом солнечном освещении в режиме насыщения выходной мощности

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассчитанной ЛБВ *Ka*-диапазона с выходной мощностью 135 Вт и техническим КПД выше 60 % проведена разработка четырехступенчатого коллектора, охлаждаемого излучением в космическое пространство. Анализ теплового режима показал, что предложенная конструкция коллектора обеспечивает малый (не более 40 °С) перепад температур между электродами коллектора и радиатором, температура которого может корректироваться за счет числа и размеров

2(545).indd 46 03.06.2020 9:06:04

ребер. В различных режимах работы ЛБВ максимальная температура ступеней коллектора не превышает 191, а радиатора – 166 °С. Рассчитан тепловой режим коллектора при изменении температуры окружающей среды от -180 до +130 °С. Влияние солнечного излучения увеличивает температуру радиатора примерно на 70 °С и не приводит к существенной азимутальной несимметрии в распределении температур по электродам и радиатору коллектора при изменении положения радиатора относительно Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Журавлева, В. Д.** Расчет и оптимизация по техническому КПД широкополосных ЛБВ с многоступенчатой рекуперацией / В. Д. Журавлева, В. И. Роговин, С. О. Семенов, В. А. Филатов // Тез. докл. конф. «Вопросы исследования и проектирования электровакуумных и твердотельных СВЧ-приборов». Сер. 1. Электроника СВЧ. – М., 1983. – Вып. 1 (196). – С. 10 – 11.

2. **Роговин, В. И.** Исследование влияния закона изменения шага спиральных ЛБВ на электронный и технический КПД / В. И. Роговин, С. О. Семенов // Тез. докл. X всесоюзн. семинара «Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа». – Ленинград, 1990. – 30 с.

3. **Роговин, В. И.** Многоступенчатые коллекторы для ламп бегущей волны / В. И. Роговин, С. О. Семенов // Радиотехника. – 2002. – № 2. – С. 57 – 62.

4. **Роговин, В. И.** Коллекторы с рекуперацией для ЛБВО и клистронов / В. И. Роговин, С. О. Семенов // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 4.

5. **Ильина, Е. М.** Анализ трансформации электронного сгустка в широкополосной лампе бегущей волны на основе усовершенствованной двумерной модели / Е. М. Ильина, С. П. Морев, В. И. Роговин, С. О. Семенов, Б. Л. Ушерович // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 10. – С. 1271 – 1274.

6. **Семенов, С. О.** Исследование динамики нестационарного электронного пучка в электронно-оптических системах электровакуумных приборов / С. О. Семенов // Прикладная физика. – 2008. – № 4. – С. 92 – 100.

7. **Михеев, А. Е.** Исследование излучательной способности пластин из алюминиевых сплавов с МДО-покрытием / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Р. В. Алякрецкий, Д. В. Раводина, Т. В. Трушкин // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 2 (54). – С. 131 – 136.

8. **Коллет, Р. С.** Проблемы проектирования связных космических летательных аппаратов / Р. С. Коллет, Б. Л. Хэрдэн // ТИИЭР. – 1977. – Т. 65, № 3. – С. 68 – 85.

Статья поступила 26 марта 2020 г.

2(545).indd 47 03.06.2020 9:06:04

УДК 621.385

СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ БОРТОВЫХ ЦЕЗИЕВЫХ АЛТ

Н. Г. Духина, Н. И. Мирющенко, А. А. Орехов, С. А. Плешанов, К. В. Ревенко, В. В. Чугунов

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

Представлены формулы для расчета эффективности продольного и поперечного экранирования системы магнитной защиты, состоящей из 4 тонкостенных коаксиальных цилиндров, изготовленных из сплавов марки 79НМ и 81НМА. Численными методами проведен расчет системы магнитного экранирования для цезиевой атомно-лучевой трубки (АЛТ) «Успех-4М» с учетом всех конструктивных особенностей АЛТ. Изучены спектры зеемановских резонансов АЛТ, помещенных во внешние постоянные магнитные поля различной ориентации. Анализ сдвига частоты зеемановских резонансов позволил провести оценки коэффициента магнитного экранирования АЛТ и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

КС: атомно-лучевая трубка, экранирование, коэффициент экранирования, магнитное поле, магнитный экран, многослойный экран, магнитный сдвиг частоты, компьютерное моделирование

MAGNETIC SCREENING SYSTEMS FOR PRECISION ON-BOARD CESIUM ABTs

N. G. Dukhina, N. I. Miryushchenko, A. A. Orekhov S. A. Pleshanov, K. V. Revenko, V. V. Chugunov

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

Formulas are presented for calculating the effectiveness of longitudinal and transverse screening of a magnetic protection system, consisting of 4 thin-walled coaxial cylinders made of alloys of 79HM and 81HMA grades. Numerical methods were used to calculate the magnetic screening system for the «Uspeh-4M» cesium atomic beam tube taking into account all design features of ABTs. The spectra of Zeeman resonances of ABTs, placed in external constant magnetic fields of different orientations were studied. The analysis of the frequency shift of the Zeeman resonances made it possible to estimate the coefficient of ABT magnetic screening and magnetic shift of the zero transition frequency.

Keywords: atomic beam tube, screening, screening coefficient, magnetic field, magnetic screen, multilayer screen, magnetic frequency shift, computer modeling

1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие и совершенствование ракетной, космической и навигационной техники и её широкое использование в военных, научных и народнохозяйственных целях требует постоянного повышения точности временных и частотных измерений.

Атомно-лучевые трубки (АЛТ) служат в качестве квантовых дискриминаторов частоты, использование которых позволяет обеспечить генерацию чрезвычайно точных сигналов частоты бортовых синхронизирующих устройств. Лидером по производству высококачественных АЛТ

2(545).indd 48 03.06.2020 9:06:04

на пучке атомов цезия является АО «НПП «Исток» им. Шокина», где разрабатываются и исследуются цезиевые АЛТ с 1959 года. Цезиевые АЛТ с магнитной селекцией атомных состояний, которые выпускаются на НПП «Исток», получили широкое распространение как в наземной, так и в бортовой аппаратуре. На сегодняшний день цезиевые АЛТ являются ключевыми элементами, определяющими точностные характеристики российской системы ГЛОНАСС, и обеспечивают длительное поддержание частоты или времени с относительной точностью на уровне $5{,}0\cdot10^{-14}\ldots1{,}0\cdot10^{-14}$.

Функциональные узлы классической цезиевой АЛТ показаны на рис. 1. Конструкция и принцип работы цезиевых АЛТ подробно описаны в работе [1].

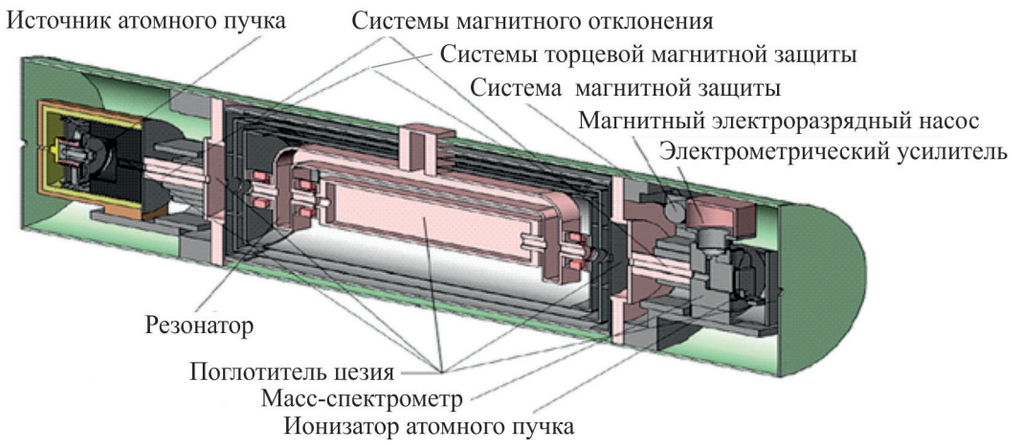


Рис. 1. Функциональные узлы цезиевой АЛТ

Одним из важнейших требований, предъявляемых к цезиевым АЛТ, является снижение магнитного сдвига частоты рабочего перехода атома цезия, возникающего под воздействием внешних магнитных полей [2]. Для этого необходимо, чтобы в области взаимодействия атомного пучка с полем СВЧ-резонатора, установленного внутри системы экранов, обеспечивалась глубокая степень экранировки с коэффициентом экранирования не менее 10^5. Как правило, источниками возмущающих внешних магнитных полей являются постоянно действующее магнитное поле Земли (около 0,5 Э) и поля рассеяния других приборов, работающих в одном блоке с АЛТ.

В цезиевых АЛТ в качестве материалов экранов используются магнитомягкие сплавы с большой магнитной проницаемостью, требующие предварительного высокотемпературного отжига. Необходимость в таком отжиге, а также конструктивные ограничения приводят к потребности использования разборных конструкций, в которых цилиндрическая часть экрана не сварена с торцевыми частями, а соединена с ними винтами, стяжными хомутами и т. п. В таких экранах неизбежно наличие воздушных зазоров между цилиндрическими и торцевыми частями, уменьшающих коэффициент экранирования.

В литературе можно найти много различных формул для расчета эффективности экранирования (отношение внешнего магнитного поля к внутреннему) для открытых с концов коаксиальных цилиндров из материалов с высокой магнитной проницаемостью в однородном магнитном поле [3]. Однако для экранирования продольных полей общей формулы не существует, хотя Магер получил соотношение между эффективностями поперечного и продольного экранирования для одного цилиндра (с открытыми и закрытыми каналами) и оценил соотношение для двух коаксиальных цилиндров с открытыми концами. Для магнитных экранов, рассматриваемых в рамках

2(545).indd 49 03.06.2020 9:06:05

данной статьи, которые невозможно ориентировать в окружающем поле, ограничивающим критерием будет являться эффективность экранирования продольных полей.

В данной статье приводится общая формула для расчета эффективности экранирования продольных полей системой из 4 тонкостенных коаксиальных цилиндров с малыми радиальными зазорами между ними. Допущение о тонкостенных экранах с малыми зазорами приводит к приближениям, упрощающим получающиеся уравнения и делающим их более удобными для практического применения к различным случаям магнитного экранирования, а также обеспечивает простое графическое представление метода построения формулы. Использование формулы продемонстрировано применительно к магнитным экранам, предназначенным для цезиевых АЛТ.

Для более точного расчета эффективности экранирования цезиевых АЛТ необходимо использовать численные методы решения уравнений, так как аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с тем, что функциональные узлы АЛТ имеют сложную асимметричную конфигурацию, и они практически не поддаются точному расчету. При расчете также следует уделять внимание конструктивным особенностям АЛТ, которые легко поддаются расчетам при использовании численных методов решения уравнений.

Получены спектры зеемановских резонансов прецизионных АЛТ, которые были измерены с использованием катушек Гельмгольца. По полученным данным можно провести оценку коэффициента магнитного экранирования АЛТ и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

2. ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛТ

Для получения высокой стабильности частоты область резонатора тщательно экранируют от внешних магнитных полей и в ней создают малое однородное статическое поле с помощью рамок соленоида в области резонатора внутри системы магнитных экранов. В слабом магнитном поле каждый из сверхтонких уровней расщепляется на $2F + 1$ зеемановских резонансов, которые определяются различными значениями проекции F на направление внешнего магнитного поля и характеризуются квантовыми числами m_F (рис. 2) [4].

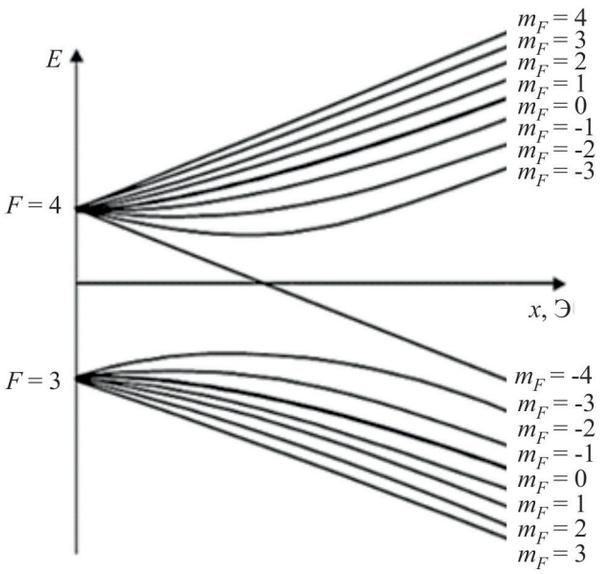


Рис. 2. Схема сверхтонких уровней основного состояния атомов изотопа ^{133}Cs в зависимости от величины внешнего магнитного поля [3]

2(545).indd 50 03.06.2020 9:06:05

Слабое однородное магнитное поле выделяет рабочий переход, имеющий квадратичную зависимость от величины магнитного поля, и создает стабильность сдвига частоты перехода.

Нарушение однородности постоянного магнитного поля, имеющее место в реальных АЛТ, приводит к разнообразным искажениям резонансной линии. При этом нередко наблюдается существенное уменьшение интенсивности резонанса, вплоть до полного исчезновения интерференционной картины Рамзея.

В цезиевых АЛТ широко используется метод разделенных осциллирующих полей Рамзея [5]. Ширина резонансной линии определяется в этом случае средним временем пролета атомов в пространстве между областями СВЧ-полей и описывается формулой [6]:

$$T = L/v, \tag{1}$$

где v – средняя скорость атомов пучка; L – расстояние между СВЧ-полями.

Наличие неоднородности магнитного поля в пролетном пространстве эквивалентно в «атомной» системе отсчета действию на атом возмущения, зависящего от времени. Это возмущение может индуцировать дополнительные переходы между энергетическими уровнями атома, искажающие резонансную линию наблюдаемого перехода (см. рис. 2).

В случае цезиевой АЛТ рабочим является переход между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния ($F = 4$, $m_F = 0 \leftrightarrow F = 3$, $m_F = 0$), который принято считать нулевым (часовым) переходом. Поскольку многоквантовые переходы маловероятны, то резонансная линия подвергается искажениям главным образом за счет переходов (рис. 2):

$$(F = 4, m_F = 0) \leftrightarrow (F = 4, m_F = \pm 1),$$
$$(F = 3, m_F = 0) \leftrightarrow (F = 3, m_F = \pm 1).$$

Действительная частота нулевого («часового») перехода f, Гц, в цезиевых АЛТ зависит от напряженности внешнего магнитного поля [7]

$$f = f_{0\text{-}0} + 427{,}45 \cdot H_c^2, \tag{2}$$

где $f_{0\text{-}0}$ – частота нулевого перехода; H_c – напряженность внешнего магнитного поля, Э.

Для цезиевых АЛТ $f_{0\text{-}0} = 9\,192\,631\,770$ Гц.

Постоянное магнитное поле применяется в стандарте частоты с целью расщепления магнитных уровней на дополнительные шесть переходов $\Delta F = \pm 1$, $\Delta m_F = 0$, которые показаны на рис. 3. Эти переходы попарно симметричны относительно нулевого перехода и не должны приводить к сдвигу его частоты. Однако, вследствие различной сортировки атомов с разными m_F, интенсивности ближайших к нулевому переходу линий с $m_F = \pm 1$ будут неодинаковы, и они, накладываясь своими краями на линию 4,0 ↔ 3,0, будут нарушать ее симметрию, вызывая сдвиг частоты.

Для оценки качества систем магнитного экранирования удобнее использовать разрешенные правилами отбора зеемановские резонансы $m_F = \pm 1; \pm 2; \pm 3$ (см. рис. 3), которые описываются следующей формулой:

$$f = f_{0\text{-}0} + 7{,}00 \cdot 10^5 \cdot m_F \cdot H_c, \text{ Гц}. \tag{3}$$

С помощью зеемановских резонансов можно точно вычислить коэффициент экранирования системы магнитных экранов по величине магнитного сдвига частоты.

Снижение влияния внешнего магнитного поля на смещение частоты зеемановских резонансов может привести к улучшению долговременной стабильности магнитных цезиевых АЛТ. На сегодняшний день на АЛТ «Успех-4М» получена долговременная стабильность на уровне $2{,}4 \cdot 10^{-14}$ (рис. 4).

2(545).indd 51 03.06.2020 9:06:05

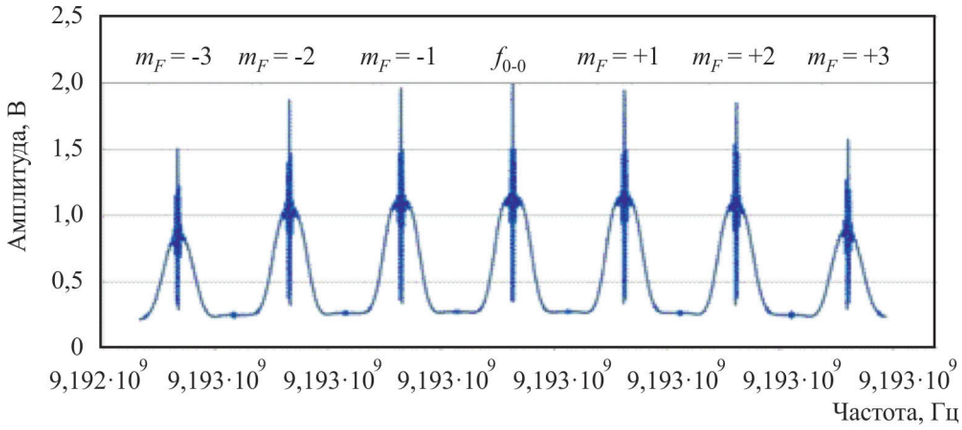
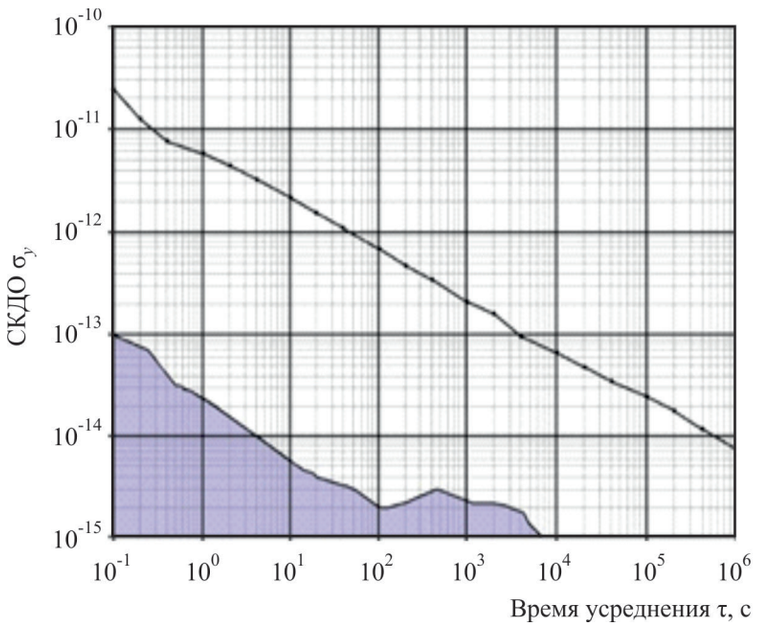


Рис. 3. Спектр семи зеемановских резонансов цезиевой АЛТ «Успех-4»



Девиация Аллана $\sigma_y(\tau)$

Время	СКДО
0,001	$7{,}18488\cdot10^{-10}$
0,002	$7{,}46617\cdot10^{-10}$
0,004	$4{,}52978\cdot10^{-10}$
0,01	$2{,}47453\cdot10^{-10}$
0,02	$1{,}28050\cdot10^{-10}$
0,04	$6{,}1404\cdot10^{-11}$
0,1	$2{,}4828\cdot10^{-11}$
0,2	$1{,}28212\cdot10^{-11}$
0,4	$7{,}5815\cdot10^{-12}$
1	$5{,}7964\cdot10^{-12}$
2	$4{,}4660\cdot10^{-12}$
4	$3{,}3302\cdot10^{-12}$
10	$2{,}1801\cdot10^{-12}$
20	$1{,}5354\cdot10^{-12}$
40	$1{,}0996\cdot10^{-12}$
100	$6{,}962\cdot10^{-13}$
200	$4{,}816\cdot10^{-13}$
400	$3{,}411\cdot10^{-13}$
1000	$2{,}165\cdot10^{-13}$
2000	$1{,}589\cdot10^{-13}$
4000	$9{,}66\cdot10^{-14}$
10000	$6{,}66\cdot10^{-14}$
20000	$4{,}85\cdot10^{-14}$
40000	$3{,}57\cdot10^{-14}$
100000	$2{,}4\cdot10^{-14}$
200000	$1{,}8\cdot10^{-14}$
400000	$1{,}2\cdot10^{-14}$
1000000	$7{,}5\cdot10^{-15}$

Рис. 4. Девиация Аллана для АЛТ «Успех-4М»

3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ АЛТ

Эффективность экранирования для системы из тонкостенных цилиндрических экранов, изготовленных из материалов с высокой магнитной проницаемостью, в поперечном поле рассчитывается по формуле [3]:

$$G_N(g_i, s_{i,\,i+1}) = (1/2)\,(u_{i+1} = v_{i+1}) = H/H_0, \qquad (4)$$

где $u_{i+1} = (1 + g_i s_{i,i+1})u_i + s_{i,i+1}v_i$; $v_{i+1} = g_i\mu_i + v_i$; $S_{N,N+1} = 0$; $g_i = \mu_i t_i / r_i$; $s_{i,i+1} = (r_{i+1} - r_i - t_i)/r_{i+1}$ – радиальный зазор между экранами; H – внешнее поле; H_0 – внутреннее поле вблизи центра экранов; μ_i – магнитная проницаемость i-го экрана (является свойством материала и предполагается однородной по всей поверхности экрана); t_i – толщина i-го экрана; r_i – внутренний радиус i-го экрана;

2(545).indd 52 03.06.2020 9:06:05

N – количество экранов; u_i и v_i – максимальные значения касательной и нормальной компонент магнитного поля на i-м экране (внутреннее поле предполагается равным 1). Эта рекуррентная формула верна при $t_i/r_i << 1$, $s_{i,i+1} << 1$ и $g_i >> 1$.

Для систем, состоящих из 4 и более цилиндрических экранов, расчет эффективности экранирования становится сложным. Это связано с тем, что в сумму входит большое количество пренебрежимо малых членов. С целью получения приближенного решения для таких громоздких сумм можно воспользоваться рис. 5. Данный график упрощает формирование всех членов по способу, который группирует члены одинаковой величины.

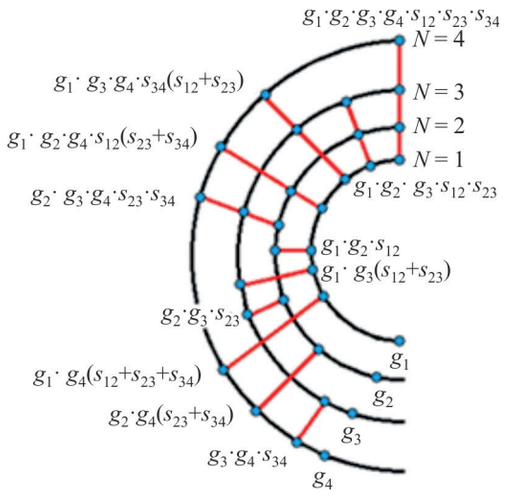


Рис. 5. Графическое представление построения общей формулы для эффективности экранирования

Одной точкой на линии экрана представляются члены g_i, а линией между точками – члены $s_{i,i+1}$ для соседних экранов или члены $(s_{i,i+1} + s_{i+1,i+2} + \ldots + s_{j-1,j})$ для несоседних экранов i и j. Соединенные между собой точки представляют члены произведения, как показано на рис. 5. Члены, входящие в уравнение (4), представляются всеми возможными способами сочетания точек 1, 2, 3 или 4. Сумма этих членов дает окончательное выражение для G_N. Для материалов с высокой магнитной проницаемостью ($\mu \geq 10^4$ Гс/Э) низшими членами произведения обычно можно пренебречь, но число значимых членов зависит от конкретной конструкции экрана.

В случае магнитных экранов, рассматриваемых в рамках данной работы, для нахождения G_4 с общей точностью 5 % достаточно оставить произведения наивысшего и предшествующего наивысшему порядков, что дает:

$$G_4 \approx (1/2)[\, g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot g_4 \cdot s_{12} \cdot s_{23} \cdot s_{34} + g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot s_{12} \cdot s_{23} + g_2 \cdot g_3 \cdot g_4 \cdot s_{23} \cdot s_{34} + g_1 \cdot g_2 \cdot g_4 \cdot s_{12}(s_{23} + s_{34}) + g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot s_{34}(s_{12}+s_{23})]. \quad (5)$$

Для оценки эффективности экранирования АЛТ в поперечном поле, по формуле (5), были использованы размеры магнитной защиты АЛТ «Успех-4М».

На рис. 6 приведено схематическое изображение (с размерами) магнитной защиты цезиевой АЛТ «Успех-4М».

Расчет показал, что эффективность экранирования АЛТ «Успех-4М» в поперечном поле составляет $6{,}80 \cdot 10^9$.

2(545).indd 53 03.06.2020 9:06:05

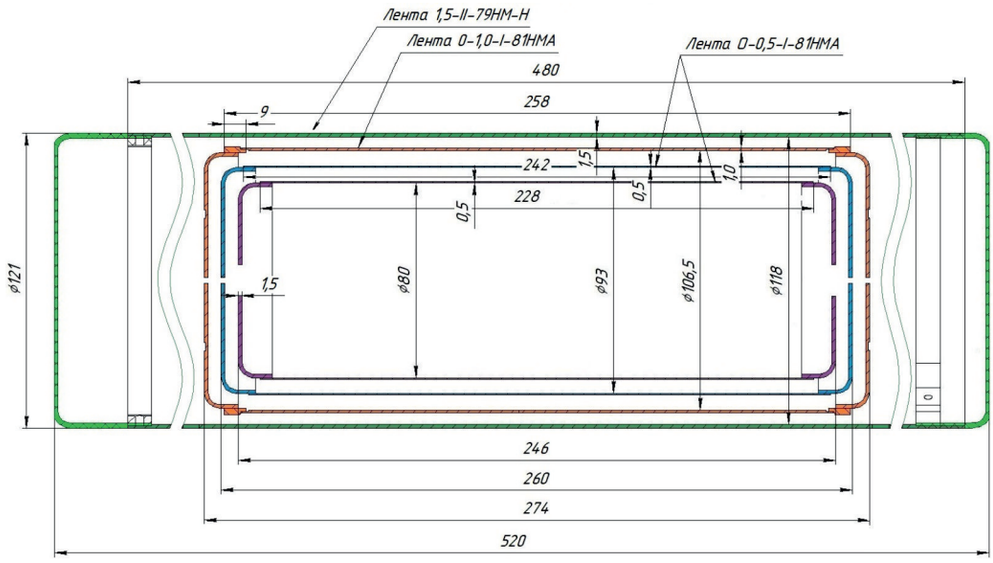


Рис. 6. Схематическое изображение магнитной защиты АЛТ «Успех-4М»:
1-й экран выделен фиолетовым цветом; 2-й экран – синим цветом;
3-й экран – оранжевым цветом; 4-й экран является корпусом прибора
и выделен зеленым цветом

Эффективность экранирования для системы из тонкостенных цилиндров с малым радиальным зазором в продольных магнитных полях можно записать и распространить на закрытые цилиндры в том же виде, что и для случая продольного поля:

$$G_N^l = G_N(g_i^l, s_{i,i+1}^l), \tag{6}$$

где $g_i^l = \mu_i^l t_i / r_i$, $s_{i,i+1}^l = f s_{i,i+1}$.

Величина G_N дается выражением (4), построение которого представлено графически на рис. 5, а μ_i^l определяются путем обобщения выражения (7):

$$\mu_i^l = \begin{cases} 4D\mu_i - \text{для открытого цилиндра}, \\ \left[4D/\left(1+r_i/L_i\right)\right]\mu_i - \text{для закрытого цилиндра}, \end{cases} \tag{7}$$

где D – коэффициент размагничивания для эллипсоида длиной L_i и радиусом r_i, равным радиусу экрана; L_i – общая длина, включая концевые крышки.

Зависимость величин f и D от отношения L/r показана на рис. 7. Для учета особенностей данной геометрии и разброса свойств материала лучше всего экспериментально определять μ_i^l для первого экрана. Если экспериментальные проверки невозможны, то для оценки μ_i^l можно использовать выражение (7).

Расчет эффективности экранирования АЛТ «Успех-4М» в продольном магнитном поле показал, что для открытого цилиндра коэффициент экранирования составляет $5{,}68 \cdot 10^8$, а для закрытого цилиндра коэффициент экранирование равен $6{,}20 \cdot 10^8$.

2(545).indd 54 03.06.2020 9:06:06

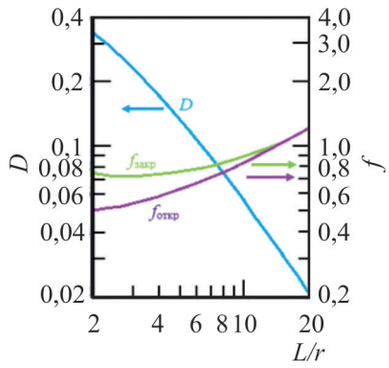
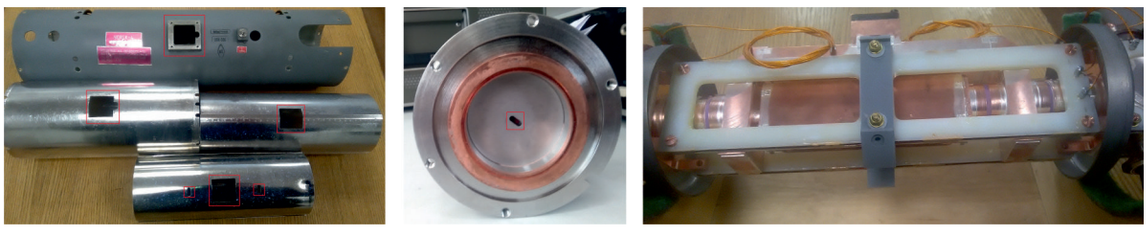


Рис. 7. Зависимость коэффициента размагничивания D и коэффициента f от L/r для цилиндрических экранов с открытыми и закрытыми концами

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

В предыдущей главе приведены результаты расчета коэффициента магнитного экранирования АЛТ, состоящей из 4 тонкостенных цилиндрических экранов. Полученные значения являются завышенными, поскольку в общем случае аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным, так как функциональные узлы АЛТ имеют сложную асимметричную конфигурацию и практически не поддаются точному расчету. Для более точного расчета также следует учитывать все конструктивные особенности АЛТ с магнитной селекцией, которые показаны на рис. 8, и использовать численные методы решения уравнений.



а) *б*) *в*)

Рис. 8. Конструктивные особенности АЛТ:
а – отверстия под СВЧ-фланец и для симметрирования плеч резонатора; *б* – отверстие для пролета атомного пучка; *в* – рамки соленоида

При разработке промышленных АЛТ на пучке атомов цезия используют приближенные методы расчета узлов, однако при этом решающую роль играет интуиция разработчика и экспериментальные исследования на лабораторных макетах приборов. Возможность совершенствования методики расчета функциональных узлов АЛТ существует благодаря развитию методов компьютерного моделирования магнитных систем и систем формирования потоков заряженных частиц на основе трехмерных математических моделей, хорошо апробированных в области проектирования магнитных и электронно-оптических систем ЭВП СВЧ.

На рис. 9 показана 3*d*-модель магнитной защиты АЛТ «Успех-4М», использовавшаяся для расчётов магнитного поля цезиевой АЛТ с помощью численных методов. Наружный экран (не по-

2(545).indd 55 03.06.2020 9:06:06

казан на рис. 9) является одновременно корпусом АЛТ. Внутри корпуса установлены экраны *1…3* в виде отрезков цилиндрических труб с закрытыми торцами *4…6* (торцевой магнитной защитой). Все экраны разделены между собой узкими коаксиальными и торцевыми зазорами. Для прохождения ленточного атомного пучка в центре дисков экранов имеются отверстия: круглые, в *4*-м и *5*-м дисках, диаметром 10 мм и щелевидное, в *6*-м диске, размерами 2,5×7 мм.

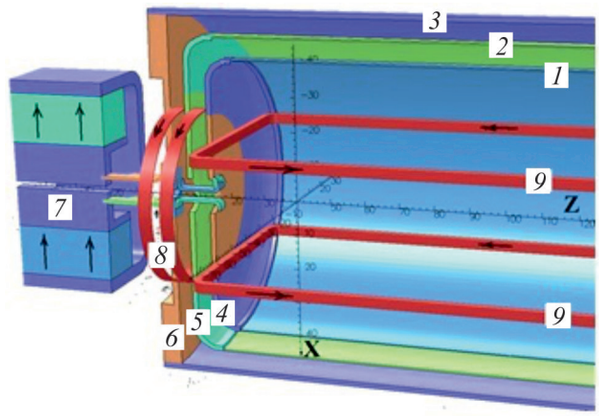


Рис. 9. Система магнитных экранов цезиевой АЛТ
с магнитной селекцией атомных состояний

С внешней стороны торцевой магнитной защиты установлены магнитные системы на постоянных магнитах *7*, предназначенные для селекции атомов цезия по их энергетическим состояниям. Между торцами находятся соленоиды *8*. Внутри первого экрана установлены рамки *9* в виде прямоугольных каркасов с натянутыми на них проводами.

Ярмо магнита и внешние пластины выполнены из стали армко, экраны с торцами и внутренние пластины – из сплава марки 81НМА, наружный экран – из сплава марки 79НМ.

Расчет эффективности системы магнитных экранов проводился с учетом воздействия внешнего однородного магнитного поля напряженностью 1 Э, ориентированного в двух направлениях – вдоль осей *X* и *Z* системы магнитных экранов. Для снижения трудоемкости и повышения точности расчетов на всех плоскостях симметрии, присущих проектируемого варианту конструкции экранов, задавались соответствующие или тангенциальные граничные условия для решения полевых задач.

Результаты сравнительного анализа экранирующих свойств системы экранов АЛТ показаны на рис. 10.

Результаты моделирования показали, что в системе экранов цезиевой АЛТ имеет место сложное распределение магнитного поля вдоль оси *Z*.

Установлено, что при воздействии внешнего однородного поля $H_{z\ extr}$ = 1 Э в модели без наружного экрана поле увеличится сразу на ~1,5 порядка, превысив при этом на порядок и возмущённое поле с наружным экраном. В системе же с наружным экраном столь резкого скачка поля, вызванного возмущением внешних полей, не наблюдаем.

Установлено, что воздействие внешнего однородного поля $H_{x\ extr}$ = 1 Э незначительно влияет на изменение магнитного поля внутри системы магнитных экранов и приблизительно равно значению экранирования при нулевом значении внешнего магнитного поля.

Анализируя рис. 10, можно увидеть, что напряженность поля внутри системы магнитных

2(545).indd 56 03.06.2020 9:06:06

экранов цезиевой АЛТ с учетом наружного экрана при воздействии внешнего однородного поля $H_{x\ extr}$ = 1 Э составляет $9 \cdot 10^{-8}$ Э, что соответствует коэффициенту экранирования $1{,}1 \cdot 10^{7}$, а при воздействии поля $H_{z\ extr}$ = 1 Э напряженность поля внутри системы магнитных экранов составляет $5 \cdot 10^{-7}$ Э, что соответствует коэффициенту экранирования $2 \cdot 10^{6}$.

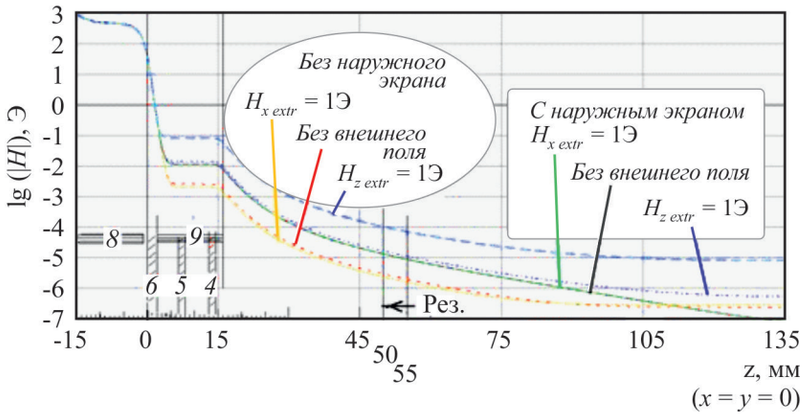


Рис. 10. Влияние внешних полей $H_{z\ extr}$ = 1 Э и $H_{x\ extr}$ = 1Э в системе многослойных магнитных экранов с наружным экраном и без него

В связи с этим можно сделать вывод, что коэффициент экранирования системы магнитных экранов цезиевой АЛТ составляет $10^{6}\ldots10^{7}$, в зависимости от направления внешнего однородного магнитного поля.

5. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ МАГНИТНЫХ АЛТ

Одними из важнейших характеристик цезиевых АЛТ являются магнитный сдвиг частоты (МСЧ) и коэффициент экранирования под воздействием внешних магнитных полей заданной величины и ориентации.

Величина МСЧ зависит от экранирующих свойств системы магнитной защиты АЛТ, от внешнего магнитного поля, а также от топографии магнитного поля, проникающего в переходную область между селектором атомных состояний и СВЧ-резонатором, в котором происходит взаимодействие атомного пучка с СВЧ-полем.

Нами получены экспериментальные данные по сдвигу частоты центральных пиков зеемановских резонансов прецизионных АЛТ, которые были измерены с использованием катушек Гельмгольца (рис.11), обеспечивавших три ориентации внешнего магнитного поля по отношению к АЛТ, при величине внешнего магнитного поля в 1 Э.

Проведено измерение МСЧ для АЛТ «Успех-3БМ» для выявления влияния направления внешнего магнитного поля на смещение частоты зеемановского резонанса. Результаты измерения приведены на рис. 12.

На рис. 12 можно увидеть, что наиболее благоприятным положением АЛТ «Успех-3БМ» является такое, когда направление внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и параллельно оси прибора (см. рис. 12, *а*). Магнитный сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса $m_F = \pm 1$ (см. рис. 3) составил 0,44 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования $1{,}6 \cdot 10^{6}$.

2(545).indd 57 03.06.2020 9:06:06

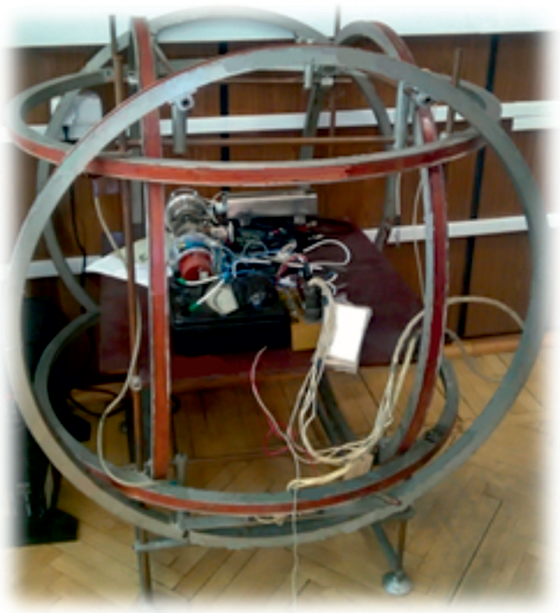
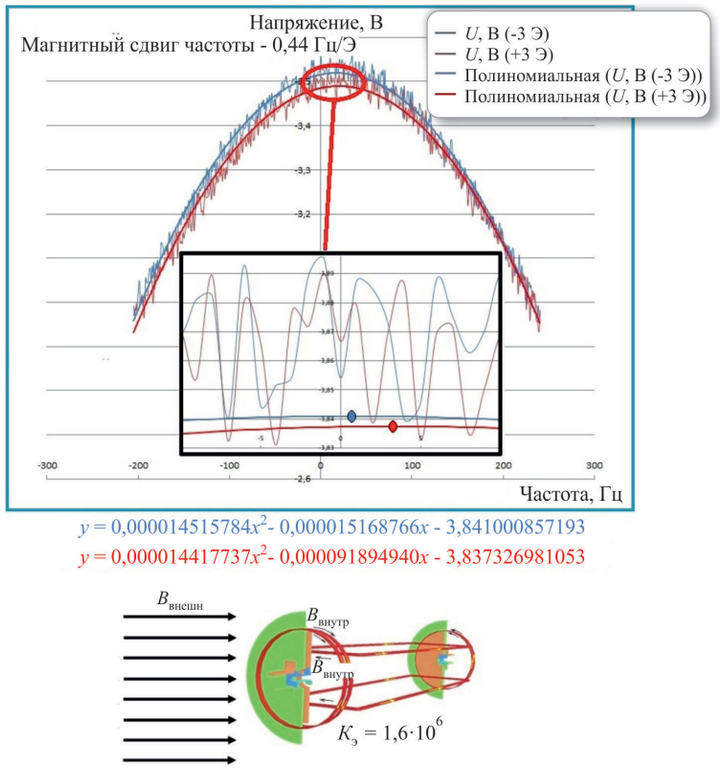


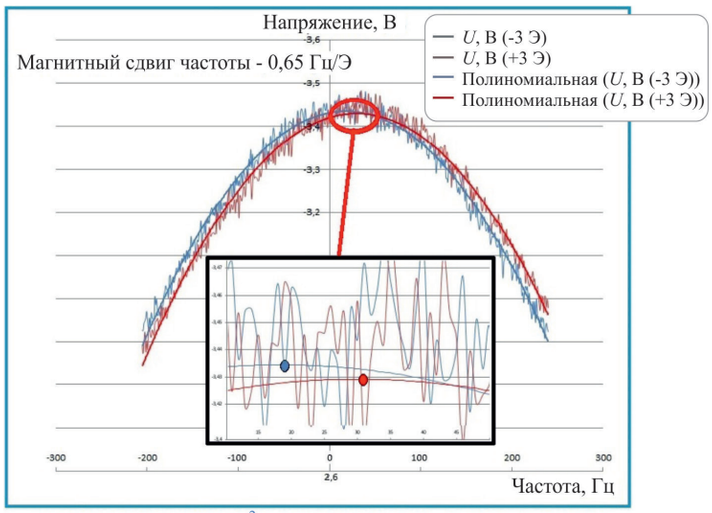
Рис. 11. Катушки Гельмгольца



а)

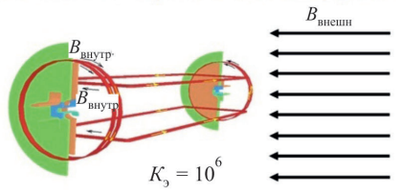
Рис. 12. Влияние направления внешнего магнитного поля на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ «Успех-3БМ» (начало):
а – направление внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и параллельно оси прибора

2(545).indd 58 03.06.2020 9:06:07

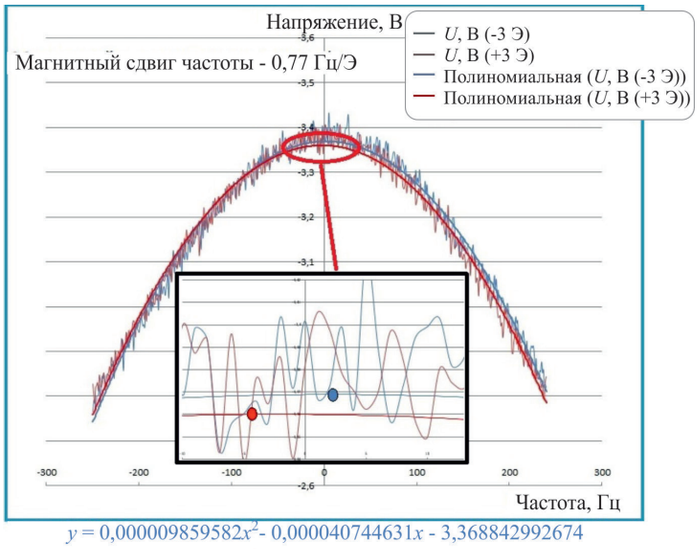


$y = 0{,}000010888493x^2 - 0{,}000399394575x - 3{,}430836230914$

$y = 0{,}000010571327x^2 - 0{,}000634331846x - 3{,}419713834949$

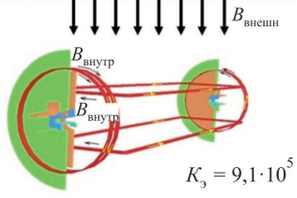


б)



$y = 0{,}000009859582x^2 - 0{,}000040744631x - 3{,}368842992674$

$y = 0{,}000009799756x^2 - 0{,}000043329744x - 3{,}360015594303$



в)

Рис. 12. Влияние направления внешнего магнитного поля на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ «Успех-3БМ» (окончание): *б* – направление внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и перпендикулярно оси прибора; *в* – направление внешнего магнитного поля параллельно направлению слабого магнитного поля и перпендикулярно оси прибора

2(545).indd 59 03.06.2020 9:06:07

Наихудшим положением АЛТ «Успех-3БМ» является такое, когда направление внешнего магнитного поля параллельно направлению слабого магнитного поля и перпендикулярно оси прибора. Магнитный сдвиг частоты центрального пика на зеемановском резонансе $m_F = \pm 1$ (см. рис. 3) составил 0,77 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования $9{,}2 \cdot 10^5$.

Когда направление внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и перпендикулярно оси прибора, магнитный сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса $m_F = \pm 1$ (рис. 3) составил 0,65 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования $1 \cdot 10^6$.

На рис. 13 представлены результаты измерения МСЧ для АЛТ «Успех-4М».

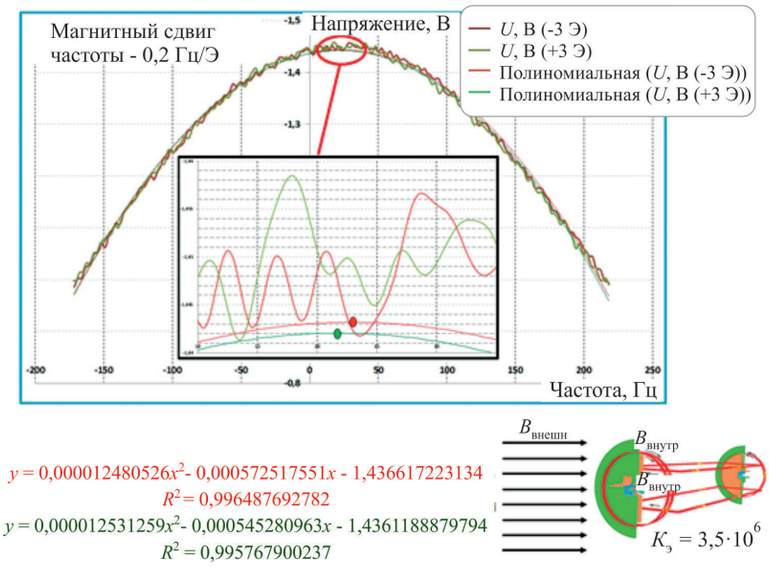


Рис.13. Влияние внешнего магнитного поля на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ «Успех-4М»

Измерения АЛТ «Успех-4М» проводились в положении, когда поперечные внешние магнитные поля были перпендикулярны направлению слабого магнитного поля подмагничивния и параллельны оси прибора. Магнитный сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса $m_F = \pm 1$ (см. рис. 3) составил 0,2 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования $3{,}5 \cdot 10^6$.

Полученные данные позволяют оценить коэффициент экранирования системы магнитной защиты на уровне $0{,}9 \cdot 10^6 \ldots 1{,}6 \cdot 10^6$ для АЛТ «Успех-3БМ» и более чем $3{,}0 \cdot 10^6$ для АЛТ «Успех-4М». Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования достаточно высокие, что говорит о правильном конструировании и технологическом исполнении систем магнитной защиты цезиевых АЛТ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведены аналитические расчеты эффективности экранирования для системы из тонкостенных цилиндрических экранов АЛТ «Успех-4М» в продольном и поперечном магнитном поле. Эффективность экранирования в поперечном поле составляет $6{,}80 \cdot 10^9$, а в продольном магнитном поле для открытого цилиндра коэффициент экранирования составляет $5{,}68 \cdot 10^8$, а для закрытого цилиндра эффективность экранирования равна $6{,}20 \cdot 10^8$.

Аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным, так как функциональные узлы АЛТ имеют сложную асимметричную конфигурацию и практически не поддаются точному расчету.

2(545).indd 60 03.06.2020 9:06:08

Поэтому авторы не рекомендуют использовать приведенные формулы для расчета эффективности экранирования магнитной защиты, так как полученный результат отличается от численного расчета и данных экспериментов на 3 порядка. Для более точного расчета эффективности экранирования следует использовать численные методы решения уравнений.

Используя компьютерное моделирование, произведены численные расчеты коэффициента экранирования АЛТ, которые позволяют оценить эффективность экранирования в диапазоне от $1{,}1\cdot10^7$ при воздействии внешнего однородного поля $H_{x\ extr} = 1$ Э до $2\cdot10^6$ при воздействии внешнего однородного поля $H_{z\ extr} = 1$ Э. Полученные результаты показывают на эффективность экранирования, достижимую при идеальных условиях. В производственном процессе добиться данных условий крайне сложно, и поэтому в промышленных АЛТ эффективность экранирования ниже расчетных значений.

Результаты компьютерного моделирования показали, что в АЛТ необходимо усиление торцевой магнитной защиты.

Произведено измерение МСЧ АЛТ для выявления влияния направления внешнего магнитного поля на смещение частоты вершины зеемановского резонанса. Полученные данные позволяют оценить коэффициент систем магнитного экранирования на уровне $0{,}9\cdot10^6\ldots1{,}6\cdot10^6$ для АЛТ «Успех-3БМ» и более чем $3{,}0\cdot10^6$ для АЛТ «Успех-4М». Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования достаточно высокие, что говорит о правильном конструировании и технологическом исполнении систем магнитной защиты цезиевых АЛТ.

Установлено, что наиболее благоприятным положением АЛТ является такое, когда направление внешнего магнитного поля перпендикулярно направлению слабого магнитного поля и параллельно оси прибора.

Установлено, что при тщательном изготовлении систем магнитного экранирования смена направления внешнего магнитного поля практически не вызывает частотного сдвига резонансов.

Разумеется, для получения высоких значений коэффициентов экранирования всей системы необходимо использовать высококачественные материалы и добиваться тщательного соблюдения технологических режимов обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Покровский, Е. Н.** Атомно-лучевые цезиевые трубки / Е. Н. Покровский, Н. И. Волкова, М. С. Доманов, М. П. Лещенко, С. А. Плешанов, И. И. Самарцев, Ю. А. Турутин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2009. – Вып. 3 (502). – С. 4 – 16.

2. **Голеницкий, И. И.** Анализ и оптимизация функциональных узлов цезиевых атомно-лучевых трубок методом компьютерного моделирования / И. И. Голеницкий, Н. Г. Духина, В. А. Мешков, С. А. Плешанов, В. В. Чугунов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2012. – Вып.1 (512). – С. 4 – 20.

3. **Gubser, D. U.** Shielding of longitudinal magnetic field with thin, closely spaced concentric cylinders of high permeability material / D. U. Gubser, S. A. Wolf, J. E. Cox // Rev. Sci. Instrum. – 1979. – Vol. 50, No 6. – P. 751 – 756.

4. **Пихтелев, А. И.** Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А. И. Пихтелев, А. А. Ульянов, Б. П. Фатеев и др.; под ред. Б. П. Фатеева. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.

5. **Рамзей, Н.** Молекулярные пучки / Н. Рамзей; пер. с англ. под ред. Б. П. Адьясевича. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 407 с.

6. **Плюсина, Э. И.** Влияние неоднородностей слабого магнитного поля на интенсивность резонанса в системе с раздельными осциллирующими полями / Э. И. Плюсина, Г. М. Хапланов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 9. – С. 109 – 115.

7. **Мясников, Л. Л.** Квантовая электроника на судах / Л. Л. Мясников. – Ленинград: Судостроение, 1966. – 428 с.

Статья поступила 10 марта 2020 г.

2(545).indd 61 03.06.2020 9:06:08

УДК. 621.385.632

УМЕНЬШЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЯЦИИ В ПРИБОРАХ СВЧ

А. И. Петросян[1], **В. И. Роговин**[1, 2], **С. О. Семёнов**[1, 2]

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

[2]*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет»*

Предложен метод уменьшения модулирующего напряжения в приборах СВЧ. Метод основан на применении в электронной пушке фокусирующего электрода, состоящего из двух электродов, единого источника питания и коммутатора. Проведены расчеты такой пушки и фокусировки магнитным полем МПФС сформированного ею пучка. Отмечены ламинарность пучка и малые пульсации пучка в МПФС. Показано уменьшение величины напряжения модуляции более чем в 2 раза по сравнению с управлением пучка фокусирующим электродом.

КС: напряжение модуляции в приборах СВЧ, запирающее напряжение, дополнительный электрод, электронная пушка, фокусировка пучка МПФС, единый источник питания, коммутатор

THE DIMINUTION OF MODULATION VOLTAGE IN MICROWAVE DEVICES

A. I. Petrosyan[1], **V. I. Rogovin**[1, 2], **S. O. Semenov**[1, 2]

[1]*JSC «RPC «Almaz», Saratov*

[2]*Saratov State University*

A method of the modulation voltage diminution in microwave devices is suggested. The method is based on using a focusing electrode, which consists of two parts, a single source of power supply and commutator. The computation design of such gun and beam focusing by magnetic field of the PPM are presented. The beam laminarity and small beam pulsations are demonstrated. More, than twice diminution of modulation voltage as compared with beam control by single focusing electrode is shown.

Keywords: the modulation voltage value in microwave devices, black-out voltage, supplementary electrode, electron gun, beam focusing by the PPM, a single source of power supply, commutator

1. ВЕДЕНИЕ

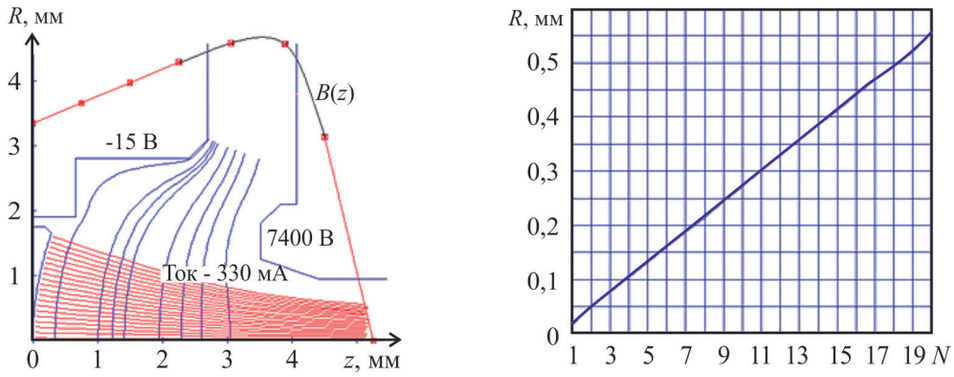
Известно применение сеток вблизи катода [1] для управления электронным пучком с малой величиной модулирующего напряжения. Однако сетки возмущают электронный пучок, что приводит к увеличению оседания электронов на стенки пролетного канала. К тому же сетки уменьшают ток пушки из-за подавления эмиссии электронов вблизи элементов теневой сетки или в результате оседания части электронов на токоперехватывающую сетку. Альтернативой сеткам служит штырь в центре катода [2], но при этом модулирующее напряжение значительно выше, чем при использовании сеток. С учетом вышесказанного на некоторых приборах СВЧ с большой долговечностью, например на космических ЛБВ, используется модуляция по фокусирующему электроду, хотя это требует увеличения модулирующего напряжения в несколько раз по срав-

2(545).indd 62 03.06.2020 9:06:08

нению с сеточными приборами и более чем в два раза по сравнению с приборами со штырем. Поэтому задача уменьшения модулирующего напряжения в приборах с управлением пучком напряжением фокусирующего электрода является важной и актуальной. Особо значимо решение этой задачи для приборов коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов. В данной работе предлагается метод решения этой задачи.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Метод основан на применении в электронной пушке фокусирующего электрода, состоящего из двух электродов. С целью сопоставления традиционной пушки с одинарным фокусирующим электродом и пушки с фокусирующим электродом, состоящим из двух электродов, были рассчитаны обе эти пушки (рис. 1….4). Расчет проводился по программам синтеза [3] и анализа [4, 5] электронных пушек.



а) *б*)

Рис. 1. Электронная пушка с напряжением анода 7400 В, распределением магнитного поля в пушке $B(z)$ и током 0,33 А (*а*) и зависимость радиальной координаты R крупной частицы от ее порядкового номера N в плоскости $z = 5{,}3$ мм (*б*)

Из рис. 1 следует, что пучок, формируемый пушкой с одинарным фокусирующим электродом, имеет требуемую величину тока и в односкоростном приближении является ламинарным, так как траектории крупных частиц, имитирующих траектории электронов, не пересекаются, а график зависимости $R(N)$ (см. рис. 1, *б*) является отрезком прямой линии. Запирание катода в этой пушке показано на рис. 2. Видно, что отрицательная эквипотенциальная поверхность -0,0001 (т. е. -0,74 В) является ближайшей к катоду, поэтому катод полностью заперт и его ток равен нулю. Пушка с дополнительным фокусирующим электродом представлена на рис. 3.

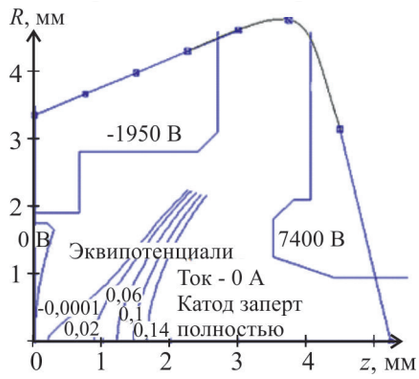


Рис. 2. Катод заперт отрицательным относительно катода напряжением -1950 В на фокусирующем электроде

2(545).indd 63 03.06.2020 9:06:08

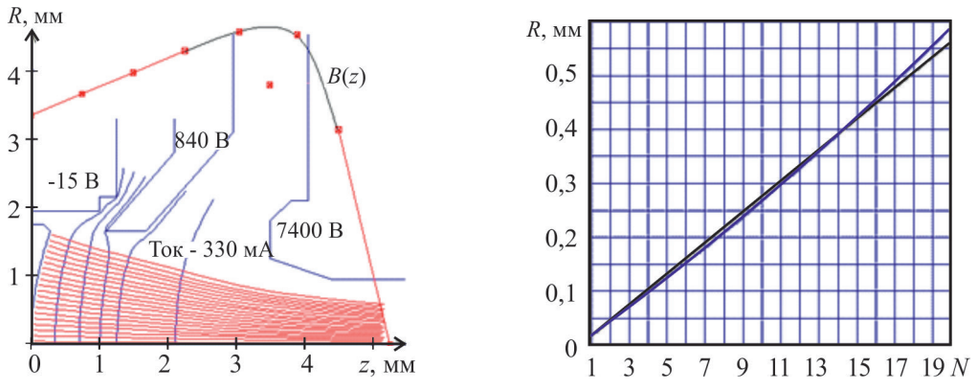


Рис. 3. Электронная пушка с дополнительным фокусирующим электродом, напряжением анода 7400 В, распределением магнитного поля в пушке $B(z)$ и током 0,33 А (*а*) и зависимость радиальной координаты R крупной частицы от ее порядкового номера N в плоскости $z = 5{,}3$ мм (*б*)

Конфигурацию и размеры обоих фокусирующих электродов этой пушки выбирают таким образом, чтобы формируемый ею пучок (см. рис. 3) в односкоростном приближении был ламинарным с тем же током и с такой же компрессией, как пучок, формируемый пушкой с одинарным фокусирующим электродом (см. рис. 1). Ламинарность этого пучка очевидна, так как траектории не пересекаются (см. рис. 3, *а*), а график зависимости $R(N)$ (см. рис. 3, *б*) близок к нарисованному на этом же рисунке отрезку прямой. При этом размеры пучка и ток примерно такие же, как у пучка на рис. 1. Напряжение на аноде составляет 7400 В, на первом фокусирующем электроде (ближнем к катоду) напряжение равно -15 В, на дополнительном фокусирующем электроде $U = 840$ В.

Результаты расчета обеих пушек (см. рис. 1, *а* и рис. 3, *а*) с учетом тепловых скоростей электронов представлены на рис. 4. Видно, что пучок стал многоскоростным, а токи пучков в обеих пушках остались равными 0,33 А.

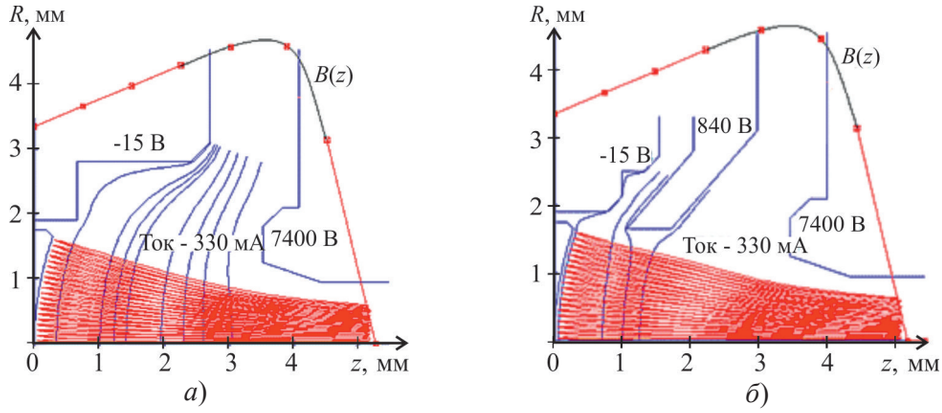


Рис. 4. Электронные пушки (см. рис. 1, *а* и рис. 3, *а*) с учетом тепловых скоростей электронов

Фокусировка пучков, сформированных этими пушками, магнитным полем МПФС представлена на рис. 5 и 6 соответственно. На этих рисунках на ординате показаны величины магнитного поля B, нормированные амплитудой $B_{амп}$, и нормированные диаметром пролетного канала $D_{кан}$

2(545).indd 64 03.06.2020 9:06:08

значения радиальных координат R границ трубок тока, содержащих 0,3; 0,4…0,9; 0,95; 0,98; 1,0 тока пучка. Заштрихованными полосками показаны границы начального участка трубки дрейфа, коллиматора и пролетного канала. Видно, что расчетное заполнение пролетного канала пучком равно примерно 0,55. Такая величина заполнения, как показал многолетний опыт сопоставления результатов расчета и данных испытания приборов СВЧ, позволяет ожидать токопрохождение через пролетный канал на уровне 99 % и более.

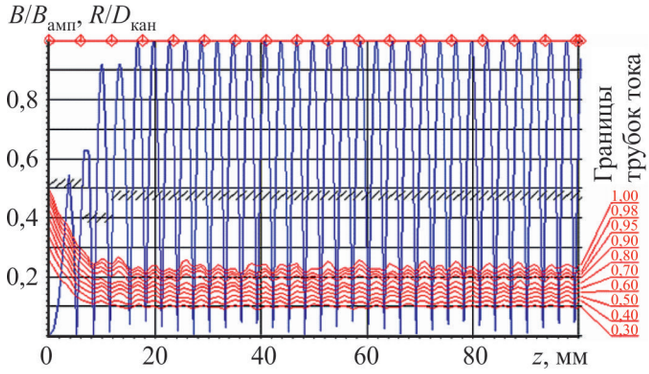


Рис. 5. Фокусировка пучка, сформированного пушкой (см. рис. 4, *а*) с пролетным каналом диаметром 1,2 мм в магнитном поле МПФС амплитудой 0,32 Тл

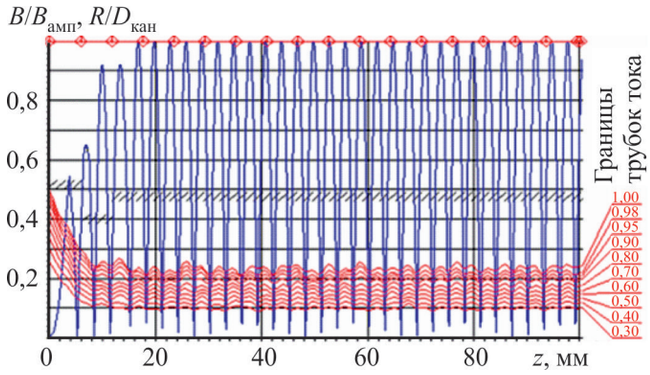


Рис. 6. Фокусировка пучка, сформированного пушкой (см. рис. 4, *б*) с пролетным каналом диаметром 1,2 мм в магнитном поле МПФС амплитудой 0,32 Тл

Сравнение рис. 5 и 6 показывает, что пульсации и заполнение канала пучком примерно одинаковы. Запирание пучка пушки (см. рис. 4, *б*) осуществляется двумя фокусирующими электродами с одинаковыми отрицательными относительно катода потенциалами, значения которых, как показал расчет, равны -840 В (рис. 7). Таким образом, применение фокусирующего электрода, состоящего из двух электродов, позволило уменьшить абсолютную величину запирающего катод напряжения с 1950 до 840 В, т. е. в 2,3 раза. Предлагается для включения и выключения прибора СВЧ использовать один и тот же источник питания и коммутатор. Если коммутатор подает плюс источника (840 В) относительно катода на дополнительный фокусирующий электрод и близкое к нулю напряжение на первый фокусирующий электрод, то прибор СВЧ включен. Если же подаётся -840 В относительно катода на оба фокусирующих электрода, то прибор выключен. Таким образом, величина напряжения модуляции в этом случае составляет 840 В вместо 1950 В, т. е. уменьшается в 2,3 раза. Описанный метод уменьшения величины напряжения модуляции запатентован [6].

2(545).indd 65 03.06.2020 9:06:09

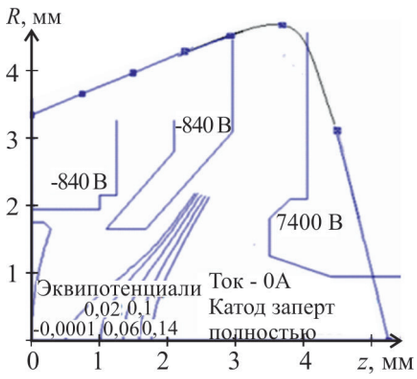


Рис. 7. Запирание катода отрицательными напряжениями, равными -840 В, на обоих фокусирующих электродах

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен альтернативный применению сеток и штыря метод существенного (в два и более раз) уменьшения величины запирающего катод напряжения и величины напряжения модуляции в приборах СВЧ. Метод предусматривает использование дополнительного фокусирующего электрода, единого источника питания и коммутатора для подачи запирающего катод напряжения и рабочего напряжения, которые равны по абсолютной величине. Проведены расчеты традиционной пушки без дополнительного фокусирующего электрода и пушки с дополнительным фокусирующим электродом, показаны ламинарность и одинаковые параметры пучка в обеих пушках. Рассчитана фокусировка пучков, сформированных обеими пушками, отмечаются малые и примерно одинаковые пульсации границы пучков в МПФС и одинаковое заполнение пролетного канала пучками. Проведены расчеты запирания катода в обеих пушках. Показано, что применение дополнительного фокусирующего электрода позволило в 2,3 раза уменьшить абсолютную величину запирающего катод напряжения, а применение единого источника питания и коммутатора дало возможность в 2,3 раза уменьшить величину напряжения модуляции. При этом коммутатор подаёт попеременно одинаковые отрицательные напряжения на оба фокусирующих электрода или такое же по абсолютной величине положительное напряжение на дополнительный фокусирующий электрод и близкое к нулю напряжение на первый фокусирующий электрод.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Патент 2943234 США, НКИ 315-30.** – 28.06.1960.

3. **Петросян, А. И.** Программа синтеза электронных пушек О-типа / А. И. Петросян, З. П. Иванова, В. В. Пензяков // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1976. – Вып. 10. – С. 109 – 110.

4. **Петросян, А. И.** Комплекс программ для проектирования на ЭВМ электронных пушек с сеточным управлением / А. И. Петросян, В. Д. Журавлева, В. В. Пензяков, В. И. Роговин // Прикладная физика. – 2002. – № 3. – С. 127 – 133.

5. **Журавлева, В. Д.** Моделирование многоскоростного электронного пучка в области пролетного канала электронно-оптической системы / В. Д. Журавлева, С. П. Морев, В. В. Пензяков, В. И. Роговин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 7. – 39 с.

6. **Патент 2714692 РФ.** Способ бессеточной модуляции пучка в СВЧ-приборах О-типа / С. О. Семёнов, А. И. Петросян, В. И. Роговин. – № 2019122216; заявл. 11.07.2019; опубл. 19.02.2020, Бюл. №5.

Статья поступила 27 марта 2020 г.

2(545).indd 66 03.06.2020 9:06:09

УДК:621.385.6

СЕТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ИЗ ВЫСОКОПЛОТНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛБВ

С. Д. Журавлев[1], В. И. Шестеркин[1], М. В. Горбачева[2], Д. А. Бессонов[3], Т. Н. Соколова[3], Е. Л. Сурменко[3]

[1]*АО «НПП «Алмаз», г. Саратов*

[2]*ООО «ВИРИАЛ», г. Саратов*

[3]*НПФ «Прибор-Т» СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов*

Приведены результаты экспериментальных исследований по применению лазерного излучения с ультракороткой длительностью импульса при изготовлении сеточных электродов из высокоплотного пиролитического графита для мощных импульсных ЛБВО. Представлены параметры лазерной установки и режимы лазерной абляции. Проведены испытания сеточных структур толщиной 110 мкм и шириной перемычек 60…70 мкм на вибропрочность при воздействии синусоидальных вибраций и одиночных ударов с большим ускорением.

КС: лазер, сеточные структуры, сверхкороткий импульс, пиролитический графит

GRID ELECTRODES MADE OF HIGH-DENSITY PYROLYTIC GRAPHITE FOR HIGH-POWER PULSED TWTs

S. D. Zhuravlev[1], V. I. Shesterkin[1], M. V. Gorbacheva[2], D. A. Bessonov[3], T. N. Sokolova[3], E. L. Surmenko[3]

[1]*JSC «RPC «Almaz», Saratov*

[2]*JSC «VIRIAL», Saratov*

[3]*RPC «Pribor-T» SSTU named after Gagarin U.A., Saratov*

The results of experimental studies on the use of laser radiation with ultrashort pulse duration in the manufacturing of grid electrodes from high-density pyrolytic graphite for high-power pulsed TWTOs are presented. The laser setup parameters and laser ablation modes are presented. The mesh structures with a thickness of 110 μm and bridges widths of 60…70 μm were tested for vibration strength under the influence of sinusoidal vibrations and single impacts with high acceleration.

Keywords: laser, mesh structures, ultrashort pulse, pyrolytic graphite

1. ВВЕДЕНИЕ

Для низковольтного управления током электронного пучка в электронных пушках импульсных ламп бегущей волны (ЛБВ) используют сеточные электроды, размещенные вблизи эмитирующей поверхности импрегнированного термоэмиссионного катода [1]. В приборах с выход-

2(545).indd 67 03.06.2020 9:06:09

ной средней мощностью до 100 Вт применяют одинарные сеточные структуры из материалов с высокими антиэмиссионными свойствами. В мощных импульсных ЛБВ для предотвращения перехвата тока и возникновения паразитной термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки в паузе между импульсами используются двойные сеточные структуры, состоящие из теневой и управляющей сеток. Перемычки управляющей сетки имеют меньшую ширину, и их размещают в геометрической тени перемычек теневой сетки. Точность совмещения перемычек определяется точностью их изготовления с минимально возможными допусками. Для приборов миллиметрового диапазона с высокой удельной мощностью электронного потока требования к точности изготовления сеточных структур существенно возрастают.

Для изготовления сеточных структур используют материалы, обладающие минимальной термической эмиссией при напылении на их поверхность продуктов испарения (Ba и BaO) с поверхности катода. К таким материалам относится гафний, имеющий более низкую плотность тока термической эмиссии по сравнению с молибденом и вольфрамом в одинаковых условиях [2]. Однако гафний имеет недостаточно высокую температуру плавления (около 2150 °C). Кроме того, при контакте с поверхностью импрегнированного катода гафний рекристаллизуется и теряет свою механическую прочность.

Наиболее перспективным материалом для сеточных структур является пиролитический графит, прочность которого даже при температуре более 2500 °C превышает прочность всех известных материалов [3, 4]. Пиролитический графит, как одна из модификаций углерода, химически инертный – не образует устойчивых химических связей с расплавами металлов и с продуктами испарения катода. При увеличении температуры сетки скорость десорбции бария и его окиси с ее поверхности превышает скорость адсорбции. Поверхность пиролитического графита, свободная от продуктов испарения с катода, имеет работу выхода, близкую к работе выхода непосредственно самого материала (около 4,6 эВ), что является необходимым условием существенного снижения термической эмиссии при больших значениях температуры сетки. Кроме того, коэффициент вторичной электронной эмиссии пиролитического графита, как и других материалов из углерода, существенно меньше, чем у металлов, и после текстурирования может достигать 0,3, что снижает фазовый объем электронного пучка в приборе и упрощает условия его фокусировки магнитными полями [5].

Однако до настоящего времени пиролитический графит не нашел применения в качестве сеточных структур в электровакуумных приборах, таких, как ЛБВ и клистроны. Это связано с невозможностью формирования сеточных структур с высокой прозрачностью и шириной перемычек до 100 мкм с использованием традиционных технологий (например, фотолитографии) и их присоединения (пайки) к сеткодержателям из молибдена, что вызвано упомянутой выше химической инертностью пиролитического графита.

Известны способы формирования деталей из пиролитического графита с помощью наложения металлических масок-шаблонов с последующей пескоструйной обработкой [6] и лазерным излучением с короткими импульсами [7]. Однако использование вышеуказанных методов не применимо для изготовления сеток, ширина перемычек которых сопоставима с толщиной сетки.

2. ЛАЗЕРНОЕ АБЛЯЦИОННОЕ МИКРОФРЕЗЕРОВАНИЕ

В данной работе исследована возможность применения оборудования с ультракороткими импульсами и высокой плотностью энергии лазерного излучения пикосекундной длительности для изготовления миниатюрных сеточных электродов из пиролитического графита [8].

2(545).indd 68 03.06.2020 9:06:09

Лазерное абляционное микрофрезерование представляет собой процесс послойного удаления обрабатываемого материала из объема заготовки при перемещения луча лазера по заданной программой траектории, соответствующей чертежу изготавливаемой детали.

Взаимодействие короткого и ультракороткого (наносекундного, пикосекундного и фемтосекундного) лазерного излучения высокой плотности энергии с веществом принципиально отличается от воздействия лазерного излучения с импульсами большей (микросекундной и более) длительности. К моменту окончания сверхкоротких импульсов термические и газодинамические процессы не успевают развиться в глубь материала, что предотвращает его расслоение. Малые размеры зоны диффузии энергии сверхкоротких лазерных импульсов позволяют увеличить точность и пространственное разрешение структур нано- и микроразмерного масштаба. Поверхностная абляция сверхкороткими лазерными импульсами уменьшает влияние экранирующего эффекта абляционной плазмы.

В процессе отработки технологии резки пиролитического графита была использована лазерная технологическая установка на базе пикосекундного лазера с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульса $\tau = 10$ пс и энергией импульса 40 мкДж, что соответствует плотности мощности, сфокусированной в зоне обработки при использовании короткофокусного ($F = 50$ мм) объектива (около $5{,}1 \cdot 10^{12}$ Вт/см^2). За один проход лазерное излучение наносекундной длительности импульса удаляет слой материала глубиной до 10^{-5} м, а пикосекундное – до 10^{-7} м [9, 10].

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

Заготовки сеточных структур представляли собой чашки из высокоплотного пиролитического графита в форме цилиндрической поверхности диаметром 15 мм с вогнутой торцевой поверхностью, в которой вырезались перемычки сеточной структуры. Плотность мощности в зоне обработки при диаметре пятна лазерного излучения 10 мкм составляла ~$5{,}1 \times 10^{12}$ Вт/см^2. Размер пятна абляционного воздействия обеспечивался объективами с фокусным расстоянием 50 мм, при этом каустика сфокусированного лазерного излучения составляла ~500 мкм. Стрела прогиба вогнутой поверхности заготовки превышала глубину резкости и составляла ~1,49 мм (рис. 1, *а*). При такой стреле прогиба сканирование луча лазера по поверхности заготовки не обеспечивало нахождение фокуса лазерного излучения на поверхности заготовки без применения дополнительного оборудования. Для решения данной проблемы было разработано устройство, позволяющее наклонять заготовку на угол α относительно ее оси симметрии с возможностью ее вращения вокруг оси симметрии (рис. 1, *б*). Угол наклона заготовки выбирается индивидуально под величину стрелы прогиба. Для заготовки сетки (см. рис.1, *а*) угол наклона составил 17°, что позволило уменьшить значение стрелы прогиба обрабатываемой зоны чашки до 350 мкм.

Формирование перемычек сетки осуществлялось по программе путем последовательного вырезания сегментов при азимутальном повороте заготовки вокруг оси симметрии. Традиционно прошивку двойных сеточных структур с теневой и управляющей сетками осуществляют в собранном КСУ с заготовками теневой и управляющей сеток, приваренными с помощью лазерной сварки к молибденовому катододержателю. Прошивку обеих сеток осуществляют одновременно методом электроискровой резки электродом из меди с пазами, повторяющими топологию перемычек сеток. Сформированные данным способом перемычки теневой и управляющей сеток имеют практически одинаковую ширину. Причем кольцевые перемычки обеих сеток размещены друг относительно друга не по радиусу кривизны катода, а по линии, парал-

2(545).indd 69 03.06.2020 9:06:09

лельной оси симметрии катодно-сеточного узла. При таком размещении часть кольцевой перемычки управляющей сетки, обращенная к катоду, и ее боковая поверхность, удаленная от оси симметрии, выходят из геометрической тени перемычек теневой сетки для электронов, стартующих по радиусу кривизны катода (рис. 2, *а*). При этом перехват тока перемычками управляющей сетки тем больше, чем больше ее толщина. В реальных конструкциях КСУ соотношение толщин теневой и управляющей сеток составляет приблизительно1:3.

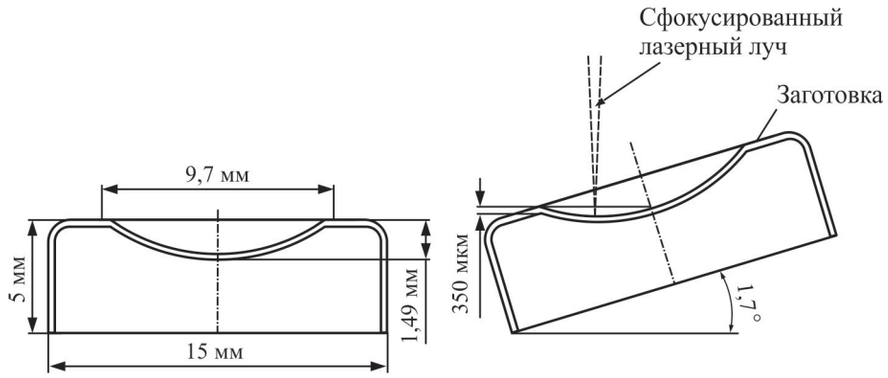


Рис.1. Заготовка сеточного электрода

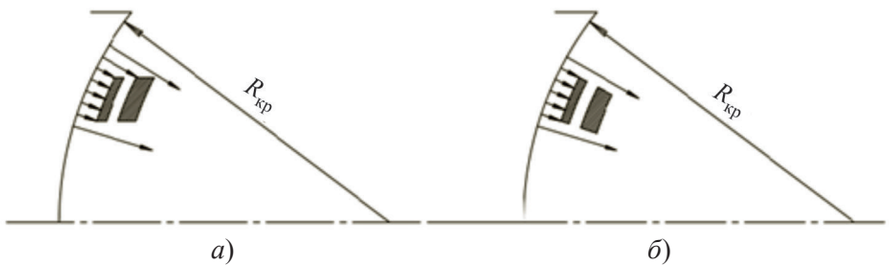


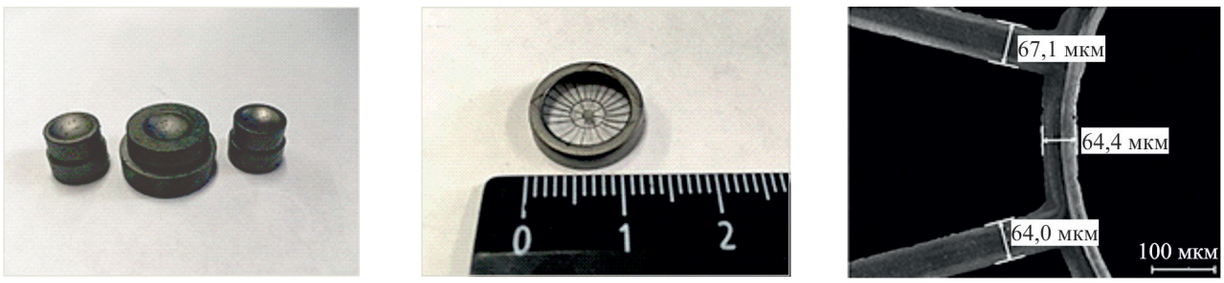
Рис. 2. Размещение перемычек сетки относительно поверхности катода
в зависимости от типа прошивки:
а – плоскопараллельная прошивка; *б* – прошивка по радиусу кривизны управляющей сетки

При раздельной прошивке сеток лазерная прошивка позволяет увеличить ширину кольцевых перемычек теневой сетки за счет увеличения их внешнего диаметра настолько, чтобы внешние диаметры обеих кольцевых перемычек располагались на линии радиуса кривизны катода. В этом случае обеспечивается защита кольцевых перемычек управляющей сетки от токоперехвата. Идеальное геометрическое затенение всех перемычек управляющей сетки обеспечивается при совместной прошивке обеих сеток лазерным излучением при повороте КСУ по двум сферическим координатам относительно центра кривизны управляющей сетки (рис. 2, *б*).

В данной работе приведены результаты раздельной прошивки теневой и управляющей сеток из высокоплотного пиролитического графита для промышленно выпускаемой импульсной ЛБВ *С*-диапазона. Формирование заготовок будущих сеток (рис. 3, *а*) осуществляли пиролитическим осаждением углерода из углеродсодержащей газовой среды (метан) со скоростью подачи в реакционную камеру 20…100 л/ч при температуре ~2000 ˚С, давлении до ~100 Па в течение ~180 мин. В процессе пиролиза углерод осаждался на поверхность цилиндрической матрицы

2(545).indd 70 03.06.2020 9:06:09

из графита МПГ-6, отполированную до 10…11 класса чистоты. Благодаря гладкой поверхности графитовых матриц, заготовки сеток легко отделялись и имели поверхность с шероховатостью такой же, как поверхность матриц. Толщина заготовок сеток составляла около 110 мкм. Радиусы кривизны теневой и управляющей сеток составляли 8 и 7,72 мм соответственно. Сеточные структуры содержали кольцевые перемычки с наружными диаметрами 3,2 и 1,2 мм соответственно, между которыми были сформированы 6 радиальных перемычек. На периферии сеточных структур, ограниченной диаметром 7,02 мм, были сформированы 24 радиальные перемычки (рис. 3, *б*). Ширина радиальных перемычек обеих сеток составляла приблизительно 65 мкм (рис. 3, *в*). Ширина кольцевых перемычек теневой сетки – около 90 мкм. Шероховатость краев перемычек сеточной структуры не превышала 1 мкм.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Сеточные структуры:
а – заготовки теневой и управляющей сеток; *б* – фотография управляющей сетки;
в – радиально-кольцевые перемычки при увеличении (×200)

Для уменьшения перехвата тока электронного пучка сеточными структурами их геометрическая прозрачность должна быть максимально высокой. При сохранении геометрических размеров ячеек сеточных структур, обеспечивающих оптимальные напряжения запирания тока электронного пучка, увеличение прозрачности можно обеспечить лишь за счет уменьшения ширины перемычек. С другой стороны, уменьшение ширины перемычек ограничено возможностями способа и технологии их «прошивки», не разрушающими перемычки в процессе изготовления, а также сохранением устойчивости к воздействию вибрационных и ударных нагрузок, которые сеточные структуры, как и прибор в целом, испытывают в процессе эксплуатации в аппаратуре.

С этой целью изготовленные сеточные структуры были испытаны на устойчивость к вибрационным и ударным нагрузкам при воздействии синусоидальных вибраций в диапазоне частот 10…2000 Гц с ускорениям 170 м/с^2 и одиночных ударов с длительностью импульсов 2…20 мс и ускорением 230 м/с^2. Общее количество ударов – 12. Режимы испытаний превосходили требования, предъявляемые к вакуумным приборам космического назначения в ~1,5 раза. Сеточные структуры, изготовленные методом микроразмерного лазерного фрезерования, успешно выдержали испытания на вибропрочность [11].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ прецизионного лазерного фрезерования с применением лазерного излучения пикосекундной длительности импульса и плотностью мощности около 5,1·10^{12} Вт/см^2 был применен для формирования сеточных структур толщиной 110 мкм с шириной перемычек

2(545).indd 71 03.06.2020 9:06:09

60…70 мкм из высокоплотного пиролитического графита для мощных импульсных приборов СВЧ-диапазона. Сеточные структуры не разрушаются при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с ускорением, по крайней мере, до 23*g*.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Григорьев, Ю. А.** / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 7. – 71 с.

2. **Бабанов, А. Ж.** / А. Ж. Бабанов, В. И. Козлов, В. Е. Авдеев, А. А. Андреев // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1980. – Вып. 8. – С. 14 – 17.

3. **Smith, W. H.** Pyrolytic graphite / W. H. Smith, D. H. Leeds // Modern Materials. – 1970. – No 7. – P. 139.

4. **Фиалков, А. С.** / А. С. Фиалков, А. И. Бавер, Н. М. Сидоров и др. // Успехи химии. – 1965. – Т. 34, вып. 1. – С. 132 – 153.

5. **Заявка 2276681 Франция, МКИ H 01 j 1/46** / G. Pierre, B. Gilles; Thomson-CSF (Франция). – № 7422686; заявлено 28.06.74; опубл. 23.01.76.

6. **Трофимова, О. А.** / О. А. Трофимова, Т. Н. Соколова, Г. В. Конюшков // Вестник СГТУ. – 2006. – № 3 (14), вып. 1. – С. 121 – 128.

7. **Локтионов, Е. Ю.** / Е. Ю. Локтионов, А. В. Овчинников // V международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров». – С.-Петербург, 2009. – С. 47 – 52.

8. **Пат. 2344027 Российская Федерация** / Т. Н. Соколова, О. А. Трофимова, А. В. Конюшин, Е. Л. Сурменко. – Заявлено 14.05.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.

9. **Попов, И. А.** / И. А. Попов, Т. Н. Соколова, Е. Л. Сурменко и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 468.

10. **Кононенков, Т. В.** / Т. В. Кононенков, В. И. Конов // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 28, № 2. – С. 167 – 172.

11. **Журавлев, С. Д.** Формоустойчивость сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением / С. Д. Журавлев, В. И. Шестеркин, Д. И. Целиков, М. В. Горбачева, Д. А. Бессонов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1. – С. 22 – 25.

Статья поступила 1 мая 2020 г.

2(545).indd 72 03.06.2020 9:06:10

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.391.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО ЧИСЛА ФЛЮКТУИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

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

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

Получено выражение для неизвестного числа флюктуирующих по фазе сигналов. Проведено сопоставление апостериорной дисперсии числа сигналов, детерминированных, флюктуирующих по Гауссу и по фазе, от отношения сигнал/шум.

КС: оптимальное обнаружение неизвестного числа сигналов, флюктуации фазы, детерминированные сигналы

DETERMINATION OF AN UNKNOWN NUMBER OF FLUCTUATING SIGNALS

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

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

An expression for an unknown number of phase fluctuating signals is obtained. A comparison of the posteriori dispersion of the number of signals, deterministic, fluctuating according to Gauss and phase from the signal-to-noise ratio, is performed.

Keywords: optimal detection of an unknown number of signals, phase fluctuations, deterministic signals

В связи с появлением летательных аппаратов типа «дрон», число которых может быть сколь угодно большим и по большей части неизвестным, в последние годы вновь возник интерес к задачам статистической обработки отраженных от многочисленных объектов радиолокационных сигналов, которые, как правило, носят флюктуационный (вероятностный) характер.

Задача обнаружения флюктуирующего по амплитуде и фазе радиолокационного сигнала была решена классическими методами [1], где, в частности, было показано, что при известной априорной (начальной) вероятности присутствия сигнала оптимальным обнаружителем является наблюдатель Зигерта. Позднее было также показано, что при подходе к решению задачи с точки зрения обнаружения неизвестного (но не более одного) числа сигналов в одной области получается тот же самый результат. В случае присутствия больше чем одного сигнала в N областях пространства, исследуемого с помощью радиолокации, такого соответствия не наблюдается, и поэтому необходимо пользоваться методами, развитыми в работе [2].

Рассмотрим оптимальное обнаружение неизвестного числа сигналов в N областях, если известно, что в каждой области может находиться не более одного сигнала, и если факты выпадения

2(545).indd 73 03.06.2020 9:06:10

сигналов в областях независимы, с заданными априорными вероятностями v_j ($j = 1,2, \ldots N$). В этом случае средний риск имеет вид:

$$R = \int_{G_1} \ldots \int_{G_n} \left(\sum_{n=0}^{N} I(n, \hat{n}) \cdot \tilde{p}_n \right) \cdot P(y_1, \ldots, y_N) \cdot dy_1 \cdot \ldots dy_N.$$

Здесь $n = \sum_{j=1}^{N} n_j$ – число сигналов в N областях; $\hat{n} = \hat{n}(y_1, \ldots, y_N)$ – оценка этого числа; n_j – число сигналов в j-й области, которое может быть равно 0 или 1; $y_j(t)$ – входная реализация радиолокационного сигнала, отраженного от j-й области, имеющая область значений G_j. Остальные обозначения те же, что и в [2].

Традиционно рассмотрим квадратичную функцию цели $I(n, \hat{n}) = (n - \hat{n})^2$. Предположим также, что сигналы в областях независимы. Тогда, проделав аналогичные выкладки, приведенные в [2], получим оптимальную оценку числа сигналов $\hat{n}_0$ и минимальный средний риск R в виде

$$\hat{n}_0 = \left[\sum_{n=0}^{N} n \cdot \tilde{p}_n \right] = \left[\sum_{j=1}^{N} \tilde{v}_j \right], \tag{1}$$

$$R = \sum_{j=1}^{N} \int_{G_j} \tilde{\sigma}_j^2 \cdot P(y_j) \cdot dy_j + \int_{G_1} \ldots \int_{G_N} \left(\left[\sum_{j=1}^{N} \tilde{v}_j \right] - \sum_{j=1}^{N} \tilde{v}_j \right)^2 \cdot P(y_1, \ldots, y_N) \cdot dy_1 \cdot \ldots dy_N. \tag{2}$$

Здесь $\tilde{v}_j$ – апостериорная вероятность наличия сигнала в j-й области; $\tilde{\sigma}_j^2 = \tilde{v}_j \cdot (1 - \tilde{v}_j)$; $[z]$ – целая часть z.

При условии, что $\sum_{j=1}^{N} \tilde{v}_j >> 1$ и $\sum_{j=1}^{N} \tilde{\sigma}_j^2 >> 1/4$, формулы (1) и (2) примут вид:

$$\hat{n}_0 = \sum_{j=1}^{N} \tilde{v}_j(y_j), \tag{3}$$

$$R = \sum_{j=1}^{N} \int_{G_j} \tilde{\sigma}_j^2 \cdot P(y_j) \cdot dy_j = \sum_{j=1}^{N} \left\langle \tilde{\sigma}_j^2 \right\rangle_{y_j}. \tag{4}$$

Из выражений (3) и (4) видно, что оптимальная оценка равна среднему апостериорному числу сигналов в N областях, а минимальный риск определяется суммой средних апостериорных дисперсий числа сигналов в каждой области.

Ввиду статистической эквивалентности областей, расчет средней апостериорной дисперсии будем вести для одной из них, временно опустив индекс. Из формул теории вероятностей [3] имеем

$$\tilde{v} = \frac{v \cdot \Lambda(y)}{1 - v + v \cdot \Lambda(y)}, \tag{5}$$

$$P(y) = P(y/0) \cdot \{1 - v + v \cdot \Lambda(y)\}.$$

2(545).indd 74 03.06.2020 9:06:10

Здесь $\Lambda(y) = \dfrac{P(y/1)}{P(y/0)}$ – отношение правдоподобия; $P(y/0)$ – распределение входной реализации, состоящей только из шума, и поэтому совпадающее с распределением шума $P_{ш}(y)$. Принимая во внимание выражение (5), получим

$$\left\langle \tilde{\sigma}^2 \right\rangle_y = \int_G \tilde{\sigma}^2 \cdot P(y) \cdot dy = \sigma_0^2 \cdot \int_G P_{ш}(y) \cdot \frac{\Lambda(y) \cdot dy}{1 - \nu + \nu \cdot \Lambda(y)}, \tag{6}$$

где $\sigma_0 = \sqrt{\nu \cdot (1-\nu)}$.

Рассмотрим обнаружение флюктуирующего по фазе сигнала, имеющего вид

$$S_\varphi = \sqrt{\varepsilon} \cdot \mathrm{Re}\{e^{i\varphi} \cdot u(t) \cdot e^{-i\omega_0 \cdot t}\}. \tag{7}$$

Здесь φ – случайная начальная фаза, имеющая равномерный закон распределения; ε – энергия сигнала; ω_0 – несущая частота; $u(t)$ – детерминированный комплексный коэффициент, удовлетворяющий условию $\dfrac{1}{2} \cdot \int_0^T |u(t)|^2 dt = 1$; $[0, T]$ – интервал обнаружения.

Для сигнала (7) отношение правдоподобия имеет вид [1–3]: $\Lambda(y) = e^{-\rho} \cdot I_0(2\sqrt{\rho} \cdot z)$. Здесь $\rho = \dfrac{1}{2 \cdot N_0} \cdot \int_0^T S_\varphi^2 \cdot dt$ – отношение сигнал/шум; N_0 – спектральная плотность мощности шума; $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя; $z = \left| \dfrac{1}{\sqrt{2 \cdot N_0}} \int_0^T y(t) \cdot u(t) \cdot e^{-i\omega_0 t} \cdot dt \right|$.

Усреднение по шуму в интеграле (6) заменим усреднением по случайной скалярной величине z, имеющей закон распределения Релея. Тогда (6) примет вид

$$\left\langle \tilde{\sigma}^2 \right\rangle_y = \sigma_0^2 \cdot \int_0^\infty 2 \cdot z \cdot e^{-z^2} \cdot \frac{e^{-\rho} \cdot I_0(2\sqrt{\rho} \cdot z) \cdot dz}{1 - \nu + \nu \cdot e^{-\rho} \cdot I_0(2\sqrt{\rho} \cdot z)}. \tag{8}$$

Интеграл (8) при произвольном ρ в элементарных функциях не берется, но может быть вычислен асимптотически для $\rho < 1$ и $\rho > 1$.

При малых ρ ($\rho < 1$) отношение правдоподобия близко к единице, поэтому возможно разложение функций $e^{-\rho}$ и $I_0(2\sqrt{\rho} \cdot z)$ в ряд Тейлора по степеням ρ. Ограничиваясь степенями порядка ρ^2, получаем

$$\left\langle \tilde{\sigma}^2 \right\rangle_y = \sigma_0^2 \cdot \{1 - \sigma_0^2 \cdot \rho^2 + o(\rho^2)\}. \tag{9}$$

При больших ρ ($\rho > 1$) при помощи асимптотических методов получаем выражение для интеграла (8)

$$\left\langle \tilde{\sigma}^2 \right\rangle_y = 2^{-\frac{5}{4}} \cdot \pi^{\frac{3}{4}} \cdot \sigma_0^2 \cdot \rho^{-\frac{1}{4}} \cdot \exp\left(-\frac{\rho}{4} - \frac{\ln^2 \rho}{16 \cdot \rho} \right) \cdot \left[1 + o\left(\frac{\ln \rho}{\rho} \right) \right], \tag{10}$$

из которого видно, что средняя апостериорная дисперсия при больших ρ убывает примерно экспоненциально.

Семейство зависимостей $B_j = B(\rho, \nu_j) = \left\langle \tilde{\sigma}_j^2 \right\rangle_{y_j}$ от ρ при различных значениях ν_j приведено

2(545).indd 75 03.06.2020 9:06:10

на рис. 1. Начальные и конечные участки кривых построены при помощи формул (9) и (10), а промежуточные (штриховые линии) приближенно интерполированы. Сравним полученные характеристики с аналогичными зависимостями, полученными в [2] для других видов сигналов (рис. 2). При малых ρ совпадение полученных в работе кривых с кривыми для флюктуирующих по нормальному закону сигналов говорит о существенном влиянии на неопределенность числа сигналов флюктуации фазы. С увеличением ρ, ввиду того, что фаза является неэнергетическим параметром, это влияние практически исчезает и характеристики приближаются к кривым для детерминированного сигнала, оставаясь при этом выше их. Такое поведение объясняется влиянием детектирования сигнала, необходимого при флюктуирующей фазе, то есть при заданной средней апостериорной дисперсии для обнаружения сигнала с флюктуирующей фазой потребуется несколько большее значение ρ, чем для обнаружения детерминированного сигнала. Из рис. 1 следует, что характеристики симметричны относительно замены v_j на $1 - v_j$, что является следствием зависимости (9) и (10) от $\sigma_{0j} = \sqrt{v_j \cdot (1 - v_j)}$. Наибольшей апостериорной дисперсией обладают сигналы с $v_j = 0{,}5$.

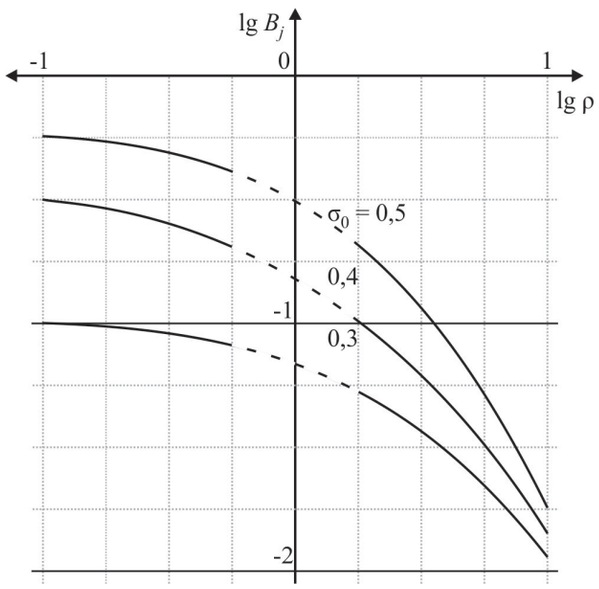


Рис. 1. Зависимости апостериорной дисперсии от отношения сигнал/шум

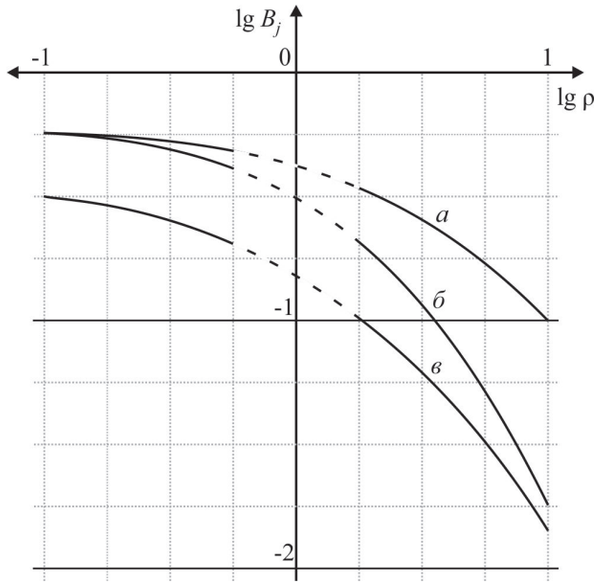


Рис. 2. Зависимости апостериорной дисперсии от отношения сигнал/шум ($\sigma_0 = 0{,}4$):
а – детерминированные сигналы; *б* – флюктуирующие по Гауссу; *в* – флюктуирующие по фазе

Рассмотренное в работе определение неизвестного числа сигналов может быть использовано при оптимальном распределении энергии между N областями. При большом ресурсе энергии это распределение близко к распределению энергии при детерминированных сигналах и стремится к равномерному.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вайнштейн, Л. А.** Выделение сигналов на фоне помех / Л. А. Вайнштейн, В. Д. Зубаков. – М.: Сов. радио, 1960.

2. **Большаков, И. А.** Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума / И. А. Большаков. – М.: Сов. радио, 1969.

3. **Левин, Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1969.

Статья поступила 18 сентября 2019 г.

2(545).indd 76 03.06.2020 9:06:10

ИСТОРИЯ

УДК (09)

УЧЕНЫЕ «ИСТОКА» – ВЕТЕРАНЫ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

Часть 2

А. К. Балыко
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Т. А. Балыко, учитель истории
Общеобразовательная средняя школа № 16, г. Щелково

SCIENTISTS OF «ISTOK» – VETERANS OF THE GREAT PATRIOTIC WAR

Part 2

A. K. Balyko
JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

T. A. Balyko, history teacher
Comprehensive secondary school № 16, Shchelkovo

ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ КИРЮШИН

Полвека назад меня (А. К. Балыко – *ред.*), молодого специалиста теоретического отдела «Истока», пригласили на банкет, посвященный 50-летию старшего научного сотрудника отдела В. П. Кирюшина. Все горячо поздравляли юбиляра, говорили в его адрес много теплых и хороших слов, на что Владимир Павлович, человек предельно скромный, реагировал сдержанно, улыбаясь. Лишь иногда, когда речь поздравлявшего доходила до высшей фазы, он останавливал его словами: «Да это было не совсем так...», «В этом участвовал не только я…».

В. П. Кирюшин

Перечисляя научно-производственные заслуги В. П. Кирюшина, сотрудники непременно на первое место ставили его первенство в создании ЛОВ. Я тогда плохо понимал, что такое ЛОВ, но что значит быть первым во всем Советском Союзе, оценить мог по достоинству. Вот почему именно об этой работе я попросил начать свой рассказ Владимира Павловича.

– Для этого мне необходимо сделать отступление. Я учился в МГУ на физическом факультете. Некоторые наши преподаватели были тесно связаны с Фрязино. Н. А. Капцов – совладелец фабрики, много лет работавшей на будущей

2(545).indd 77 03.06.2020 9:06:11

территории «Истока», с его именем связывают создание во Фрязино первой в России лаборатории по изучению электронных процессов в вакууме. С. Д. Гвоздовер руководил аспирантурой в НИИ-160 (позднее «Исток»). Поэтому неудивительно, что я оказался во Фрязино.

Дипломную работу выполнял под руководством Анатолия Павловича Федосеева, а рядом со мной в лаборатории работал Э. А. Гельвич. Тема диплома: «Исследование реактивных свойств электронного облака в магнетронах» – меня увлекала. Защитился на отлично, и меня оставили в аспирантуре МГУ. Надо отметить, что в то время выпускников физфака МГУ распределяло правительство страны и лишь 5 % имели право продолжать учебу в аспирантуре. Предполагалось, что я буду продолжать заниматься магнетронами. Но в это время появились публикации о новых приборах – лампах обратной волны (ЛОВ). Мои научные руководители С. Д. Гвоздовер и В. М. Лопухин переориентировали меня на это направление. Я продумал конструкцию и изготовил прибор. Все узлы сделал сам, только электронную пушку взял от клистрона, разработанного в НИИ-160. Прибор заработал сразу. Было это в 1955 году. Все тогда приходили в нашу лабораторию, чтобы посмотреть на новшество – к новому, первому, относились с большим интересом. Затем я исследовал основные свойства «своей» ЛОВ и опубликовал ряд статей. Замечу, что в нашей стране несколько научных коллективов усиленно занимались созданием этих приборов, но так получилось, что мой образец в тот момент оказался первым работающим. Позднее появились и другие, более совершенные приборы...

– А как Вы считаете, какие у Вас были предпосылки, чтобы стать ученым?

– Трудно сказать. Я родился в Минске. Отец работал юристом, затем занялся философией. В 1935 году наша семья переехала в Подмосковье. Школу я заканчивал в Ильинском в 1940 году, за отличную учебу получил аттестат с золотой каемочкой. Занимался фотографией и радиолюбительством – в конце 30-х это было популярное увлечение молодежи. В те годы действовал приказ министра обороны СССР маршала Тимошенко, согласно которому в институт брали только юношей, отслуживших армию. Так что в октябре сорокового я был призван в армию и прослужил до конца 1946 года. После возвращения я опоздал к приему в вузы. Чтобы не терять время до осени и восстановить знания, поступил работать лаборантом в МЭИ, в лабораторию антенн, к известному ученому Казанцеву. Наверное, меня все же что-то тянуло к знаниям, к науке. Здесь я впервые познакомился с СВЧ-техникой. В лаборатории было много немецкого трофейного оборудования дециметрового диапазона длин волн, из которого мы готовили лабораторные работы для студентов.

Осенью 1947 года я был принят на физический факультет МГУ без экзаменов. Учеба в университете протекала нормально. Где-то на 3-4 курсах начался настоящий бум, связанный с развитием ракетной и ядерной техникой. Тогда число студентов МГУ увеличилось вдвое за счет перевода к нам отличников из других вузов страны.

– Владимир Павлович, Вы прослужили в армии 6 лет – это один из самых длительных и трудных сроков службы для советского солдата. Казалось бы, что о войне все уже сказано и пересказано. И тем не менее, обойти этот период Вашей жизни никак нельзя...

– Война застала меня в самом начале занятий на двухгодичных офицерских курсах. Курсы пришлось прервать и встретить наступавшие немецкие войска танкистом на Северо-Западном фронте. Запомнилось ужасное зрелище – отступление нашей армии. Дивизия наша почти полностью была обескровлена. В период переформирования я был послан на переподготовку и стал связистом-радиотехником. Вернулся опять под Старую Русу почти на прежнее место – фронт там тогда стоял долго.

2(545).indd 78 03.06.2020 9:06:11

Особой ожесточенностью отличались бои под Спас-Деменском. Немецкая группировка прочно засела в отобранном у нас укрепрайоне. Чтобы отсечь ее от подкрепления, нужно было перерезать дорогу длиной 2 километра. Несколько месяцев мы «грызли» этот отрезок, но взять смогли лишь после начала отступления немецких войск.

После нашу часть перебросили под Вязьму, поближе к Курску, где намечалось грандиозное сражение. В этом сражении я не участвовал. Наша дивизия располагалась на расстоянии от места боя; мы стояли, так сказать, на всякий случай. Потом, уже позднее, пошло массированное наступление на Белоруссию и Прибалтику; мы с боями брали Смоленск, Витебск, Вильнюс, Каунас и, наконец, Кенигсберг. За бои в Белоруссии и Восточной Пруссии был награжден медалями «За победу» и «За боевые заслуги».

Но окончания войны в Европе я так и не дождался. Остатки нашей дивизии погрузили в три эшелона и отправили на восток. На Дальнем Востоке мы обосновались на сопках, в тайге. Жили в землянках. Военные действия начались 3 сентября, но были кратковременными. Мы успели взять города Мулин и Мудандзян. В этом районе пробыли до зимы. Затем дивизию вновь расформировали, и мы вернулись на свою территорию в г. Спасск-Дальний. Здесь мне пришлось прослужить еще целый 1946 год. Вот, в общем-то, и все, что коротко можно рассказать о службе...

Добавим, что за боевые заслуги Владимир Павлович был награжден многими орденами и медалями, его фотография была помещена на стенде теоретического отдела «Наши ветераны», и каждый год в День Победы сотрудники отдела с благодарностью отмечали его вклад в общую победу нашего народа.

Научная деятельность В. П. Кирюшина после окончания аспирантуры МГУ и защиты диссертации продолжилась в НПП «Исток» с 1956 года: сначала в лаборатории В. А. Афанасьева, а затем в теоретическом отделе, в лаборатории Р. А. Силина.

Интерес к теоретическим исследованиям он проявлял еще в университете. На основе разработанного математического обеспечения Владимир Павлович создал ряд уникальных программ для ЭВМ по расчету спиральных замедляющих систем, антенн, многослойных диэлектрических волноводов, оптических систем. Много занимался тепловизионной аппаратурой. С особым интересом проводил исследования СВЧ-плазмотронов и приборов для СВЧ-нагрева, предложил ряд новых идей, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения. Совместно с разработчиками А. М. Цейтлиным, Н. И. Цемко и А. С. Зусмановским был создан уникальный образец плазмотрона, на котором получен выдающийся результат – СВЧ-разряд большой мощности в атмосфере.

Параллельно с творческой работой В. П. Кирюшин занимался педагогической деятельностью. Он был одним из первых преподавателей в «истоковском» втузе и читал курс общей физики более 10 лет, пока втуз был филиалом МЭИ.

В числе его любимых занятий был туризм. Он много бродил по горам Кавказа как самостоятельно, так и увлекая за собой сотрудников отдела. Памятны времена, когда Владимир Павлович организовывал коллективные поездки в Тиберду и Домбай. Не только горы привлекали его, но и подводная охота, лыжи, автотуризм. И всегда он с интересом рассказывал о своих путешествиях, сопровождая их красивыми слайдами.

Владимир Павлович с большой заботой относился к своим товарищам, сослуживцам, ни в чём не отказывая им. Последние годы предметом его заботы был садово-огородный участок.

2(545).indd 79 03.06.2020 9:06:11

АННА ДМИТРИЕВНА ГАВРИЛОВА

А. Д. Гаврилова

В канун Дня Победы по Центральному телевидению демонстрировался многосерийный фильм «Жуков», в котором многократно использовались документальные кадры. В последней серии фильма в сюжете, посвященном празднованию 20-летия Победы (1965 г.), среди ветеранов, шагающих по праздничной Москве, крупным планом показали «истоковку» А. Д. Гаврилову.

Анна Дмитриевна прожила 92 года. Она была многогранно одаренным человеком, участницей Великой Отечественной войны, народной любимицей, гордостью города Фрязино. Всегда бодрая и жизнерадостная, она прожила долгую жизнь. Возможно, оттого, что была убеждена, что ни в коем случае нельзя идти на поводу у своих лет. «Годы отдельно, а интересы в жизни отдельно», – была одной из любимых ее поговорок. Люди слушали ее и искренне верили, что Анна Дмитриевна нашла способ управлять годами. А способ этот, по ее мнению, предельно прост: ты сам должен делать жизнь интересной. Она старалась побывать на выставках знаменитых и не очень художников, запоем читала биографии выдающихся людей, с увлечением рассказывала о прочитанном, любила театр, музыку, балет, активно занималась физической культурой. И как не позавидовать было этой женщине, прошедшей большой жизненный путь, но до конца своей жизни не утратившей радости от общения с прекрасным.

Родилась Анна в г. Щелково. В предвоенные годы, закончив десятилетку, устроилась работать на станции Чкаловской. Вечерами она занималась в кружках художественной самодеятельности: красиво пела и зажигательно плясала, увлекалась спортом – ездила на велосипеде и хорошо каталась на коньках. Однажды, это было в начале войны, Анна пробилась к генералу и упросила взять ее в Гвардейский полк ночных бомбардировщиков. С тех пор более 50 лет не расставалась она с пишущей машинкой. Профессия негромкая, но такая была необходимая. В полку Анна познакомилась с выпускником МГУ С. Ивановым. По приказу командира полка в тяжелых полевых условиях Стефан и Анна составляли «Историю 680-го полка». Книга получилась замечательной, а между ее авторами завязалась крепкая дружба, переросшая затем в любовь.

Сталинградская битва, Курская дуга, освобождение Белоруссии, Польши, Германии – такой боевой путь прошел легендарный полк ночных бомбардировщиков. Летом 1946 года полк был расформирован. Истории жизни и любви Стефана Петровича Иванова и Анны Дмитриевны Гавриловой выпускник Фрязинской школы № 2 Т. А. Балыко посвятил одну из глав своей книги «Поколение войны», изданной в самиздате к 60-летию Победы.

ГЕРОИЗМ СТАРТА
(глава из книги «Поколение войны»)

Летом 1941 года 18-летняя Аня Гаврилова уже успела провести свой отпуск в доме отдыха, а когда вышла на работу, то не прошло и нескольких дней, как началась война. Девушка трудилась

2(545).indd 80 03.06.2020 9:06:11

машинисткой в НИИ ВВС на Чкаловской, и ей было предложено уехать вместе с институтом в эвакуацию в Свердловск.

– Нет, – ответила Аня, – я не хочу в Свердловск, я хочу на фронт.

Как раз в это самое время в Чкаловский из Омска прибывает 680-й авиаполк, машинистка идет в него служить, еще несколько месяцев уходят на пополнение материальной части полка, и в январе 1942 года под Москвой летчики совершают свои первые бомбардировочные удары по позициям врага. Режим жизни – героизм. Днем двадцатилетние парни спят, под вечер поднимают настроение гармоникой и песнями, а ночью каждый из них на самолете, полном бомб, делает по 7-8 вылетов, сбрасывая драгоценный груз на оккупантов. Старт – финиш, старт – финиш. Иногда случалось так, что веселый молодой паренек, который еще пару часов назад поднимал настроения шутками, с вылета не возвращался. Тут же, ночью Аня печатала донесение о погибшем, а на следующий день в столовой с болью в сердце смотрела на опустевшее место, но не верила, что человека больше нет. Бывало так, что грязный, усталый летчик возвращался к обеду, принося с собой радость жизни: «На вынужденную посадку сел, 20 километров пехом сюда шел, движок забарахлил что-то». И в череде этих непрекращающихся игр со смертью Аня знакомится со Стефаном Ивановым, выпускником биологического факультета МГУ, начальником химической службы полка. Ответственный молодой человек берет девушку под свою опеку. Защита Москвы прошла успешно, полк переводят под Сталинград. Снова режим жизни – героизм. Маневренные летчики не только атакуют фашистов, но и успешно доставляют продукты питания группе советских войск под командованием генерала Белова, попавшей в окружение. Особо обрадовала летчиков полка ситуация, когда немецкий самолет, летевший с грузом для попавшего в окружение генерала Паульса, был обманут нашей сигнальной ракетой и сел прямо в плен. Под Сталинградом машинистка Аня участвует в написании истории полка, Стефан руководит этой работой, вскоре 680-й полк преобразовывается в 45-й Гвардейский «Варшавский» Краснознаменный ордена Суворова III степени ночной бомбардировочный авиаполк. Командир полка – Анатолий Александрович Меняев, 37 лет, выдержан, аккуратен, уважаем. После Сталинграда летчиков под его начальством вместе с другими войсками переводят на Курскую дугу. Утомительный месячный путь на эшелоне по железной дороге. Целый вагон 18-летних девчонок.

– Помню, – вспоминает Анна Дмитриевна, – нам сказали, что Жуков очень недоволен тем, что на остановках девчонки разгуливают по округе. А мы и не разгуливали вовсе. Все ждали остановку, чтобы быстро побежать в деревню, голову помыть да обогреться у печки.

Под Курском вагон подружек остался позади, Аня и медицинская сестра оказываются вдвоем среди летчиков 4-го полка. Завязывается любовный треугольник. Варвара питает далеко не слабые чувства по отношению к Стефану и оказывает ему всевозможные знаки внимания. Однажды она делает гимнастический пируэт и идет к мужчине на руках, да еще и в нижнем белье, это смущает военного, он недоуменно шарахается от нее в сторону. Между девушками происходит неприятный диалог. «Ты любишь его или нет? – требует ответить Варвара. – Скажи мне точно». Аня еще не любила Стефана, он был ей как хороший друг, но ответ ее был однозначным: «Да». И Варвара не выдерживает своего поражения и переводится в другой полк. На некоторое время Аня остается в полку одна, страшновато, но вскоре к пилотам переводят машинистку Надю Световец, стало веселее. Если раньше Гавриловой приходилось ночевать в одном доме с летчиками, то теперь машинисткам выделяют отдельную избу, а летчики получают некоторую свободу в выражениях, которую они не могли себе позволить

2(545).indd 81 03.06.2020 9:06:11

при даме. «Устрой ты ее куда-нибудь»,– просили они Стефана Иванова. Летчики – народ нахальный, но благородный. Когда в белорусской Щитне домик с машинистками занесло снегом так, что выйти оттуда на обед им не удалось, вместо ужина военные бросились откапывать своих прекрасных солдаток.

После Белоруссии последовала Варшава. Принимали их плохо, дома для расселения не давали, приходилось жить в сараях. «Сегодня я буду давать концерт песни, – сказала взрослая полячка в одной из деревень, – приходите все». Машинистки пытались отговорить летчиков от этого необдуманного шага: «Давайте не пойдем на концерт, нас там всех пересчитают, а потом перестреляют». Однако молодость бывает безрассудна. На следующий день Аня и Надя сами идут в деревню на танцы, девушки понравились полякам, те предупреждают, что прийдут к ним ночью в гости. Советские летчики с радостью ждут незваных гостей, но ловят только польскую певицу. «Я кур шла кормить», – невозмутимо объясняет артистка нашему часовому, а на небе светит желтая луна. Кормежка кур откладывается до утра, но на расследование ситуации сейчас уже нет времени, Красная армия неумолимо движется к Берлину.

Деревня мелькает за деревней. В одной из них на полк обрушивается неожиданная тревога: «Немцы! Немцы!» 300 разношерстных полуголодных немцев, отбившихся от своих военных группировок, были рады сдаться в плен. Их накормили и закрыли в сарае на усмотрение тех советских войск, которые должны войти в этот населенный пункт следом. Хороший подарочек. Вхождение на вражескую территорию не стало сюрпризом для 45 полка. «Вот она, проклятая Германия» – значилось на огромном приграничном плакате. Деревня Альденбург резко отличалась от нищей Польши, сараи сменились на большие, просторные дома. Убирая стог сена возле одного из них, Аня наткнулась на потайной люк и сразу вспомнила недавние слова подруги Нади: «А вдруг под этим стогом спрятан клад». А вдруг! Кладом оказывается небольшая комнатка, наполненная мужскими вещами, самой лучшей из которых является кожаный плащ. В этот раз чуда не произошло, но зато немало их было в другие, более напряженные минуты войны.

Ехала Аня с летчиками как-то летом на машине по проселочной дороге, вокруг красиво, безбрежно, зелено, она любуется природой, глазки широко открыты, и вдруг из леса выскакивает большой белый заяц. Девушка в восторге, такого она еще не видела.

– Смотрите, смотрите, – кричит машинистка, – заяц!

Водитель останавливает машину, летчики лениво вглядываются в эту невидаль, пора ехать дальше, но сзади их догоняет машина с минерами.

– Вы куда гоните, а? Дорога еще не разминирована, а они едут!

Оказалось, что спустя десять метров машину 45-го полка с Аней и летчиками на борту поджидала мина, но еще раньше их поджидал большой белый заяц. Не раз подобные чудеса спасали людям жизни.

Аня Гаврилова и Стефан Иванов с радостью встретили победу 9 мая, но возвращаться на родину время им еще не пришло.

– В Веймаре, – сказал ей Стефан, – мне предложили учительствовать, а ты, Аннушка, там будешь работать в Советской военной администрации.

Так был дан старт тем событиям, плод которых вырос в подмосковном Фрязино и в декабре 2004 года отмечает 50-летний юбилей, но в далеком 1945-м сложно было себе представить то, в какую сторону приведут уроки в Веймаре.

Спустя четыре года молодая семья возвращается в СССР, позади у Стефана насыщенная педагогическая практика в послевоенной Германии, и он опять приходит к своей Аннушке с известием:

– Во Фрязино строится школа, мне предлагают быть директором.

2(545).indd 82 03.06.2020 9:06:11

– А где жить?

– При школе.

Стефан Петрович Иванов стал первым директором Фрязинской школы № 2, на его плечи было возложено руководство педагогическим коллективом и хозяйственной частью образовательного учреждения. Та дружеская, семейная атмосфера, которая царит в стенах пятиэтажного, монументального красного здания на улице Ленина, несомненно, была заложена этим трудолюбивым и ответственным человеком. Однако война не проходит даром. В 1960 году дал знать о себе поврежденный позвоночник, у Стефана Петровича отказали ноги, два года он прожил на инвалидной коляске, еще два года – на топчане, а в 1964 году, ощущая постоянную поддержку и внимание всех, кто его окружал, умер. Анна Дмитриевна до сих пор бережет добрую память о человеке, с которым ее судьбу связала война. До 1990 года она является бессменным секретарем 45-го полка, организовывает ежегодные встречи однополчан 9 мая, дает им ночлег, ведет переписку. Однажды в ее однокомнатной квартирке ночевали 13 человек. Ее военная подруга Надя вышла замуж за летчика Федора Маслова, который без ноги летал бомбить Берлин. Трудности, которые выпали людям в годы войны, сила духа, которая давала возможность вместе преодолевать эти трудности, способствовали крепким, честным, открытым человеческим отношениям. Именно этим отличаются те, кто прошел войну и дал старт школам, фабрикам, заводам, стадионам и всем нам, выросшим в героической стране, единственной во всем мире, чей народ победил фашистов. Даже тогда, когда немцы рвались к Москве, когда могло показаться, что пришел конец, русские люди не отчаивались, не впадали в панику и безысходную депрессию, и в редкие минуты отдыха от борьбы в 45 авиаполку можно было услышать дружественное одобрение бойкого девичьего желания:

– Сегодня полетов нет, давайте устроим концерт…

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ ПРОХОРОВ

Николай Иванович Прохоров родился 23 июля 1922 г. По призыву И. В. Сталина «Юноши – в спецшколы!» он закончил Московскую спецшколу артиллерийского профиля, затем Киевское артиллерийское училище и пополнил ряды молодых командиров. Природа одарила его способностями в разных областях. С юных лет он проникся любовью к русскому языку и в дальнейшем требовал от сотрудников даже написания скучных документов в соответствии с правилами русского языка. С юных лет отличался и способностями к иностранным языкам. После войны свободно общался с немецкими специалистами, работавшими во Фрязино, без затруднений проводил с ними технические совещания. С юных лет отлично разбирался в различных областях техники, с особым интересом относился к авто- и фототехнике, а позднее, уже после войны, и к электронике.

Н. И. Прохоров

Одаренность и многогранность юноши в годы войны соединились с мужеством в его характере и смелостью

2(545).indd 83 03.06.2020 9:06:12

в поступках. В результате такого соединения Николай Иванович поразительно рано проявил себя и в 23 года стал начальником штаба артиллерийского полка в звании гвардии майора.

Николай Иванович воевал на нескольких фронтах. Защищал столицу в московской битве под командованием легендарного генерала П. А. Белова. Одно время находился в непосредственном подчинении у генерала М. И. Неделькина, ставшего впоследствии первым главнокомандующим ракетных войск Советского Союза, председателем ответственных комиссий по приемке ракетно-космической техники.

Фронтовое сотрудничество помогло Н. И. Прохорову в его дальнейшей работе на крупнейшем в стране предприятии, разрабатывающем и выпускающем электронные приборы для ракетной и космической аппаратуры.

Послевоенная жизнь Николая Ивановича сложилась так, что он, по существу, продолжал работу начальника штаба, но только теперь уже не полка, а крупного отдела, в состав которого входили пять конструкторских и технических бюро. На их базе впоследствии были созданы самостоятельные подразделения предприятия, а Н. И. Прохоров был назначен заместителем главного инженера предприятия. Будучи в запасе, он дважды повышался в воинском звании и в течение 50 лет непрерывно поддерживал деловую связь с генералитетом страны. Много лет в среде военных заказчиков Николай Иванович пользовался непререкаемым авторитетом и уважением, ибо, как никто другой, способен был по-военному четко и точно выполнять данные обещания. Причина такой четкости лежала в умении Н. И. Прохорова вникнуть в суть дела, досконально разобраться в конструктивных и технических тонкостях изделия, в короткий срок обработать большой объем технической документации по внедряемым в производство приборам. Те, кому приходилось участвовать в совещаниях различного уровня, знают, что почти всегда спорные вопросы решались в пользу разработчиков изделий из НПП «Исток», ибо все доводы заместителя главного инженера были научно-технически и финансово-экономически обоснованы и в основе их лежали, прежде всего, интересы дела, а не коньюктурные соображения.

Большую помощь Н. И. Прохоров получал от отдела внедрения, которым на протяжении многих лет безупречно руководил В. И. Чибисов. Совместными усилиями сотрудниками на двадцати предприятиях и заводах отрасли было внедрено более 350 типов изделий электронной техники, созданных в НПП «Исток». Для этого понадобилось передать заводам 6830 единиц оборудования, более 2400 единиц инструментальной оснастки, подобрать и подготовить более 300 специалистов и руководителей производств.

С именем Н. И. Прохорова связан целый этап интенсивного внедрения изделий электронной техники, за которые он вместе с другими видными специалистами страны был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР и персонально – звания «Почетный работник электронной и радиопромышленности».

Полвека проработал он на «Истоке» и 36 лет был членом дирекции предприятия.

Где бы он не находился: в кругу ветеранов-фронтовиков, среди сотрудников предприятия, на встречах со школьниками – везде отчетливо проявлялись его мудрость, сердечная доброжелательность, постоянная готовность помочь людям, поддержать их в трудную минуту, иногда просто теплым словом и шуткой.

Николай Иванович с детства впитал в себя прелести и горести подмосковной земли, в юности видел, как быстро преобразуются его родные места, а позднее, уже в зрелом возрасте, сам принимал непосредственное участие в преобразованиях едва заметного на карте страны города Фрязино в крупный научный центр.

2(545).indd 84 03.06.2020 9:06:12

Н. И. Прохоров был избран первым председателем совета ветеранов предприятия, а в состав этого совета бессменно входил с момента его создания. Его патриотические выступления в школах, на митингах и в печати всегда были интересны и содержательны.

КСЕНИЯ КУЗЬМИНИЧНА СТЕПИНА

К. К. Степина

В 1944 году Ксения Кузьминична начала работать секретарём Смоленского райкома комсомола, в 1946 году переехала в посёлок Фрязино. Тридцать лет работала в НПП «Исток» на разных должностях, в том числе освобожденным заместителем председателя профкома предприятия.

Война принесла горе практически в каждую советскую семью: не вернулись с фронта один, два, а то и больше мужчин-кормильцев. У Ксении Кузьминичны Стёпиной на войне погибли три брата и мужья трёх сестёр.

До войны работала она учительницей в селе Мутище на Смоленщине. В сентябре 1941 года село оказалось оккупированным немцами. Они вошли внезапно, без единого выстрела. И в первые же часы ограбили все дома. Брали не только скот, но и продукты. Выявили коммунистов, комсомольцев и других активистов. Многих повесили, виселицы стояли повсюду. Фашисты были недолго, основные их силы были переброшены в Москву. Наводить «порядок» оставили местных жителей – полицейских. Одни из них служили по принуждению, другие выполняли указания фашистов по собственной воле. Когда под Вязьмой попали в окружение несколько советских дивизий, то немцы устроили там огромный лагерь для военнопленных. Многим из них удавалось бежать. Уходили в основном на запад, в сёла, откуда уже ушли фашисты. Как вспоминает Ксения Кузьминична, в эти дни в доме не закрывались двери. Женщины принимали бежавших, кормили их, перевязывали раны, предлагали одежду. Многие оставались жить в ожидании прихода Красной Армии.

Однажды в дом Ксении Кузьминичны зашёл сбежавший военнопленный. Назвался В. П. Клюевым. Увидел на стене географическую карту, на столе глобус, отметил на них, где проходит линия фронта. Через несколько дней зашёл опять и рассказал, что он офицер Красной Армии, капитан, танкист. Ещё с двумя офицерами скрывается в соседнем селе. Доверившись молодой женщине, он предложил Ксении Кузьминичне войти в группу подпольщиков. Она сразу согласилась, велико было желание помочь родной армии поскорее расправиться с захватчиками. Через некоторое время она получила первое задание: в трёх ближайших сёлах взять на учёт всех бежавших из плена, узнать их фамилии, воинское звание, военные части, в которых служили, доверительно поговорить с ними и предложить принять участие в подпольной работе. Задание было выполнено, все опрошенные дали согласие работать для Родины.

Затем последовали другие задания: выявить полицейских, посещать их сходки, определять зоны их действия, отношение к местному населению, степень бесчинства. Наиболее ярых

2(545).indd 85 03.06.2020 9:06:12

полицейских – уничтожать. Немецкое командование было целиком занято операцией под Москвой. Это дало возможность подпольщикам очистить от предателей несколько районов Смоленщины и даже восстановить там советскую власть (райкомы партии, сельские советы). Среди бежавших военнопленных были связисты, которые смогли установить связь с областным штабом партизанского движения и командования армией. Первоначальная группа подпольщиков значительно расширилась, и скоро ей было присвоено звание партизанский полк имени Сергея Лазо. Ксению Кузьминичну Стёпину назначили председателем Мутищенского партизанского сельского совета.

Однако открыто действовать подпольщикам пришлось недолго. После битвы под Москвой из Германии пошло новое подкрепление. Смоленщина вновь наводнилась фашистами. Продолжать открытую работу подпольщики уже не могли, и поэтому из центра было получено задание: разбиться на три группы. Одна группа направилась к своим через линию фронта, вторая пошла в Брянские леса для соединения с партизанскими отрядами, третья осталась на месте для проведения террористических операций.

Ксения Кузьминична оказалась во второй группе, состоящей из 250 человек. Шли только ночами. Немцы были повсюду, несколько раз группу обнаруживали, но удавалось уйти.

Закончились патроны, продукты. Люди были измотанные и голодные. Жили в землянках и шалашах. И без того тяжёлую жизнь усугубляла зима. Отряд имени С. Лазо пополнялся бежавшими от фашистов жителями местных деревень, к нему присоединились и мелкие партизанские группы. В нём было три батальона, штаб, хозяйственная часть, группа разведки, медицинский пункт. Были воссозданы партийная и комсомольская организации. В отряде было 25 женщин, держались они достойно, выносили все тяготы партизанской жизни.

Женщины в основном держали связь с населением сёл, где располагались немецкие гарнизоны. Под видом беженцев они входили в деревни, узнавали численность гарнизонов, расположение и вид их технического вооружения. Несколько раз натыкалась Ксения Кузьминична на вражеские посты, едва уходила от них. С партизанами немцы расправлялись очень жестоко: отрезали уши, нос, грудь, а потом вешали и месяцами не давали хоронить.

Отряд оказался отрезанным от «Большой земли». Не был обеспечен ни обмундированием, ни продуктами, ни боеприпасами. С убитых немцев снимали одежду и надевали на себя. Летом основной пищей была заячья капуста, кислая, но вкусная. Отваривали её в болотной воде, ели без хлеба и соли. Спали в пути, на ходу. Воду пили болотную, процеживая её через тряпочку, чтобы не попали головастики. Зато зимой воды было достаточно. Несмотря на невыносимые условия жизни, отряд выполнял все задания командования. С целью задержки переброски вражеских войск на фронт, бойцами отряда уничтожались эшелоны на станциях, на железной дороге Брянск – Рославль, Рославль – Крычев. Только на одной станции Пригорье в ночь на 5 ноября 1943 года было уничтожено 17 самолётов, эшелонов с бронетягачами, 2 цистерны с горючим, 13 автомашин, склады с продовольствием и военным обмундированием, взорвана водокачка, выведен из строя узел связи, подорваны железнодорожные стрелки, светофоры, убито 370 немецких солдат и офицеров.

Несли потери и партизаны. В апреле 1944 года Ксения Кузьминична, выполняя задание, была ранена осколком от бомбы. Осколок удаляли ночью возле костра, рану обрабатывали самогоном. После такой тяжёлой операции бойцы 25 километров несли её на самодельных носилках, вместе с ней форсировали речку Ипоть. «День Победы для меня всегда настоящий праздник, – говорит К. К. Стёпина. – Праздник со слезами на глазах. Открываются раны, встают перед

2(545).indd 86 03.06.2020 9:06:12

глазами ушедшие из жизни в боях и уже в мирное время боевые товарищи, настоящие друзья, чью руку помощи ощущала в течение всех военных лет».

ЗИНАИДА ДМИТРИЕВНА КОВТУНОВА

Зинаида Дмитриевна Ковтунова прожила 83 года. В НПП «Исток», где она проработала почти 30 лет, помнят ее как скромную, трудолюбивую, исключительно честную и душевную сотрудницу.

З. Д. Ковтунова

Зинаида Дмитриевна родилась на Кубани, в станице Белореченская. Этот край не миновала Великая Отечественная война, которая прервала на долгие годы и мечты, и планы девушки, решившей в 17 лет добровольцем уйти на фронт. Зенитно-артиллерийский полк, с которым ей довелось дойти до Берлина, форсировал Керченский пролив, освобождал Витебск, Варшаву, участвовал в Висло-Одерской операции. С военной фотографии смотрит на нас красивая девушка: черные кудрявые волосы и никакой жесткости во взгляде. А ведь ей довелось видеть и Черное море, бурое от человеческой крови, и следы зверств фашистов, и смерть друзей, с которыми делила последнее... Не очень любила рассказывать об этом Зинаида Дмитриевна. Единственное, о чем вспоминала она с гордостью, как поздравлял и благодарил бойцов маршал Г. К. Жуков, как наградили ее по этому случаю отрезом на платье. Хранила З. Д. Ковтунова и листки с рекомендацией командира полка для вступления в партию, воспользоваться которой в годы войны так и не пришлось.

После войны Зинаида Дмитриевна поступила на физико-математический факультет Ростовского государственного университета. Успешно его окончив в 1954 году, она по распределению приехала в г. Фрязино и устроилась на работу в теоретический отдел предприятия. С первых же дней Зинаида Дмитриевна поразила ученых своей феноменальной памятью и огромным трудолюбием. Она была способна проделать математические выкладки более чем на 100 страницах и при этом не сделать ни одной ошибки. Подобное качество особенно высоко ценили теоретики. З. Д. Ковтунова – автор двадцати печатных работ и семи изобретений. Все ее работы отличаются строгостью и аккуратностью в изложении, красотой найденного решения и конкретностью полученных результатов.

В общении Зинаида Дмитриевна была немногословна, но ее слова, как правило, всегда были самыми нужными и доступными. Она с теплотой и отзывчивостью относилась и к своим родным, и просто к знакомым. И все же на первом месте в ее жизни всегда была семья. Супруг, Александр Николаевич, инвалид войны, был одним из самых уважаемых в городе людей – много лет проработал главным технологом «Истока». Без нянь и бабушек чета Ковтуновых воспитала сына и дочь. Сын Дмитрий много лет продолжает семейную традицию – работал в НПК-17 ведущим разработчиком уникальных приборов, стал кандидатом технических наук, одним из лучших изобретателей предприятия. Десять лет Д. А. Ковтунов работал в городских

2(545).indd 87 03.06.2020 9:06:13

представительных и исполнительных органах города. Много сил и энергии Зинаида Дмитриевна отдавала воспитанию внуков, ради которых она уволилась с «Истока», едва перешагнув пенсионный возраст.

Вся жизнь З. Д. Ковтуновой основывалась на принципах, которые она бесстрашно отстояла в Великой Отечественной войне. Она не приняла перестройку и реформы и продолжала бороться за патриотические принципы на митингах в Москве и Фрязино, демонстрируя свое бесстрашие перед власть имущими, выступая против нависающей перед родным отечеством угрозой развала.

АРКАДИЙ ИВАНОВИЧ ДЕОМИДОВ

А. И. Деомидов

6 марта 1998 г. на 74-м году жизни скончался старейший научный сотрудник НПП «Исток», ветеран войны и труда, кандидат технических наук Аркадий Иванович Деомидов.

А. И. Деомидов прожил замечательную жизнь, достойно пройдя через трудности предвоенных лет и тяжелейшие испытания в годы войны, активно участвуя в созидательном послевоенном процессе восстановления страны и в развитии в СССР электроники СВЧ.

А. И. Деомидов родился в Ленинграде, в семье интеллигентов. С особой теплотой отзывался он о своей метери – школьной учительнице. В блокадные дни Аркадию Ивановичу удалось выйти на «Большую землю» по «Дороге жизни». После окончания военного училища он был направлен на фронт. Командовал взводом минеров. Гвардии лейтенант А. И. Деомидов был участником одного из самых кровопролитных сражений при форсировании Днепра. За высокое мужество, проявленное в этих боях, он был награжден орденом Красной Звезды. В окопах под Кременчугом был принят в партию. Войну Аркадий Иванович закончил, имея на груди три ордена и несколько медалей, и множество мелко исписанных листков – все годы войны он вел подробный дневник.

После окончания Ленинградского электротехнического института он приезжает во Фрязино и поступает на работу на наше предприятие. Начало его трудовой деятельности связано с разработками клистронов в отделе 170. Затем он переходит в теоретический отдел и работает здесь вплоть до выхода на пенсию. Здесь проявилась его черта тонкого исследователя. Предметом особого научного увлечения Аркадия Ивановича становятся муары и разнообразные области их применения. Хорошо известны его работы по использованию муаров для контроля механических напряжений в металлокерамических узлах изделий электронной техники. В 1980 году он успешно защищает кандидатскую диссертацию и становится старшим научным сотрудником теоретического отдела. Дальнейшие его научные исследования были связаны с решением тепловых задач, возникающих в процессе эксплуатации электронных приборов.

А. И. Деомидов активно участвовал в общественной жизни отдела, много сил и энергии отдавая воспитанию молодежи. Нам он запомнится и как большой оптимист и жизнелюб.

2(545).indd 88 03.06.2020 9:06:13

Аркадий Иванович обладал удивительным чувством юмора, его юмор был пронизан глубокими философскими мыслями. В любой ситуации он оставался глубоко интеллигентым человеком, его жизнь украшали скромность и желание помочь сотруднику добрым словом.

Статья поступила 20 марта 2020 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ЛЯПИН Л. В. **Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе LTCC:** учеб. пособие / Л. В. Ляпин, В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2020. – 192 с.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления многослойных печатных плат (МПП) ГИС СВЧ-диапазона на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC). Рассмотрены вопросы конструирования и технологии изготовления таких МПП и перспективы и преимущества их использования в современных радиоэлектронных устройствах СВЧ-диапазона.

Пособие предназначено для студентов Российского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и по направлениям 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

ИОВДАЛЬСКИЙ В. А. **Твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона:** учеб. пособие / В. А. Иовдальский, В. А. Пчелин, И. А. Гаврилов; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2020. – 144 с.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления твердотельных усилителей мощности СВЧ-диапазона. Сформированы соответствующие направления и концепция совершенствования ГИС СВЧ усилительных каскадов.

Пособие предназначено для студентов Российского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», а также аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

2(545).indd 89 03.06.2020 9:06:13

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.

2(545).indd 90 03.06.2020 9:06:13

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 15.6.2020 г.	Усл. п. л. 11,0	Формат $60\times88^{1/8}$
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Уч.-изд. л. 11,5	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	10 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

2(545).indd 91 03.06.2020 9:06:13

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2020, вып. 2(545), с. 90

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

2(545).indd 92 03.06.2020 9:06:14