ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (543)

2019

4(543).indd 1 20.12.2019 9:33:17

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(543) **2019** **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», 2019 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(543) **2019** **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», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

Алексеев Р.П., Цоцорин А.Н., Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В. – Насыщение передаточной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов..... 6

Алексеев Р.П., Цоцорин А.Н., Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В. – Механизм насыщения выходной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов..... 15

Электровакуумные приборы

Жабин Г.А., Архипов Д.Ю., Пелипец О.В. – Влияние повышенного отбора тока на элементный состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода..... 24

Одиноков В.В., Панин В.В. – Современное вакуумное оборудование для микроэлектронных технологических процессов на пластинах диаметром 150…200 мм..... 35

Тормозов В.Т., Мизинов П.В., Рыбин М.Г., Жарый Е.В., Резнёв В.А., Образцова Е.Д., Образцова Е.А. – Металлопористый катод, модифицированный графеном..... 43

Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Бакунин Г.В., Лопин М.И. – Возможности повышения средней мощности в многолучевой ЛБВ *Ки*-диапазона..... 53

Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Закурдаев А.Д. – Исследование возможности создания мощной ЛБВ *Х*-диапазона с расширенной полосой..... 61

Технология и материаловедение

Налогин А.Г., Семенов М.Г., Мясников А.В., Семенов А.С., Панков Р.П., Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Еремин И.С., Федосеев Н.А., Налогин И.А., Ескин А.Е. – Резонаторный метод неразрушающего контроля электромагнитных параметров ферритовых пластин на СВЧ.. 67

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Чеканов А.В. – Микроволновое излучение снижает активность межклеточного взаимодействия элементов крови в присутствии этанола..... 78

Краткие сообщения

Балыко А.К., Терешкин Е.В. – Анализ эффективности генераторов с идеализированными функциями от времени тока и напряжения..... 84

Экономика

Курдюкова Н.О., Вершинин А.А. – Формы и перспективы сотрудничества предприятий и учебных заведений в современных условиях хозяйствования..... 92

История

Балыко А.К. – Научно-техническое наследие Владимира Сергеевича Лукошкова..... 96

Тематический указатель..... 112

Алфавитный указатель..... 117

4(543).indd 4 20.12.2019 9:33:17

CONTENTS

Solid-state electronics

Alekseev R.P., Tsotsorin A.N., Bormontov E.N., Bykadorova G.V. – Saturation of transfer current-voltage characteristics of high-power microwave LDMOS transistors..... 6

Alekseev R.P., Tsotsorin A.N., Bormontov E.N., Bykadorova G.V. – Mechanism of quasisaturation of output current-voltage characteristics of high-power microwave LDMOS transistors..... 15

Electrovacuum devices

Zhabin G.A., Arkhipov D.Yu., Pelipets O.V. – The effect of increased current drawing on the emission surface elemental composition of the molecular sputter-deposited oxide cathode..... 24

Odinokov V.V., Panin V.V. – Modern vacuum equipment for microelectronic technological processes, on wafers with a diameter of 150…200 mm..... 35

Tormozov V.T., Mizinov P.V., Rybin M.G., Zhariy E.V., Reznev V.A., Obraztsova E.D., Obraztsova E.A. – Dispenser cathode modified by graphene..... 43

Galdetsky A.V., Bogomolova E.A., Natura I.P., Bakunin G.V., Lopin M.I. – Possibilities of increasing the average power in *Ku*-range multi-beam TWT..... 53

Galdetsky A.V., Bogomolova E.A., Natura I.P., Zakurdaev A.D. – Investigating the possibility of creating high-power *X*-band TWT with an expanded band..... 61

Technology and material science

Nalogin A.G., Semenov M.G., Myasnikov A.V., Semenov A.S., Pankov R.P., Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S., Fedoseev N.A., Nalogin I.A., Eskin A.E. – The cavity method of non-destructive testing of electromagnetic parameters of microwave ferrite wafers..... 67

Medical electronics

Kazarinov K.D., Shchelkonogov V.A., Baranova O.A., Polnikov I.G., Chekanov A.V. – Microwave radiation reduces the activity of cell-cell interaction of blood elements in ethanol presence..... 78

News in brief

Balyko A.K., Tereshkin E.V. – The analysis of the efficiency of oscillators with idealized functions of current and voltage time..... 84

Economics

Kurdyukova N.O., Vershinin A.A. – Forms and prospects of cooperation between enterprises and educational institutions in modern business conditions..... 92

History

Balyko A.K. – Scientific and technical heritage of Vladimir Sergeyevich Lukoshkov..... 96

Subject index..... 112

Alphabetical index..... 117

4(543).indd 5 20.12.2019 9:33:17

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.323

НАСЫЩЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРОВ

Р. П. Алексеев[1], А. Н. Цоцорин[1], Е. Н. Бормонтов[2], Г. В. Быкадорова[2]

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

[2]*Воронежский государственный университет*

У мощных СВЧ LDMOS-транзисторов наблюдается эффект насыщения переходной вольт-амперной характеристики (ВАХ), что требуется учитывать при разработке усилителей мощности на их основе. Физические эффекты, приводящие к насыщению переходной ВАХ, соотносятся также с эффектом квазинасыщения выходной ВАХ LDMOS-транзисторов и отличны от механизма, вызывающего насыщение ВАХ обычного MOS-транзистора. В настоящей работе проводятся исследование и анализ влияния на насыщение переходной ВАХ конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.

КС: СВЧ LDMOS-транзистор, дискретный мощный транзистор, Sentaurus TCAD, моделирование, квазинасыщение

SATURATION OF TRANSFER CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF HIGH-POWER MICROWAVE LDMOS TRANSISTORS

R. P. Alekseev[1], A. N. Tsotsorin[1], E. N. Bormontov[2], G. V. Bykadorova[2]

[1]*Research Institute of Electronic Engineering, Voronezh*

[2]*Voronezh State University*

High-power microwave LDMOS transistors have the effect of saturation of the transfer current-voltage characteristic, which must be taken into account when developing power amplifiers based on them. The physical effects leading to saturation of the transfer I-V characteristic are also correlated with the effect of quasi-saturation of the output I-V characteristic of LDMOS transistors and differ from the mechanism causing the saturation of the I-V characteristic of a conventional MOS transistor. The research and analysis of the effect on the saturation of the transient I-V characteristic of the design and technological parameters of high-power microwave LDMOS transistors are carried out in this paper.

Keywords: microwave LDMOS transistors, discrete high-power transistors, Sentaurus TCAD, modeling, quasi-saturation

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, MOS-транзисторы (metal oxide semiconductors) характеризуются эффектом насыщения выходной (сток-исток) вольт-амперной характеристики (ВАХ) при высоких напряжениях на стоке, вызванным отсечкой канала [1]. Подобный эффект насыщения тока стока

4(543).indd 6 20.12.2019 9:33:17

наблюдается также в мощных СВЧ LDMOS-транзисторах (laterally diffused metal oxide semiconductors), базовая структура которых приведена на рис. 1. Однако в случае LDMOS-транзисторов насыщается не только выходная, но и передаточная ВАХ, определяющая коэффициент усиления прибора и учитываемая при выборе рабочего режима.

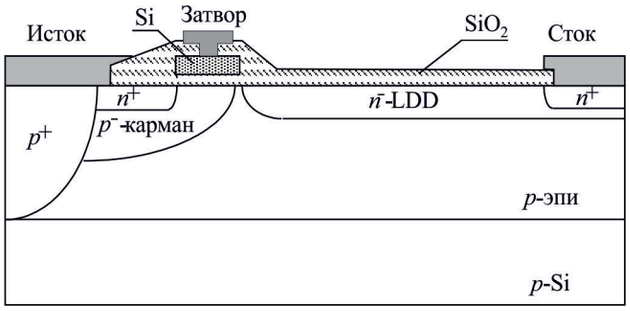


Рис. 1. Базовая LDMOS-структура

Насыщение ВАХ LDMOS-транзисторов обуславливают иные физические эффекты, нежели в обычных MOS-транзисторах. Согласно последним исследованиям [2, 3], ключевым эффектом, вызывающим данное явление, выступает эффект Кирка (Kirk effect), или SCM (space charge modulation). Применительно к LDMOS-транзисторам эффект Кирка заключается в следующем. При повышении напряжения на затворе U_G и фиксированном напряжении стока U_D из канальной области в область LDD (lightly doped drain) инжектируется все больше электронов. При определенном U_G плотность инжектированных носителей n превысит концентрацию легирующей примеси в LDD-области N_{LDD}. Это приведет к снижению напряженности электрического поля в LDD-области у края затвора и росту на границе LDD/n^+-сток. Высокая напряженность электрического поля вызывает насыщение скорости носителей заряда. Другой причиной насыщения ВАХ выступает экранирование поля стока, сопровождающее эффект Кирка. Когда концентрация инжектированных электронов превосходит концентрацию ионизированных доноров LDD-области, их суммарное поле начинает экранировать исток от напряжения на стоке. Таким образом, повышение напряжения на затворе уменьшает тянущее поле стока, что в конечном итоге вызывает насыщение переходной ВАХ, даже если скорость носителей далека от насыщения.

Цель данной работы – исследование влияния на эффект насыщения передаточных ВАХ конструктивно-технологических параметров и режимов изготовления современных мощных СВЧ LDMOS-транзисторов с субмикронными размерами канальной области. При этом наибольший практический интерес представляет точка начала насыщения, т. е. уровень тока стока и напряжения на затворе, при превышении которых ток стока перестаёт зависеть от напряжения на затворе.

2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования механизмов насыщения передаточной ВАХ построена модель мощного СВЧ LDMOS-транзистора, основанная на существующей технологии изготовления изделий данного типа [4]. Разработанная модель является структурной, т. е. не предназначена для определения рекомендованных параметров технологических процессов создания реальных структур. С целью

4(543).indd 7 20.12.2019 9:33:18

облегчения анализа происходящих физических эффектов модель была построена на основе упрощенной LDMOS-структуры, не включающей полевой электрод над стоковой областью, а LDD-область выполнена равномерно легированной.

Модель создана в среде приборно-технологического проектирования Sentaurus TCAD [5]. Для моделирования самой структуры использовался модуль структурного проектирования SDE. При этом геометрические границы материалов задавались строго, без моделирования процессов окисления, осаждения и травления. Концентрация примесей в кремнии определялась согласно закону гауссова распределения через указание концентраций в двух точках: на поверхности подложки и на глубине, соответствующей положению *p–n*-перехода в реальных структурах. Параметры распределения Гаусса подбирались так, чтобы итоговый профиль залегания примеси максимально соответствовал реальному.

Расчёт электрофизических параметров виртуального прибора выполняется численными методами по узлам сетки, поэтому необходимо оптимизировать её геометрические параметры, которые выбираются из физических соображений: в неактивных областях шаг сетки увеличивается, а в областях, где протекают физические процессы переноса носителей заряда и результаты расчётов должны быть точнее, шаг сетки уменьшается. Точные размеры минимального и максимального шага сетки, а также закон перехода между ними подбираются эмпирически. В качестве оптимизатора расчётной сетки использовался программный модуль SNMesh.

Основой для численного моделирования электрофизических параметров и характеристик исследуемых LDMOS-структур является решение системы уравнений в частных производных, описывающей статическое и динамическое поведение носителей в полупроводнике под влиянием внешних полей [5]. Рассматривается диффузионно-дрейфовая модель, в которой основные электрофизические параметры рассчитываются путём решения фундаментальной системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также выражений для электронного и дырочного токов:

$$\nabla(\varepsilon \cdot \nabla\psi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \text{ – уравнение Пуассона,}$$

$$\left.\begin{aligned} \nabla J_n &= -q(G - R) + q\frac{\partial n}{\partial t} \\ \nabla J_p &= q(G - R) - q\frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}\right\} \text{ – уравнения непрерывности,}$$

$$\left.\begin{aligned} J_n &= -q(\mu_n n \cdot \nabla\psi - D_n \nabla n) \\ J_p &= -q(\mu_p p \cdot \nabla\psi + D_p \nabla p) \end{aligned}\right\} \text{ – уравнения токов,}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ψ – электростатический потенциал; q – заряд электрона; p – концентрация дырок; n – концентрация электронов; N_D^+ – концентрация ионизированных атомов донорной примеси; N_A^- – концентрация ионизированных атомов акцепторной примеси; J_n, J_p – плотности электронного и дырочного токов соответственно; R – скорость рекомбинации электронов и дырок; G – скорость генерации электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

Данная система уравнений решается с помощью программного модуля SDevice методом сеток

4(543).indd 8 20.12.2019 9:33:18

с использованием алгоритма Ньютона при изменяемых граничных условиях, а также с учётом соответствующих моделей физических процессов, происходящих в структуре.

Визуализация рассчитанных передаточных ВАХ и определение по ним пороговых напряжений $U_{\text{пор}}$ выполняется с помощью командного файла программного модуля Inspect.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Переходная ВАХ может быть условно разбита на три участка (рис. 2): подпороговый участок *1*, в котором напряжение на затворе U_g не достигло величины, необходимой для формирования полноценно проводящего канала, поэтому ток стока I_d относительно мал; линейный участок *2*, в котором ток стока в первом приближении линейно возрастает с ростом напряжения на затворе; участок насыщения *3*, где зависимость $I_d(U_g)$ существенно отклоняется от линейного закона, быстро переходит в практически горизонтальную прямую, т. е. перестаёт зависеть от напряжения на затворе. Рассмотрим конструктивно-технологические параметры мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, влияющие на каждый участок.

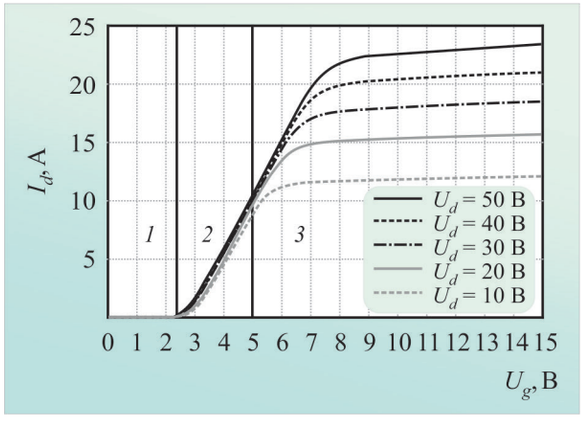


Рис. 2. Переходная ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных напряжениях на стоке:
1 – подпороговый участок; *2* – линейный участок; *3* – участок квазинасыщения

3.1. Подпороговый участок

Как видно из рис. 3, при повышении U_d напряжение и ток, при которых наступает насыщение, повышаются. Это объясняется тем, что большее напряжение на стоке требует большей концентрации электронов у края затвора (а следовательно, и U_g) для своего экранирования. Другим следствием повышения U_d является некоторое снижение порогового напряжения. Этот эффект выражен тем сильнее (рис. 3), чем больше концентрация примеси в LDD-области.

Изменение порогового напряжения обусловлено DIBL-эффектом (drain-induced barrier lowering), который хоть и ослабляется в LDMOS-транзисторах благодаря RESURF-эффекту (reduced surface field) [6, 7], но не исчезает полностью. Суть DIBL-эффекта заключается в том, что чем выше напряжение на стоке, тем дальше область пространственного заряда (ОПЗ) заходит в канальную область и соответственно тем при меньшем U_g происходит инверсия проводимости и формирование канала. В LDMOS-транзисторах при повышении напряжения на стоке ОПЗ

4(543).indd 9 20.12.2019 9:33:18

слабо распространяется в канальную область (рис. 4), однако концентрация дырок N_p в канале (рис. 5, *а*) при повышении напряжения на стоке U_d меняется сильно (рис. 5, *б*).

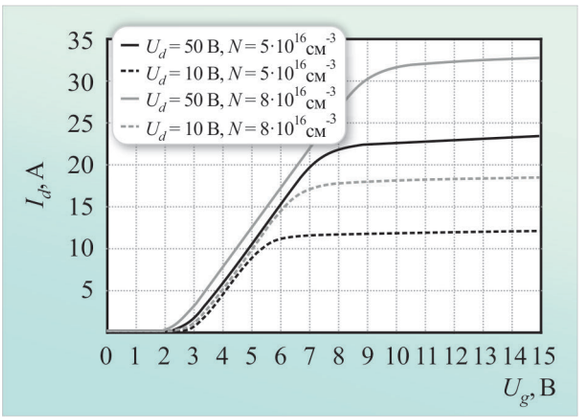


Рис. 3. Переходные ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных напряжениях на стоке и разной концентрации легирующей примеси

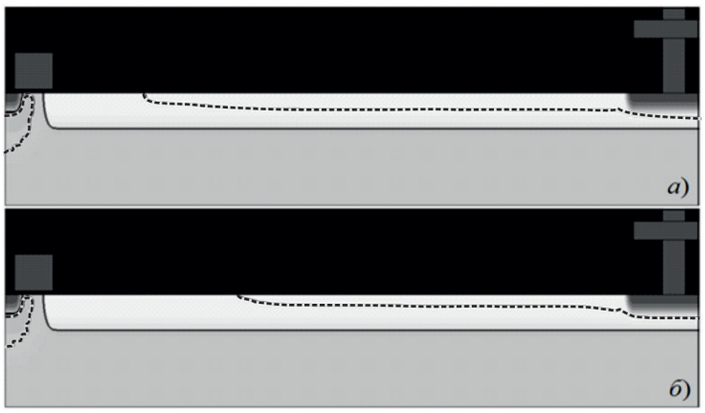
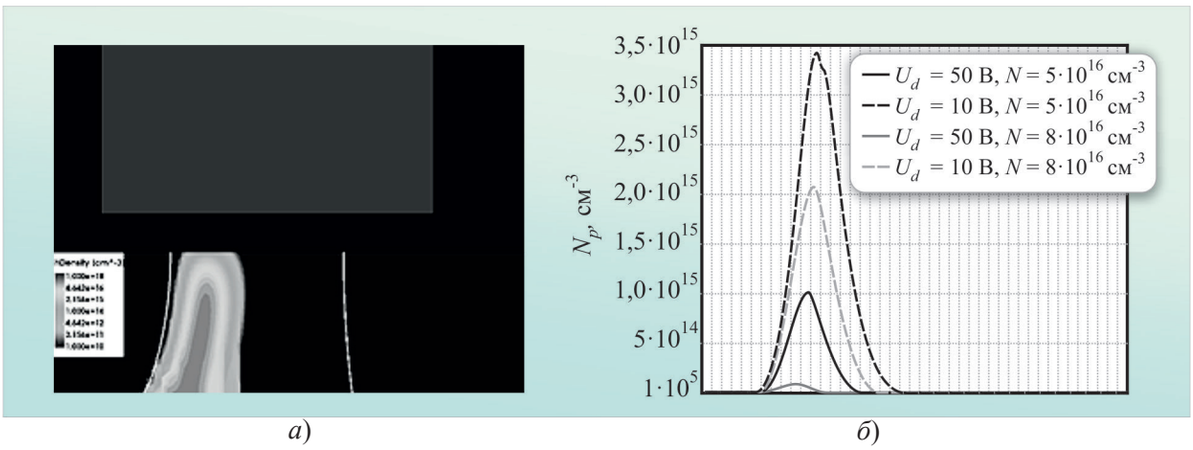


Рис. 4. ОПЗ перехода LDD – эпитаксиальная пленка при $U_g = 0$ (черная пунктирная линия ограничивает необеднённый участок): *а* – U_d = 10 В; *б* – U_d = 20 В



а) *б*)

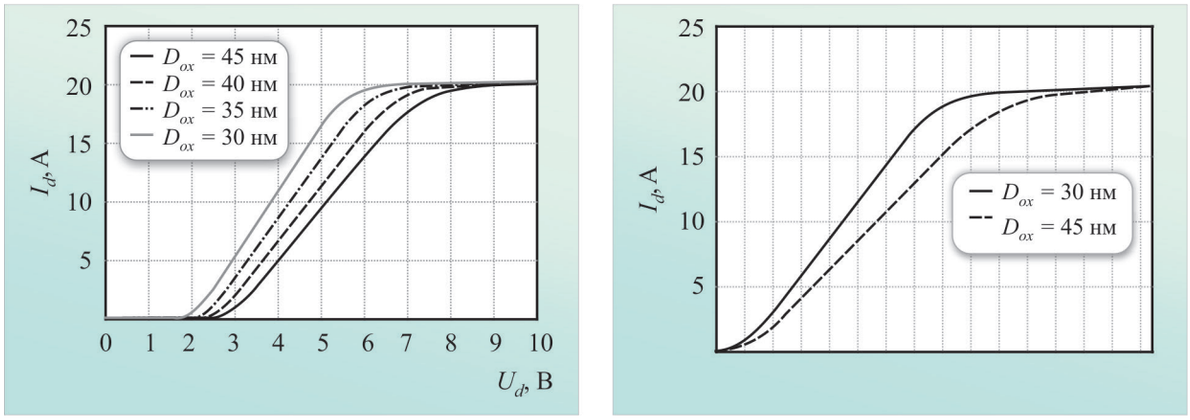
Рис. 5. Распределение концентрации дырок N_p в канальной области: *а* – в LDMOS-структуре при U_d = 10 В; *б* – при разных U_d и концентрации примеси N в LDD-области на глубине 1 нм от поверхности кремния

4(543).indd 10 20.12.2019 9:33:19

Помимо концентрации примеси в LDD-области, на пороговое напряжение также влияют: длина затвора L_g, концентрация примеси в p^--кармане, толщина подзатворного окисла D_{ox}.

3.2. Линейный участок

Линейный участок переходной ВАХ представляет наибольший интерес, т. к. именно от его наклона и протяженности зависит положение точки насыщения. На наклон линейного участка в первую очередь влияет толщина подзатворного окисла (рис. 6), что объясняется изменением величины падения напряжения на подзатворном окисле [8].



а) *б*)

Рис. 6. Переходные ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных толщинах подзатворного окисла:
а – с подпороговым участком; *б* – без подпорогового участка

Увеличение длины затвора L_g также приводит к увеличению угла наклона линейного участка переходных ВАХ, однако его влияние практически незаметно. Увеличение же концентрации примеси в p^--кармане уменьшает угол наклона. На рис. 7 представлены смоделированные LDMOS транзисторные структуры при разных концентрациях примеси на границе n^+-истока и p^--кармана и соответствующие им линейные участки переходных ВАХ.

Для проверки факта зависимости наклона переходной ВАХ от концентрации примеси в подзатворной области было проведено технологическое моделирование LDMOS транзисторной структуры с учётом двух наиболее распространённых способов создания p^--кармана [9]. Результат оказался схожим с тем, что показало структурное моделирование.

Другим параметром, наиболее сильно влияющим на наклон линейного участка переходной ВАХ, выступает глубина D_{p+} p^+-истока (рис. 8). Это может быть объяснено исходя из следующих соображений. В первом приближении можно считать общее сопротивление LDMOS-транзистора как последовательное соединение трёх резисторов. Первый резистор (истоковый) представляет собой совокупность сопротивлений от контакта истока до канала (главной составляющей является сопротивление слаболегированной эпитаксиальной пленки [4]). Второй резистор (канальный) – сопротивление канала. Последний (стоковый) резистор – сопротивление от края канала до контакта стока, и доминирующей составляющей здесь является сопротивление LDD-области. Из всех трёх составляющих общего сопротивления LDMOS-транзистора от U_g зависит только сопротивление канального резистора. Как показывают расчёты, экспоненциальный

4(543).indd 11 20.12.2019 9:33:19

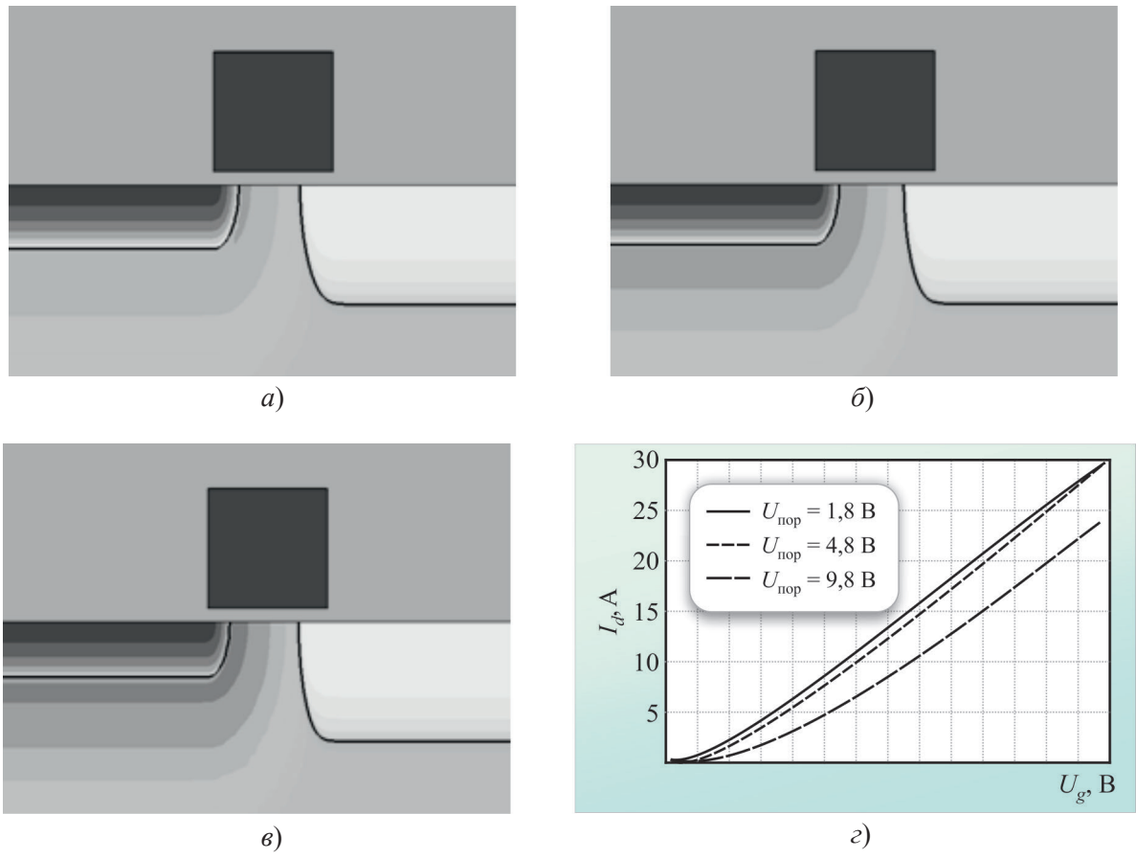


Рис. 7. Распределения легирующей примеси $|N_D - N_A|$ в модели мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных концентрациях примеси в p^--кармане (*а...в*), обеспечивающих пороговые напряжения, и соответствующие им линейные участки переходных ВАХ (*г*):
а – $N_A = 6{,}5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ ($U_{пор} = 1{,}8$ В); *б* – $N_A = 1{,}4 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ ($U_{пор} = 4{,}8$ В);
в – $N_A = 3{,}7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ ($U_{пор} = 9{,}8$ В)

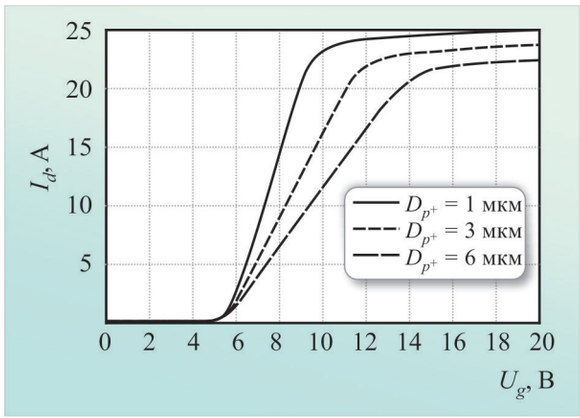


Рис. 8. Переходные ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных глубинах D_{p+} p+-истока

4(543).indd 12 20.12.2019 9:33:19

характер данной зависимости в сумме с постоянным сопротивлением стока и истока даёт близкую к линейной зависимость общего сопротивления от напряжения на затворе, что согласуется с известным видом переходной ВАХ. Разумеется, чем меньше номинал резисторов стока и истока, тем больший вклад в общее сопротивление вносит канал, тем круче меняется характеристика при уменьшении его сопротивления под действием напряжения на затворе U_g. Вместе с тем, как видно из рис. 9, даже значительное увеличение глубины p^+-области (а следовательно, уменьшение сопротивления истока) вызывает незначительный рост максимального тока. Это связано с тем, что ни конфигурация, ни сопротивление истоковой области никак не влияют на квазинасыщение, ключевое влияние на которое оказывают эффекты, происходящее в LDD-области.

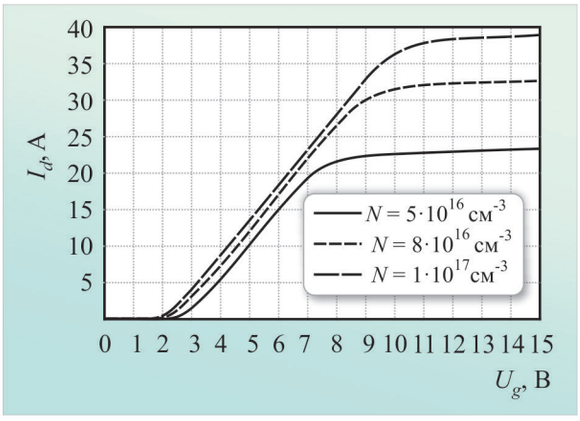


Рис. 9. Переходные ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора при разных поверхностных концентрациях примеси в LDD-области

3.3. Участок насыщения

Исходя из вышеизложенного, можно ожидать, что степень легирования LDD-области влияет на переходную ВАХ LDMOS-транзистора аналогичным образом, как и глубина p^+-области. Однако её влияние в действительности противоположное: повышение концентрации легирующей примеси в LDD-области (или ее части) сдвигает точку насыщения переходной ВАХ в сторону больших U_g и при этом практически не меняет наклон её линейного участка (см. рис. 9).

Это связано со спецификой физических процессов, приводящих к квазинасыщению. Так как необходимым начальным условием для возникновения квазинасыщения является превышение концентрации инжектированных электронов над фоновой концентрацией примеси, то повышение последней естественным образом вызывает увеличение напряжения квазинасыщения, что в свою очередь означает рост максимального тока. На рис. 10 показаны переходные ВАХ LDMOS-транзисторов с глубокой p^+-областью и с повышенной концентрацией примеси в LDD-области. Параметры структур подобраны так, чтобы их сопротивления сток-исток в открытом состоянии были равными.

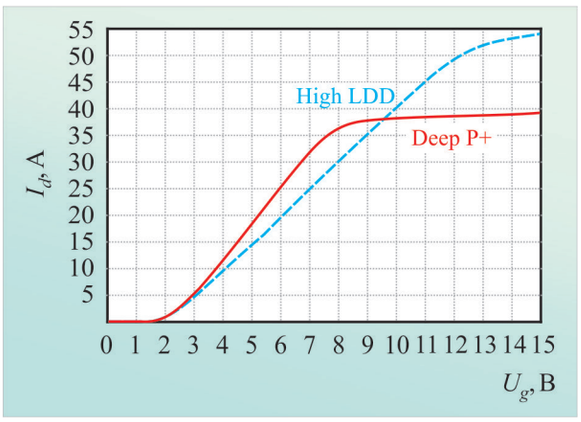


Рис. 10. Переходные ВАХ мощных СВЧ LDMOS транзисторов с глубокой p^+-областью и с повышенной концентрацией примеси в LDD-области

4(543).indd 13 20.12.2019 9:33:19

Конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, существенно влияющих на наклон участка насыщения, в данном исследовании выявлено не было.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Насыщение переходной ВАХ мощных СВЧ LDMOS-транзисторов соотносится с квазинасыщением выходной ВАХ, обусловлено наличием LDD-области и не связано с отсечкой канала. Ключевым параметром в этой связи выступает степень легирования LDD-области, непосредственно влияющая на уровень напряжения на затворе, при котором начинают проявляться эффект Кирка и экранирование напряжения на стоке, а следовательно, и на напряжение и ток насыщения. Другим важным с точки зрения влияния на переходную ВАХ элементом конструкции LDMOS-транзистора выступает p^+-область истока, определяющая крутизну характеристики.

Понимание зависимости вида переходной ВАХ от тех или иных параметров позволяет конструировать приборы с лучшими рабочими характеристиками и открывает путь для дальнейшего совершенствования LDMOS-технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуртов, В. А.** Твердотельная электроника / В. А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2007. – 408 с.

2. **Kumar, B.** On the unification of physics of quasi-saturation in LDMOS devices. Part I / B. Kumar, M. Shrivastava // IEEE Trans. Electron Devices. – 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 191 – 198.

3. **Wang, L.** Physical description of quasi-saturation and impactionization effects in high-voltage drain-extended MOSFETs / L. Wang, J. Wang, C. Gao, J. Hu, P. Z. X. Li, W. Li, S. H. Y. Yang // IEEE Trans. Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, No 3. – P. 492 – 498.

4. **Ткачев, А. Ю.** Влияние конструктивно-технологических факторов на электрические параметры мощных СВЧ LDMOS-транзисторов: автореферат дис. канд. техн. наук / Ткачев А. Ю. – Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2011. – 16 с.

5. Sentaurus Device User Guide. Version D-2010.03. – Synopsys, Inc., 2010. – 1328 c.

6. **Vestling, L.** Design and modeling of high-frequency LDMOS transistors / L. Vestling // Acta Unisersitatis Upsaliensis, 2002. – 58 p.

7. **Apples, J. A.** High voltage thin layer devices (RESURF devices) / J. A. Apples, H. M. J. Vaes // EDM Tech. Dig. – 1979. – Vol. 25. – P. 238.

8. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. – М.: Мир, 1984. – Кн.1 456 с.; Кн.2 456 с.

9. **Алексеев, Р. П.** Моделирование влияния технологии формирования канальной области на выходные вольт-амперные характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов / Р. П. Алексеев, Г. В. Быкадорова, В. А. Кожевников, А. В. Калашников, А. Ю. Ткачёв // Энергия – XXI век. – 2015. – № 3 (91). – С. 102 – 107.

Статья поступила 14 марта 2019 г.

4(543).indd 14 20.12.2019 9:33:19

УДК 621.382.323

МЕХАНИЗМ НАСЫЩЕНИЯ ВЫХОДНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРОВ

Р. П. Алексеев[1], А. Н. Цоцорин[1], Е. Н. Бормонтов[2], Г. В. Быкадорова[2]

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

[2]*Воронежский государственный университет*

Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы характеризуются эффектом квазинасыщения выходной вольт-амперной характеристики (ВАХ), механизм возникновения которого отличен от эффектов, вызывающих насыщение ВАХ обычных MOS-транзисторов. Явление квазинасыщения эквивалентно подключению резистора к выходу транзистора, что негативно сказывается на энергетических характеристиках прибора. В настоящей работе проводится исследование механизма квазинасыщения выходной ВАХ мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Для исследования использовалась структурная модель СВЧ LDMOS-транзистора, созданная в среде САПР Sentaurus TCAD. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых приборов.

КС: СВЧ LDMOS-транзисторы, дискретные мощные транзисторы, Sentaurus TCAD, моделирование, квазинасыщение

MECHANISM OF QUASI-SATURATION OF OUTPUT CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF HIGH-POWER MICROWAVE LDMOS TRANSISTORS

R. P. Alekseev[1], A. N. Tsotsorin[1], E. N. Bormontov[2], G. V. Bykadorova[2]

[1]*Research Institute of Electronic Engineering, Voronezh*

[2]*Voronezh State University*

High-power microwave LDMOS transistors have the effect of quasi-saturation of the output current-voltage characteristic the mechanism of which differs from the effects causing the saturation of the I-V characteristics of conventional MOS transistors. The phenomenon of quasi-saturation is equivalent to connecting a resistor to the output of the transistor, which negatively affects the power characteristics of the device. The research of quasi-saturation mechanism of the output I-V characteristic of high-power microwave LDMOS transistors was carried out in this paper. For this research a structural model of a microwave LDMOS transistor, created in computer-aided design Sentaurus TCAD was used. The results can be applied for the design of new devices.

Keywords: microwave *LDMOS transistors, discrete power transistors, Sentaurus TCAD, modeling, quasi-saturation*

1. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые мощные СВЧ LDMOS-транзисторы (laterally diffused metal oxide semiconductors) в настоящее время широко известны и распространены в различной приемопередающей радиоаппаратуре. Несмотря на распространение в последнее время приборов на основе широкозонных полупроводниковых материалов, таких, как нитрид галлия GaN, кремниевые LDMOS-транзисторы продолжают занимать значительную долю рынка как в России, так и за рубежом благодаря хорошему соотношению цена-качество и высокой воспроизводимости технологического процесса. Сегодня LDMOS-технология является основной технологией при производстве широкой номенклатуры мощных СВЧ-устройств для различных применений,

4(543).indd 15 20.12.2019 9:33:20

включающих: базовые станции сотовой системы связи, радиопередатчики сигналов *P*-, *L*-, *S*-диапазонов частот, РЛС наземного и воздушного базирования, систем навигации и др. Ведущие зарубежные производители за прошедшее десятилетие смогли расширить рабочий диапазон частот LDMOS-транзисторов, который теперь покрывает частоты от 1 МГц до 4 ГГц, включая WiMax и радарный *S*-диапазон [1]. Все это делает изучение тонкостей физики работы LDMOS-транзисторов интересным не только с научной, но и с практической точки зрения.

Подобно обычным MOS-транзисторам, LDMOS-транзисторы характеризуются эффектом насыщения выходной (сток-истоковой) вольт-амперной характеристики (ВАХ) при высоких напряжениях на стоке. Однако в случае LDMOS-транзисторов насыщение выходной ВАХ не является «строгим»: ток стока продолжает возрастать при повышении напряжения сток-исток, но существенно медленнее, чем на линейном участке ВАХ (рис. 1). По этой причине в зарубежной литературе данный эффект получил название квазинасыщения (quasi-saturation). Причина такого поведения заключается в том, что насыщение ВАХ в LDMOS-транзисторах имеет иной механизм, нежели в обычных MOS-транзисторах (где оно объясняется отсечкой канала [2]). Ключевой конструктивной особенностью LDMOS-транзисторов является так называемая LDD (lightly doped drain) область (рис. 2). Благодаря наличию этой области достигается так называемый эффект снижения напряженности электрического поля на поверхности полупроводника (reduced surface field – RESURF) [3]. Этот принцип был предложен в 1979 году Аппельсом (Appels) и Ваесом (Vaes) [4].

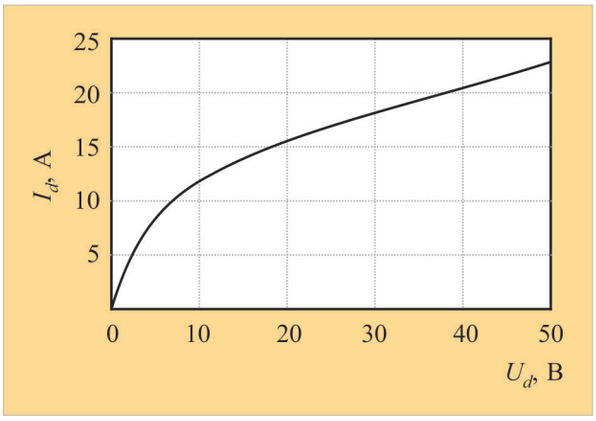


Рис. 1. Выходная ВАХ СВЧ LDMOS-транзистора

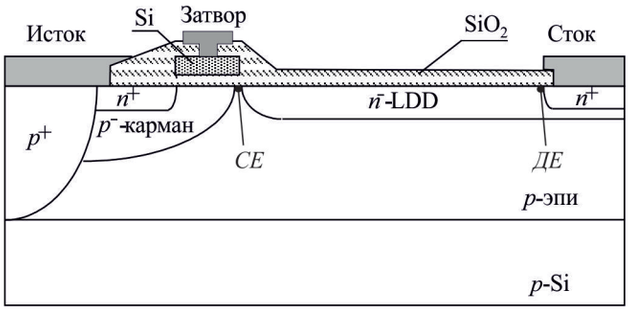


Рис. 2. Базовая LDMOS-структура

4(543).indd 16 20.12.2019 9:33:20

Следствием эффекта RESURF является расширение области пространственного заряда (ОПЗ) не в сторону канала транзистора, а вглубь эпитаксиального слоя [5]. В результате в LDMOS-транзисторах практически не происходит падение напряжения вдоль канала (рис. 3). Это означает, что для LDMOS-транзисторов не характерны такие эффекты, как отсечка канала или модуляция его длины. Таким образом, квазинасыщение не может быть объяснено тем же механизмом, что и насыщение в обычных MOS-транзисторах.

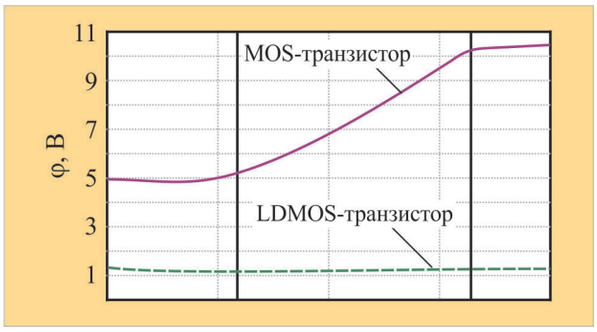


Рис. 3. Распределение потенциала в подзатворной области классического MOS- и LDMOS-транзистора при U_d = 10 В, U_g = 15 В, выделенный участок соответствует физическому каналу

Целью данной работы является исследование эффекта квазинасыщения выходной ВАХ дискретных мощных СВЧ LDMOS-транзисторов с субмикронными размерами канальной области и определение механизмов его появления.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования механизмов квазинасыщения построена модель мощного СВЧ LDMOS-транзистора, основанная на существующей технологии изготовления изделий данного типа [5]. Разработанная модель является структурной, т. е. не предназначена для определения рекомендованных параметров технологических процессов создания реальных структур. С целью облегчения анализа наблюдаемых физических эффектов модель была построена на основе упрощенной LDMOS-структуры, не включающей полевой электрод над стоковой LDD-областью, а сама LDD-область выполнена равномерно легированной.

Модель создана в среде приборно-технологического проектирования Sentaurus TCAD [6]. Для моделирования структуры использовался модуль структурного проектирования SDE. При этом геометрические границы материалов задавались строго, без моделирования процессов окисления, осаждения и травления. Концентрация примесей в кремнии определялась, согласно закону распределения Гаусса, через установление концентраций в двух точках: на поверхности подложки и на глубине, соответствующей положению *p–n*-перехода в реальных структурах. Параметры распределения Гаусса подбирались так, чтобы итоговый профиль залегания примеси максимально соответствовал реальному.

Расчёт электрофизических параметров виртуального прибора выполняется численными методами по узлам сетки, поэтому необходимо оптимизировать её геометрические параметры, которые выбираются из физических соображений: в неактивных областях шаг сетки увеличивается, а в областях, где протекают физические процессы переноса носителей заряда и где результаты расчётов должны быть точнее, шаг сетки уменьшается. Точные размеры минимального и максимального шага сетки, а также условия перехода между ними подбираются эмпирически. В качестве оптимизатора расчётной сетки использовался программный модуль SNMesh.

Основой для численного моделирования электрофизических параметров и характеристик

4(543).indd 17 20.12.2019 9:33:20

исследуемых LDMOS-структур является решение системы уравнений в частных производных, описывающей статическое и динамическое поведение носителей в полупроводнике под влиянием внешних полей [6]. Рассматривается диффузионно-дрейфовая модель, в которой основные электрофизические параметры рассчитываются путём решения фундаментальной системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также выражений для электронного и дырочного токов:

$$\nabla(\varepsilon \cdot \nabla\psi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \text{ – уравнение Пуассона,}$$

$$\left.\begin{aligned} \nabla J_n &= -q(G - R) + q\frac{\partial n}{\partial t} \\ \nabla J_p &= q(G - R) - q\frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}\right\} \text{ – уравнения непрерывности,}$$

$$\left.\begin{aligned} J_n &= -q(\mu_n n \cdot \nabla\psi - D_n \nabla n) \\ J_p &= -q(\mu_p p \cdot \nabla\psi + D_p \nabla p) \end{aligned}\right\} \text{ – уравнения токов,}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ψ – электростатический потенциал; q – заряд электрона; p – концентрация дырок; n – концентрация электронов; N_D^+ – концентрация ионизированных атомов донорной примеси; N_A^- – концентрация ионизированных атомов акцепторной примеси; J_n, J_p – плотности электронного и дырочного токов соответственно; R – скорость рекомбинации электронов и дырок; G – скорость генерации электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

Данная система уравнений решается с помощью программного модуля SDevice методом сеток с использованием алгоритма Ньютона при изменяемых граничных условиях, а также с учётом соответствующих моделей физических процессов, происходящих в структуре.

Визуализация рассчитанных выходных ВАХ выполняется с помощью командного файла программного модуля Inspect.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выходная ВАХ LDMOS-транзистора в первом приближении может быть разбита на три участка: квазилинейный участок, переходный участок и участок квазинасыщения (рис. 4). Однако данное разделение является условным, так как в зависимости от режима снятия ВАХ, в том числе от напряжения на затворе U_g, переход между участками может быть очень плавным (см. рис. 1). На рис. 5, *а* представлены выходные ВАХ LDMOS-транзистора при разном напряжении на затворе, на рис. 5, *б* – переходная ВАХ транзистора.

Из приведенного рисунка видно, что, помимо плавности перехода к квазинасыщению, U_g влияет также на величину наклона участка квазинасыщения к горизонтальной оси. Идеальная переходная ВАХ характеризуется горизонтальным участком насыщения, т. е. полной независимостью тока стока от напряжения на стоке U_d. Соответственно для описания квазинасыщения можно использовать выходное сопротивление, однако для большей наглядности целесообразно ввести параметр, равный разнице токов стока при определенных напряжениях на стоке ΔI_d. В нашем случае была взята разница токов при U_d = 20 и 40 В. На рис. 6, *а* представлена зависимость абсолютной разницы токов $\Delta I_{d20\text{-}40}$, а на рис. 6, *б* – зависимость относительной

4(543).indd 18 20.12.2019 9:33:20

разницы токов $\Delta I_{d20\text{-}40}/I_d$ (U_d = 20 В) от напряжения на затворе. Как видно из приведенных рисунков, минимальный прирост тока стока относительно его величины наблюдается при U_g = 5 В, т. е. примерно на середине линейного участка переходной ВАХ (см. рис. 5, *б*).

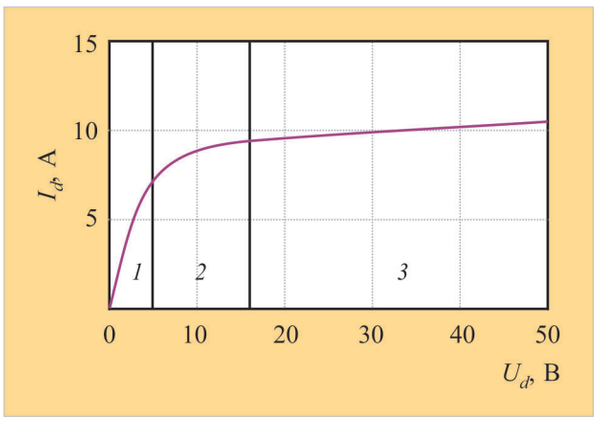
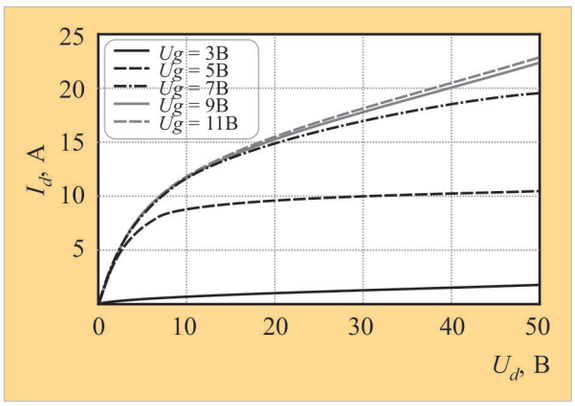
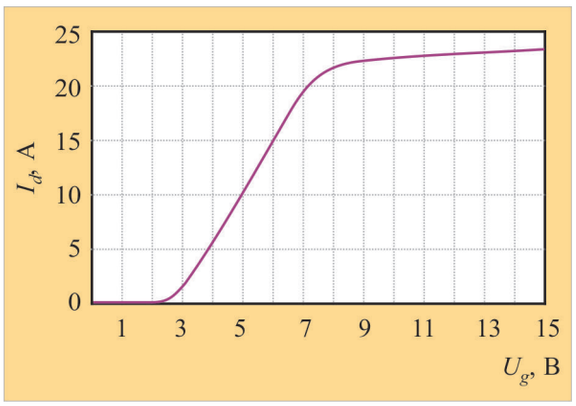


Рис. 4. Выходная ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора:
1 – квазилинейный участок; *2* – переходный участок; *3* – участок квазинасыщения

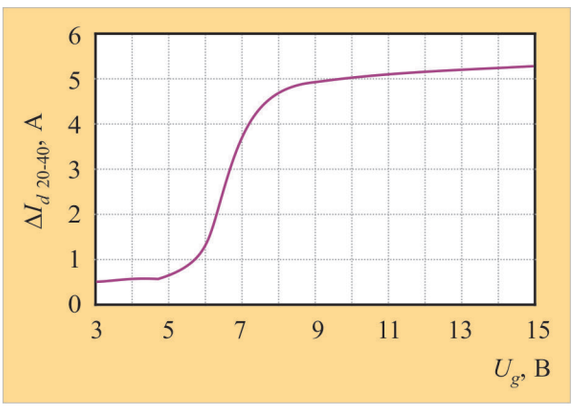


а)

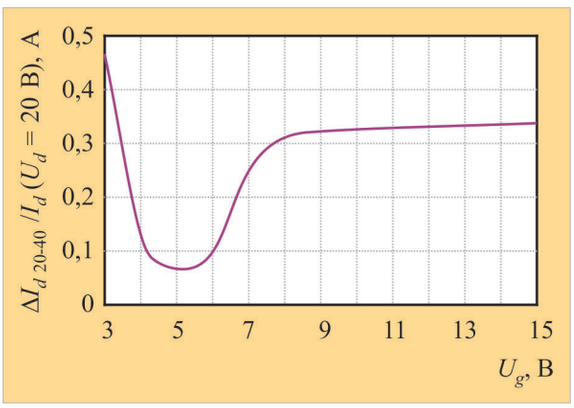


б)

Рис. 5. ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора:
а – выходная; *б* – переходная



а)



б)

Рис. 6. Зависимость разницы тока стока при U_d = 20 и 40 В от напряжения на затворе U_g:
а – абсолютная; *б* – относительная

4(543).indd 19 20.12.2019 9:33:21

Такая зависимость квазинасыщения от U_g обуславливается специфическими эффектами, связанными с инжекцией носителей в LDD-область и определяющими, в том числе, насыщение переходной ВАХ LDMOS-транзисторов. Согласно исследованиям [7, 8], ключевым эффектом, приводящим к квазинасыщению, является эффект Кирка (Kirk effect), или space charge modulation (SCM), известный по своему проявлению в биполярных транзисторах. Суть эффекта Кирка применительно к LDMOS-транзисторам заключается в следующем. В случае повышения U_g при фиксированном U_d из канальной области в область LDD инжектируется все больше электронов. При определенном U_g плотность инжектированных носителей n превысит концентрацию легирующей примеси в LDD-области N_{LDD}. Это приведет к снижению напряженности электрического поля E в LDD-области у края затвора (на рис. 2 обозначена *CE* – channel edge) и росту E на границе LDD/n^+-сток (на рис. 2 обозначена *DE* – drain edge). На рис. 7 показано распределение E в LDD-области при разных U_g. Видно, что E у края n^+-стока сильно возрастает при высоких U_g.

На рис. 8 представлена динамика изменения E в точках *CE* и *DE* при повышении U_g. На представленном графике хорошо видно, что минимуму относительного прироста тока $\Delta I_{d20\text{-}40} / I_d$ (U_d = 20 В) соответствует почти равное значение напряженности поля на обоих концах LDD-области. Влияние напряжения на стоке на распределение E вдоль LDD-области можно проследить по рис. 9. Видно, что при любых напряжениях на затворе повышение U_d вызывает рост E во всей LDD-области. Таким образом, влияние напряжений, подаваемых на затвор и сток, принципиально различно: повышение U_g вызывает перераспределение E вдоль LDD-области, а повышение U_d – рост E во всех точках.

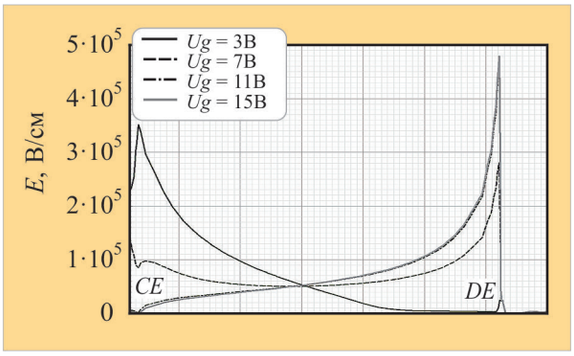


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля вдоль LDD-области при разных напряжениях на затворе, U_d = 50 В

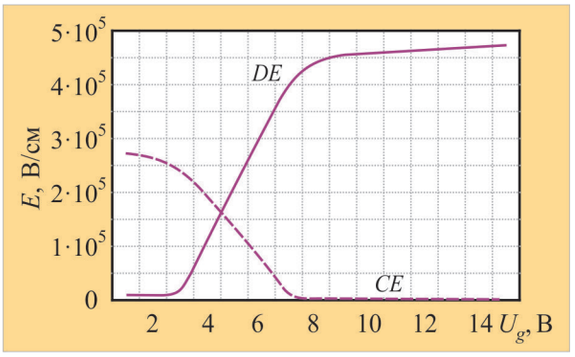


Рис. 8. Зависимости напряженности электрического поля в точках *CE* и *DE* от напряжения на затворе, U_d = 50 В

Чтобы понять, как взаимодействие этих факторов приводит к плавному или сильно выраженному квазинасыщению при тех или иных режимах, можно обратиться к следующим рассуждениям. Как известно, плотность тока может быть определена как $j = qnv$, где q – элементарный заряд; n – концентрация носителей заряда; v – скорость носителей заряда.

Таким образом, для понимания механизма квазинасыщения тока стока j достаточно проследить характер изменения концентрации n и скорости носителей заряда v при различных напряжениях U_g и U_d. На рис. 10 представлены зависимости концентрации электронов n в точках *CE* и *DE* от напряжения на стоке U_d при разных U_g. Аналогичные зависимости для v показаны на рис. 11.

4(543).indd 20 20.12.2019 9:33:21

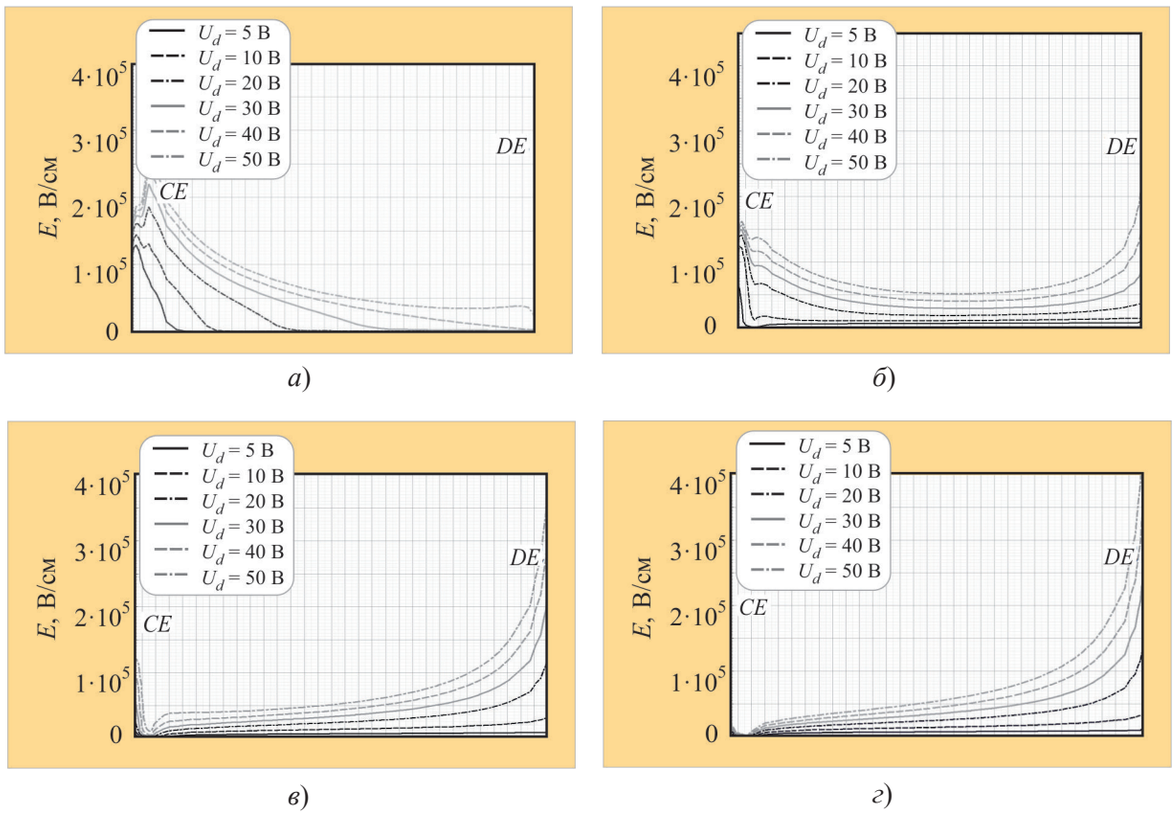


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля вдоль LDD-области при разных напряжениях на стоке:
а – U_g = 3 В; *б* – U_g = 5 В; *в* – U_g = 7 В; *г* – U_g = 9 В

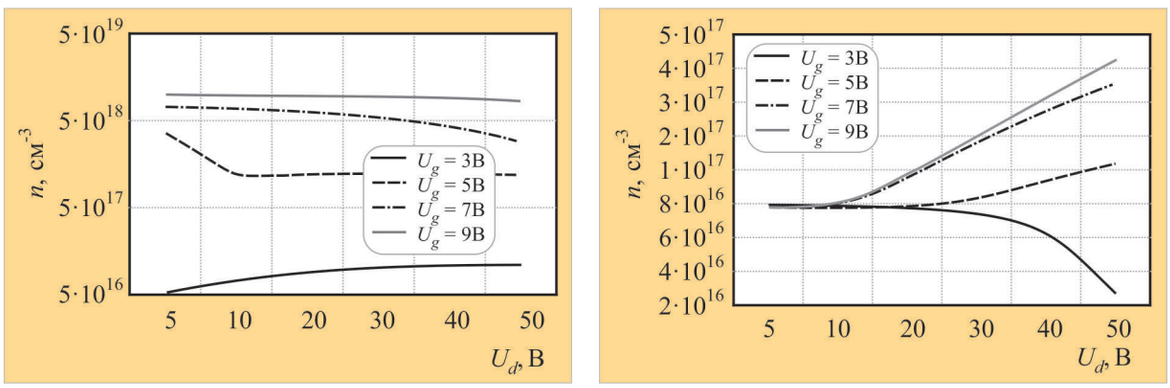
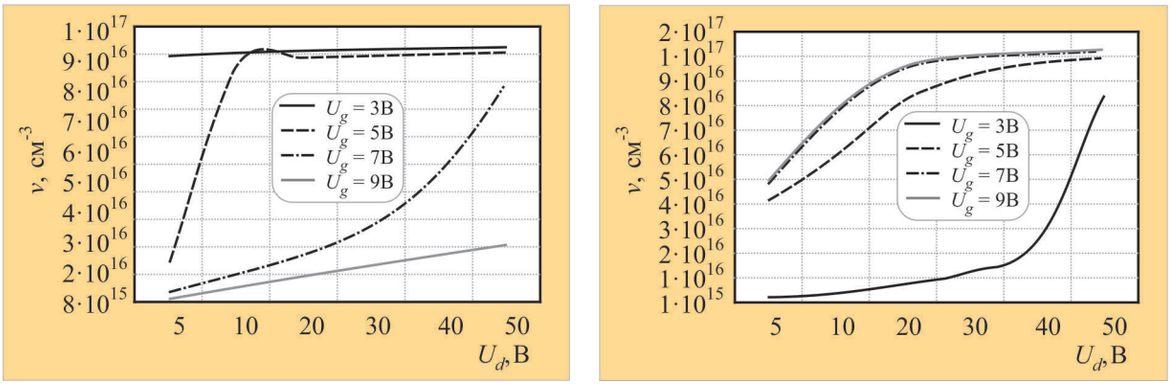


Рис. 10. Зависимости концентрации электронов от напряжения на стоке при разных U_g:
а – в точке *CE*; *б* – в точке *DE*

4(543).indd 21 20.12.2019 9:33:22



а) *б*)

Рис. 11. Зависимости скорости электронов от напряжения на стоке при разных U_g:
а – в точке *CE*; *б* – в точке *DE*

Рассмотрим изменения концентрации n и скорости носителей заряда v при разных напряжениях на затворе.

При $U_g = 3$ В проводимость канала невелика, напряженность поля сосредоточена у *CE*. Ввиду этого, скорость электронов в точке *CE* насыщена уже при незначительном U_d. В то же время v у *DE* быстро возрастает с повышением напряжения на стоке. Это приводит к тому, что по мере повышения U_d время пролета электронов вдоль LDD-области к *DE* снижается, а время пролета из канала в LDD-область остается постоянным. Благодаря этому, с повышением U_d концентрация электронов в LDD-области, и в частности у *DE*, снижается. Таким образом, при $U_g = 3$ В причиной отклонения от линейного закона нарастания тока при повышении напряжения является насыщение скорости носителей заряда на участке *CE*. Однако, ввиду упомянутого существенного роста v вдоль LDD-области, квазинасыщение тока происходит плавно и относительный прирост тока стока $\Delta I_{d20\text{-}40}/I_d$ ($U_d = 20$ В) оказывается весьма значительным.

При $U_g = 7$ В картина противоположна случаю $U_g = 3$ В: из-за эффекта Кирка максимум E смещается к DE, v в данной точке выходит на насыщение, что и ограничивает рост тока. У *CE* напряженность поля минимальна и скорость далека от насыщения. Это означает, что скорость, с которой электроны влетают в LDD-область (а следовательно, и число влетевших электронов), с повышением U_d растет, в то время как скорость, с которой они вылетают из LDD-области в n^+-сток, остается приблизительно постоянной. Таким образом, разница в числе влетевших и вылетевших электронов возрастает с ростом U_d, и n в *DE* повышается, что и влечет за собой рост тока стока, несмотря на насыщение v. Случай $U_g = 9$ В представляет собой дальнейшее развитие уже описанных процессов: E полностью сосредоточена у *DE*, благодаря чему скорость носителей заряда в данной точке насыщается уже при $U_d = 20$ В, в то время как у *CE* она остается относительно малой даже при $U_d = 50$ В. Однако резкий рост n в *DE* способен компенсировать насыщение скорости, и j на участке квазинасыщения продолжает уверенно расти.

При $U_g = 5$ В наблюдается промежуточная ситуация: проводимость канала такова, что концентрация инжектированных электронов превосходит N_{LDD}, но эффект Кирка еще выражен не настолько сильно, так что напряженность поля высока и в *CE*, и в *DE*. Соответственно скорость электронов в этих точках сопоставима и с повышением U_d насыщается как в *CE* (полностью), так и в *DE* (частично). Это приводит к тому, что при повышении напряжения стока n у *CE* прак-

4(543).indd 22 20.12.2019 9:33:22

тически не меняется, а у *DE n* растет достаточно слабо. Таким образом, с ростом U_d *n* и *v* слабо меняются на границе LDD/n^+-сток и рост тока выражен слабо.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, причиной отклонения от линейного закона нарастания тока при повышении напряжения на стоке в LDMOS-транзисторах является насыщение дрейфовой скорости электронов в зависимости от напряжения на затворе на том или ином участке LDD-области. Вместе с тем насыщение скорости не способно вызвать полную независимость тока стока от напряжения на стоке, как это происходит в длинноканальных MOS-транзисторах: ток продолжает нарастать, но не по линейному закону.

Последнее обстоятельство особенно справедливо для дискретных мощных LDMOS-транзисторов, которые из-за необходимости работать при высоких напряжениях питания имеют протяженную LDD-область с малой длиной перекрытия затвором. В силу этих конструктивных особенностей, напряженность электрического поля в дискретных мощных LDMOS-транзисторах достигает значений, необходимых для насыщения *v*, лишь на краях LDD-области, в отличие от интегральных LDMOS-транзисторов, рассмотренных в работе [7].

Максимально приближенная к идеальному насыщению ВАХ достигается при таком напряжении на затворе, при котором напряженность электрического поля распределена равномерно по всей длине LDD-области, что соответствует середине линейного участка переходной ВАХ. В теории данный факт позволяет изменять значение напряжения затвора, при котором достигается квазинасыщение с минимальным наклоном, посредством внедрения полевых электродов и создания неравномерно легированной LDD-области, так как эти конструктивные особенности также способны перераспределять напряженность электрического поля вдоль LDD-области.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Theeuwen, S. J. C. H.** LDMOS technology for RF power amplifiers / S. J. C. H. Theeuwen, J. H. Qureshi // IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No 6. – P. 1755 – 1763.

2. **Гуртов, В. А.** Твердотельная электроника / В. А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2007. – 408 с.

3. **Vestling, L.** Design and modeling of high-frequency LDMOS transistors / L. Vestling //Acta Unisersitatis Upsaliensis. – 2002. – 58 p.

4. **Apples, J. A.** High voltage thin layer devices (RESURF devices) / J. A. Apples, H. M. J. Vaes // EDM Tech. Dig. – 1979. – No 25. – P. 238.

5. **Ткачев, А. Ю.** Влияние конструктивно-технологических факторов на электрические параметры мощных СВЧ LDMOS-транзисторов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.13.18. – Воронеж: Воронежский госуниверситет. – 2011. – 16 с.

6. Sentaurus Device User Guide. Version D-2010.03. – Synopsys, Inc., 2010. – 1328 с.

7. **Kumar, B. Sampath.** On the unification of physics of quasi-saturation in LDMOS devices / Kumar B. Sampath, Shrivastava // IEEE Trans. Electron Devices. – 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 191 – 198.

8. **Wang, L.** Physical description of quasi-saturation and impactionization effects in high-voltage drain-extended MOSFETs / L. Wang, J. Wang, C. Gao, J. Hu, P. Z. X. Li, W. Li, S. H. Y. Yang // IEEE Trans. Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, No 3. – P. 492 – 498.

Статья поступила 8 июля 2019 г.

4(543).indd 23 20.12.2019 9:33:22

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.73(088.8)

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОГО ОТБОРА ТОКА НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННОГО ОКСИДНОГО КАТОДА

Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец

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

Изложены результаты исследования изменения элементного состава эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода (МНОК) после отбора тока повышенной плотности методом электронной Оже-спектроскопии (ОЭС). Показано, что имеется корреляция между ухудшением эмиссионных параметров МНОК и изменением элементного состава поверхности. Наибольшее обеднение атомами Ba и Sr на поверхности М-покрытия МНОК происходит в области границы покрытия шириной 150…200 мкм.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), оксидный катод (ОК), электронная Оже-спектроскопия(ОЭС), недокальные характеристики, долговечность, щелочно-земельные металлы (ЩЗМ), М-покрытие

THE EFFECT OF INCREASED CURRENT DRAWING ON THE EMISSION SURFACE ELEMENTAL COMPOSITION OF THE MOLECULAR SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODE

G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, O. V. Pelipets

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

The paper presents the results of studying by Auger electron spectroscopy the emission surface elemental composition changes of sputter-deposited oxide cathode after drawing high density current. It is shown that there is a correlation between the deterioration of the emission properties of cathode and the changes in the surface elemental composition. The greatest depletion of Ba and Sr atoms on the surface of the cathode M-coating occurs in the region of the coating boundary 150…200 μm in width.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode (MSDOC), oxide cathode (OC), Auger electron spectroscopy (AES), emission characteristics, working life, alkaline-earth metals (AEM), M-coating

1. ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологии изготовления молекулярно-напыленного оксидного катода (МНОК) и его работы в современных циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) требует расширения знаний о качественном и количественном элементном составе и физико-химических процессах, происходящих на поверхности и в объеме МНОК. В работе [1] проводился энергодисперсионный микроанализ осажденного М-покрытия. Однако при использовании данного метода возникают трудности, связанные с определением концентраций легких элементов.

4(543).indd 24 20.12.2019 9:33:22

Одним из мощных методов исследования элементного состава поверхности является электронная Оже-спектроскопия (ОЭС). Преимуществом метода является использование сфокусированного пучка электронов малого диаметра в качестве возбуждающих частиц. Энергетическое положение Оже-пиков определяется электронной структурой атомов, что позволяет получать информацию о составе поверхности для всех элементов периодической системы, используя эталонные спектры [2].

Исследование влияния толщины М-покрытия и протекающего тока на испарение компонентов оксидного покрытия и эмиссионные свойства ОК приведено в [3–5]. Однако для миниатюрных МНОК с ленточным электронным потоком на иридиевом керне влияние повышенного отбора тока на состав эмиссионного покрытия (М-покрытия) изучено недостаточно [6].

В настоящей работе с помощью метода ОЭС проведена оценка элементного состава эмиссионной поверхности образцов МНОК после нанесения М-покрытия и работы катодов с повышенным отбором тока в макетах ЦЗУ.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались МНОК, изготовленные на кернах из сплава ВР-20ВП с нанесенной пленкой иридия и с М-покрытием толщиной 0,8…1 мкм. Керн крепился к подогревателю из сплава ВР-27ВП с помощью лазерной сварки (рис. 1). Осаждение М-покрытий проводилось ионно-плазменным методом в смеси газов Ar и CO_2 при давлении 0,11…0,13 Па из мишени состава $(BaSrCa)CO_3$ с соотношением элементов щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) 47:45:8. Конструкция ионно-плазменной установки и методика токоотбора с МНОК описаны в работах [7, 8].

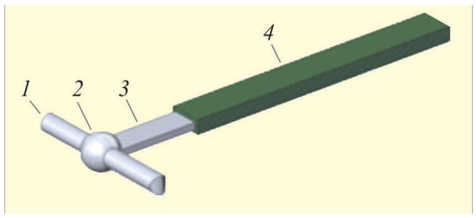


Рис. 1. Фрагмент конструкции МНОК:
1 – подогреватель; *2* – место сварки;
3 – непокрытая часть керна;
4 – эмиссионное покрытие керна

Определение элементного состава поверхности МНОК проводилось Оже-спектрометром типа 09 ИОС 3 при комнатной температуре в диапазоне энергий Оже-электронов до 2000 эВ. Погрешность определения концентраций составляла 30 %.

Энергетическое разрешение при снятии Оже-спектров составляло 1 %, диаметр электронного луча на поверхности образца – около 20 мкм. Параметры первичного пучка электронов выбирались равными 3 кВ и 2 мкА. Регистрация энергетического распределения электронов $N(E)$ проводилась в дифференциальной форме, напряжение модуляции было равно 1 и 7 В. Оже-анализ поверхности осуществлялся при остаточном давлении в камере не хуже $4 \cdot 10^{-6}$ Па.

Проведено исследование поверхности трех МНОК по всей длине покрытия кернов. Длина кернов катодов составляла 1 мм, длина покрытой части керна – 0,7 мм. М-покрытие представляло собой замкнутую поверхность по всей площади керна. По сравнению с серийными образцами, катоды имели увеличенную площадь эмиссионной поверхности – $7{,}7 \cdot 10^{-4}$ см^2. Катод № 1 – с непрокаленным (неотформованным) М-покрытием, катод № 2 – после работы в макете ЦЗУ 1300 ч, катод № 3 – после срока службы 3530 ч. В установке ОЭС исследование поверхности МНОК № 3 проводили без травления и с травлением поверхностного слоя аргоном на глубину 50 и 100 нм.

Катод № 2 работал с отбором тока небольшой плотности (0,2 А/см^2) в непрерывном режиме в течение 1300 ч. За время его работы в макете прибора ухудшений по эмиссионным параметрам не выявлено. МНОК № 3 показал хорошие эмиссионные свойства в непрерывном режиме

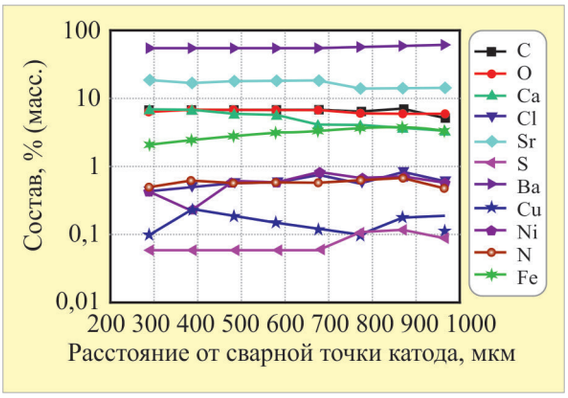
4(543).indd 25 20.12.2019 9:33:22

с начальной плотностью тока 0,6 А/см^2. После 500 ч работы с данного катода отбирался ток с плотностью до 14 А/см^2. В условиях повышенного токоотбора у катода № 3 произошло значительное падение эмиссии на сроке службы 1000 ч, однако он не снимался с испытаний до срока службы 3530 ч.

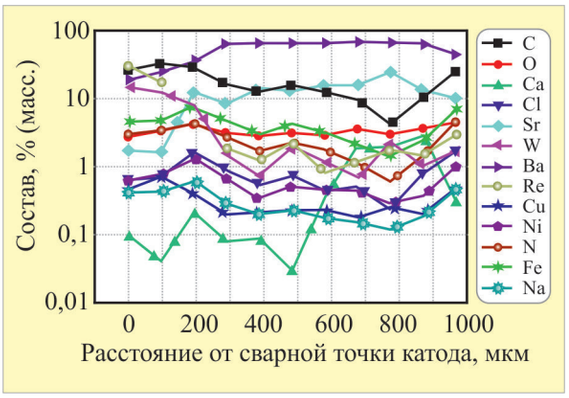
После 3530 и 1300 ч работы оба катода были демонтированы из макетов для проведения исследования состава эмиссионной поверхности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, *а* показано распределение элементов на поверхности М-покрытия МНОК № 1 непосредственно после напыления покрытия, рассчитанное по Оже-спектрам (рис. 3, *а*). Исследовалась покрытая часть керна длиной 700 мкм, так как при нанесении М-покрытия часть керна от сварной точки (подогревателя) протяженностью около 300 мкм скрыта под маской оправки. Наибольшую концентрацию на эмиссионной поверхности катода имеют активные элементы Ba, Sr, C и O. Содержание атомов Ca составляет 5,2 % (масс.) (таблица). Отношение средних значений концентраций элементов Ba:Sr:Ca на эмиссионной поверхности составляет 59:17:5. Среднее значение атомов железа на поверхности М-покрытия МНОК № 1 составляет 3 % (масс.). Менее 1 % (масс.) составляют концентрации Ni, N, Cu. На поверхности выявлено незначительное количество вредных для МНОК примесей – Cl, S в количестве 0,6 и 0,1 % (масс.). Соотношение активных элементов МНОК № 1 вдоль поверхности керна остается неизменным в пределах точности измерений.



а)



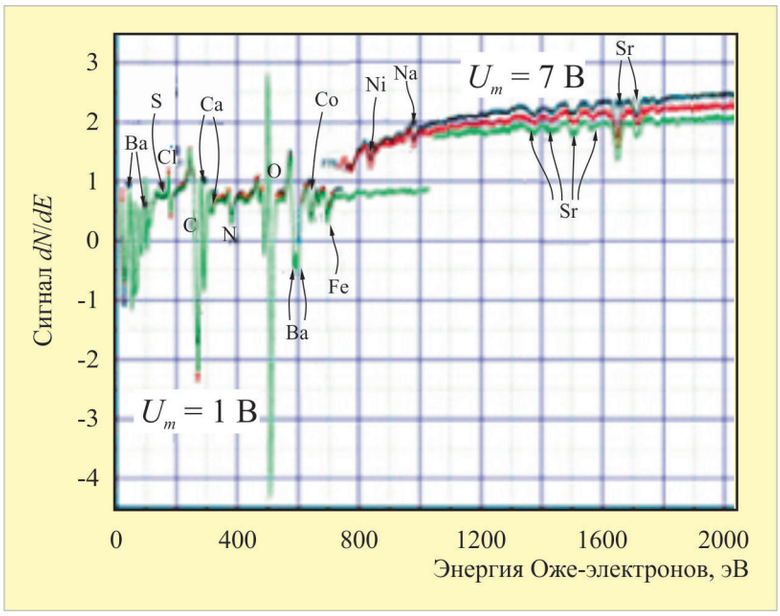
б)

Рис. 2. Распределение концентрации элементов на эмиссионной поверхности неотформованного МНОК № 1 (*а*) и МНОК № 2 после срока службы 1300 ч (*б*)

4(543).indd 26 20.12.2019 9:33:22

Усредненный состав, % (масс.), эмиссионной поверхности МНОК после осаждения М-покрытия и срока службы катодов с отбором тока

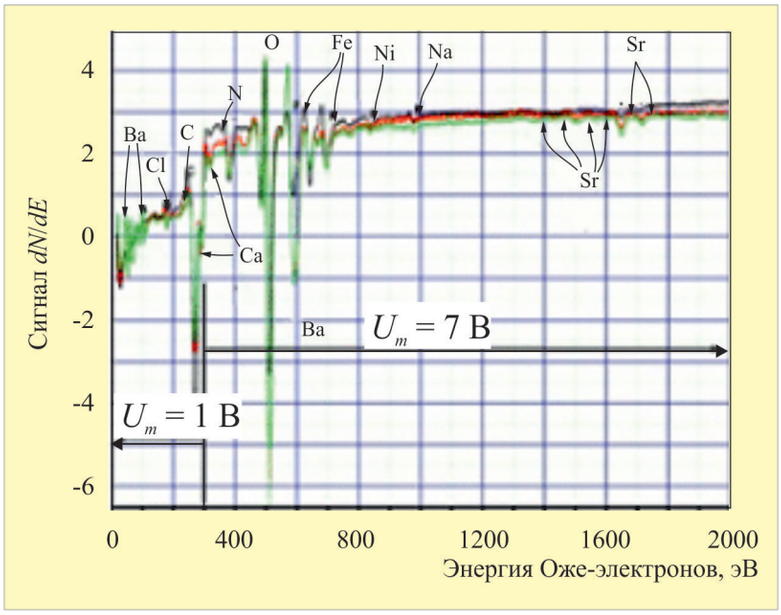
Элемент	На поверхности			На глубине 50 нм	На глубине 100 нм
	МНОК № 1	МНОК № 2	МНОК № 3	МНОК № 3	МНОК № 3
C	6,6	12,7	8,7	7,6	5,4
O	6,5	3,2	1,7	6,9	8,8
Ca	5,2	0,9	2,9	9,7	12,0
Cl	0,6	0,7	–	–	–
Sr	17,1	13,7	27,3	20,9	16,6
W	< 0,3	1,4	2,2	2,0	3,9
Ba	59,1	58,9	45,6	46,1	46,9
Re	< 0,4	1,7	8,9	2,5	3,0
Cu	0,1	0,2	–	–	–
Ni	0,6	0,5	–	–	–
N	0,6	1,6	–	–	–
Fe	3,2	3,4	–	–	–
Na	0,2	0,2	–	–	–
S	0,1	–	–	–	–
Ir	–	–	2,3	3,6	3,6



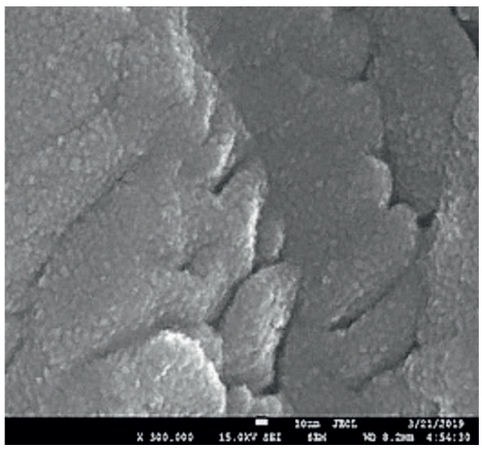
а)

Рис. 3. Оже-спектры поверхности (см. также с. 28):
а – неотформованного МНОК с осажденным М-покрытием

4(543).indd 27 20.12.2019 9:33:23



б)



в)

Рис. 3. Оже-спектры поверхности:
б – МНОК после срока службы 1300 ч;
в – СЭМ-изображение М-покрытия неотформованого МНОК на микроскопе JEOL (×300000)

На рис. 4, *а* показана недокальная характеристика МНОК № 2 со сроком службы 1300 ч. Характеристическая точка имеет перегиб при накале 250 мА и температуре 575 °С. После первых 50 ч работы произошло небольшое уменьшение эмиссии в низкотемпературной области из-за выключения геттера. В течение 1300 ч работы МНОК наблюдался незначительный рост эмиссии. После 1300 ч работы катод был демонтирован из макета прибора для исследования элементного состава поверхности.

На рис. 2, *б* показано рассчитанное по Оже-спектрам (см. рис. 3, *б*) распределение концентрации элементов на поверхности МНОК № 2 после срока службы 1300 ч при отборе тока плотностью 0,2 А/см^2. Анализ рис. 2, *б* показывает, что на непокрытой части керна на длине 300 мкм от сварной точки после 1300 ч появляется пленка М-покрытия. Возможно, произошло осаждение элементов М-покрытия на участок керна при испарении покрытия, а также миграция атомов М-покрытия в процессе работы катода. На длине покрытия от 300 до 900 мкм от подогревателя

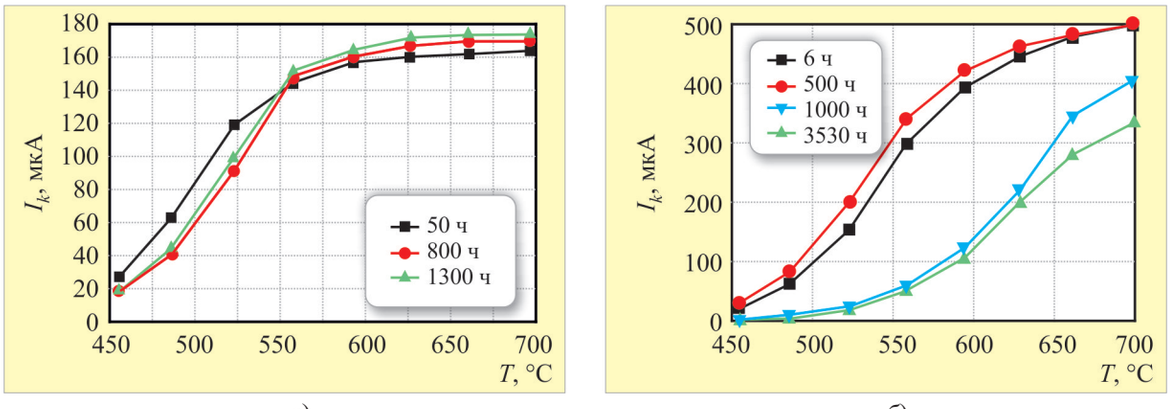
4(543).indd 28 20.12.2019 9:33:23

концентрации Ba, Sr и других активных элементов, кроме Ca (активатора), изменились незначительно. Отношение средних значений концентраций элементов Ba:Sr:Ca на катоде № 2 составляет 59:14:1. Концентрация Ba и Sr возрастает при удалении от подогревателя вдоль эмиссионного покрытия керна на протяжении 300 мкм. Вблизи подогревателя керны МНОК имеют максимальную температуру (около 750…800 °С при отборе большой плотности тока, 550…600 °С при работе катода с небольшой плотностью).

На рис. 3, *в* показано СЭМ-изображение М-покрытия сразу после осаждения на МНОК, полученное с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL (Япония). Нанесение покрытия проводилось при давлении рабочего газа 0,10…0,13 Па. При большом увеличении (в 300000 раз) видно, что зерна М-покрытия округлой формы имеют размеры около 10 нм. Шероховатость поверхности и размер зерен М-покрытия зависят от условий осаждения М-покрытия и степени полировки подложки. Однородная плотная структура М-покрытия с увеличенным размером контактирующей площади между кристаллами способствует лучшему перемешиванию фаз твердого раствора ЩЗМ, улучшает взаимодействие металл-оксид, транспортировку Ba и электронную проводимость. Эти свойства М-покрытия способствуют меньшей работе выхода и рабочей температуре МНОК, чем у ОК с пористым покрытием, и позволяют отбирать токи большей плотности [7, 8].

В процессе работы МНОК с небольшой плотностью тока (1…3 А/см^2) температура на конце керна примерно на 20 °С меньше, чем в области сварной точки, что установлено при пирометрировании катодов в стеклянной лампе. Из рис. 2, *б* видно, что вблизи подогревателя наибольшую концентрацию имеют атомы W, Re, C, Ba, наименьшую – атомы Ca, Cu, Na, Cl (менее 1 % (масс.)). Атомов Ir на поверхности М-покрытия МНОК № 2 не обнаружено. Концентрация кислорода на поверхности керна данного катода составляет около 3,2 % (масс.), что меньше, чем у неотформованного МНОК № 1.

В М-покрытии катода № 2 обнаружены атомы Fe (3,4 % (масс.)), что может быть связано с электронной бомбардировкой и распылением оправок из стали, в которых находились МНОК при напылении. Присутствие в М-покрытии незначительных концентраций Cu и Ni связано с распылением катода-мишени на никелевом керне и электронной бомбардировкой медной подложки во время ионно-плазменного напыления. Наличие атомов железа с концентрацией до 3…4 % (масс.) в М-покрытии не ухудшает эмиссионных свойств МНОК.



а) *б*)

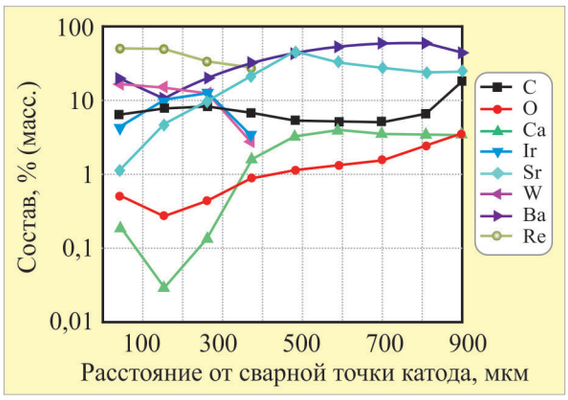
Рис. 4. Эмиссионные характеристики МНОК со сроком службы 1300 ч при отборе тока плотностью 0,2 А/см^2 (*а*) и 3530 ч (*б*) и начальной плотности тока 0,6 и 14 А/см^2 (после 500 ч)

4(543).indd 29 20.12.2019 9:33:23

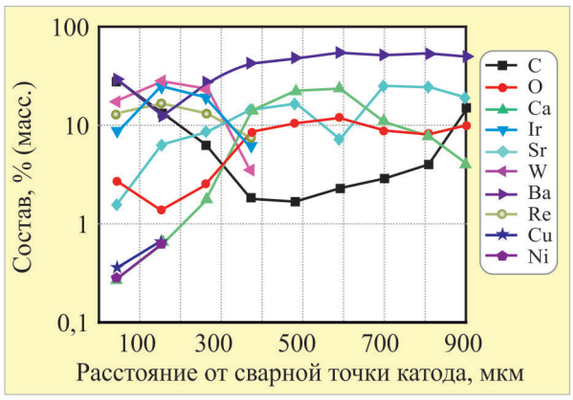
На рис. 4, *б* представлены недокальные характеристики и результаты испытания на долговечность МНОК № 3 со сроком службы 3530 ч, которые свидетельствуют о падении тока эмиссии после 500 ч работы после отбора с катода тока плотностью более 14 А/см^2.

На рис. 5, *а* показано распределение концентрации элементов на поверхности МНОК № 3, рассчитанное по Оже-спектрам. В период времени с 500 до 1000 ч работы МНОК, когда с катода отбирался ток повышенной плотности, из-за процессов миграции и испарения М-покрытия катод сильно деградировал (рис. 4, *б*). Атомы Ba и Sr на поверхности МНОК № 3 имеют наибольшую концентрацию, которая возрастает при удалении от подогревателя. На расстоянии 470 мкм от подогревателя концентрация Sr на поверхности М-покрытия превышает концентрацию Ba, а затем убывает (рис. 5, *а*). Вблизи подогревателя на поверхности М-покрытия обнаружены атомы W, Ir, Re. На расстоянии до 370 мкм от подогревателя концентрация примеси атомов Re превышает концентрацию W и Ir.

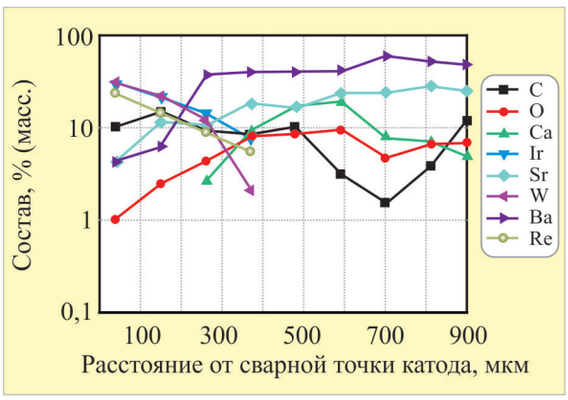
На всей длине поверхности М-покрытия МНОК № 3 концентрация атомов C превышает концентрацию O и Ca. Наиболее значительное изменение концентрации элементов М-покрытия произошло на расстоянии до 400…450 мкм от подогревателя. Отношение средних значений концентраций элементов Ba:Sr:Ca на эмиссионной поверхности катода составляет 46:27:3.



а)



б)



в)

Рис. 5. Распределение элементов на поверхности МНОК № 3:
а – без травления поверхности; *б* – с травлением на глубину ~50 нм;
в – с травлением на глубину ~100 нм

4(543).indd 30 20.12.2019 9:33:24

Анализ эмиссионной поверхности МНОК № 3 после травления верхнего эмиссионного слоя аргоном в вакууме на глубину 50 нм (рис. 5, *б*) показал, что на длине поверхности протяженностью до 260 мкм от подогревателя концентрация W превышает концентрацию атомов Ir и Re. Концентрация атомов Ca в М-покрытии постепенно возрастает и на расстоянии 350…650 мкм от подогревателя превышает концентрацию Sr, O и C. В ОК из всех ЩЗМ эмиссионного покрытия Ca имеет наименьшую скорость испарения [9].

Возможно, увеличение концентрации атомов Ca в центральной части покрытия керна происходит за счет их диффузии под действием градиента температуры. Отношение средних значений концентраций ЩЗМ Ba:Sr:Ca после травления эмиссионной поверхности на глубину 50 нм составляет 46:21:10. Наблюдается различие в распределении атомов O и C на глубине 50 нм и на поверхности М-покрытия МНОК № 3 в центральной части керна. Концентрация атомов C уменьшается по сравнению с покрытием без травления. В средней части керна концентрация атомов O превышает концентрацию атомов C. Вблизи подогревателя и на конце покрытия керна концентрация атомов O меньше концентрации C. На поверхности М-покрытия без травления концентрация атомов O меньше, чем в объеме покрытия. В данном катоде на поверхности и на глубине слоя 50 нм от поверхности атомов Fe не обнаружено. После травления слоя поверхности толщиной 50 нм усредненная концентрация элементов O, Ca, Ir в М-покрытии МНОК возросла, в то время как концентрация атомов Sr и C незначительно уменьшилась (см. таблицу). После травления поверхности катода № 3 на глубину 100 нм общий характер распределения концентраций ЩЗМ и других элементов не меняется. В покрытии увеличивается средняя концентрация атомов O и Ca, уменьшается концентрация C и Sr. Отношение средних значений концентраций ЩЗМ Ba:Sr:Ca после травления эмиссионной поверхности на глубину 100 нм составляет 47:17:12.

В [3, 9] показано, что в пористом покрытии ОК отбор тока термоэлектронной эмиссии при наложении электрического поля изменяет скорость испарения бария, стронция и кислорода.

Известно, что величина эмиссии плотных оксидных покрытий определяется количеством избыточного ЩЗМ в слое и соотношением концентраций Ba и Sr на поверхности покрытия [4, 9]. Вследствие уменьшения содержания Ba, эмиссионная способность ОК падает.

Из рис. 5 следует, что при наложении электрического поля и отборе тока повышенной плотности (до 14 А/см^2) на эмиссионной поверхности МНОК № 3 резко уменьшается концентрация активных элементов – Ba, Sr и O, что приводит к деградации эмиссионных свойств и сокращению срока службы МНОК. Наибольшее обеднение эмиссионной поверхности МНОК происходит в области границы М-покрытия шириной 150…200 мкм.

В работе [10] при масс-спектрометрическом исследовании было показано, что основными продуктами испарения МНОК на никелевом керне являются BaO, Ba, Sr, а во время формовки катода – CO_2, углеводороды различного состава, Na, небольшое количество BaCl. Присутствие ионов Cl и S связано со следами их выделения из откачной системы установки напыления в процессе нанесения покрытия.

В процессе испытания катодов на долговечность наблюдается связь эмиссионных свойств МНОК и изменения состава поверхности. Из расчетных концентраций таблицы следует, что после отбора с МНОК № 3 тока до 14 А/см^2 и ухудшения его эмиссионных свойств средняя концентрация Ba на поверхности М-покрытия уменьшается по сравнению с МНОК № 2, работавшим в мягком режиме, на 13,3 % (масс.), после чего остается примерно на одном уровне с изменением глубины. Средняя концентрация Sr наоборот: на эмиссионной поверхности об-

4(543).indd 31 20.12.2019 9:33:24

разца № 3 повышается на 13,6 % (масс.) по сравнению со вторым образцом, а на глубине слоя 50 и 100 нм уменьшается до 20,9 и 16,6 % (масс.). Концентрация атомов Ca растет гораздо сильнее: после повышенного токоотбора на поверхности образца № 3 она возрастает на 2 % (масс.) по сравнению с образцом № 2. На глубине слоя 50 и 100 нм концентрация Ca возрастает до 9,7 и 12 % (масс.) соответственно. Для МНОК № 2, имеющего стабильные эмиссионные свойства, величина отношения концентраций Ba/Sr на эмиссионной поверхности составляет 4,3. Отношение концентраций Ba/Sr на эмиссионной поверхности МНОК № 3 составляет 1,7.

Таким образом, после отбора с МНОК тока большой плотности и деградации эмиссионных свойств отношение концентраций Ba/Sr на эмиссионной поверхности уменьшается в 2,5 раза.

Из таблицы видно, что в М-покрытии образца № 2 не обнаружено элементов Cu, Ni, S, Na, N, Fe. Возможно, они не выявлены из-за сигнала на уровне шума. Некоторые из элементов (Cu и Ni) обнаружены на керне катода № 3.

При исследовании распределения концентрации элементов на глубине 50 и 100 нм от поверхности М-покрытия установлено, что в центральной области концентрация Ca имеет максимальное значение. Концентрация C в области М-покрытия имеет минимум, повышаясь в области границы и конца покрытия. Нам представляется следующее объяснение этих процессов.

Известно, что Ca и C являются активаторами в ОК. Повышенный отбор тока с ОК ускоряет процессы активирования и испарения Ba и O, разогревает оксидный слой джоулевым теплом, увеличивает распыление слоя, оказывая неблагоприятное влияние на долговечность. Срок службы реального ОК определяется, по существу, испарением небольшой части окиси бария из поверхностного слоя [9].

Восстановление Ba в прикерновой области и объеме М-покрытия возможно посредством следующих механизмов [11]:

$$BaO + Ca \rightarrow Ba + CaO, \quad (1)$$

$$BaO + C \rightarrow Ba + CO\ (г). \quad (2)$$

При восстановлении Ba по первому механизму, в процессе работы МНОК после испарения Ba с поверхности происходит увеличение доли Ca в объеме М-покрытия. Под действием градиента температур атомы Ca из приграничной области, ближайшей к подогревателю (см. рис.1), диффундируют к центру эмиссионного покрытия. Поэтому концентрация Ca на глубине 50 и 100 нм в центральной области М-покрытия возрастает.

Содержание C на поверхности керна и в М-покрытии связано с особенностями технологического процесса напыления в смеси газа $Ar + CO_2$, при котором углерод осаждается по толщине оксидного слоя и на керне. Наибольшая концентрация Ba и Sr содержится в центральной области М-покрытия. В процессе работы катода и повышенного токоотбора часть атомов C уходит из М-покрытия в виде газа CO за счет реакции восстановления. На конце М-покрытия концентрация атомов C внутри покрытия возрастает из-за пониженной температуры в этой области (недостаточно активного расхода C в процессе восстановления Ba). В области границы М-покрытия рост концентрации C на глубине 50 и 100 нм связан с резким уменьшением концентрации ЩЗМ из-за повышенной температуры и возможной миграции атомов C с поверхности керна.

В работе [12] при исследовании изменения состава по глубине оксидного слоя для ОК с толстым пористым покрытием показано, что распределение концентрации BaO/CaO происходит неравномерно по глубине и определяется перепадом температур от керна к поверхности при различных условиях и времени работы катода. В тонком М-покрытии МНОК перепад темпе-

4(543).indd 32 20.12.2019 9:33:24

ратуры от керна к поверхности мал. Поэтому, скорее всего, влияние на неоднородность по длине керна при распределении ЩЗМ по глубине М-покрытия оказывает градиент температуры, возникающий в процессе повышенного отбора тока.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ОЭС исследовано распределение концентрации элементов на поверхности и на глубине 50 и 100 нм М-покрытия МНОК после повышенного отбора тока.

Результаты исследования элементного состава показали, что в процессе отбора тока повышенной плотности с МНОК с ленточным электронным потоком наряду с испарением активных элементов М-покрытия существует их миграция на керне по направлению к подогревателю на расстояние до 250…300 мкм от границы покрытия. Несмотря на особенности микроструктуры, электрофизические и эмиссионные свойства МНОК, деградация эмиссии МНОК приведенной конструкции при повышенном отборе тока происходит, как и в стандартном ОК, за счет преимущественного испарения с эмиссионной поверхности бариевой компоненты. Наибольшее обеднение атомами Ba и Sr на эмиссионной поверхности МНОК происходит в области границы М-покрытия, обращенной в сторону подогревателя, шириной 150…200 мкм, что объясняется как повышенным испарением этих элементов покрытия в данной части катода (при повышенном токоотборе температура и температурный градиент увеличиваются), так и их миграцией по замкнутому покрытию и в область непокрытого керна.

После отбора с МНОК № 3 тока повышенной плотности (14 А/см^2) в непрерывном режиме средняя концентрация на поверхности М-покрытия образца изменилась по сравнению с образцом № 2, работавшим 1300 ч со стабильной эмиссией. Концентрация Ba уменьшилась на 13,3 % (масс.), концентрация Sr возросла на 13,6 % (масс.), концентрация Ca возросла на 2 % (масс.). Возросла неоднородность в распределении элементного состава на поверхности и в глубине М-покрытия вдоль керна. Соотношение средних концентраций атомов Ba:Sr:Ca на поверхности и глубине 50 и 100 нм составило соответственно 46:27:3, 46:21:10 и 47:17:12. Отношение средних концентраций Ba/Sr на эмиссионной поверхности по сравнению с составом поверхности МНОК со стабильной эмиссией уменьшилось в 2,5 раза. С увеличением глубины слоя до 100 нм от поверхности концентрация Ca в М-покрытии возросла с 3 до 12 % (масс.).

Повышение концентрации Ca в центральной области в объеме М-покрытия произошло, возможно, вследствие его диффузии из области с более высокой температурой. Снижение концентрации C в центральной области в объеме М-покрытия, по-видимому, связано с его удалением в виде газа в процессе восстановления Ba.

Можно заключить, что одной из причин уменьшения срока службы при повышенном токоотборе является неравномерность потери компонентов М-покрытия по длине керна, связанная с градиентом температуры. Поэтому при разработке приборов с повышенным отбором тока необходимо конструктивно уменьшать перепад температуры по длине керна для повышения срока службы, сохранения запаса активного вещества и уменьшения неоднородности в распределении ЩЗМ на поверхности и в глубине М-покрытия.

Авторы благодарят А. В. Галдецкого и А. М. Соколова за полезное обсуждение результатов работы.

4(543).indd 33 20.12.2019 9:33:24

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жабин, Г. А.** Фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 03-06 июня 2019. – С. 112 – 116.

2. **Владимиров, Г. Г.** Физическая электроника. Эмиссия и взаимодействие частиц с твердым телом / Г. Г. Владимиров. – СПб.:Издательство «Лань, 2013. – 368 с.

3. **Пикус, Г. Я.** Влияние электрического поля на испарение компонентов и работу выхода окиси бария / Г. Я. Пикус, В. П. Тетеря // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1971. – Т. 35, № 5. – С. 1023 – 1030.

4. **Пикус, Г. Я.** Исследование газовыделения и испарения катодов с плотным покрытием, полученным методом плазменного напыления / Г. Я. Пикус, В. Ф. Шнюков // Электронная техника. Сер. 5. Приемно-усилительные лампы. – 1971. – Вып. 1(18). – С. 11 – 19.

5. **Шнюков, В. Ф.** Влияние толщины покрытия М-катода на скорость испарения его компонентов / В. Ф. Шнюков, А. Е. Лушкин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 1. – С. 58 – 62.

6. **Жабин, Г. А.** Влияние токоотбора на элементный состав поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 03 – 06 июня 2019. – С. 79 – 83.

7. **Жабин, Г. А.** О технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов с повышенной плотностью тока / Г. А. Жабин // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 28 – 31 мая 2018. – С. 182 – 186.

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

9. **Никонов, Б. П.** Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия,1979. – С. 185 – 186.

10. **Клементьев, Ю. Ф.** Масс-спектрометрическое исследование продуктов испарения молекулярно-напыленного оксидного катода / Ю. Ф. Клементьев, А. Я Князев, Е. Н. Лифанцев // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 10 (394). – С. 23 – 27.

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

12. **Князева, И. М.** Исследование состава оксидного покрытия методом радиоактивных индикаторов / И. М. Князева, В. П. Васильев // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1971. – Т. 35, № 5. – С. 1031 – 1034.

Статья поступила 7 августа 2019 г.

4(543).indd 34 20.12.2019 9:33:24

УДК 539.216.2

СОВРЕМЕННОЕ ВАКУУМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЛАСТИНАХ ДИАМЕТРОМ 150…200 мм

В. В. Одиноков, В. В. Панин

ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», г. Москва, Зеленоград

Представлен модульный принцип создания вакуумно-плазменного оборудования для микроэлектронных технологий с использованием различных вариантов загрузки-выгрузки пластин в рабочий модуль (реактор): установки с поштучной ручной загрузкой-выгрузкой пластин, с поштучной загрузкой-выгрузкой пластин из шлюзовой камеры манипулятором, с поштучной загрузкой-выгрузкой пластин манипулятором из кассеты в кассету в шлюзовой камере, а также оборудование кластерного типа. Рабочие модули установок обеспечивают высокие требования к процессам плазмохимического травления.

КС: вакуумные установки, интегральные схемы, загрузка-выгрузка пластин, источник плазмы, ВЧ-генератор, травление пластин

MODERN VACUUM EQUIPMENT FOR MICROELECTRONIC TECHNOLOGICAL PROCESSES, ON WAFERS WITH A DIAMETER OF 150…200 мм

V. V. Odinokov, V. V. Panin

JSC «Research institute of precision machine manufacturing», Moscow, Zelenograd

The modular principle of creating vacuum-plasma equipment for microelectronic technologies using various options for loading and unloading substrates into a working module (reactor) is presented: systems with single manual loading and unloading of substrates, with single loading and unloading of substrates from a lock chamber by a manipulator, with single loading and unloading of substrates by a manipulator from a cassette-to-cassette in a lock chamber, as well as cluster type equipment. Working modules of systems provide high requirements to the processes of plasma etching.

Key words: vacuum installations, integrated circuits, plate loading and unloading, plasma source, HF generator, plate etching

В производстве интегральных схем (ИС) с использованием вакуумных технологий на выход годных ИС существенное влияние оказывает воспроизводимость остаточной газовой среды в вакуумной камере (реакторе), а также исключение попадания на поверхность рабочих пластин инородных частиц (пылинок) при напуске и откачке рабочего объёма реактора. Особенно эти факторы негативно оказывают влияние на выход годных ИС с увеличением уровня их интеграции.

На производительность вакуумных установок в большей степени влияет потеря рабочего времени на откачку вакуумного объёма до предельного давления и напуск воздуха для его разгерметизации. Поэтому при проектировании вакуумных установок для современных микроэлектронных технологий необходимо уделять особое внимание перечисленным выводам.

Существуют различные варианты загрузки-выгрузки кремниевых пластин в реактор вакуумного технологического оборудования, представленные на рис. 1:

4(543).indd 35 20.12.2019 9:33:24

- поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в рабочий модуль – реактор (рис. 1, *а*);
- поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором из шлюзовой камеры в реактор (рис. 1, *б*);
- поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором из шлюзовой камеры в реактор из кассеты в кассету (рис. 1, *в*);
- поштучная загрузка-выгрузка пластин манипуляторами из нескольких шлюзовых камер в несколько рабочих модулей – реакторов из кассеты в кассету с использованием стандартного механического интерфейса (СМИФ) контейнеров – «кластерная система» вакуумного оборудования (рис. 1, *г*).

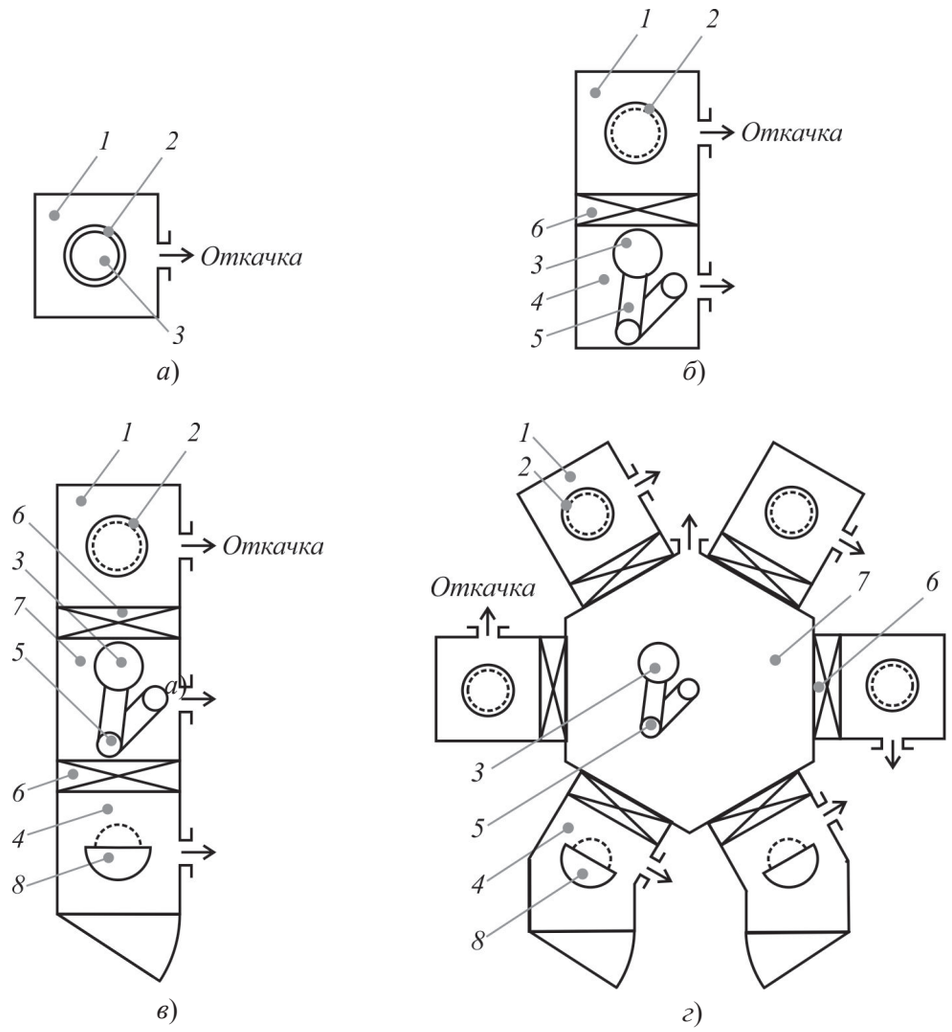


Рис. 1. Варианты модульной компоновки вакуумно-плазменных установок:
1 – рабочий модуль; *2* – столик; *3* – пластина; *4* – загрузочный модуль (шлюзовая камера); *5* – манипулятор; *6* – щелевой затвор; *7* – модуль транспортирования; *8* – кассета с пластинами

В таблице представлены варианты модульного проектирования вакуумных установок с учетом повышения их производительности и выхода годной продукции.

4(543).indd 36 20.12.2019 9:33:25

Варианты модульной компоновки вакуумных установок с точки зрения производительности и выхода годной продукции

№	Вариант модульной компоновки	Производительность	Выход годных, %
1	Поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в реактор (рис. 1, *а*)	Низкая	~ 40 – 60
2	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором в реактор из шлюзовой камеры (рис. 1, *б*)	Средняя	~ 60 – 70
3	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипулятором в реактор из кассеты в кассету из шлюзовой камеры (рис. 1, *в*)	Высокая	~ 80 – 90
4	Поштучная загрузка-выгрузка пластин манипуляторами в несколько рабочих модулей – реакторов из нескольких шлюзовых камер из кассеты в кассету и с использованием СМИФ контейнеров – «кластерная система» вакуумного оборудования (рис. 1, *г*)	Высокая	~ 95 – 98

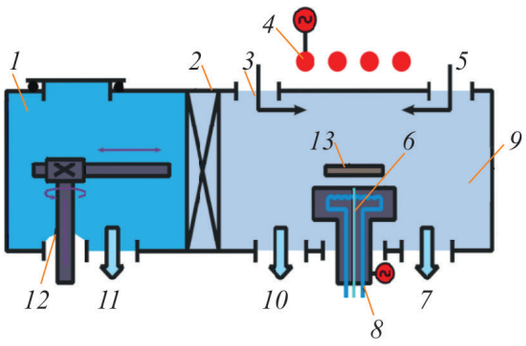
Поштучная ручная загрузка-выгрузка пластин или группы пластин в реактор применяется при обработке небольших партий пластин, а также при невысоких требованиях к остаточной вакуумной среде (рис. 2). Это оборудование имеет небольшую производительность, так как достаточно много времени тратится на откачку до высокого вакуума реактора и на разгерметизацию его перед выгрузкой пластин. При вскрытии реактора на атмосферу происходит смена состава газовой среды, что ведет к невоспроизводимости рабочей газовой среды и создает дополнительное образование частиц пыли в камере, что существенно влияет на привносимую дефектность и выход годных ИС.

Рис. 2. Модуль установки с поштучной ручной загрузкой-выгрузкой пластин

4(543).indd 37 20.12.2019 9:33:25

Для технологии микроэлектронных производств на пластинах диаметром от 100 до 200 мм необходимо снизить привносимую дефектность и тем самым повысить выход годных изделий. Для этого необходимо применять шлюзовую камеру с расположенным в ней манипулятором, который транспортирует необработанную пластину в реактор и возвращает обратно после обработки. За счет небольшого времени на откачку и разгерметизацию небольшого объёма шлюзовой камеры увеличивается производительность установки в целом.

Например, по такой схеме была создана установка травления мелкой щелевой изоляции в кремнии, оборудованная манипулятором, выполняющим поштучную загрузку-выгрузку пластин в реактор из шлюзовой камеры (рис. 3). При этом реактор (см. рис. 2) использовался для стыковки с модулем загрузки-выгрузки из шлюзовой камеры.



а)

б)

Рис. 3. Схема (*а*) и фотография общего вида (*б*)
установки травления мелкой щелевой изоляции в кремнии

Загрузка и выгрузка пластин *13* диаметром от 100 до 200 мм происходит с помощью манипулятора *12* из шлюзовой камеры *1*. Предельное давление достигается с помощью средств вакуумной откачки через откачные патрубки *7*, *10* и *11*. Через затвор *2* манипулятор транспортирует пластину на рабочий стол в реакторе *9*. Охлаждаемый столик имеет канал подачи гелия *6* под пластину и через согласующее устройство подключен к генератору *8* с частотой 13,56 МГц. Индуктор *4* через согласующее устройство подключен к генератору с частотой 13,56 МГц. Процессные газы подаются в реактор через газовый «душ» *3* и *5*. Передача мощности от индуктора в реактор происходит через толстый кварцевый диск. Продукты реакции удаляются средствами вакуумной откачки через откачные патрубки *7* и *10*. После завершения технологического процесса манипулятор перемещает обработанную пластину в шлюзовую камеру для ее выгрузки и загрузки новой необработанной пластины.

На установке реализован процесс травления гладких щелей шириной 1 мкм на глубину 2 мкм в кремниевой пластине (рис. 4). Мощность верхнего генератора не превышала 1000 Вт, а нижнего – 160 Вт. Процесс проходил при давлении в реакторе от 2 до 5 Па. Продолжительность процесса не превысила 180 с.

4(543).indd 38 20.12.2019 9:33:25

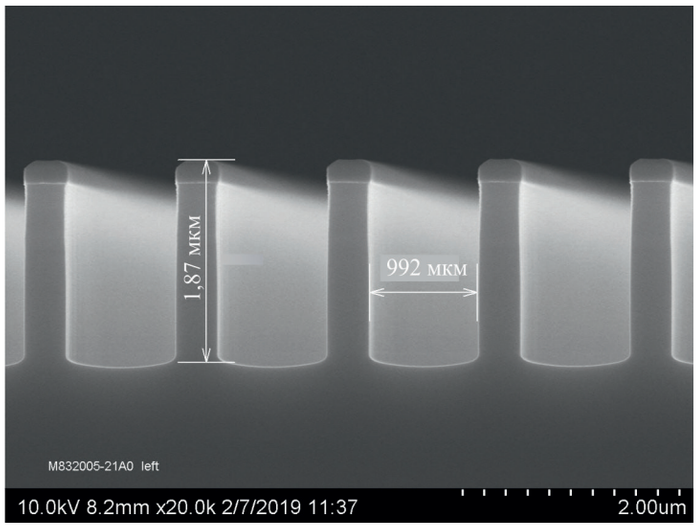
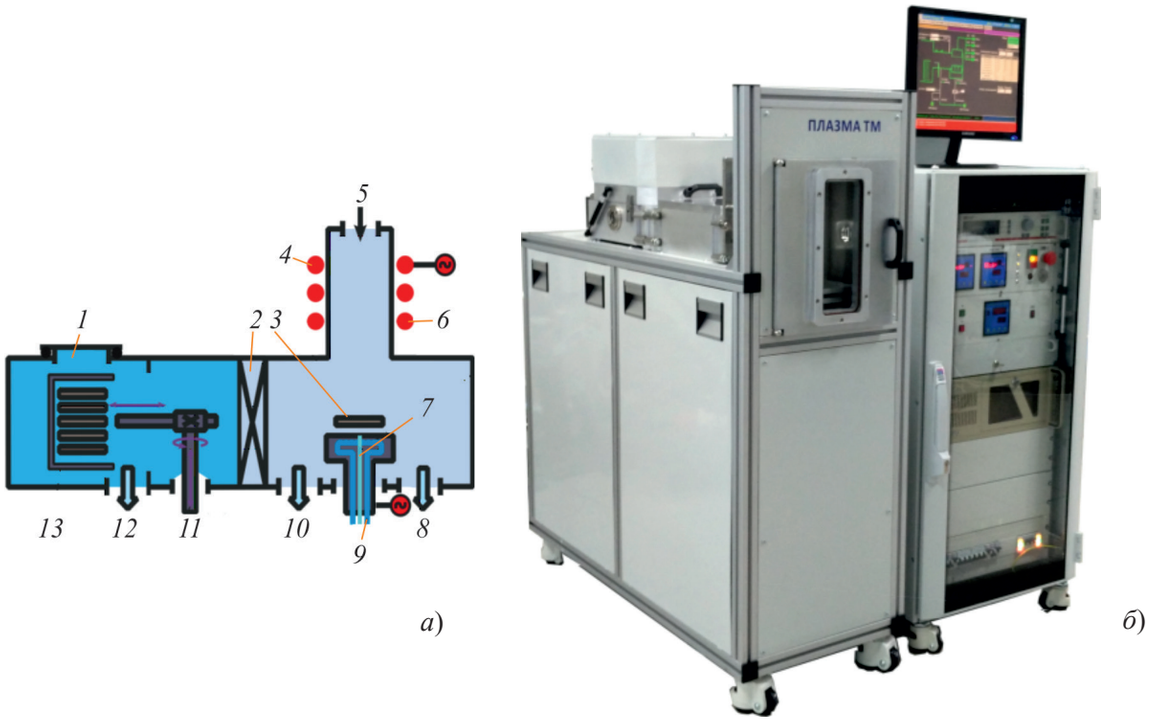


Рис. 4. РЭМ-изображение результатов формирования щелей в кремниевой пластине

Для увеличения производительности такого вида оборудования использовалась компоновка по схеме рис. 1, *в*. Применялся загрузочный модуль со шлюзовой камерой с расположенной в ней кассетой из 25 пластин. Манипулятор поштучно транспортирует необработанные пластины из кассеты в реактор и возвращает обратно после обработки (рис. 5).



а) *б*)

Рис. 5. Схема (*а*) и фотография общего вида (*б*) установки глубокого анизотропного травления кремния

4(543).indd 39 20.12.2019 9:33:26

Загрузка и выгрузка пластин *3* диаметром от 100 до 200 мм происходит с помощью манипулятора *11* из шлюзовой камеры *1* с кассетой *13*. Предельное давление достигается с помощью средств вакуумной откачки через откачные патрубки *8*, *10* и *12*. Через затвор *2* манипулятор транспортирует пластину на рабочий стол в реакторе. Охлаждаемый столик имеет канал подачи гелия *7* под пластину и через согласующее устройство подключен к ВЧ-генератору *9* с частотой 13,56 МГц. Источник плазмы *4* применяется для генерации радикалов и ионов, получаемых при прохождении газа *5* через индуктор *6*, подключенный через согласующее устройство к генератору с частотой 13,56 МГц. Продукты реакции удаляются средствами вакуумной откачки через откачные патрубки *8* и *10*. После завершения технологического процесса манипулятор перемещает обработанную пластину в шлюзовую камеру для ее выгрузки и загрузки новой необработанной пластины.

На установке реализован процесс анизотропного травления отверстий с разным аспектным отношением в кремниевой пластине через фоторезистивную маску толщиной 2,2 мкм (рис. 6) Мощность генератора источника плазмы – не более 1200 Вт, а мощность генератора рабочего стола – не более 90 Вт. Процесс проходил при давлении в реакторе от 2 до 5 Па. Время подачи травящего реагента SF_6 не превысило 3 с, а осаждающегося реагента C_4F_8 – 6 с. Получены значения неоднородности процесса травления в пределах 2…3 % глубоких отверстий и щелей с большим аспектным соотношением (более 15) и низкой шероховатостью стенок при скорости травления кремния до 5 мкм/мин.

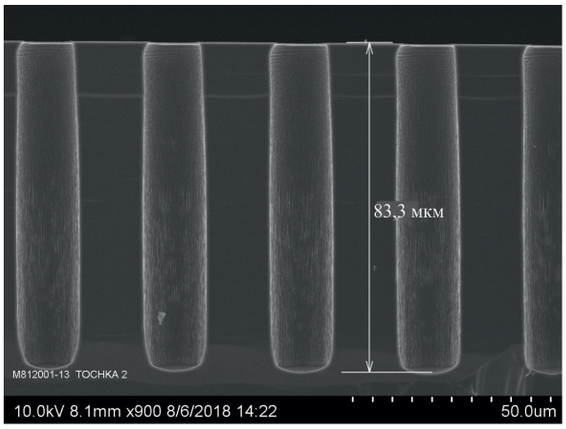


Рис. 6. РЭМ-изображение результатов травления отверстий
в кремниевой пластине

Оборудование данного типа и компоновки соответствует производству ИС с уровнем технологии ~180 нм. Установки удобно встраиваются в производство с «чистыми» комнатами (рис. 7).

Развитие микроэлектронных технологий с увеличением степени интеграции и топологическими нормами 80…40 нм, а в дальнейшем до 20…10 нм на пластинах диаметром 200…300 мм предъявляет к вакуумно-плазменному оборудованию ещё более высокие требования. Во-первых, само оборудование должно размещаться в «чистом» помещении и перенос кассет между установками должен происходить в почти герметичных переносных контейнерах (СМИФ). Транспортирование пластин из кассеты в кассету должно осуществляться в вакууме или в «обеспыленной» зоне (боксе).

Перемещение пластин между шлюзовыми системами и рабочими модулями должно обес-

4(543).indd 40 20.12.2019 9:33:26

печиваться одним или несколькими манипуляторами, которые располагаются в модуле транспортирования. Манипуляторы при своем движении не должны выделять частицы, которые могут попасть на поверхность пластин. В транспортном модуле поддерживается более низкое давление, чем в рабочих модулях, и этим обеспечивается вакуумная «блокировка» рабочих модулей друг от друга. Этот вид оборудования называется «кластерным».

Рис. 7. Установки, размещенные в «чистой» комнате

Управление кластерными установками обеспечивается двухуровневой микропроцессорной системой управления (МСУ). Верхний уровень обеспечивает работу шлюзовых систем, загрузку-выгрузку пластин между кассетами, перемещение пластин в модуле транспортирования и передачу их в рабочие модули. Каждый рабочий модуль управляется индивидуальной МСУ.

На рис. 1, *г* и рис. 8 изображены схема и фото разработанной кластерной установки с четырьмя рабочими модулями.

Таким образом, в зависимости от требований технологических процессов и уровня топологических норм могут быть различные варианты загрузки-выгрузки пластин в рабочий модуль – реактор специального технологического оборудования для микроэлектронных технологий, а именно: поштучная ручная загрузка-выгрузка, поштучная загрузка-выгрузка из шлюзовой камеры манипулятором, поштучная загрузка-выгрузка манипулятором из кассеты в кассету в шлюзовой камере, а также оборудование кластерного типа. При этом используются различные модули, что является прогрессивным решением при создании другого технологического оборудования.

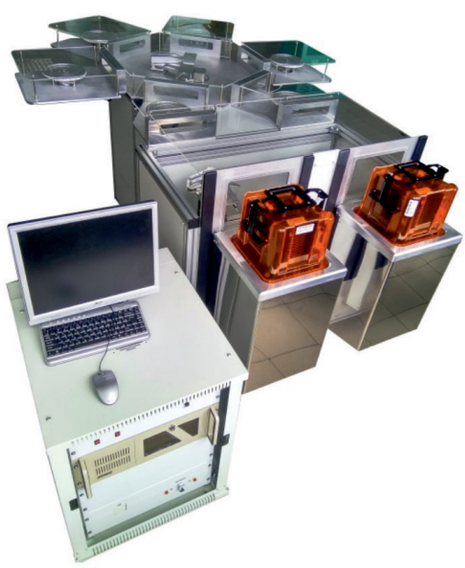


Рис. 8. Общий вид кластерной транспортной системы

Достигнуты хорошие технологические результаты работы на установках травления мелкой щелевой изоля-

4(543).indd 41 20.12.2019 9:33:26

ции в кремнии и глубокого анизотропного травления кремния. Микропроцессорная система управления установками обеспечивает контроль параметров процесса и поддерживает их стабильность согласно установленным значениям. Это обеспечивает хорошую воспроизводимость технологических процессов.

Созданы несколько рабочих модулей: глубокого анизотропного травления кремния, травления мелкой щелевой изоляции в кремнии, очистки пластин от органических загрязнений в СВЧ-разряде и атомно-слоевого осаждения. Разрабатываются модули нанесения пленок в магнетронном разряде (PVD), быстрого термического отжига (RTA), осаждения пленок из газовой фазы (CVD) и атомно-слоевого травления (ALE). Модули взаимозаменяемы на портах модуля транспортирования установки.

Размещение оборудования данного типа в чистых производственных помещениях позволит повысить производительность и значительно снизить привносимую дефектность на пластины, что приведет к значительному повышению выхода годных ИС с более высокими требованиями к технологической топологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Одиноков, В. В.** Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности / В. В. Одиноков, Ю. В. Панфилов // Наноинженерия. – 2011. – № 11. – С. 7 – 18.

2. **Патент 2679863 РФ** от 13.02.2019. Манипулятор для перемещения полупроводниковых пластин.

3. **Одиноков, В. В.** Технологическое оборудование для глубокого травления кремния, мелкощелевой изоляции, удаления фоторезиста и атомно-слоевого осаждения / В. В. Одиноков, В. М. Долгополов, П. А. Иракин, В. В. Панин // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – № 1 (1). – С. 24 – 29.

4. **Одиноков, В. В.** Новые вакуумно-плазменные процессы и оборудование для микроэлектроники / В. В. Одиноков // Вакуумная техника и технология. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 2.1 – 2.8.

Статья поступила 8 августа 2019 г.

4(543).indd 42 20.12.2019 9:33:26

УДК 621.385.73

МЕТАЛЛОПОРИСТЫЙ КАТОД, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГРАФЕНОМ

В. Т. Тормозов, П. В. Мизинов[1], М. Г. Рыбин[2], Е. В. Жарый[3], В. А. Резнёв[3], Е. Д. Образцова[2], Е. А. Образцова[2]

[1]*ГУ Банка России по ЦФО, г. Москва*

[2]*ИОФ РАН, г. Москва*

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

Впервые применена в качестве экспериментального покрытия пропитанного катода М-типа моноатомная плёнка графена. Проведена оценка свойств модифицированного катода. На основе сравнительного эксперимента показано, что применение графеновых плёнок в качестве покрытия для МПК значительно улучшает их эксплуатационные характеристики по сравнению с типовыми.

КС: металлопористый катод, графен, эмиссионное тело, наноуглерод

DISPENSER CATHODE MODIFIED BY GRAPHENE

V. T. Tormozov, P. V. Mizinov[1], M. G. Rybin[2], E. V. Zhariy[3], V. A. Reznev[3], E. D.Obraztsova[2], E. A. Obraztsova[2]

[1]*Main Administration of Bank of Russia on CFD, Moscow*

[2]*General Physics Institute, RAS, Moscow*

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

For the first time, a monoatomic grapheme film was used as an experimental coating of an impregnated M-type cathode. The properties of the modified cathode were evaluated. Based on the comparative experiment it was shown that the use of grapheme films as a coating for dispenser cathodes significantly improves their operational characteristics as compared to the typical ones.

Keywords: dispenser cathode, graphene, emission body, nanocarbon

1. ВВЕДЕНИЕ

Электровакуумные приборы (ЭВП), работающие в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ), типа клистронов, ламп бегущей волны (ЛБВ), магнетронов широко применяются в радиотехнических устройствах на земле и в воздухе, на море и в космосе как для военных нужд, так и для гражданских.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой, предъявляемой к приборам данного типа, является их надёжность. Особенно актуален данный вопрос при эксплуатации прибора в космосе.

Проблема повышения надёжности и увеличения срока службы ЭВП стоит с самого начала их развития [1]. Одним из вариантов решения этой задачи является улучшение долговечности и увеличение плотности тока электронной эмиссии применяемых в них катодов. Эмиссия и срок службы – взаимосвязанные параметры, и одновременное их улучшение представляет наибольшие трудности [2]. Обозначенной проблемой занимается большое количество учёных на протяжении десятков лет.

4(543).indd 43 20.12.2019 9:33:26

В данной статье мы хотим показать наши достижения по увеличению эмиссионных характеристик металлопористого импрегнированного катода (МПК) М-типа за счет переноса на его поверхность монослоя графена.

2. УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ М-ТИПА

МПК широко применяются в ЭВП О-типа с 60-х годов прошлого века. Более чем за полвека эксплуатации накоплен большой опыт по улучшению их параметров. Основные направления исследований в данной области – поиск материалов и способов, обеспечивающих [3] снижение рабочей температуры катода $T_{раб}$, увеличение плотности тока эмиссии J, снижение коэффициента деградации поверхности, уменьшение разброса работы выхода φ по поверхности.

Анализ литературных источников и патентов, посвящённых совершенствованию катодно-подогревательных узлов, позволяет выделить несколько векторов повышения ключевых характеристик МПК – эмиссии и долговечности:

1. Поиск и разработка оптимального состава активного вещества с малой скоростью испарения, позволяющего получить стабильно высокую эмиссию.

Основными эмиссионно-активными составами, применяемыми в МПК, являются алюминат $(BaO)_x(CaO)_y(Al_2O_3)_z$ с разным соотношением оксидов Ba, Ca и Al, а также алюмосиликат Ba–Ca. Решение вопроса улучшения характеристик сводится к подбору типа редкоземельного металла и его процентного содержания в активном веществе.

2. Улучшение характеристик матрицы катода, позволяющих увеличить запас активного вещества и повысить эффективность его использования.

Предлагаемые варианты усовершенствования самой тугоплавкой матрицы МПК сводятся к подбору фракции порошка W и добавлению в него Os, Ir, Ru или Re. Использование многокомпонентных материалов для матриц МПК является наиболее перспективным. Применение двухкомпонентных порошков из сплавов на основе W для изготовления пористой матрицы катода может, во-первых, влиять на равновесное давление Ba внутри МПК и изменять основной интенсивный фактор диффузионной доставки Ba на эмитирующую поверхность, во-вторых, влиять на химический потенциал W в матрице, а следовательно, и на скорость диффузионной гомогенизации матрицы и плёночного покрытия.

3. Снижение интенсивности диффузного взаимодействия покрытия с металлом губки, приводящего к образованию интерметаллического соединения.

Усовершенствования по данному направлению сводятся к методам повышения устойчивости плёнок Os на поверхности катода и предотвращения диффузного взаимодействия Os и W. В качестве покрытия, помимо стандартного осмий-рутениевого (OsRu), предлагаются варианты: Al+Os, Os+Ir, Os+Ir+Al, OsW и многокомпонентное покрытие W/Re/Os. Применение плёночных покрытий, состоящих из двух (или трёх) компонентов, может влиять на кинетику диффузионного взаимодействия плёнки и матрицы катода, а также на скорость изменения состава поверхности.

Отдельно стоит отметить качественно новые подходы к модификации МПК. Известно, что углеродные наночастицы (нанотрубки, полиэдральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа и т. д.) представляют особый интерес для эмиссионной электроники благодаря возможности улучшения с их помощью эмиссионных свойств катодных систем. Наиболее востребованным данный тип материалов оказался для использования в матричных автоэмиссионных катодах (МАЭК); для изготовления МПК наноуглеродный материал ранее не применялся.

4(543).indd 44 20.12.2019 9:33:26

В работах [4–6] авторы предположили, что внедрение наноуглеродного материала Углерона® и Астралена® в МПК может изменить механизм и скорость протекания трехфазных реакций образования активных элементов и кислорода и тем самым улучшить его эмиссионные свойства.

Результатом добавления наноуглеродного материала (Углерона® в эмиссионно-активный состав, Астралена® в состав металлической губки) стало увеличение температурного запаса МПК (на 50 °С по сравнению с типовым), что говорит о потенциально большей его долговечности, чем у типового, при той же эмиссионной способности.

3. МОДИФИКАЦИЯ МПК М-ТИПА ГРАФЕНОВОЙ ПЛЁНКОЙ

Наиболее широко применяемым типом МПК является пропитанный катод с плёнкой Os на эмитирующей поверхности (катод М-типа). Матрица катода изготавливается из вольфрамового порошка марки ВА (дисперсно-упрочнённого порошка W, легированного Al и Si). Пористая матрица катода пропитывается активным веществом состава $3BaO{-}0{,}5CaO{-}Al_2O_3$ (содержание алюмината в губке в пределах 8…9 %). На эмитирующую поверхность катода, предварительно обработанную ионным травлением, методом ионно-плазменного распыления наносится плёнка Os толщиной 0,4…0,6 мкм. Катоды, изготовленные по этой технологии, обеспечивают при рабочих температурах 1050…1100 °С плотность тока эмиссии 10…15 А/см^2.

Состав покрытия и технология нанесения плёнки такого катода не меняются уже более 30 лет.

Учитывая положительный опыт использования наноуглеродных материалов в МАЭК, авторами было предложено использовать в качестве экспериментального покрытия МПК М-типа графена – монослоя sp^2-гибридизированного углерода. Использование данного материала обусловлено, в первую очередь, его физико-химическими свойствами.

Графен имеет уникальные электронные свойства, которые основаны на его зонной структуре [7]. В первой зоне Бриллюэна графена существуют особые точки K и K', вблизи которых закон дисперсии энергии электронов имеет линейную зависимость от волнового вектора. Таким образом, графен является полупроводником с нулевой запрещённой зоной, а движение электронов в нём описывается не уравнением Шрёдингера, как в объёмных полупроводниках, а двумерным уравнением Дирака для безмассовых квазичастиц [8]. Вследствие этого, в графене наблюдается квантовый эффект Холла [9], сверхвысокая подвижность электронов [9].

3.1. Изготовление модифицированных катодов (покрытие стандартных катодов плёнкой графена толщиной в 1 атом)

Покрытие катодов графеном состоит из двух этапов. На первом этапе графен синтезируется на поверхности медной фольги, а на втором – переносится с медной фольги на катод.

Формирование графеновой плёнки происходит в специально разработанной установке по синтезу графена [10]. Установка состоит из нескольких основных частей. Главная – это вакуумная камера с водяным охлаждением стенок. К ней подключен форвакуумный насос, вакуумметр, имеется ввод метана CH_4, водорода H_2, аргона Ar. Медная подложка закрепляется на электродах, к которым подключен источник постоянного тока, а температура образца измеряется через смотровое окно наведением на него пирометра (схема и фотографии установки – на рис. 1). Таким образом, собранная установка имеет следующие особенности:

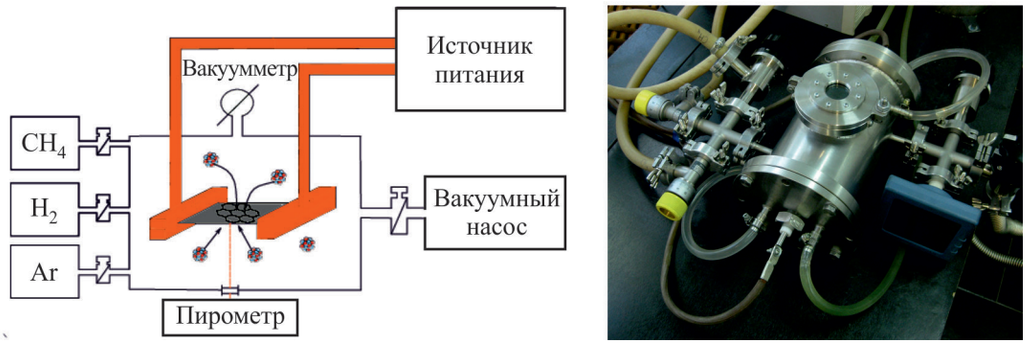
– вакуумная камера с водяным охлаждением;
– вакуумные электрические вводы для подключения каталитической подложки;

4(543).indd 45 20.12.2019 9:33:26

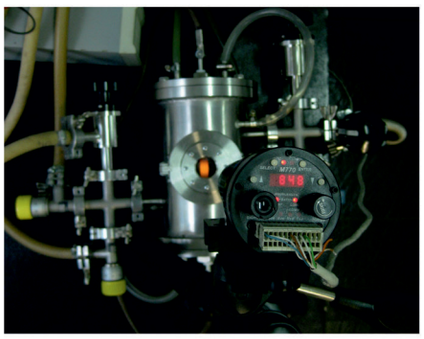
– измерение давления с помощью вакуумметра в диапазоне 10^{-3}…1000 мбар;

– измерение температуры бесконтактным методом с помощью двулучевого пирометра через смотровое окно в диапазоне 750…1500 °C;

– прецизионная подача трёх газов с помощью игольчатых клапанов-натекателей.



а) *б*)



в)

Рис. 1. Установка по синтезу графена:

а – общая схема; *б* – фотография собранной установки по синтезу графена; *в* – фотография работающей установки во время синтеза графена на поверхности медной фольги при температуре 848 °C

Синтез графена состоит из следующих шагов:

1. Отжиг металлической фольги в смеси H_2 и Ar.
2. Напуск CH_4.
3. Осаждение C из CH_4 на медную подложку.
4. Формирование графеновой плёнки.

Способ изготовления графеновой плёнки заключается в реализации широко используемого метода химического газофазного осаждения (CVD) на медной фольге [11–14]. Путём нагрева каталитической подложки до высокой температуры (более 800 °C) в среде углеродсодержащего газа. Однако при реализации этого метода есть множество параметров, которые влияют на конечный результат, а именно на качество получаемой графеновой плёнки. В настоящих экспериментах используется резистивный нагрев каталитической подложки с помощью пропускания электрического тока в среде углеродсодержащего газа.

На первом шаге каталитическую подложку, зажатую между электрическими вводами, помещают в вакуумную камеру. Затем камеру откачивают, напускают в неё смесь газов из H_2 и Ar

4(543).indd 46 20.12.2019 9:33:27

и нагревают медную фольгу до температуры более 800 °С. На этом этапе происходит отжиг каталитической подложки для удаления естественного оксидного слоя с её поверхности.

На втором шаге, после отжига в камеру напускают углеродсодержащий газ CH_4. При температуре более 800 °С происходит разложение CH_4 на С и H_2 вблизи каталитической подложки, и атомы С осаждаются на поверхности подложки, формируя графеновую плёнку. Далее подложка охлаждается до комнатной температуры, камера откачивается и заполняется воздухом.

Наиболее предпочтительные параметры отжига:

– концентрация H_2 в смеси H_2+Ar от 10 до 90 %;
– давление в камере от 20 до 800 мбар;
– температура отжига от 800 до 1000 °С;
– время отжига каталитической подложки от 1 до 60 мин.

Наиболее предпочтительные параметры формирования графеновой плёнки:

– температура формирования графеновой плёнки равна температуре отжига каталитической подложки;
– концентрация углеродсодержащего газа в камере от 1 до 20 %;
– время формирования графеновой плёнки от 1 до 60 мин.

Второй этап переноса графена с медной фольги на катод заключается в следующих действиях, согласно схеме на рис. 2. Процесс переноса подробно описан в статье [15].

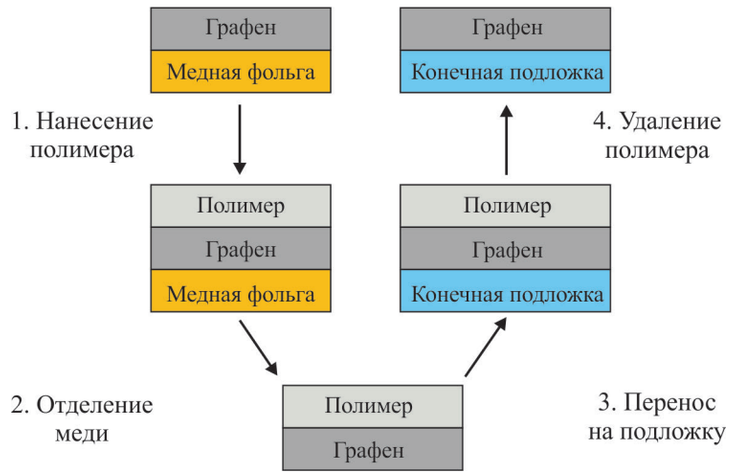


Рис. 2. Схема процесса переноса графеновой плёнки на катод

1. Атомарная графеновая плёнка крайне нестабильна. Для переноса с медной фольги на конечную подложку (в настоящих экспериментах графен переносился на катод) графеновую плёнку предварительно покрывают полимером в качестве промежуточной поддерживающей подложки. В данном случае использовался полиметилметакриллат (ПММА), растворённый в анизоле (концентрация – 4 % (масс.)).

2. Графен на медной фольге с нанесённым полимером помещается в раствор персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$ (концентрация – 1 г на 5 мл воды), и в течение 12 ч медь химически растворяется. В результате на поверхности раствора плавает графен с полимером. Водой раствор промывается несколько раз для удаления остатков травления.

3. В воду помещается катод и на его поверхность аккуратно вылавливается графеновая плёнка с полимером.

4. Полимер удаляется в ацетоне в течение 20 мин.

4(543).indd 47 20.12.2019 9:33:27

Наличие и качество графеновой плёнки на поверхности образцов катодов подтверждается с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Поскольку графен обладает характерным спектром КРС, то с помощью данного метода можно идентифицировать его монослой [16, 17]. Исследование образцов проводилось на спектрометре при лазерном возбуждении 514,5 нм. На рис. 3 представлены спектры КРС с «чистого» катода (чёрный спектр) и покрытого графеном (красный спектр).

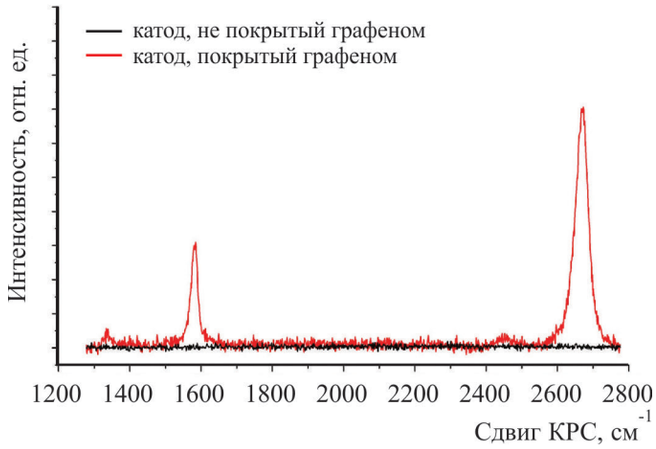
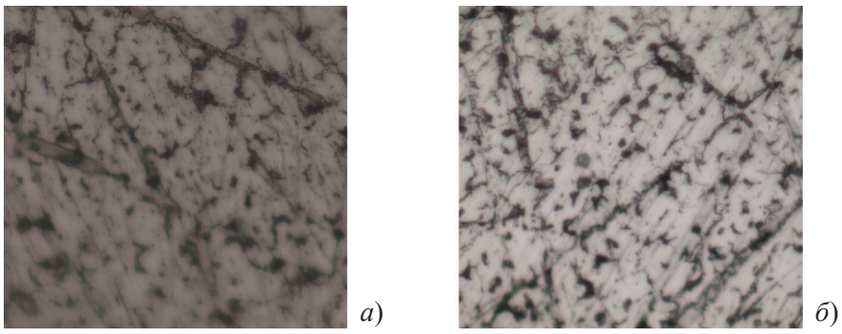


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света с катода
без графеновой пленки (чёрный спектр) и покрытого графеном (красный спектр)

На рис. 4 представлены фотографии, полученные с помощью оптического микроскопа при 100-кратном увеличении, катода без графеновой пленки (4, *а*) и покрытого графеном (4, *б*).



а) *б*)

Рис. 4. Изображение в оптическом микроскопе «чистого» катода (*а*) и покрытого графеном (*б*).
Изображения сделаны при 100-кратном увеличении, размеры изображения – 70 ×70 мкм

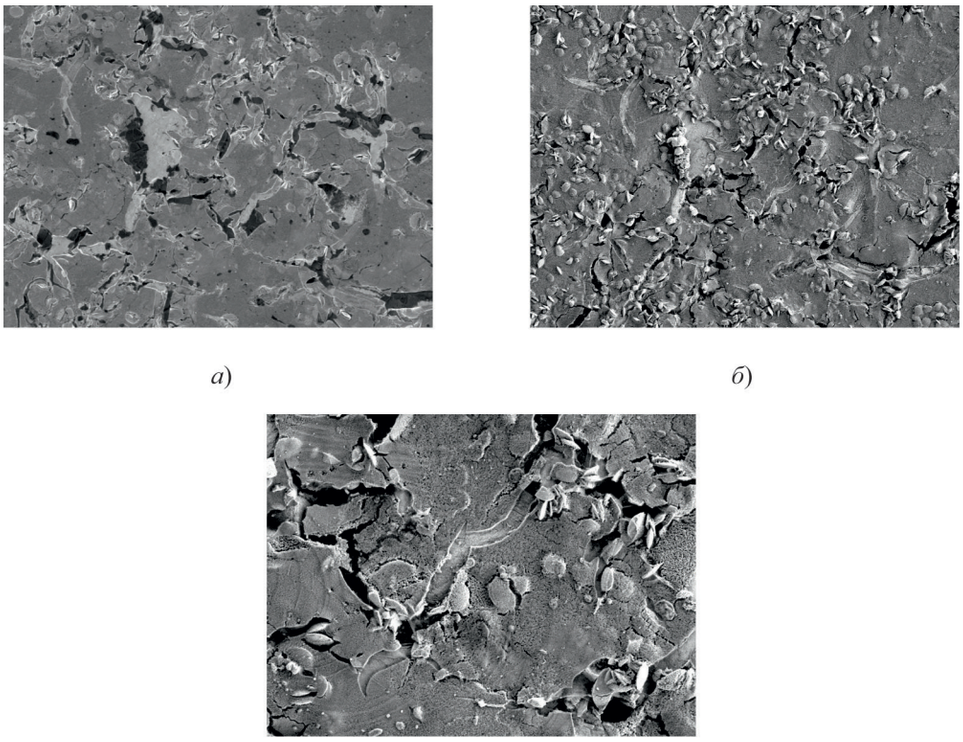
3.2. Известные проблемы при модификации катодов

Для экспериментов была изготовлена партия МПК диаметром 2,2 мм, с нанесённой плёнкой Os толщиной 0,6 мкм, поверх которой по описанной выше методике наносилась моноатомная плёнка графена. С помощью спектроскопии КРС проверено качество графенового покрытия образцов. С четырех точек эмиссионной поверхности каждого катода получены спектры КРС. Анализ спектров однозначно показал наличие моноатомной плёнки графена в каждой контрольной точке каждого образца.

4(543).indd 48 20.12.2019 9:33:27

Исследование эмиссионных свойств экспериментальных катодов проводилось на диодных макетах. При измерении вольт-амперных характеристик в непрерывном режиме наблюдалась крайне неустойчивая эмиссия катодов.

Для выяснения возможных причин нестабильной термоэмиссии поверхность образцов была изучена методом электронной микроскопии (рис. 5). Анализ полученных изображений показал наличие разрывов графенового покрытия по всей поверхности катода. По мнению авторов, именно неоднородность покрытия поверхности образца могла послужить причиной неустойчивой эмиссии.



а) *б*)

в)

Рис. 5. Электронно-оптические снимки поверхности катода
с экспериментальным покрытием (образец катода № 3):
а – датчик In-lens с разрешение 2 мкм; *б* – датчик HE-SE2 с разрешение 2 мкм; *в* – датчик HE-SE2 с разрешение 1 мкм

Исследование структуры поверхности МПК М-типа в атомно-силовом микроскопе, проведённое в работе [18], позволило выявить ряд её особенностей. В процессе изготовления катода его эмиссионное тело проходит несколько этапов обработки, существенно изменяющих геометрию поверхности. Так, процесс ионного травления приводит к значительному изъязвлению поверхности, образованию «гористых структур» с большим количеством пиков, а напыление Os увеличивает количество образовавшихся конусных структур. Плотность «пирамид» на поверхности составляет $2{,}5\times10^7$ ед./см^2. Наличие таких неровностей на эмитирующей поверхности увеличивает поверхность катода в 1,4 раза [18].

Авторы предполагают, что сильно развитая, «гористая» геометрия поверхности МПК послужила вероятной причиной разрыва графенового покрытия.

4(543).indd 49 20.12.2019 9:33:28

По всей видимости, на этапе переноса (см. п.3.1.) массы мокрой плёнки с поддерживающим полимером оказалось достаточно, чтобы она могла разорваться на вершинах «пирамид» под собственным весом. При удалении ПММА ацетоном на эмитирующей поверхности катода остаётся уже разорванная плёнка.

Решение данной проблемы не является очевидным. Авторы прибегли к максимально щадящей абразивной и химической полировке поверхности образцов, после которой перенос плёнки без разрывов оказался возможным.

3.3. Эмиссионные свойства МПК, модифицированных графеновой плёнкой

Для исследования эмиссионных свойств была изготовлена партия из шести МПК диаметром 2,2 мм, с нанесённой плёнкой Os толщиной 0,6 мкм. Все образцы подвергались щадящей абразивной и химической полировке поверхности. После чего на эмитирующую поверхность катодов была перенесена моноатомная плёнка графена.

Испытания на долговечность проводились в диодных макетах (анод – медь, охлаждаемая водой, температура воды на выходе 20…30 °С). Диодные макеты откачаны до вакуума 1×10^{-7} Торр. Расстояние «анод–катод» – 1 мм. Перед испытаниями катоды были обезгажены при температуре 1300 °С (ярк.) при вакууме не хуже 1×10^{-7} Торр, прошли активацию и тренировку подачей U_A до 750 В при вакууме не хуже 1×10^{-7} Торр. Испытания проводились в режиме постоянного токоотбора (I = 90 мА) при $T_{\text{исп}}$ = 1300 °С (ярк.) (форсированные испытания), U_A = 500 В. Результаты испытаний отображены в табл. 1, 2 и на рис. 6.

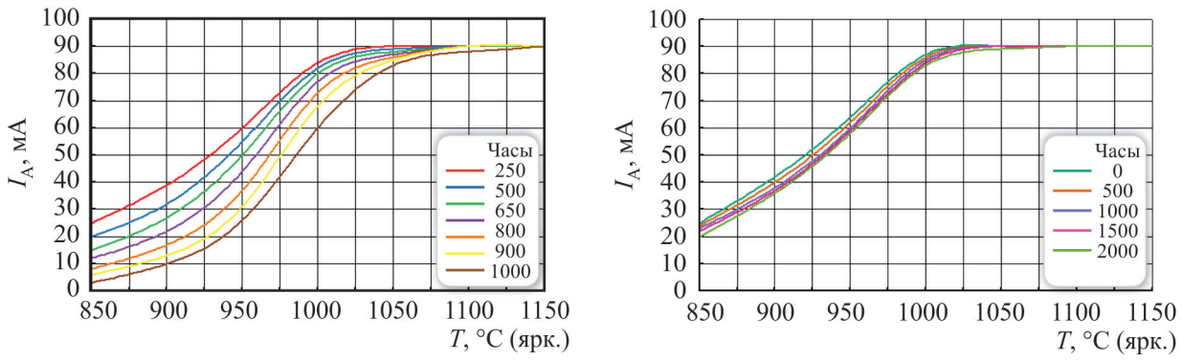
Таблица 1. Накальные характеристики (I_A, мА) при испытании на долговечность серийного катода М-типа, покрытого плёнкой Os

τ, ч	T, °С (ярк.)						
	850	900	950	1000	1050	1100	1150
0	25	39	60	84	90	90	90
250	20	32	55	82	89	90	90
500	15	27	50	80	88	90	90
650	12	22	44	77	87	90	90
800	8	17	37	73	86	90	90
900	6	13	31	68	85	90	90
1000	3	10	26	60	83	88	90

Таблица 2. Накальные характеристики (I_A, мА) при испытании на долговечность катода, покрытого плёнкой графена

τ, ч	T, °С (ярк.)						
	850	900	950	1000	1050	1100	1150
0	25	42	64	87	90	90	90
500	24	40	62	86	88	90	90
1000	23	38	60	85	86	90	90
1500	22	37	59	84	90	90	90
2000	20	36	58	83	89	90	90

4(543).indd 50 20.12.2019 9:33:28



а) *б*)

Рис. 6. Испытание на долговечность:
а – серийный МПК М-типа с плёнкой Os; *б* – экспериментальный катод с плёнкой графена

Принимая во внимание, что температура испытаний больше рабочей температуры серийного катода ($T_{исп}$ = 1300 °C (ярк.) > $T_{норм}$ = 1050 °C (ярк.)) на 250 °C, можно прогнозировать увеличение долговечности службы экспериментальных катодов. Срок службы серийного катода при $T_{раб}$ = 1050 °C (ярк.) составляет 10000 ч. Авторы полагают, что предполагаемый срок службы катода, модифицированного графеном (после полировки поверхности), составит не менее 20000 ч.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Впервые была применена в качестве экспериментального покрытия МПК моноатомная плёнка графена. Проведена оценка свойств модифицированного катода.

На основе сравнительного эксперимента показано, что применение графеновых плёнок в качестве покрытия для МПК значительно улучшает их эксплуатационные характеристики по сравнению с типовыми МПК М-типа. Авторы полагают, что вероятной причиной этого может являться замедление скорости испарения активного вещества с эмитирующей поверхности, напрямую влияющее на долговечность катода, а также равномерное распределение эмиссии по поверхности.

Задачи дальнейших экспериментов – исследование состава и структуры поверхности, а также скорости испарения активного вещества.

При модификации типового катода графеновой плёнкой авторам пришлось столкнуться со следующими проблемами:

– сложность технологического процесса производства высококачественной графеновой плёнки;

– «ручной труд» и трудоёмкость процесса переноса синтезируемой плёнки с подложки на катод;

– необходимость полировки поверхности катода, что приводит к разрушению пирамидальной поверхностной структуры [18], а также к «затиранию» части пор рабочей поверхности, отрицательно сказывающихся на эмиссионной способности.

Однако полученные первые результаты в применении графенового покрытия для катодов подтверждают перспективность дальнейшего изучения данного направления.

4(543).indd 51 20.12.2019 9:33:28

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гилмор-мл., А. С.** Лампы с бегущей волной / А. С. Гилмор-мл. – М.: Техносфера, 2013. – 618 с.

2. **Дюбуа, Б. Ч.** Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (к истории идей в катодной технологии) / Б. Ч. Дюбуа, О. К. Култашев, О. В. Поливникова // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. – 2008. – № 4 (497). – С. 3 – 22.

3. **Бушуев, Н. А.** Современные источники электронной эмиссии для ламп бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / Н. А. Бушуев, Г. В. Сахаджи // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 2, № 10. – С. 126 – 138.

4. **Крачковская, Т. М.** Металлопористый катод, модифицированный наноуглеродом / Т. М. Крачковская, Л. А. Мельников, Г. В. Сахаджи и др. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2017. – № 11. – С. 1 – 11. – Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/nov17/16/text.pdf.

5. **Крачковская, Т. М.** Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного наноуглеродом / Т. М. Крачковская, А. В. Сторублев, Г. В. Сахаджи, А. С. Емельянов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 155 – 159.

6. **Крачковская, Т. М.** Эмиссионные свойства металлопористых катодов, модифицированных наноуглеродом / Т. М. Крачковская, Л. А. Мельников // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, № 22. – С. 11 – 18.

7. **Geim, A. K.** The rise of graphene / A. K. Geim, K. S. Novoselov // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6, No 3. – P. 183 – 191.

8. **Wallace, P. R.** The band theory of graphite / P. R. Wallace // Phys. Rev. – 1947. – May. – Vol. 71, No 9. – P. 622 – 634.

9. **Novoselov, K. S.** Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov et al. // Science. – 2004. – Vol. 306, No 5696. – P. 666 – 669.

10. **Рыбин, М. Г.** Графен и структуры на его основе для фотоники: дис. на соиск. уч. степ. канд. ф.-м. н. / М. Г. Рыбин, Ин-т общ. физики им. А. М. Прохорова РАН. – М., 2012. – 106 с.

11. **Bae, Sukang.** Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes / Sukang Bae, Hyeongkeun Kim, Youngbin Lee et al. // Nature Nanotechnology. – 2010. – Vol. 5, No 8. – P. 574 – 578.

12. **Li, Xuesong.** Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils / Xuesong Li, Weiwei Cai, Jinho An et al. // Science (New York, N.Y.). – 2009. – Vol. 324, No 5. – P. 1312 – 1314.

13. **Li, Xuesong.** Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes / Xuesong Li, Yanwu Zhu, Weiwei Cai et al. // Nano letters. – 2009. – Vol. 9, No 10. – P. 4359 – 4363.

14. **Mattevi, Cecilia.** A review of chemical vapour deposition of graphene on copper / Cecilia Mattevi, Hokwon Kim, Manish Chhowalla // J. Mater. Chem. – 2011. – Vol. 21. – P. 3324 – 3334.

15. **Barin, G. B.** Optimized graphene transfer: influence of polymethylmethacrylate (PMMA) layer concentration and baking time on graphene final performance / Gabriela Borin Barin, Yi Song, Iara de Fatima Gimenez et al. // Carbon. – 2014. – Vol. 84, No 11. – P. 82 – 90.

16. **Gupta, Awnish.** Raman scattering from high-frequency phonons in supported *n*-graphene layer films / Awnish Gupta, Gugang Chen, Priya Joshi et al. // Nano letters. – 2007. – Vol. 6, No 1. – P. 2667 – 2673.

17. **Ferrari, A. C.** Raman spectrum of graphene and graphene layers / A. C. Ferrari, J. Meyer, Vittorio Scardaci et al. // Physical review letters. – 2006. – Vol. 97, No 12.– P. 187401-1–187401-4.

18. **Дюбуа, Б. Ч.** Влияние структуры поверхности металлопористых катодов на их эмиссионные свойства / Б. Ч. Дюбуа, О. В. Поливникова, А. Г. Михальченков, М. П. Темирязева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. – 2010. – № 1 (504). – С. 25 – 34.

Статья поступила 18 сентября 2019 г.

4(543).indd 52 20.12.2019 9:33:28

УДК 621.385.632

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ В МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛБВ *Ки*-ДИАПАЗОНА

А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, И. П. Натура, Г. В. Бакунин, М. И. Лопин

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

Спроектирована, изготовлена и исследована магнитная фокусирующая система для многолучевой оптики. Предложено конструктивное решение по повышению однородности магнитного поля в зазоре, которое должно значительно улучшить токопрохождение. Спроектирован многолучевой коллектор с рекуперацией, в котором центральная часть коллекторного полюса изолирована от внешнего и соединена с телом коллектора. Данное решение значительно уменьшает обратный ток электронов в пролетный канал и позволяет существенно повысить степень рекуперации в многолучевых приборах.

КС: ЛБВ Ки-диапазона, ЗС типа ЦСР, многолучевая электронно-оптическая система, коллектор с рекуперацией

POSSIBILITIES OF INCREASING THE AVERAGE POWER IN *Ku*-RANGE MULTI-BEAM TWT

A. V. Galdetsky, E. A. Bogomolova, I. P. Natura, G. V. Bakunin, M. I. Lopin

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

A magnetic focusing system for multi-beam optics was designed, manufactured and studied. A constructive solution is proposed to increase the uniformity of magnetic field in the gap, which should significantly improve the current flow. A multi-beam depressed potential collector has been designed, in which the central part of the collector pole is isolated from the external and connected to the collector body. This solution significantly reduces the reverse current of electrons to transit channel and can considerably increase the degree of recovery in multi-beam devices.

Keywords: Ku-range TWT, slow-wave structure of a chain of coupled resonators type, multi-beam electron-optic system, depressed potential collector

1. ВВЕДЕНИЕ

Для развития современных РЛС требуются широкополосные усилители 2-см диапазона, обладающие высокой мощностью, улучшенными энергетическими показателями, уменьшенными массогабаритными размерами и низкой стоимостью.

Одно из технических решений в этой области представляет собой цепочку из двух ЛБВ, имеющих одинаковые напряжения питания: выходная мощная многолучевая «прозрачная» ЛБВ, пакетированная постоянными магнитами, и предвыходная однолучевая ЛБВ с фокусировкой МПФС [1]. Использование такой цепочки позволяет достичь двухрежимности, высокого КПД, низкого напряжения питания и решает тепловую проблему в обеих лампах.

В данной работе проведено исследование замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов (ЗС типа ЦСР) для «прозрачной» многолучевой ЛБВ *Ки*-диапазона со средней мощностью 3 кВт в рабочей полосе 1 ГГц, рассмотрены электронная оптика и конструкция магнитной системы на постоянных магнитах.

4(543).indd 53 20.12.2019 9:33:28

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗС ТИПА ЦСР ДЛЯ ЛБВ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В качестве прототипа данной ЛБВ была использована многолучевая «прозрачная» ЛБВ 2-см диапазона с выходной импульсной мощностью 30 кВт и скважностью 30 в полосе шириной 800 МГц с ЗС типа ЦСР (рис.1), в которой средняя мощность ограничивалась значительным токооседанием.

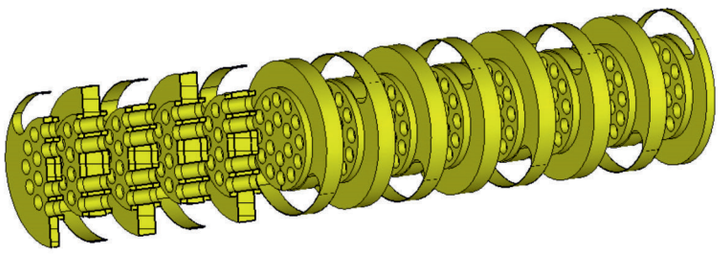


Рис. 1. Конструкция замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов

Расширение полосы частот лампы проводилось за счет сдвига частоты отсечки рабочей моды в более коротковолновую сторону с увеличением рабочей полосы до 1 ГГц [2]. Расчет показал, что требуемая полоса частот достигается за счет уменьшения угла раскрыва щелей связи на 5 град. ЗС имеет изохронную структуру на всей длине. На рис. 2 представлены дисперсионные характеристики ЗС прибора для различных величин шага ЗС.

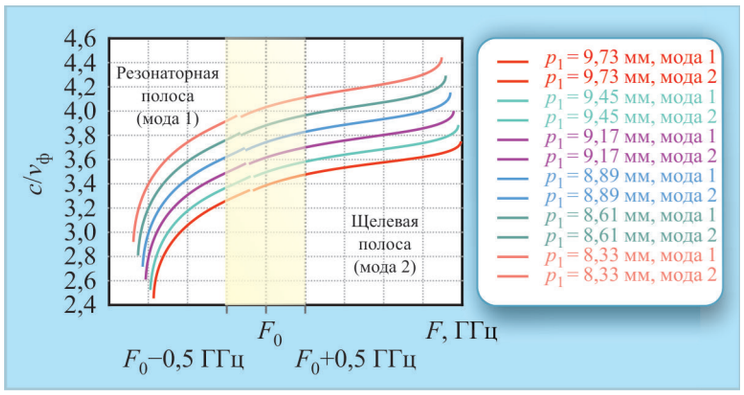


Рис. 2. Дисперсионная характеристика ЗС

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Конструкция магнитной системы прототипа имела межполюсный зазор 65 мм, продольную составляющую магнитного фокусирующего поля в области прохождения многолучевого электронного потока около 2700 Гс (рис. 3, 4).

Как видно из рис. 4, поперечные компоненты магнитного поля в магнитной системе прототипа значительные, что обуславливает заметное токооседание.

Для многолучевых ЛБВ с высокой средней мощностью особенно важным является обеспечение высокого токопрохождения, которое достигается в первую очередь за счет повышения однородности магнитного поля в рабочей области [1, 3]. Для подавления поперечных компо-

4(543).indd 54 20.12.2019 9:33:29

нент магнитного поля в конструкцию магнитной системы введен центральный магнит (рис. 5). Для хорошего токопрохождения через коллекторный полюс его толщина уменьшена с 2 до 1 мм. Для равномерного распределения электронных пучков в коллекторе величину магнитного поля в нем уменьшили с 926 до 156 Гс введением дополнительных экранов (рис. 5, 6).

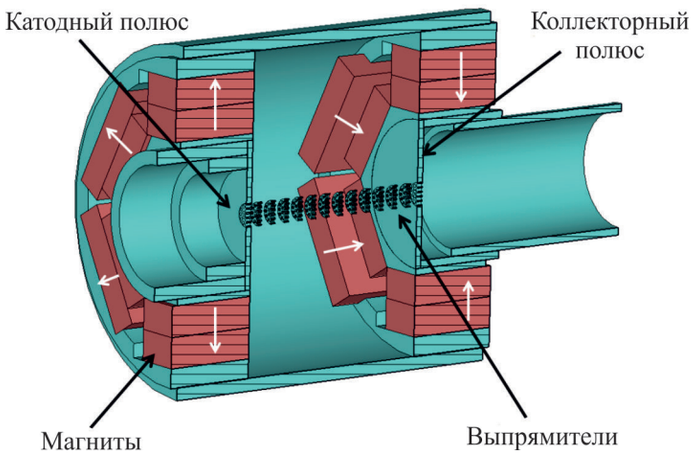
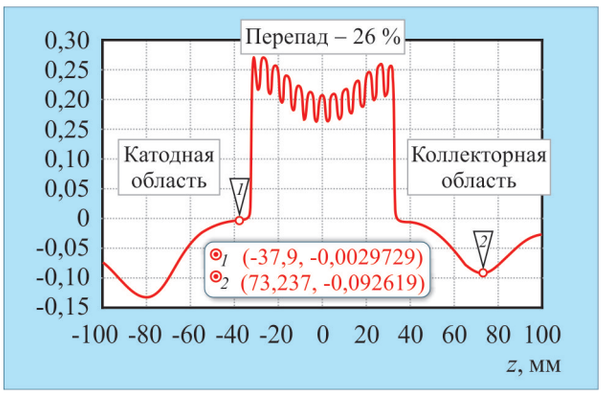
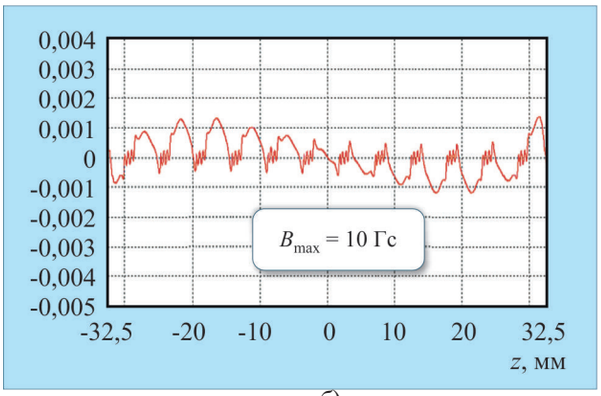


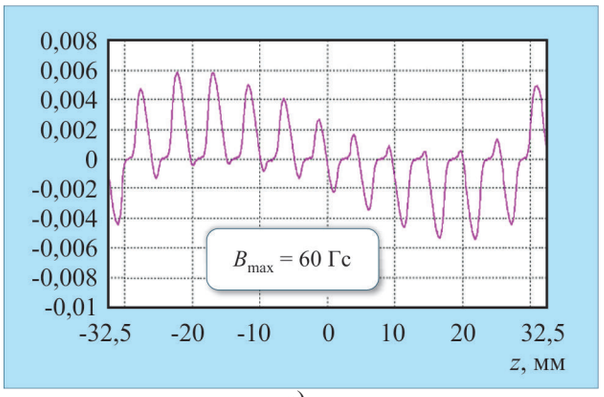
Рис. 3. Конструкция МФС с призматическими магнитами и выпрямителями в межполюсном зазоре



а)



б)



в)

Рис. 4. Распределения магнитного поля на оси зазора (*а*) и поперечных компонент магнитного поля на осях периферийных каналов при радиусе 1,45 мм (*б*) и 2,9 мм (*в*)

4(543).indd 55 20.12.2019 9:33:29

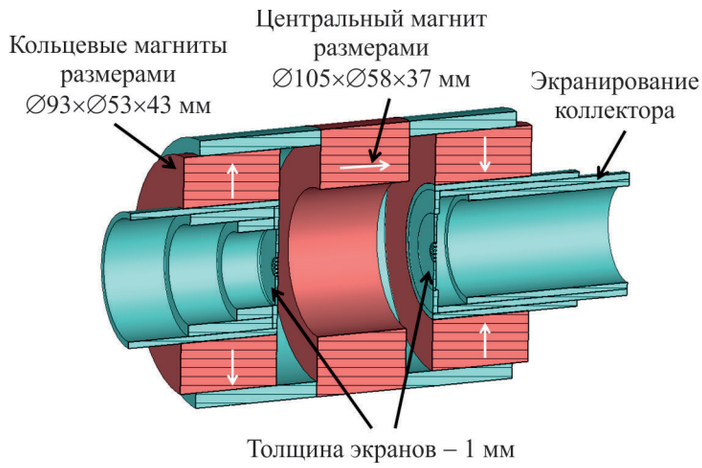
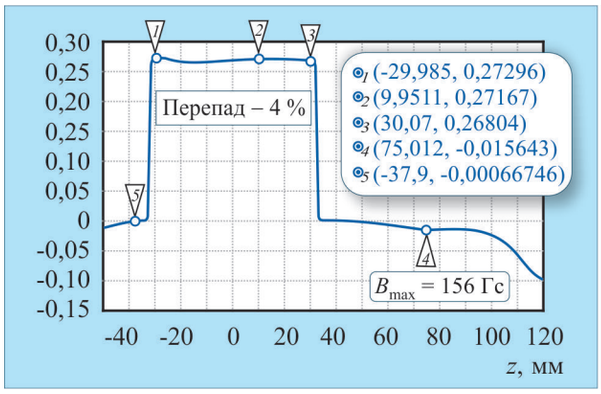
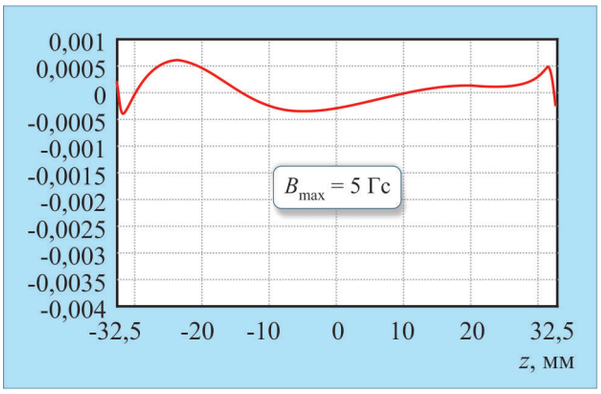


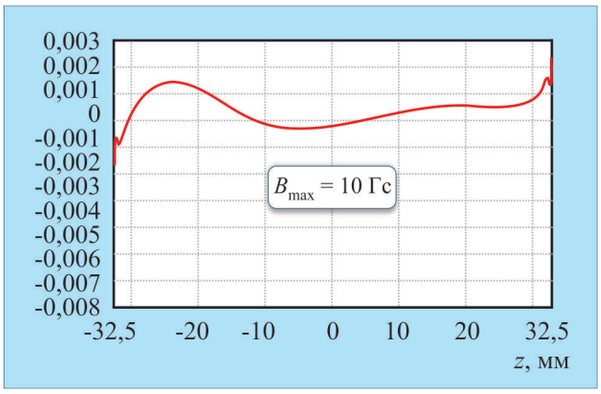
Рис. 5. Новая конструкция МФС с двумя кольцевыми магнитами, намагниченными радиально, и дополнительным центральным кольцом, намагниченным продольно



а)



б)



в)

Рис. 6. Распределения магнитного поля на оси зазора (*а*) и поперечных компонент магнитного поля на осях периферийных каналов при радиусе 1,45 мм (*б*) и 2,9 мм (*в*)

Был изготовлен макет МФС с размерами, соответствующими расчетным значениям. На рис. 7 представлены экспериментальная и расчетная кривые распределения магнитного поля в межполюсном зазоре 65 мм.

4(543).indd 56 20.12.2019 9:33:30

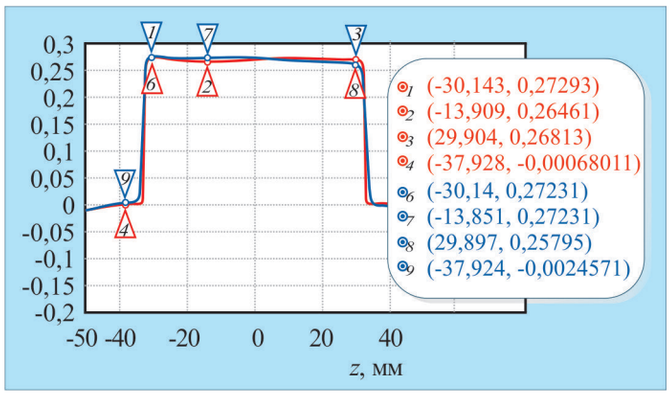


Рис. 7. Распределения магнитного поля на оси МФС:
синяя кривая – эксперимент; красная кривая – расчет

4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Многолучевая электронно-оптическая система не является аксиально-симметричной относительно главной оси, и для ее расчета требуются трехмерные модели системы электронного потока. Однако при малых значениях магнитного поля в пушке можно рассчитать основные размеры и электрический режим электронной пушки в двумерном приближении (рис. 8) для одной ячейки многолучевой пушки с достаточной точностью. Расчет парциальных пучков в пролетном канале, где поперечные компоненты могут быть важны, делался в трехмерной программе (рис. 9).

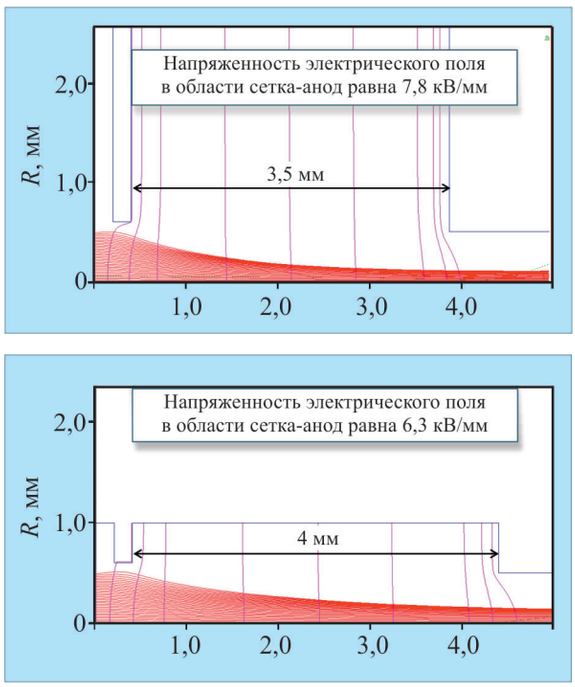
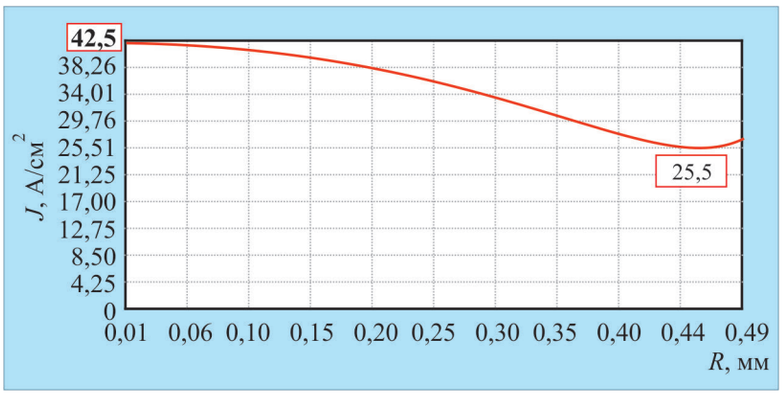
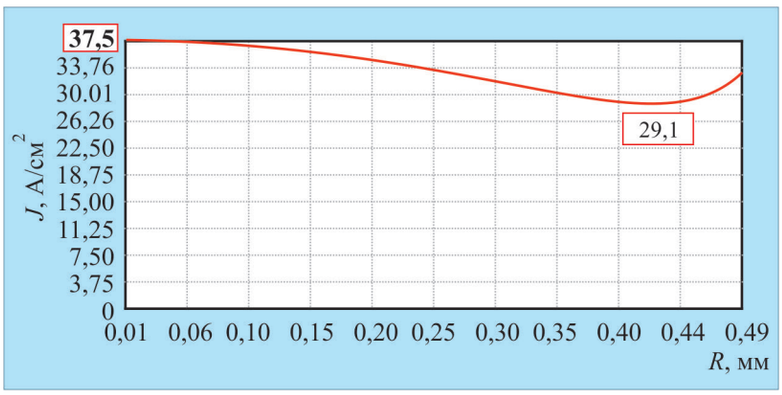


Рис. 8. Расчет ЭОС и распределение плотности тока на парциальном эмиттере (см. также с. 58):
а – ячейка многолучевой ЭОС прототипа; *б* – ячейка многолучевой ЭОС
разрабатываемого прибора

4(543).indd 57 20.12.2019 9:33:30



в)



г)

Рис. 8. Расчет ЭОС и распределение плотности тока на парциальном эмиттере:
в – распределение плотности тока на парциальном эмиттере прототипа;
г – распределение плотности тока на парциальном эмиттере разрабатываемого прибора

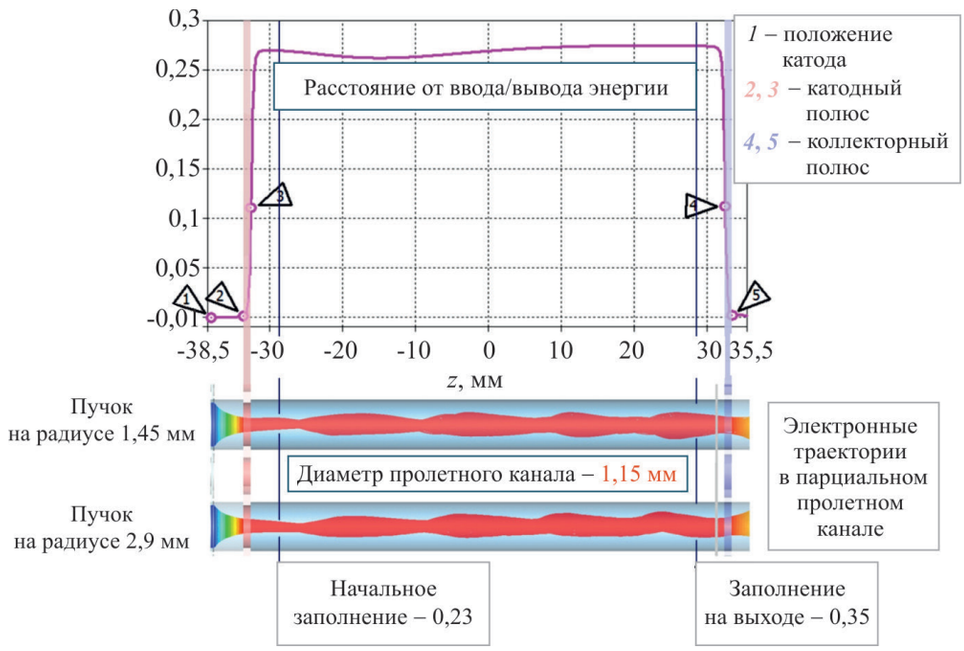


Рис. 9. Статический трехмерный расчет многолучевой ЭОС

4(543).indd 58 20.12.2019 9:33:31

За счет увеличения расстояния сетка-анод удалось понизить напряженность электрического поля в нем до 6,3 кВ/мм, что обеспечивает надежную работу узла без пробоев. Плотность тока с парциального эмиттера удалось понизить и сделать более равномерной (рис. 8, *в*, *г*). Конструкция новой магнитной системы обеспечивает минимальное значение поперечной составляющей магнитного поля, благодаря чему наблюдается 100%-ное токопрохождение пучка во всех каналах системы (см. рис. 9).

5. РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРА С ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ

Произведен расчет коллектора с рекуперацией. Для обеспечения токопрохождения пучка через коллекторный полюс толщина коллекторного полюса уменьшена до 1 мм. Реализовать индивидуальные входные отверстия для лучей в коллекторе невозможно из-за быстрого расширения лучей после прохождения коллекторного полюса. Если же традиционно отверстие в коллекторе сделать общим для всех лучей, то из-за проникновения поля рекуперации в полость коллектора возникает значительный возврат вторичных электронов в канал и нагрев коллекторного полюса возвратными электронами, ускоренными потенциалом рекуперации (рис. 10). Это заметно ограничивает возможность рекуперации в прототипе.

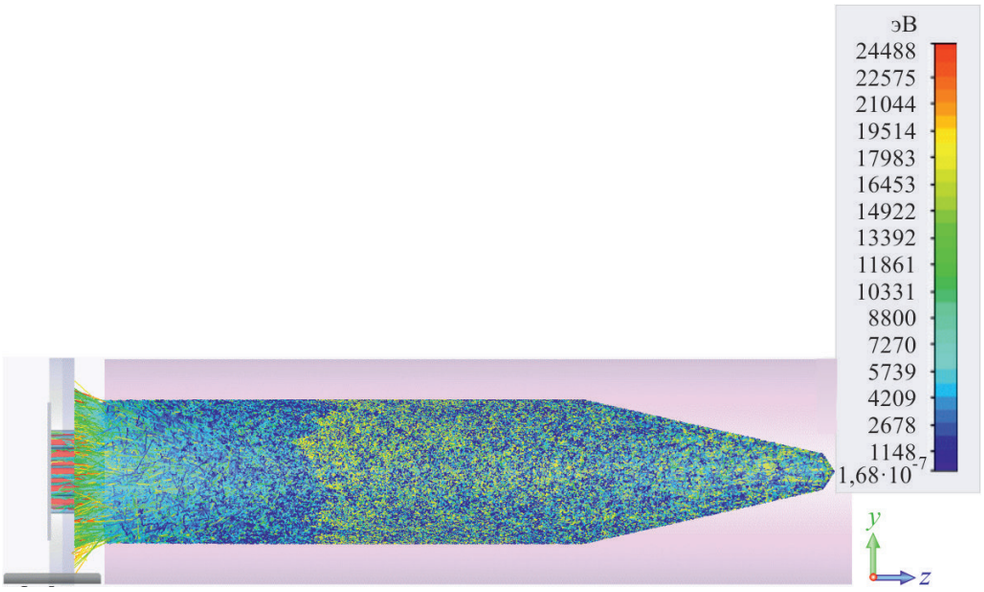


Рис. 10. Статический режим в прототипе с учетом вторичной эмиссии. Обратный ток составляет 34 мА

Для подавления этого явления мы изолировали центральную часть коллекторного полюса с отверстиями от внешней части полюса и соединили ее с коллектором, что решило проблему (рис. 11).

Возврат вторичных электронов в канал уменьшился, обратный ток составил 13 мА. Данное техническое решение позволяет реализовывать более глубокую рекуперацию, не опасаясь перегрева полюса, и получать высокий КПД коллектора.

4(543).indd 59 20.12.2019 9:33:31

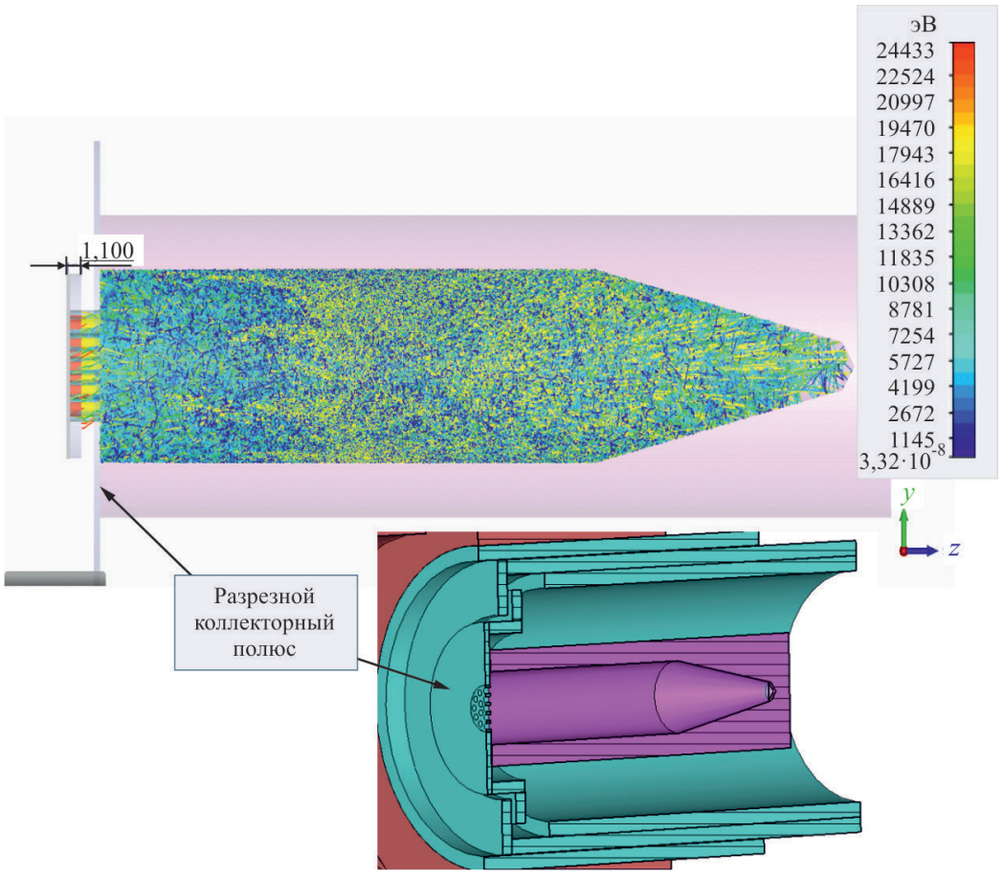


Рис. 11. Статический режим в разрабатываемом приборе
с учетом вторичной эмиссии

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация конструкции МФС по расчетам позволила обеспечить 100%-ное токопрохождение на коллектор. Спроектирован многолучевой коллектор с рекуперацией, предложено решение проблемы возврата вторичных электронов в канал за счет того, что коллекторный полюс сделан разрезным и его внутренняя часть соединена с коллектором. Данные технические решения позволят обеспечить надежную работу многолучевой ЛБВ в *Ku*-диапазоне с высокой средней мощностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сазонов, Б. В.** Многолучевые многорежимные «прозрачные» ЛБВ и усилительные цепочки на их основе / Б. В. Сазонов, А. С. Победоносцев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 2. – С. 5 – 8.

2. **Накрап, И. А.** Моделирование широкополосных замедляющих систем типа цепочки связанных резонаторов с использованием планируемого эксперимента / И. А. Накрап, А. Н. Савин, Ю. П. Шараевский // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 3. – С. 333 – 340.

3. **Галдецкий, А. В.** Возможности повышения мощности и токопрохождения в динамическом режиме в ЭВП с профилированным магнитным полем / А. В. Галдецкий, Н. В. Лопаткин, И. П. Натура, Л. А. Сапрынская, В. Б. Хомич // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике. – 2011. – С. 37.

Статья поступила 4 октября 2019 г.

4(543).indd 60 20.12.2019 9:33:31

УДК 621.385.632

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНОЙ ЛБВ *X*-ДИАПАЗОНА С РАСШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ

А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, И. П. Натура, А. Д. Закурдаев

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

Предложена перспективная конструкция замедляющей системы типа «скрещенная лестница» для мощной многолучевой «прозрачной» ЛБВ *X*-диапазона с рабочей полосой не менее 18 %, обладающая высокими электродинамическими характеристиками. Расчет электроники демонстрирует возможность получения выходной импульсной мощности не менее 24 кВт, усиления 17 дБ и КПД 28 %. Тепловой расчет показал, что лампа может надежно работать со скважностью 8. Спроектирована новая конструкция магнитной системы на постоянных магнитах с межполюсным зазором 119 мм, в расчете обеспечивающая 100%-ную транспортировку электронного потока до коллектора.

КС: лампа бегущей волны, замедляющая система, сантиметровый диапазон волн, тепловой режим, магнитная фокусирующая система

INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF CREATING HIGH-POWER *X*-BAND TWT WITH AN EXPANDED BAND

A. V. Galdetsky, E. A. Bogomolova, I. P. Natura, A. D. Zakurdaev

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

A promising design of a slow-wave structure of «double-ladder» type is proposed for a high-power multi-beam «transparent» *X*-band TWT with an operating band of at least 18 %, possessing high electrodynamic characteristics. The calculation of electronics demonstrates a possibility of obtaining an output pulse power of not less than 24 kW, a gain 17 dB and an efficiency 28 %. The thermal calculation showed that the tube can reliably work with a duty cycle 8. A new design of a magnet system on permanent magnets with an interpole gap 119 mm was developed, which in calculation provides 100 % transportation of the electron beam to the collector.

Keywords: travelling-wave tube, slow-wave structure, centimeter wave band, thermal mode, magnetic focusing system

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день стал вопрос о применении в современных РЛС и системах спутниковой связи усилителей с рабочими полосами не менее 13 % и высокой выходной мощностью в сантиметровом диапазоне. Твердотельные приборы составляют сильную конкуренцию вакуумным в данном диапазоне (хотя по стоимости они проигрывают), поэтому важным является существенное улучшение параметров вакуумных СВЧ-приборов, в частности полосы частот при выходной мощности в десятки киловатт. Классические мощные электровакуумные приборы, такие, как клистроны и ЛБВ на ЦСР, могут обеспечить или высокую выходную мощность в узкой полосе частот порядка 5-6 %, или широкую полосу с выходной мощностью не более 7 кВт [1–4].

В данной работе мы рассмотрели возможность создания мощной ЛБВ, перекрывающей полосу более 18 % при выходной мощности около 22 кВт и относительно небольшом питающем напряжении – 22 кВ.

4(543).indd 61 20.12.2019 9:33:31

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Известные широкополосные замедляющие системы (ЗС) – «спиральная» и «петляющий волновод» – позволяют обеспечить широкую полосу, однако первая система имеет ограничения по теплорассеивающей способности (а значит, по выходной мощности), а вторая – имеет невысокое сопротивление связи в рабочей полосе (что определяет большую длину лампы и невысокий КПД). Таким образом, востребованными оказываются широкополосные ЗС с большим сопротивлением связи и хорошей теплорассеивающей способностью внутренних элементов ЗС.

Для ЛБВ повышенной мощности с полосой усиления не менее 18 % предлагается конструкция ЗС типа «скрещенная лестница», представляющая собой прямоугольный волновод с выступами, который периодически перегорожен диафрагмами с двумя щелями связи определенной формы и четырнадцатью пролетными каналами (рис. 1), сходная с ЗС сантиметрового диапазона [5].

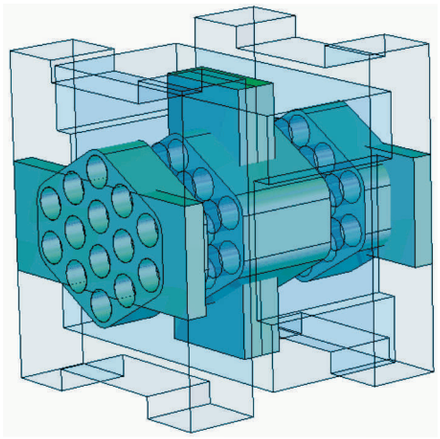


Рис. 1. Макет одного периода ЗС типа «скрещенная лестница»

Для получения высокого сопротивления связи в ЗС реализованы втулки в области зазоров. Кроме того, с той же целью пролетные каналы имеют максимально плотную гексагональную упаковку, что позволило минимизировать площадь рабочего зазора. Диаметр каналов составляет 1,5 мм, ширина и толщина перемычек – 5 и 2 мм. Для уменьшения крутизны дисперсионной кривой в конструкцию введены дополнительные выступы и индуктивные элементы, позволяющие управлять данной характеристикой (см. рис.1).

На рис. 2 представлена дисперсионная характеристика ЗС. Как видно, прибор может работать в двух диапазонах (что может представлять интерес для некоторых применений). Однако полоса частот в 18 % достигается на пространственной гармонике второй моды, так что именно этот диапазон является рабочим.

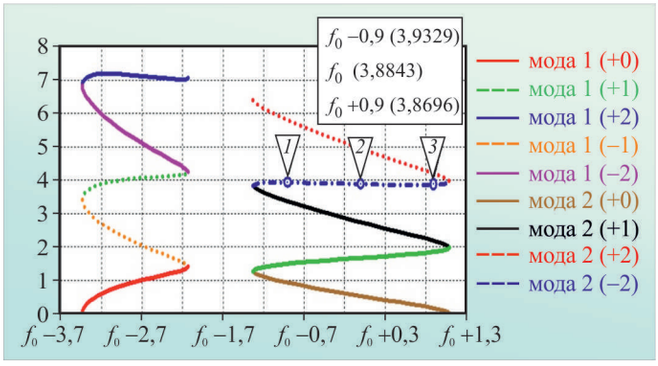


Рис. 2. Зависимость коэффициента замедления от частоты

На рис. 3 приведена АЧХ сопротивления связи. Расчет показал, что в рабочей полосе частот значение сопротивления связи в каналах изменяется от 4,8 до 7,5 Ом. Реализация работы прибора на второй моде позволила увеличить период до 14 мм и выполнить диафрагмы достаточно массивными, что обеспечивает хороший отвод тепла.

4(543).indd 62 20.12.2019 9:33:31

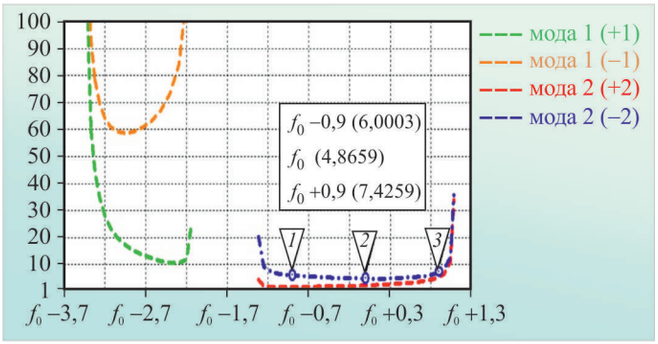


Рис. 3. АЧХ сопротивления связи

3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗС

Поскольку лампа должна работать при большом уровне средней мощности, а сечения ножек, поддерживающих втулки, относительно невелики, то необходимо провести тепловое моделирование работы прибора. Расчет проводился при следующих предположениях: на корпусе лампы системой охлаждения поддерживается температура 100 °С, общий ток пучков равен 4,2 А при скважности 8, токооседание электронного пучка на стенки пролетного канала составляет 10 % на последних трех периодах ЗС. Отсюда следует, что тепловыделение на элементы одного периода ЗС составляет 385 Вт. Распределение температуры моделируется методом конечных элементов. На рис. 4 представлена карта распределения тепла, показывающая, что максимальный температурный перепад между элементами ЗС и корпусом составил всего 165 °С, что достигнуто благодаря массивным диафрагмам.

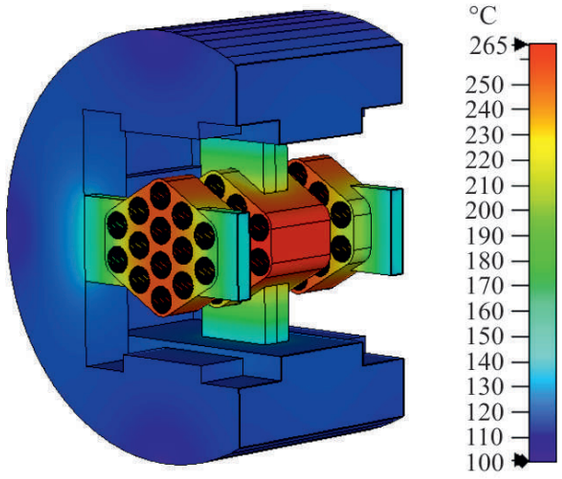


Рис. 4. Распределение теплового потока в одном периоде ЗС

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СИСТЕМ

Электронно-оптическая система имеет следующие параметры: общий ток – 4,2 А, напряжение питания – 22 кВ, заполнение на входе в ЗС – 0,3. Исходно оптика проектировалась и опти-

4(543).indd 63 20.12.2019 9:33:31

мизировалась в однолучевом приближении с нулевым магнитным полем на катоде и необходимым запасом по заполнению. Затем проектировалась магнитная система с требуемым распределением магнитного поля. Далее оптический расчет уточнялся в трехмерной модели (рис. 5). При этом параметры модели окончательно уточнялись при расчете в режиме большого сигнала.

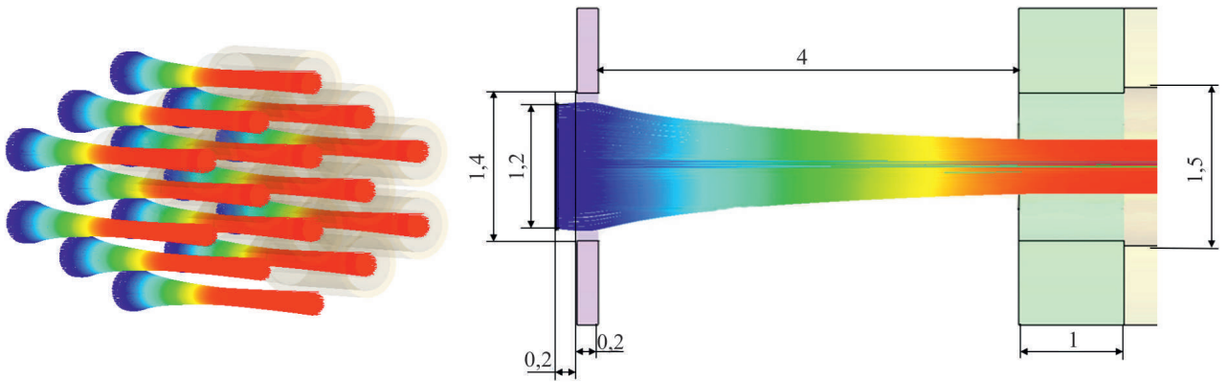


Рис. 5. 14-лучевая электронно-оптическая система пушки

Для фокусировки электронных потоков в каналах радиусом 0,75 мм необходимо магнитное поле величиной 0,17 Тл. Традиционная конструкция магнитной системы на радиально намагниченных кольцевых магнитах не позволяет обеспечить требуемой однородности поля в зазоре 119 мм. На рис. 6 представлена новая конструкция магнитной системы для многолучевой ЛБВ. Для достижения равномерного распределения продольной составляющей магнитного поля в рабочем зазоре в конструкцию введены три дополнительных продольно намагниченных кольцевых магнита, которые обеспечивают пульсации не более 5,4 % (рис. 7). Этого достаточно, чтобы поперечные компоненты магнитного поля не оказывали сильного влияния при транспортировке электронного потока в периферийных каналах [6]. Масса магнитов и полюсных наконечников составляет 7,4 кг.

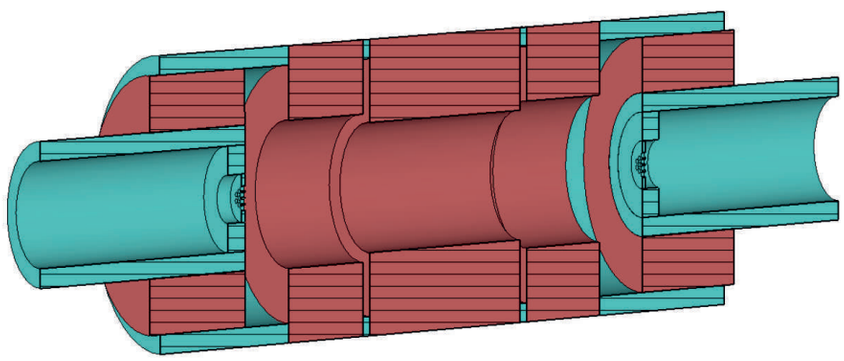


Рис. 6. Конструкция магнитной системы
в постоянных магнитах

4(543).indd 64 20.12.2019 9:33:32

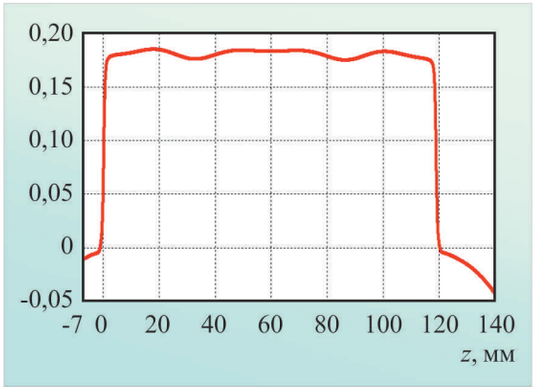


Рис. 7. Распределение магнитного поля на оси зазора МФС в пролетных каналах

5. РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛБВ ПО ДВУМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ

Усиление «прозрачной» ЛБВ не должно превышать 17 дБ, т. к. в лампе отсутствует поглотитель в ЗС. Для расчета взаимодействия пучка с СВЧ-полем бегущей волны использована двумерная модель в однолучевом приближении. Траектории частиц пучка в режиме работы в насыщении представлены на рис. 8.

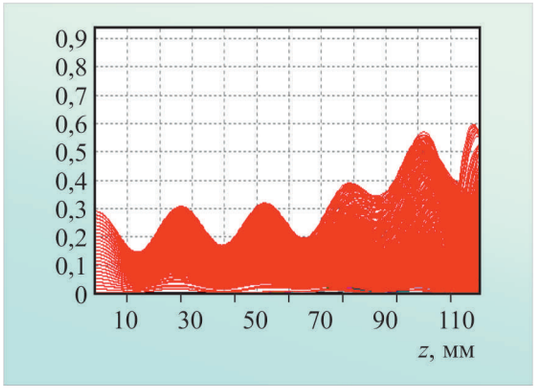


Рис. 8. Траектории электронного потока в режиме большого сигнала

Из расчета видно, что электронный пучок проходит без токооседания и имеет хороший запас по заполнению благодаря небольшому заполнению на входе.

Расчет выходных параметров ЛБВ показывает, что суммарная мощность лампы составила 24 кВт, усиление – 17 дБ и КПД – 28 %.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектированная и исследованная ЗС обладает высокими электродинамическими характеристиками, механической прочностью и теплорассеивающей способностью, обеспечивает стабильную работу ЛБВ в полосе 18 %. Возможно дальнейшее расширение полосы за счет не-

4(543).indd 65 20.12.2019 9:33:32

которого понижения сопротивления связи. Спроектирована и исследована конструкция фокусирующей магнитной системы, создающей постоянное магнитное поле 0,17 Тл в рабочем зазоре 119 мм, имеющая массу ~ 7,4 кг.

За рамками данной статьи осталась работа по проектированию широкополосного ввода/вывода СВЧ-энергии, системы охлаждения прибора, коллектора с рекуперацией и профилированию шага ЗС для увеличения КПД. Рассматривается возможность перехода к 7-лучевой конструкции ЗС с диаметром пролетных каналов 2,5 мм и пониженной плотностью токоотбора с целью увеличения срока службы катода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Курлычкин, О. И.** Замедляющие системы для мощных широкополосных ЛБВ: Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ / О. И. Курлычкин. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1981. – Вып. 14 (834).

2. **Накрап, И. А.** Оптимизация электродинамических характеристик замедляющей системы «гребёнка-квадрат» / И. А. Накрап, А. Н. Савин // Материалы 22 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2012)». Севастополь, Украина, 10-14 сентября 2012 г. – Севастополь: «Вебер», 2012. – С. 187 – 188.

3. **Накрап, И. А.** Оптимизация формы экрана замедляющей системы типа колец на встречных металлических опорах для повышения сопротивления связи / И. А. Накрап, А. Н. Савин, К. П. Вахлаева // Материалы 20 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2010)». Севастополь, Украина, 13-17 сентября 2010 г. – Севастополь: «Вебер», 2010. – С. 255 – 256.

4. **Накрап, И. А.** Моделирование широкополосных замедляющих систем типа цепочки связанных резонаторов с использованием планируемого эксперимента / И. А. Накрап, А. Н. Савин, Ю. П. Шараевский // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 3. – С. 333 – 340.

5. **Бакунин, Г. В.** Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона / Г. В. Бакунин, А. А. Батраков, А. В. Галдецкий, И. П. Натура, Е. А. Ракова, Л. А. Сапрынская, И. М. Соколова, И. П. Чепурных // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 1 (524). – С. 54 – 67.

6. **Галдецкий, А. В.** Возможности повышения токопрохождения в многолучевой ЛБВ *Ku*-диапазона с высокой средней мощностью / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, И. П. Натура, Л. А Сапрынская, Б. В. Сазонов, Г. В. Бакунин // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: матер. конф. в 2-х томах. 9-15 сентября 2018 г., Севастополь, Крым.

Статья поступила 28 августа 2019 г.

4(543).indd 66 20.12.2019 9:33:32

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179

РЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ ПЛАСТИН НА СВЧ

А. Г. Налогин[1], М. Г. Семенов[1], А. В. Мясников[1], А. С. Семенов[1], Р. П. Панков[1], М. П. Пархоменко[2], Д. С. Каленов[2], И. С. Еремин[2], Н. А. Федосеев[2], И. А. Налогин[3], А. Е. Ескин[4]

[1]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*
[2]*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино*
[3]*«Московский технологический университет» МИРЭА, г. Москва*
[4]*ФГУП ВНИИФТРИ, Московская область, Солнечногорский район, р. п. Менделеево*

Рассмотрен резонаторный метод неразрушающего контроля действительной части относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon$, действительной части относительной магнитной проницаемости μ' и тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_\mu$ образцов в форме пластин из СВЧ-ферритов при отсутствии их намагничивания. Метод реализован в диапазоне частот от 9,8 до 10,1 ГГц с использованием современных векторных анализаторов цепей и предназначен для контроля электромагнитных параметров пластин размерами $48^{-0,1}\times60^{-0,12}\times1,0^{-0,02}$ мм (или две пластины размерами $48^{-0,1}\times30^{-0,1}\times1,0^{-0,02}$ мм) с намагниченностью насыщения 16…160 кА/м, значения электромагнитных параметров которых находятся в интервалах: ε' = 14,5…15,5, $tg\delta_\varepsilon = 5\cdot10^{-4}…5\cdot10^{-5}$, μ' = 0,85…0,90, $tg\delta_\mu = 10^{-3}…10^{-4}$. Метод основан на сравнении экспериментальных характеристик (резонансная частота, ширина резонансной кривой по уровню минус 3 дБ) нагруженных проходных резонаторов (резонатор для измерения ε', $tg\delta_\varepsilon$; резонатор для измерения μ', $tg\delta_\mu$) с испытуемой пластиной с рассчитанными характеристиками нагруженных расчетных моделей данных резонаторов при помещении в них условной ферритовой пластины тех же номинальных размеров с заданными значениями электромагнитных параметров (средние значения диапазонов измерения контролируемых электромагнитных параметров пластин). При реализации метода использовалась универсальная трехмерная (3*D*) программа моделирования СВЧ-структур.

КС: ферритовая пластина (подложка), относительная диэлектрическая проницаемость, относительная магнитная проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, тангенс угла магнитных потерь, СВЧ-резонатор, измерение электромагнитных параметров ферритов

THE CAVITY METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF MICROWAVE FERRITE WAFERS

A. G. Nalogin[1], M. G. Semenov[1], A. V. Myasnikov[1], A. S. Semenov[1], R. P. Pankov[1], M. P. Parkhomenko[2], D. S. Kalenov[2], I. S. Eremin[2], N. A. Fedoseev[2], I. A. Nalogin[3], A. E. Eskin[4]

[1]*JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*
[2]*FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino*
[3]*«Moscow Technological University» MIREA, Moscow*
[4]*FSUE VNIIFTRI, Moscow Region, Solnechnogorsk District, Mendeleevo*

4(543).indd 67 20.12.2019 9:33:32

The cavity method of non-destructive testing of the real part of the relative dielectric permittivity ε', the dielectric loss tangent $tg\delta_\varepsilon$, the real part of the relative magnetic permeability μ' and magnetic loss tangent $tg\delta_\mu$ of the samples in the form of wafers from microwave ferrites in the absence of their magnetization is considered. The method is implemented within 9.8...10.1 GHz frequency range using modern vector network analyzers and it is intended to control the electromagnetic parameters of wafers with dimensions $48^{-0.1}\times60^{-0.12}\times1.0^{-0.02}$ mm (or two wafers with dimensions $48^{-0.1}\times30^{-0.1}\times1.0^{-0.02}$ mm) with saturation magnetization 16…160 kA/m, the electromagnetic parameters of which are in the intervals: ε' = 14.5…15.5, $tg\delta_\varepsilon = 5\cdot10^{-4}…5\cdot10^{-5}$, μ' = 0.85…0.90, $tg\delta_\mu = 10^{-3}…10^{-4}$. The method is based on comparing experimental characteristics (resonant frequency, resonance curve width at the level of -3 dB) of transmission resonators (a resonator for measuring ε', $tg\delta_\varepsilon$; a resonator for measuring μ', $tg\delta_\mu$) with the test wafer with calculated characteristics of the calculation models of these resonators when a conditional ferrite wafer of the same size with specified values of electromagnetic parameters (the average values of measurement ranges of the wafers electromagnetic parameters) is placed in them. The universal three-dimensional (3*D*) program of modeling microwave structures was used at the method realization.

Keywords: ferrite wafer (substrate), relative dielectric permittivity, relative magnetic permeability, dielectric loss tangent, magnetic loss tangent, microwave resonator, measurement of ferrite electromagnetic parameters

1. ВВЕДЕНИЕ

При производстве СВЧ невзаимных ферритовых приборов в полосковом исполнении требуется неразрушающий контроль действительной части относительной диэлектрической проницаемости ε', тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon$, действительной части относительной магнитной проницаемости μ' и тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_\mu$ ферритовых пластин (подложек) в ненамагниченном состоянии. Данные измерения с допустимой погрешностью можно проводить методом, основанным на работах [1–3].

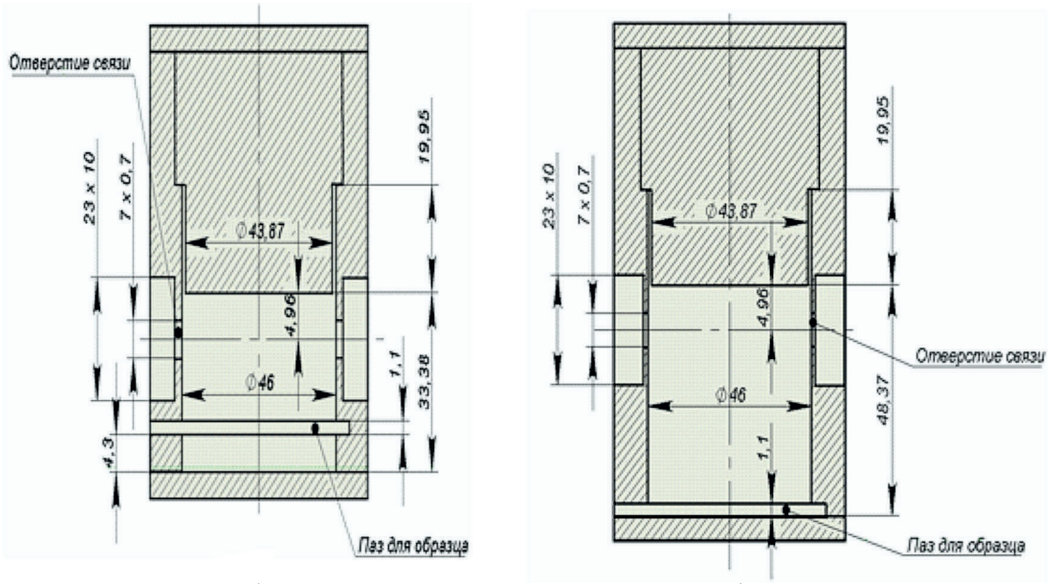
Сущность метода [4] заключается в сравнении экспериментальных характеристик проходного резонатора, содержащего испытуемый образец в форме пластины, с экспериментальными характеристиками того же резонатора, когда вместо испытуемого образца в него помещена эталонная ферритовая пластина, имеющая те же номинальные геометрические размеры, с известными электромагнитными параметрами, близкими к параметрам испытуемой ферритовой пластины (эталонный образец). При этом отличие электромагнитных параметров испытуемого образца (ε', μ', $tg\delta_\varepsilon$, $tg\delta_\mu$) от параметров эталонного не должно вызывать существенного изменения структуры электромагнитного поля в резонаторе, то есть изменение характеристик резонатора (резонансная частота, ширина резонансной кривой нагруженного резонатора, коэффициент отражения, коэффициент прохождения) при помещении в него испытуемого образца должно быть вызвано только отличием электромагнитных параметров испытуемого образца от эталонного образца.

Метод был реализован в диапазоне частот 9,8…10,1 ГГц для наиболее востребованных на частотах до 18 ГГц поликристаллических ферритов с намагниченностью насыщения от 16 до 160 кА/м со следующими значениями электромагнитных параметров эталонного и испытуемого образцов: ε' =14,5…15,5; $tg\delta_\varepsilon = 5\cdot10^{-4}…5\cdot10^{-5}$; μ' = 0,85…0,90; $tg\delta_\mu = 1\cdot10^{-3}…1\cdot10^{-4}$. Геометрические размеры образцов – $48^{-0,1}\times60^{-0,12}\times1,0^{-0,02}$ мм (или две пластины с размерами $48^{-0,1}\times30^{-0,1}\times1,0^{-0,02}$ мм).

При проведении измерений испытуемый и эталонный образцы помещаются последовательно в резонатор «ε» и в резонатор «μ» в пучность электрического и магнитного поля соответственно. В качестве непосредственно измеряемых величин в методе выступают резонансные частоты и ширины резонансных кривых по уровню минус 3 дБ нагруженных проходных цилиндрических резонаторов: резонатора «ε» для измерения диэлектрических параметров образцов и резонатора «μ» для измерения магнитных параметров образцов. Тип электромагнитных колебаний в резонаторах

4(543).indd 68 20.12.2019 9:33:32

с помещенными ферритовыми образцами – H_{012}. Поперечные сечения резонаторов изображены на рис.1, характеристики резонаторов без образцов приведены в табл. 1.



а) *б*)

Рис. 1. Резонаторы «ε» (*а*) и «μ» (*б*)

Таблица 1

Тип резонатора	Метрологические характеристики резонаторов без образцов*
Цилиндрический резонатор «ε» (см. рис. 1, *а*)	Тип колебаний резонатора без образца – H_{011}. Частота резонанса $f_{\varepsilon 0}$ = (9,1252±0,0003) ГГц. Собственная добротность резонатора $Q_{\varepsilon 0c}$ = 27968±12. Ширина резонансной кривой нагруженного резонатора $\Delta f_{\varepsilon 0н}$ = (356,2±0,1) кГц (нагруженная добротность резонатора $Q_{\varepsilon 0н} = f_{\varepsilon 0}/\Delta f_{\varepsilon 0н}$ = 25620,5). Тип колебаний резонатора с образцом – H_{012}
Цилиндрический резонатор «μ» (см. рис. 1, *б*)	Тип колебаний резонатора без образца – H_{012}. Частота резонанса $f_{\mu 0}$ = (10,0760±0,0003) ГГц. Собственная добротность резонатора $Q_{\mu 0c}$ = 32823±15. Ширина резонансной кривой нагруженного резонатора $\Delta f_{\mu 0н}$ = (344,1±0,1) кГц (нагруженная добротность резонатора $Q_{\mu 0н} = f_{\mu 0}/\Delta f_{\mu 0н}$ = 29284,5). Тип колебаний резонатора с образцом – H_{012}

*Измерения проводились при следующих климатических условиях: температура окружающей среды – (23±1) ºС; относительная влажность воздуха – 30...80 %; атмосферное давление – от 84 до 106,7 кПа. При этих климатических условиях относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_в \approx 1{,}0006$, а относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu_в \approx 1$.

4(543).indd 69 20.12.2019 9:33:33

Расчетные формулы для определения электромагнитных параметров испытуемых образцов получены из уравнений свободных колебаний волн в резонаторах «ε» и «μ», содержащих слой феррита, с учетом потерь в стенках резонаторов и в слое феррита, с применением метода линеаризации. При этом рассматривается малое возмущение резонаторов испытуемым образцом относительно резонаторов с эталонным образцом. Примененный алгоритм обработки экспериментальных данных позволяет уменьшить систематическую погрешность определения электромагнитных параметров испытываемых образцов, обусловленную их относительно большой толщиной.

Ниже приведены расчетные формулы, расположенные в соответствии с последовательностью обработки экспериментальных данных [4].

1. Приближенное значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{пр}$ рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon'_{пр} = \varepsilon'_{к}\left(1 - 14,4\frac{f_{\varepsilon} - f_{\varepsilon к}}{f_{\varepsilon к}} - 0,85\frac{d_{п} - d_{к}}{d_{к}}\right). \quad (1)$$

2. Значение действительной относительной части магнитной проницаемости μ':

$$\mu' = \mu'_{к}\left(1 - 91,5\frac{f_{\mu} - f_{\mu к}}{f_{\mu к}} - 0,4\frac{d_{п} - d_{к}}{d_{к}} - 0,1\frac{\varepsilon'_{пр} - \varepsilon'_{к}}{\varepsilon'_{к}}\right). \quad (2)$$

3. Уточненное значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости ε':

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{к}\left(1 - 14,4\frac{f_{\varepsilon} - f_{\varepsilon к}}{f_{\varepsilon к}} - 0,85\frac{d_{п} - d_{к}}{d_{к}} - 0,12\frac{\mu' - \mu'_{к}}{\mu'_{к}}\right). \quad (3)$$

4. Приближенное значение тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_{\mu пр}$:

$$tg\delta_{\mu пр} = tg\delta_{\mu к} + 45,75\left(\frac{\Delta f_{\mu}}{f_{\mu}} - \frac{\Delta f_{\mu к}}{f_{\mu к}}\right). \quad (4)$$

5. Приближенное значение тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_{\varepsilon пр}$:

$$tg\delta_{\varepsilon пр} = tg\delta_{\varepsilon к} + 7,2\left(\frac{\Delta f_{\varepsilon}}{f_{\varepsilon к}} - \frac{\Delta f_{\varepsilon к}}{f_{к}}\right) - 0,12\left(tg\delta_{\mu пр} - tg\delta_{\mu к}\right). \quad (5)$$

6. Уточненное значение тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_{\mu}$:

$$tg\delta_{\mu} = tg\delta_{\mu к} + 45,75\left(\frac{\Delta f_{\mu}}{f_{\mu}} - \frac{\Delta f_{\mu к}}{f_{\mu к}}\right) - 0,1\left(tg\delta_{\varepsilon пр} - tg\delta_{\varepsilon к}\right). \quad (6)$$

4(543).indd 70 20.12.2019 9:33:33

7. Уточненное значение тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$:

$$\mathrm{tg}\delta_\varepsilon = \mathrm{tg}\delta_{\varepsilon к} + 7{,}2\left(\frac{\Delta f_\varepsilon}{f_{\varepsilon к}} - \frac{\Delta f_{\varepsilon к}}{f_к}\right) - 0{,}12\left(\mathrm{tg}\delta_\mu - \mathrm{tg}\delta_{\mu к}\right). \quad (7)$$

В приведенных расчетных соотношениях: f_ε, $f_{\varepsilon к}$ – измеренные значения частоты резонанса нагруженного резонатора «ε» с установленным испытуемым и эталонным образцом соответственно, МГц; Δf_ε, $\Delta f_{\varepsilon к}$ – измеренные значения ширины резонансной кривой нагруженного резонатора «ε» с установленным испытуемым и эталонным образцом соответственно, МГц; f_μ, $f_{\mu к}$ – измеренные значения частоты резонанса нагруженного резонатора «μ» с установленным испытуемым и эталонным образцом соответственно, МГц; Δf_μ, $\Delta f_{\mu к}$ – измеренные значения ширины резонансной кривой нагруженного резонатора «μ» с установленным испытуемым и эталонным образцом соответственно, МГц; $d_п$, $d_к$ – толщины испытуемого и эталонного образцов соответственно, мм; $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$, $\mathrm{tg}\delta_{\varepsilon к}$ – тангенсы угла диэлектрических потерь испытуемого и эталонного образцов соответственно; $\mathrm{tg}\delta_\mu$, $\mathrm{tg}\delta_{\mu к}$ – тангенсы угла магнитных потерь испытуемого и эталонного образцов соответственно; ε', $\varepsilon'_к$ – действительные части относительных диэлектрических проницаемостей испытуемого и эталонного образцов соответственно; μ', $\mu'_к$ – действительные части относительных магнитных проницаемостей испытуемого и эталонного образцов соответственно.

В данной работе рассмотрена возможность определения электромагнитных параметров образцов в форме пластин из СВЧ-ферритов при отсутствии их намагничивания по методу [4], когда вместо параметров нагруженных резонаторов с эталонным образцом ($f_{\varepsilon к}$, $\Delta f_{\varepsilon к}$, $f_{\mu к}$, $\Delta f_{\mu к}$, $\mathrm{tg}\delta_{\varepsilon к}$, $\mathrm{tg}\delta_{\mu к}$) используются рассчитанные характеристики нагруженных расчетных моделей резонаторов «ε», «μ» (см. рис.1) при помещении в них условного образца в форме пластины тех же номинальных размеров (условный опорный образец) с заданными значениями электромагнитных параметров (опорные значения), равными средним значениям диапазонов измерения контролируемых электромагнитных параметров по данной методике.

Расчетные модели резонаторов получены на основе экспериментальных результатов исследования данных резонаторов без образца (см. табл. 1).

Такая постановка задачи возникла в связи с трудностями по аттестации эталонных образцов. Реализация ее стала возможной благодаря развитию высокоточных численных методов анализа 3*D*-моделей СВЧ-устройств.

Рассмотрим построение расчетных моделей резонаторов, проведение измерений электромагнитных параметров испытуемых образцов с использованием расчетных моделей резонаторов, схему стенда для проведения измерений, погрешности измерений.

2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЗОНАТОРОВ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Построение расчетных моделей резонаторов и измерение электромагнитных параметров испытуемых образцов проводится в следующей последовательности.

2.1. Измеряются резонансная частота, ширина резонансной кривой, коэффициент передачи нагруженных резонатора «ε» и резонатора«μ» без образца, определяется по коэффициенту передачи собственная добротность резонаторов (тип колебаний резонатора «ε» без образца – H_{011}, тип колебаний резонатора «μ» без образца – H_{012}).

Для проходного резонатора при равных значениях коэффициента связи с волноводными трак-

4(543).indd 71 20.12.2019 9:33:33

тами на входе и выходе резонатора собственная добротность Q_0 связана с нагруженной добротностью $Q_н$ и коэффициентом передачи S_{21}, дБ, соотношением [5, 6]:

$$Q_0 = \frac{Q_н}{1-10^{S_{21}/20}}, \quad (8)$$

где $Q_н = f_р/\Delta f_н$; $f_р$ – значение резонансной частоты; $\Delta f_н$ – значение ширины резонансной кривой нагруженного резонатора по уровню минус 3 дБ.

Экспериментальные значения характеристик резонаторов «ε» и «μ» приведены в табл. 1, размеры резонаторов – на рис.1.

2.2. В соответствии с рис. 1 строятся 3*D*-модели резонаторов. С помощью универсальной трехмерной (3*D*) программы моделирования СВЧ-структур проводятся расчет и настройка моделей резонаторов «ε» и «μ» без образца (по значению резонансной частоты подбором длины моделей резонаторов и по значению собственной добротности подбором проводимости стенок моделей резонаторов). Соответствие резонаторов и их моделей определяется методом сравнения рассчитанных и измеренных значений резонансных частот и ширин резонансных кривых (собственных и нагруженных). При расчетах принимаются относительная диэлектрическая проницаемость воздуха равной $\varepsilon_в \approx 1{,}0006$ и относительная магнитная проницаемость воздуха равной $\mu_в \approx 1$.

В табл. 2 приведены параметры расчетных моделей резонаторов «ε» и «μ» без образца.

Таблица 2

Расчетная модель	Параметры				
	$f_р$, ГГц	L, мм (D = 46 мм)	σ, См/м	$Q_{ε0с}$	$Q_{ε0н}$
Резонатор «ε» без образца. Тип колебаний резонатора – H_{011}	9,12554	33,385	$5{,}099\cdot10^7$	27984,22	25635,40
Резонатор «μ» без образца. Тип колебаний резонатора – H_{012}	10,07594	48,37	$5{,}099\cdot10^7$	32823,33	29284,54

2.3. Проводится расчет характеристик нагруженных расчетных моделей резонаторов (частоты резонанса и ширины резонансной кривой) при помещении в них условного опорного образца с заданными значениями электромагнитных параметров (опорные значения) с помощью универсальной 3*D*-программы моделирования СВЧ-структур. При расчетах принимаются относительная диэлектрическая проницаемость воздуха равной $\varepsilon_в \approx 1{,}0006$ и относительная магнитная проницаемость воздуха равной $\mu_в \approx 1$.

В табл. 3 приведены рассчитанные характеристики нагруженных расчетных моделей резонаторов «ε» и «μ» с условным опорным образцом с опорными значениями электромагнитных параметров: $\varepsilon'_к = 15$ – опорное значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости; $\mu'_к = 0{,}87$ – опорное значение действительной части относительной магнитной проницаемости; $\mathrm{tg}\delta_{μк} = 1{,}5\cdot10^{-4}$ – опорное значение тангенса угла магнитных потерь; $\mathrm{tg}\delta_{εк} = 1{,}0\cdot10^{-4}$ – опорное значение тангенса угла диэлектрических потерь – и опорным значением толщины образца $d_к = 1$ мм.

4(543).indd 72 20.12.2019 9:33:33

Таблица 3

Расчетная модель	Параметры	
	$f_{ек}, f_{μк}$, ГГц	$\Delta f_{ек}, \Delta f_{μк}$, кГц
Резонатор «ε» с условным опорным образцом. Тип колебаний резонатора – H_{012}	9,836732789	463,783
Резонатор «μ» с условным опорным образцом. Тип колебаний резонатора – H_{012}	10,07041363	424,830

2.4. В резонатор «ε» устанавливается испытуемый образец и проводится измерение частоты резонанса и ширины резонансной кривой нагруженного резонатора, затем проводятся аналогичные измерения с резонатором «μ».

2.5. В соответствии с формулами (1)…(7) и табл. 3 определяются параметры испытуемого образца.

3. СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Метод реализован с применением векторного анализатора цепей N5232A. Схема измерительной установки приведена на рис. 2.

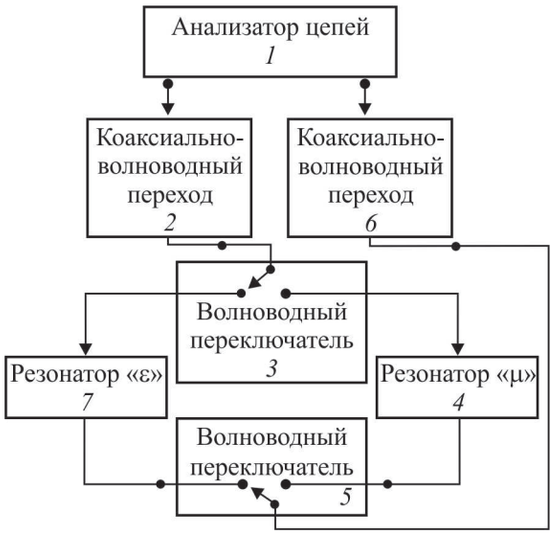


Рис. 2. Схема измерительной установки

При измерении параметров резонаторов с ферритовыми образцами используются два независимых канала, в каждом канале сигнал от анализатора цепей *1* через коаксиально-волноводный переход *2* и волноводный переключатель *3* поступает на один из резонаторов (резонатор «ε» *7* или резонатор «μ» *4*), затем через волноводный переключатель *5* и коаксиально-волноводный переход *6* на анализатор цепей *1*.

4(543).indd 73 20.12.2019 9:33:33

В табл. 4 приведены технические характеристики комплектации измерительной установки [7].

Таблица 4

Наименование оборудования или элемента	Метрологические и основные технические характеристики
Анализатор цепей векторный N5232A (Рег. № 53568-13)	Диапазон частот – от 300 кГц до 20 ГГц. Пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты выходного сигнала – $\pm 1 \cdot 10^{-6}$
Переход коаксиально-волноводный ПКВ1-13Р-23×10 (АО НПФ «Микран») – 2 шт.	Переход коаксиально-волноводный, коаксиал – 3,5 мм (розетка), волновод – 23×10 мм. Диапазон частот – 8,15…12,05 ГГц; КСВН – не более 1,1; вносимые потери – не более 0,3 дБ
Переключатель волноводный (Рэм 3.600.009) – 2 шт.	Диапазон частот – 8,15…12,05 ГГц, тракт – 23×10 мм

4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки систематической погрешности, обусловленной точностью расчета численного метода, расчетными формулами (1)…(7), алгоритмом обработки экспериментальных данных, был проведен расчет характеристик нагруженных моделей резонаторов «ε» и «μ» (частоты резонанса и ширины резонансной кривой) с условным тестовым образцом с помощью универсальной 3*D*-программы моделирования СВЧ-структур. Далее эти результаты были использованы вместо экспериментальных при определении электромагнитных параметров условного тестового образца по формулам (1)…(7). Электромагнитные параметры условного тестового образца и результаты расчета приведены в табл. 5. При расчетах принимались относительная диэлектрическая проницаемость воздуха равной $\varepsilon_в \approx 1{,}0006$ и относительная магнитная проницаемость воздуха равной $\mu_в \approx 1$.

Таблица 5

Идентификационные данные образца, резонатора	Измеряемые, расчетные параметры						
	ε'	$\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$	μ'	$\mathrm{tg}\delta_\mu$	f, ГГц	Δf, кГц	$Q_н$
Условный тестовый образец ($d_п$ = 0,988 мм)	14,98	$9{,}49 \cdot 10^{-5}$	0,87	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
Резонатор «ε» с условным тестовым образцом	–	–	–	–	9,84431	468,89	24125,65
Резонатор «μ» с условным тестовым образцом	–	–	–	–	10,07083	417,43	24125,65

По формулам (1)…(7) данной методики с использованием данных табл. 3 были определены электромагнитные параметры условного тестового образца: ε' = 14,985 (+0,005), $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon = 1{,}076 \cdot 10^{-4}$ ($+0{,}127 \cdot 10^{-4}$),

4(543).indd 74 20.12.2019 9:33:33

$\mu' = 0{,}871$ (+0,001), $tg\delta_\mu = 1{,}156 \cdot 10^{-4}$ ($-0{,}016 \cdot 10^{-4}$), где в скобках приведено отклонение результатов расчетов от исходных значений электромагнитных параметров условного тестового образца.

Границы неисключенной систематической погрешности измерений при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ рассчитываются по общей формуле [8]:

$$\theta = 1{,}1\sqrt{\sum (b_n \theta_n)^2}, \quad (12)$$

где b_n – частная производная по аргументу; θ_n – границы неисключенной систематической погрешности измерений данного аргумента.

Измеряемые величины:

f_ε – частота резонанса резонатора «ε» с установленным испытуемым образцом. Границы неисключенной систематической погрешности определяются дискретностью перестройки частоты анализатором спектра 100 Гц и пределами допускаемой относительной погрешности установки частоты выходного сигнала $\pm 1 \cdot 10^{-6}$, суммарное значение – ±1100 Гц для используемой частоты измерения [7];

Δf_ε – ширина резонансной кривой нагруженного резонатора «ε» с установленным испытуемым образцом. Границы неисключенной систематической погрешности определяются двойной дискретностью перестройки частоты анализатором спектра и составляют ±200 Гц;

f_μ – частота резонанса резонатора «μ» с установленным испытуемым образцом. Границы неисключенной систематической погрешности определяются дискретностью перестройки частоты анализатором спектра 100 Гц и пределами допускаемой относительной погрешности установки частоты выходного сигнала $\pm 1 \cdot 10^{-6}$, суммарное значение – ±1100 Гц для используемой частоты измерения [7];

Δf_μ – ширина резонансной кривой нагруженного резонатора «μ» с установленным испытуемым образцом. Границы неисключенной систематической погрешности определяются двойной дискретностью перестройки частоты анализатором спектра и составляют ±200 Гц;

$d_п$ – толщина пластины испытуемого образца. Границы неисключенной систематической погрешности определяются пределами абсолютной погрешности измерения микрометра ±0,004 мм.

Границы абсолютной погрешности измерений Δ при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ рассчитываются по общей формуле:

$$\Delta = \theta + 2\sigma, \quad (13)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений величин, которое было определено экспериментально из 10 независимых измерений (значения приведены в табл. 3).

Результаты расчета границ абсолютной погрешности измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6

Измеряемая (расчетная) величина	Составляющие погрешности ($b_n\theta_n$) по аргументам			
	μ'	ε'	$tg\delta_\mu$	$tg\delta_\varepsilon$
$f_{\varepsilon к}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	0,02	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
$f_{\mu к}$	$4{,}7 \cdot 10^{-3}$	0,01	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$

4(543).indd 75 20.12.2019 9:33:33

Окончание табл. 6

Измеряемая (расчетная) величина	Составляющие погрешности ($b_n\theta_n$) по аргументам			
	μ'	ε'	$tg\delta_\mu$	$tg\delta_\varepsilon$
$\Delta f_{\varepsilon к}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$1{,}3\cdot10^{-6}$
$\Delta f_{\mu к}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$1\cdot10^{-5}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$
f_ε	$2\cdot10^{-7}$	$3\cdot10^{-5}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Δf_ε	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$1{,}5\cdot10^{-7}$
Δf_μ	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$1\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$
f_μ	$2\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-5}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
d_n	$1{,}2\cdot10^{-3}$	0,05	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Среднее квадратическое отклонение	0,0013	0,015	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}3\cdot10^{-6}$
Границы абсолютной погрешности измерений	±0,005	±0,085	$\pm3{,}8\cdot10^{-5}$	$\pm5\cdot10^{-6}$
Допускаемые значения	±0,007	±0,1	$\pm6\cdot10^{-5}$	$\pm2{,}5\cdot10^{-5}$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе показана возможность определения электромагнитных параметров образцов в форме пластин из СВЧ-ферритов при отсутствии их намагничивания по методу [4], когда вместо параметров резонаторов с эталонным образцом ($f_{\varepsilon к}$, $\Delta f_{\varepsilon к}$, $f_{\mu к}$, $\Delta f_{\mu к}$, $tg\delta_{\varepsilon к}$, $tg\delta_{\mu к}$) используются рассчитанные характеристики расчетных моделей резонаторов «ε», «μ» (см. рис.1), созданных на основе экспериментальных данных с использованием универсальной трехмерной (3*D*) программы моделирования СВЧ-структур, при помещении в них условных образцов в форме пластин с заданными параметрами (опорные значения), равными средним значениям диапазонов измерения электромагнитных параметров по данной методике.

Разработанная методика и установка обеспечивают в серийном производстве измерение электромагнитных параметров ненамагниченных пластин из СВЧ-ферритов (подложек) размерами $48^{-0,1}\times60^{-0,12}\times1{,}0^{-0,02}$ мм (или две пластины размерами $48^{-0,1}\times30^{-0,1}\times1{,}0^{-0,02}$ мм) с намагниченностью насыщения 16…160 кА/м в диапазоне частот от 9,8 до 10,1 ГГц, пределы и показатели точности измерения которых приведены в табл. 7.

Таблица 7

Измеряемый параметр	Значение	Границы допускаемой абсолютной погрешности измерений при доверительной вероятности 0,95
Действительная часть диэлектрической проницаемости ε'	14,5 – 15,5	±0,1
Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon$	$5\cdot10^{-4} – 5\cdot10^{-5}$	$\pm2{,}5\cdot10^{-5}$

4(543).indd 76 20.12.2019 9:33:34

Окончание табл. 7

Измеряемый параметр	Значение	Границы допускаемой абсолютной погрешности измерений при доверительной вероятности 0,95
Действительная часть относительной магнитной проницаемости μ'	0,85 – 0,90	±0,007
Тангенс угла магнитных потерь $tg\delta_{\mu}$	$1\cdot10^{-3} – 1\cdot10^{-4}$	$\pm6\cdot10^{-5}$

Условия проведения измерений: температура окружающей среды – (23±1) ºС; относительная влажность воздуха – от 30 до 80 %; атмосферное давление – от 84 до 106,7 кПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка метода и аппаратуры для измерения электромагнитных параметров ферритов с малыми потерями: отчет о НИР / ВНИИФТРИ. – 1978.

2. **Соколов, В. М.** Способ вычисления добротности волноводных резонаторов со слоистооднородным заполнением / В. М. Соколов, П. А. Иващенко // Методы и средства радиотехнических измерений: Труды ВНИИФТРИ. – 1974.– Вып.17 (47).

3. **Зайцев, А. Н.** Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А. Н. Зайцев, П. А. Иващенко, А. В. Мыльников. – М.: Изд. Стандартов, 1989.

4. Методика измерения электромагнитных параметров СВЧ-ферритов с малыми потерями на образцах в форме пластин в интервале частот 9,8…10,1 ГГц. – НПО «Исток», ФГУП ВНИИФТРИ, 1978.

5. **Лебедев, И. В.** Техника и приборы СВЧ. Т. 1. / И. В. Лебедев. – М.: Изд. «Высшая школа», 1970.

6. **Завьялов, А. С.** Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах / А. С. Завьялов, Г. У. Дунаевский. – Томск: Изд. Томского университета, 1985.

7. Руководство по эксплуатации анализатора цепей № 5232А (или его аналога). – Фирма Keysight Technologies.

8. СОЕИМ. Методические указания по расчету показателей точности измерений параметров изделий электронной техники. РД118.0020-88. – ВНИИ «Электронстандарт», 1989.

Статья поступила 3 октября 2019 г.

4(543).indd 77 20.12.2019 9:33:34

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СНИЖАЕТ АКТИВНОСТЬ МЕЖКЛЕТОЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КРОВИ В ПРИСУТСТВИИ ЭТАНОЛА

К. Д. Казаринов[1], В. А. Щелконогов[1,2,3], О. А. Баранова[1,2], И. Г. Полников[1], А. В. Чеканов[1,2]

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

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

[3]*ФГБОУ ВО Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва*

В результате выполнения данной экспериментальной работы было установлено, что КВЧ-облучение низкой интенсивности в длинноволновой области снижает уровень агрегации тромбоцитов в присутствии этанола. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации – ристомицина, а также в уменьшении угла наклона агрегатограммы (скорости агрегации тромбоцитов) в зависимости от количества этанола, добавленного в среду инкубации. Предложен механизм наблюдаемого эффекта, связанный с тем, что указанные воздействия индуцируют апоптоз тромбоцитов и приводят к снижению количества циркулирующих клеток.

КС: микроволновое излучение, межклеточное взаимодействие, обогащенная тромбоцитами плазма, этанол, индукторы агрегации, алкогольная интоксикация, механизм биологического действия КВЧ-излучения

MICROWAVE RADIATION REDUCES THE ACTIVITY OF CELL-CELL INTERACTION OF BLOOD ELEMENTS IN ETHANOL PRESENCE

K. D. Kazarinov[1], V. A. Shchelkonogov[1,2,3], O. A. Baranova[1,2], I. G. Polnikov[1], A. V. Chekanov[1,2]

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

[2]*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education (FSBEI HE) Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow*

[3]*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education (FSBEI HE) «MIREA» Russian Technological University, Moscow*

As a result of this experimental work it was found that EHF-irradiation of low intensity in the long wave-length region decreased the level of platelet aggregation in the presence of ethanol. The irradiation effect was manifested in a decrease in the degree of platelet aggregation compared to the control when adding an aggregation inducer, ristomycin, as well as in a decrease of the inclination angle of aggregatogram (platelet aggregation rate) depending on the amount of ethanol added to the incubation medium. The mechanism of the observed effect is proposed, associated with the fact that these effects induce platelet apoptosis and lead to a decrease in the number of circulating cells.

Keywords: microwave radiation, cell-cell interaction, platelet-rich plasma, ethanol, aggregation inducers, alcohol intoxication, mechanism of biological action of EHF-irradiation

4(543).indd 78 20.12.2019 9:33:34

1. ВВЕДЕНИЕ

Из литературных данных известно [1], что острая алкогольная интоксикация снижает количество циркулирующих тромбоцитов, продлевает время кровотечения и вызывает кровоизлияние в слизистую желудка in vivo. Эти данные показывают возможный патогенез геморрагических симптомов у пациентов с алкогольной интоксикацией. Кроме того, известны экспериментальные данные о влиянии этанола на агрегацию тромбоцитов. Так, при потреблении крысами этанола в течение 21 дня было обнаружено снижение агрегации тромбоцитов [2]. В исследованиях [3] было показано, что снижение уровня холестерина – ЛПВП (липопротеины высокой плотности) может объяснить только 50 % защитного эффекта алкогольных напитков; остальные 50 % могут быть частично связаны с уменьшением активности тромбоцитов. Эта антитромбоцитарная активность вина объясняется как этанолом, так и полифенольными компонентами, которыми богаты красные вина.

Представленные в предшествующей нашей публикации [4] результаты по изучению эффектов КВЧ-излучения на элементы крови человека свидетельствуют о том, что КВЧ-излучение низкой интенсивности в условиях нашего эксперимента способно снизить активность межклеточного взаимодействия. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации – ристомицина, а также в уменьшении скорости агрегации тромбоцитов.

Свертывание крови является центральным звеном гемостаза (остановки кровотечения). Следующим звеном гемостаза являются особые клетки – тромбоциты, способные прикрепляться друг к другу и к месту повреждения стенок кровеносных сосудов, чтобы создать останавливающую кровь пробку. Среди множества систем нашего организма, нарушения в работе которых представляют опасность для здоровья, свертывание крови занимает первое место, как главная непосредственная причина смерти. Можно сказать, что люди болеют разными болезнями, но умирают почти всегда от нарушений системы свертывания крови. Рак, сепсис, травма, атеросклероз, инфаркт, инсульт – для широкого круга заболеваний непосредственной причиной смерти является неспособность системы свертывания поддерживать баланс между жидким и твердым состояниями крови в организме [5].

Повышенная агрегация тромбоцитов лежит в основе патогенеза большого количества заболеваний. Однако не всегда удается преодолеть агрегацию тромбоцитов и предотвратить развитие тромботических осложнений с помощью антитромбоцитарных препаратов. Известно, что апоптозу (программируемой смерти клеток) подвергаются не только ядросодержащие клетки, но и безъядерные клетки, такие, как эритроциты и тромбоциты [6].

Попыткой преодолеть некоторые нежелательные явления, связанные с активацией тромбоцитов, а также регламентировать их участие в различных патологических состояниях обусловлен поиск иных подходов к проблеме, в том числе и рассмотрение участия в апоптозе этих клеток известных индукторов агрегации: коллагена, арахидоновой кислоты, тромбина, АДФ, ионофора кальция А23187 и др. [7]. Установлен бимодальный характер влияния в зависимости от величины концентрации индуктора. При низких концентрациях наблюдается активация тромбоцитов, а при высоких – запускается программа апоптоза (транслокации фосфатидилсерина с внутренней поверхности цитоплазматической мембраны на внешнюю, открытия гигантских митохондриальных пор и выхода cyt *c*, каскадной активации каспаз и фрагментации клетки для последующей утилизации фагоцитами). При апоптозе прерываются патологические процессы, приводящие к стимуляции тромбообразования. Модулируя с помощью микроволнового излучения активацию тромбоцитов, мы, тем самым, можем осуществлять выбраковку различных субпопуляций тромбоцитов [8].

4(543).indd 79 20.12.2019 9:33:34

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования

Кровь, взятую у здоровых доноров и стабилизированную цитратом натрия, центрифугировали 10 мин при 200*g* со скоростью 1000 об/мин для получения обогащенной эритроцитами плазмы (ОТП). Затем ОТП отбиралась в чистую пробирку. Оставшуюся плазму повторно центрифугировали в течение 25 мин при 400*g* со скоростью 2800 об/мин для получения бедной тромбоцитами плазмы (БТП). Далее БТП отбиралась в отдельную чистую пластиковую пробирку. Образцы хранили при +37 °С не более 3 ч.

Агрегометрия тромбоцитов

После выделения ОТП производился подсчет клеток. Проба была объемом 250 мкл. Количество клеток составляло примерно 300 тыс./мл. Затем добавляли индуктор агрегации – водные растворы ристомицина. Конечная концентрация составляла 0,1 мг/мл.

Для исследования влияния КВЧ на агрегацию тромбоцитов использовался метод агрегометрии. Измерения были проведены на четырехканальном приборе AggRam Helena (Великобритания). Кюветы для данного прибора были из силиконизированного стекла, размеры их составляли 8×60 мм. Температура инкубации – (37±1)°С. Длина волны, на которой проводились измерения, 650 нм. Для перемешивания использовались магниты с покрытием размерами 3,5 × 4 мм.

Далее регистрировали кинетику агрегации в течение 20 мин. В качестве контроля использовали пробу, которая представляла ОТП с добавлением индуктора. Калибровка прибора осуществлялась с помощью БТП. Оценка производилась по изменению светопропускания ОТП при добавлении индуктора агрегации, в нашем случае ристомицина. После добавления индуктора образуются агрегаты тромбоцитов. Параллельно с этим процессом увеличивается светопропускание до достижения плато, что указывает на необратимую агрегацию. Степень агрегации представляет собой разницу между минимальным и максимальным процентами светопропускания. Скорость агрегации оценивалась по тангенсу угла наклона агрегатограммы [4]. Полученные результаты обрабатывались с помощью программ Exel (Microsoft office) и STATISTICA (версия 6), StatSoft Corporation (USA). Для анализа различий количественных признаков в трех и более несвязанных группах использовался статистический критерий Краскелла-Уоллиса ANOVA, в двух несвязанных группах применялся критерий Манна-Уитни. Достоверными считались различия при $p < 0{,}05$.

Условия КВЧ-облучения

Генератор на основе диода Ганна с частотой 32,9…39,6 ГГц (длина волны 9,1…7,6 мм) и мощностью излучения 3…30 мВт использовался в качестве источника микроволнового излучения. Установка микроволнового облучения обеспечивала подведение излучения к исследуемому объекту с помощью волновода сечением 7,2×3,4 мм^2 с согласующими элементами. Осуществлялся контроль режима бегущей волны, мощности микроволнового излучения и длины волны излучения. Образцы подвергались микроволновому воздействию в ближнем поле рупорной антенны, расположенной вертикально, и находясь над ней на расстоянии 6 см от открытого конца рупора, т. е. в ближней зоне облучателя. Образцы перемешивали осторожным встряхиванием каждые 5 мин. Температуру в образцах измеряли с использованием волоконно-оптического микротермодетектора МТ-4МО (Россия) с точностью 0,05 °С.

4(543).indd 80 20.12.2019 9:33:34

3. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Агрегация тромбоцитов оценивалась по изменению светопропускания ОТП при добавлении индуктора агрегации, в нашем случае ристомицина. После добавления индуктора образуются агрегаты тромбоцитов, в результате увеличивается светопропускание ОТП крови до достижения плато, что указывает на необратимую агрегацию.

На рис. 1 и 2 показаны результаты, представляющие влияние КВЧ-излучения в присутствии этанола на степень и скорость агрегации тромбоцитов. Данные были получены при обработке агрегатограмм здоровых доноров. Как видно, добавление 1 мкл этанола вызывало незначительное повышение степени агрегации тромбоцитов после КВЧ-облучения, что, возможно, обусловлено образованием гидроксиэтильных радикалов, которые являются дополнительными модуляторами тромбоцитарной активности [9, 10].

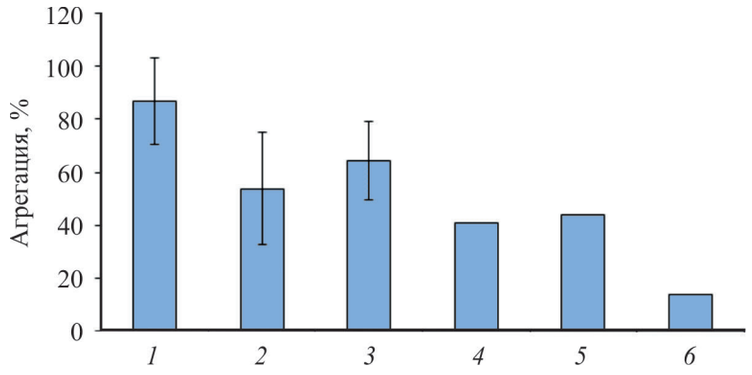


Рис. 1. Влияние КВЧ на степень агрегации тромбоцитов в присутствии этанола:
1 – ОТП; *2* – ОТП + КВЧ-облучение; *3* – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 1 мкл;
4 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 2,5 мкл; *5* – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 10 мкл;
6 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 15 мкл

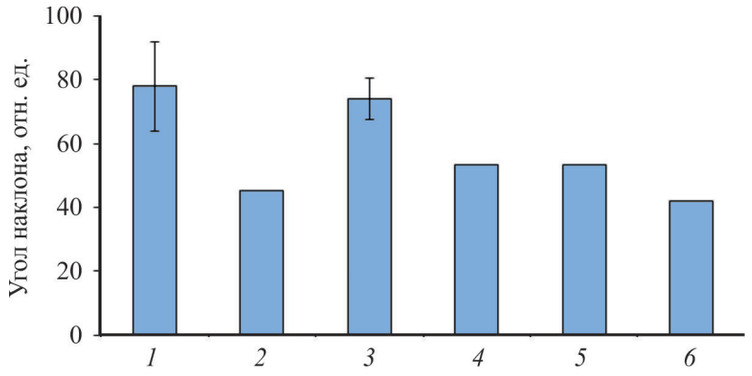


Рис. 2. Влияние КВЧ на скорость агрегации тромбоцитов в присутствии этанола:
1 – ОТП; *2* – ОТП + КВЧ-облучение; *3* – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 1 мкл;
4 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 2,5 мкл; *5* – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 10 мкл;
6 – ОТП + КВЧ-облучение/этанол 15 мкл

В ходе активации тромбоцитов происходит изменение структуры плазматической мембраны, осуществляется активное перераспределение и движение ионов через мембрану, наблюдается

4(543).indd 81 20.12.2019 9:33:34

гидролиз инозитольных фосфолипидов, что приводит к присоединению или отсоединению от биомембраны различных белков. Также происходит высвобождение и окисление арахидоновой кислоты и изменение метаболизма циклических нуклеотидов.

На основании результатов недавних исследований [11] можно предположить, что активированные тромбоциты образуют две субпопуляции, одна из которых способна эффективно агрегировать, а другая осуществляет экстернализацию фосфатидилсерина на внешней стороне мембраны и таким образом ускоряет ход мембранно-зависимых реакций свертывания крови. При этом происходит активация тромбоцитов и увеличение концентрации кальция в его цитоплазме. В дальнейшем происходит аккумуляция кальция в митохондриях до «критического уровня», что является пусковым моментом апоптоза в тромбоцитах. Запускается процесс «митохондриального некроза» тромбоцитов, который сопровождается активным выходом кальция и свободных радикалов из митохондрий, а также деградацией и разрушением цитоскелета, что сопровождается сильным увеличением размера тромбоцитов [12]. В работе [13] было показано, что в активированных тромбоцитах повышается синтез активных форм кислорода. Этанол индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов, приводит к снижению количества циркулирующих клеток, а следовательно, к снижению регистрируемого уровня агрегации тромбоцитов и скорости ее нарастания в процессе эксперимента [1]. Он вызывает деполяризацию митохондриального внутреннего трансмембранного потенциала, активацию BAX, подавление Bcl-2 и активацию каспазы-3, блокирует поверхностную экспрессию связывания P-селектина или PAC-1[1]. Эта последовательность реакций приводит к гибели значительного количества тромбоцитов, участвующих в агрегации, и, следовательно, к снижению регистрируемого уровня агрегации и скорости ее нарастания в процессе эксперимента. Предполагается, что КВЧ-излучение за счет влияния на водную среду и структуру мембран тромбоцитов ускоряет этот процесс [14, 15].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной экспериментальной работы было установлено, что КВЧ-облучение низкой интенсивности в длинноволновой области снижает уровень агрегации тромбоцитов. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индуктора агрегации – ристомицина, а также в уменьшении угла наклона агрегатограммы (скорости агрегации тромбоцитов). Добавление в среду этанола способствовало дальнейшему снижению уровня агрегации и угла наклона агрегатограммы в зависимости от количества этанола, добавленного в среду инкубации. Предложен механизм наблюдаемого эффекта, связанный с тем, что этанол индуцирует митохондриально-опосредованный внутренний апоптоз тромбоцитов и приводит к снижению количества циркулирующих тромбоцитов. КВЧ-излучение за счет влияния на водную среду и структуру мембран тромбоцитов ускоряет этот процесс. Результаты работы открывают перспективы применения КВЧ-излучения как безопасного фактора воздействия с целью коррекции патологий реологических свойств крови человека и, в частности, при алкогольной интоксикации.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu, Lei.** Ethanol induces platelet apoptosis / Lei Liu, Mengxing Chen, Lili Zhao, Qing Zhao, Renping Hu, Jie Zhu, Rong Yan and Kesheng Dai // Alcoholism, Clinical and Experimental Research. – 2017. – Vol. 42, No 2. – P. 291 – 298.

4(543).indd 82 20.12.2019 9:33:34

2. **Baysan, O.** Chronic heavy ethanol consumption is associated with decreased platelet aggregation in rats / O. Baysan, K. Kaptan, K. Erinf, Y. Oztas, T. Coskun, H. Kayir, M. Uzun, T. Uzbay, C. Beyan, E. Isik // The Tohoku Journal of Experimental Medicine. – 2005. – No 2. – P. 85 – 90.

3. **Ruf, J. C.** Alcohol, wine and platelet function / J. C. Ruf // Biol. Res. – 2004. – Vol. 37 (2). – P. 209 – 215.

4. **Казаринов, К. Д.** Экспериментальные результаты изучения эффектов КВЧ-излучения на межклеточные взаимодействия в плазме крови человека / К. Д. Казаринов, О. А. Баранова, В. А. Щелконогов, А. В. Чеканов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2 (545). – С. 79 – 86.

5. **Michelson, A. D.** Platelets / A. D. Michelson. – 3rd ed., 2013. London; Waltham, MA: Academic Press, xliv. – 1353 p.

6. **Leytin, V.** Intravenous immunoglobulin inhibits anti-GPIIb-induced platelet apoptosis in a murine model of ITP / V. Leytin, S. Mykhaylov, A. F. Starkey et al. // Br. J. Haematol. – 2006. – Vol. 133. – P. 78 – 82.

7. **Alberio, L.** Surface expression and functional characterization of alpha-granule factor V in human platelets: effects of ionophore A23187, thrombin, collagen, and convulxin / L. Alberio, O. Safa, K. J. Clemetson, C. T. Esmon, G. L. Dale // Blood. – 2000. – Vol. 95. – P. 1694 – 1702.

8. **Березовская, Г. А.** Апоптоз тромбоцитов: причины недостаточной эффективности антитромбоцитарных препаратов / Г. А. Березовская // Бюллетень СО РАМН. – 2011. – Т. 32, № 4. – С. 17 – 27.

9. **Ермолаева, Е. Н.** Свободнорадикальное окисление в интактных и активированных тромбоцитах / Е. Н. Ермолаева, Л. В. Кривохижина, С. А. Кантюков, Е. Ф. Сурина-Марышева // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 7–1. – С. 61 – 65.

10. **Štikarová, J.** Antioxidants change platelet responses to various stimulating events / J. Štikarová, P. Májek , Z. Reicheltová, R. Kotlín, J. W. Weisel, M. Malý, J. E. Dyr // Free Radic. Biol. Med. – 2009. – Vol. 47 (12). – P. 1707 – 1710.

11. **Терентьева, В. А.** Биофизические механизмы контактной активации свертывания плазмы крови / В. А. Терентьева, А. Н. Свешникова, М. А. Пантелеев // Биофизика. – 2017. – Т. 62, № 5. – С. 909 – 919.

12. **Obydennyy, S. I.** Dynamics of calcium spiking, mitochondrial collapse and phosphati-dylserine exposure in platelet subpopulations during activation / S. I. Obydennyy, A. N. Sveshnikova, F. I. Ataullakhanov, P. Mikhail // Journal of Thrombosis and Haemostasis. – 2016. – Vol. 14, No 9. – P. 1867 – 1881.

13. **Hartwig, J. H.** The platelet: form and function / J. H. Hartwig // Seminars in hematology. – 2006. – 43(1 Suppl 1): S94-100.DOI:10.1053/j.seminhematol.2005.11.004.

14. **Казаринов, К. Д.** Действие КВЧ низкой интенсивности на окислительные процессы / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // Научные труды VIII Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». – СПб, 2018. – С. 43.

15. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2 (537) . – С. 62 – 75.

Статья поступила 8 июля 2019 г.

4(543).indd 83 20.12.2019 9:33:34

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.385.6

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ С ИДЕАЛИЗИРОВАННЫМИ ФУНКЦИЯМИ ОТ ВРЕМЕНИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин

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

Проведен анализ эффективности генераторов с идеализированными функциями от времени тока и напряжения, взятыми в виде синусоид со «срезанными» минимумами и максимумами. Показано, что наибольшим КПД обладают генераторы, в которых функции от времени тока и напряжения близки к комбинациям: синусоида – последовательность узких импульсов, синфазных с минимумами синусоиды; последовательность полусинусоид – противофазный меандр.

КС: анализ, эффективность генератора, идеализированная функция

THE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF OSCILLATORS WITH IDEALIZED FUNCTIONS OF CURRENT AND VOLTAGE TIME

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin

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

The analysis of the efficiency of oscillators with idealized functions of current and voltage time taken in the forms of sinusoids with «cut» minima and maxima is carried out. It is shown that those oscillators have the highest efficiency in which the functions of the current and voltage time are close to combinations: sinusoid – a sequence of narrow pulses in phase with the sinusoid minima; the sequence of half-sinusoid – antiphase meander.

Keywords: analysis, oscillator efficiency, idealized function

Генератор СВЧ-колебаний, схематично изображенный на рис.1, содержит источник постоянного тока *1*, контурную высокочастотную систему, состоящую из линейных пассивных элементов *2*, полезную нагрузку *3* и активный элемент *4*, преобразующий энергию постоянного тока в колебательную энергию. Электрические характеристики генератора определяются видом зависимости от времени тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$. В стационарном режиме ток и напряжение являются периодическими функциями времени. Средние за период T значения $\langle i(t)\rangle = I_0$ и $\langle u(t)\rangle = U_0$ этих функций определяют мощность $P_0 = I_0 U_0$, потребляемую активным элементом от источника постоянного тока. Мощность переменного тока, выделяемая этим элементом во внешнюю цепь, определяется как $P_{\text{пер}} = I_0 U_0 - \left[\int_0^T i(t)u(t)\,dt\right]/T$. Если в полезной нагрузке

4(543).indd 84 20.12.2019 9:33:34

используется весь переменный сигнал $i(t) - I_0$, $u(t) - U_0$, то эффективность активного элемента цепи можно характеризовать величиной полного электронного КПД:

$$\eta_{\text{п}} = P_{\text{пер}} / P_0 = 1 - \int_0^T i(t)u(t)\,dt / (TI_0U_0). \quad (1)$$

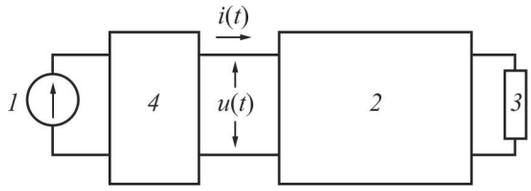


Рис.1. Схематичное изображение генератора

Однако, как правило, из ВЧ-сигнала выделяется одна из его гармонических составляющих, чаще всего основная с частотой $\omega = 2\pi/T$. Соответствующий этому случаю электронный КПД генератора выражается через комплексные амплитуды гармонических составляющих тока $I(\omega)$ и напряжения $U(\omega)$:

$$\eta = \eta(\omega) = \frac{\text{Re}\{I(\omega)U^*(\omega)\}}{2I_0U_0}. \quad (2)$$

Здесь $U^*(\omega)$ – комплексно-сопряженная величина. Очевидно, что всегда $\eta < \eta_{\text{п}} < 1$.

Согласно (1) и (2), значения КПД η и $\eta_{\text{п}}$ определяются видом периодических функций $i(t)$ и $u(t)$. Последние зависят как от свойств активного элемента (механизма его работы, электрического режима и т. п.), так и от характеристик системы, и для каждого конкретного генератора требуется специальный анализ. Однако для оценки максимальных значений КПД генераторов и формулировки требований к активному элементу и контурной системе целесообразно выяснить, как зависят значения КПД генератора от вида функций $i(t)$ и $u(t)$, отвлекаясь от конкретных способов реализации этих функций. Представляет интерес провести общий анализ, пригодный для оценок КПД генераторов на диодах и транзисторах. Для такого анализа используются характерные зависимости $i(t)$ и $u(t)$, удовлетворяющие условию [1] для мощности на n-й гармонике

$$P_n = 0,5\,\text{Re}\{I(n\omega)U^*(n\omega)\} < 0, \quad (3)$$

учитывающему, что в генераторе, контурная система которого составлена из пассивных элементов, активный элемент является единственным источником СВЧ-колебаний. Поскольку ток и напряжение входят в формулы (1) и (2) равноправно, удобно их зависимости от времени t (или безразмерной величины $\xi = \omega t$) характеризовать безразмерными функциями $H_1(t)$ и $H_2(t)$, одна из которых соответствует $i(t)/I_{\max}$, а другая – $u(t)/U_{\max}$ ($I_{\max}$ и $U_{\max}$ – максимальные значения тока и напряжения).

В работе рассматриваются функции $H_1(t)$ и $H_2(t)$ в виде синусоид со «срезами», сдвинутых друг относительно друга на угол $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ (рис. 2, *а*, *б*). В зависимости от положения «среза» это могут быть либо недеформированные синусоиды H_{10}, H_{20}, либо синусоиды со «срезанным» минимумом (низом) $H_{1\text{н}}$, $H_{2\text{н}}$, максимумом (верхом) $H_{1\text{в}}$, $H_{2\text{в}}$, минимумом и максимумом $H_{1\text{нв}}$, $H_{2\text{нв}}$. Изменяя величины углов «среза», можно получить большой класс периодических функций от синусоиды до последовательности прямоугольных импульсов, близких к реальным зависимостям $i(t)$ и $u(t)$ в генераторах.

4(543).indd 85 20.12.2019 9:33:35

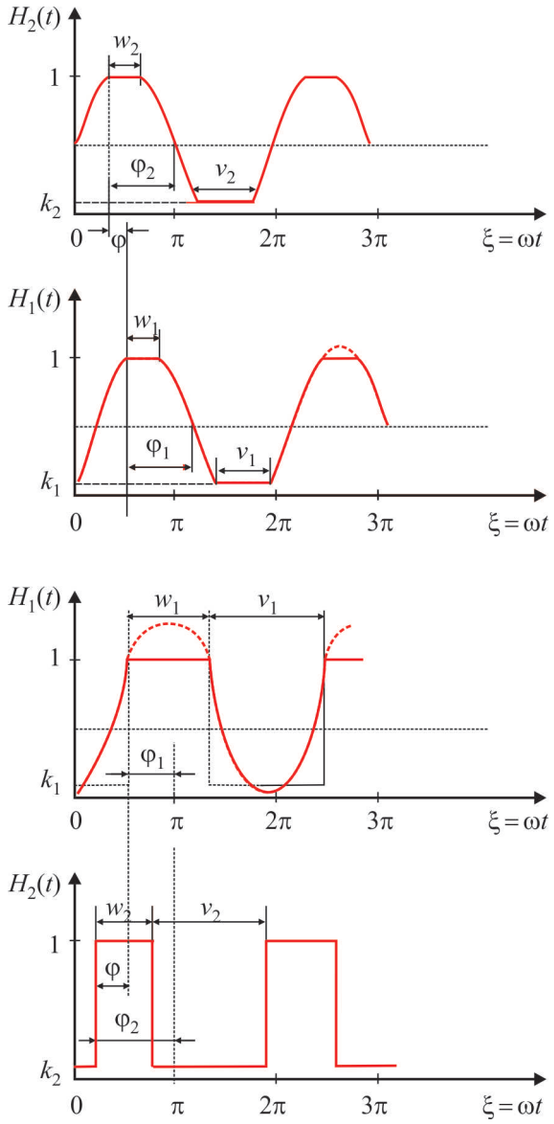


Рис. 2. Идеализированные формы тока и напряжения

Используя (2), найдем выражение для КПД на первой гармонике ($n = 1$):

$$\eta = \eta(w_1, w_2, v_1, v_2) = \frac{-0,5\left\{\left[\pi - f(w_1) - f(v_1)\right]\left[\pi - f(w_2) - f(v_2)\right]\cos\left[0,5(w_2 - w_1) - \varphi\right]\right\}}{\left[\pi/b_1 + q(w_1) - q(v_1)\right]\left[\pi/b_2 + q(w_2) - q(v_2)\right]}, \quad (4)$$

где w_1, v_1, w_2, v_2 – соответственно углы «среза» функций $H_1(t)$ и $H_2(t)$;

$$f(z) = 0,5[z - \sin(z)], \quad q(z) = 0,5z\cos(0,5z) - \sin(0,5z);$$
$$b_1 = (1 - k_1)/[k_1\cos(0,5w_1) + \cos(0,5v_1)]; \quad (5)$$
$$b_2 = (1 - k_2)/[k_2\cos(0,5w_2) + \cos(0,5v_2)].$$

Через k_1, k_2 обозначены величины, обратные перепадам функций $H_1(t)$ и $H_2(t)$ (см. рис. 2).

4(543).indd 86 20.12.2019 9:33:35

При анализе выражения (4) необходимо учитывать условие (3) физической реализуемости функций $H_1(t)$ и $H_2(t)$. С этой целью, вычислив коэффициенты Фурье для $H_1(t)$ и $H_2(t)$, определим мощность на n-й гармонике:

$$P_n / \left(I_{\max} U_{\max}\right) = \tag{6}$$

$$= \frac{0,5\left(1-k_1\right)\left(1-k_2\right)\cos\left[n\left(0,5\left(w_2-w_1\right)-\varphi\right)\right]}{\left\{\left[\cos\left(0,5w_1\right)+\cos\left(0,5v_1\right)\right]\left[\cos\left(0,5w_2\right)+\cos\left(0,5v_2\right)\right]\right\}\left[f_n\left(w_1\right)-\left(-1\right)^n f_n\left(v_1\right)\right]\left[f_n\left(w_2\right)-\left(-1\right)^n f_n\left(v_2\right)\right]},$$

где $f_n(z) = \sin[0,5z(n-1)]/(n-1) - \sin[0,5z(n+1)]/(n+1)$.

Выражение (6) удовлетворяет неравенствам (3) только для следующих попарных комбинаций функций $H_1(t)$ и $H_2(t)$:

1) $H_{10}(t)$ и $H_{20}(t)$;	5) $H_{1в}(t)$ и $H_{2н}(t)$;
2) $H_{10}(t)$ и $H_{2и}(t)$;	6) $H_{1в}(t)$ и $H_{2нв}(t)$;
3) $H_{10}(t)$ и $H_{2н}(t)$;	7) $H_{1н}(t)$ и $H_{2нв}(t)$;
4) $H_{10}(t)$ и $H_{2нв}(t)$;	8) $H_{1нв}(t)$ и $H_{2нв}(t)$.

(7)

Поскольку функции $H_1(t)$ и $H_2(t)$ взаимозаменяемые, то эти же комбинации сохранятся, если поменять местами функции.

Рассмотрим значения КПД генераторов на первой основной гармонике (4) для каждой из выписанных комбинаций (7).

1. $w_1 = w_2 = v_1 = v_2 = 0$. Выражение для КПД (4) в этом случае имеет известный вид:

$$\eta = \eta_1 = -0,5K\cos\left(\varphi\right), \tag{8}$$

где

$$K = (1 - k_1)(1 - k_2)/[(1 + k_1)(1 + k_2)]. \tag{9}$$

Максимум η_1 соответствует противофазным функциям $H_1(t)$ и $H_2(t)$.

2. $w_2 = v_1 = v_2 = 0$. Зависимость КПД η_2 от угла «среза» $\theta = w_1$ имеет вид:

$$\eta_2 = \frac{-0,5k\left[\pi - f\left(\theta\right)\right]\cos\left(\varphi - 0,5\theta\right)}{q\left(\theta\right) + \pi\left[1 + k_1\cos\left(0,5\theta\right)\right]/\left(1-k_1\right)}, \tag{10}$$

где $k = (1 - k_2)/(1 + k_2)$.

Для противофазных функций $H_1(t)$, $H_2(t)$ и $k_1 = 0$ эта зависимость приведена в виде кривой *2* на рис. 3 (номера кривых соответствуют комбинациям (7)). Видно, что «срез» максимума функции $H_1(t)$ снижает КПД по сравнению с (8).

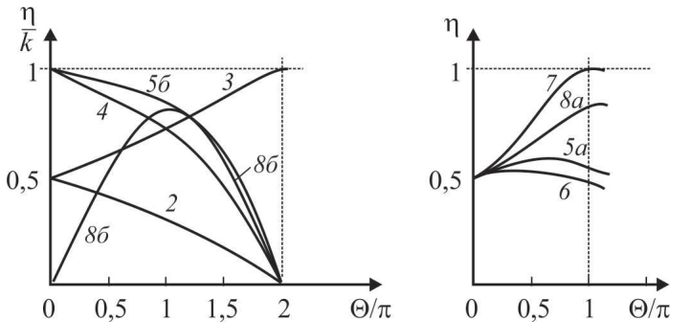


Рис. 3. Зависимости КПД на первой гармонике η от угла «среза» θ для $k_1 = k_2 = 0$ при различных формах тока и напряжения:
5б – $\eta_5 / \eta_{5п}$; *8б* – $\eta_{8б} / \eta_{8бп}$

4(543).indd 87 20.12.2019 9:33:35

3. $w_1 = w_2 = v_2 = 0$. В отличие от предыдущего случая, с ростом $\theta = v_1$ величина КПД η_3, определяемая выражением

$$\eta_3 = \frac{-0,5k\left[\pi - f(\theta)\right]\cos(\varphi)}{\pi\left[k_1 + \cos(0,5\theta)\right]/(1-k_1) - q(\theta)}, \tag{11}$$

возрастает, приближаясь к максимально возможному значению $\eta_{3max} = K$ при $k_1 = 0$, $\varphi = \pi$ и $\theta = 2\pi$, когда $H_1(t)$ есть последовательность узких импульсов, синфазных с минимумами $H_2(t)$. Зависимость $\eta_3(\theta)$ при $k_1 = 0$ изображена на рис. 3 (кривая *3*). Наибольшие значения КПД и соответствующие им углы «среза» для комбинаций 1…3 как функции от k_1 приведены на рис. 4.

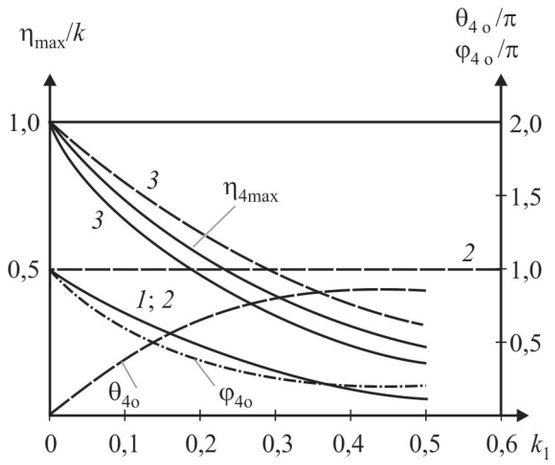


Рис. 4. Зависимости максимальных КПД η_{max} (сплошные линии), оптимальных углов θ_o (пунктир) и φ_o (штрих-пунктир) от коэффициента k_1 для гармонической функции $u(t)$ (случай 1– 4)

4. $w_2 = v_2 = 0$. Анализ выражения (4) для этого случая показывает, что наибольший КПД достигается при

$$w_1 + v_1 = 2\pi, \tag{12}$$

т.е. когда функция $H_1(t)$ есть последовательность прямоугольных импульсов, причем начало каждого импульса сдвинуто относительно синусоидального напряжения на угол φ (рис. 2, *а*, *в*). Из формулы (4) с учетом условия (12) получаем выражение

$$\eta_4 = \frac{-2k(1-k_1)\sin(0,5\theta)\cos(\varphi+0,5\theta)}{2\pi k_1 + \theta(1-k_1)}, \tag{13}$$

где $\theta = w_1 = 2\pi - v_1$.

Оптимальные длительности импульса θ_4 и соответствующие им максимальные величины КПД η_{4max} зависят от сдвига фаз φ и k_1 (рис. 5). Для каждого k_1 существует угол сдвига $\varphi = \varphi_o$, при котором η_{4max} принимает наибольшее значение, а $\theta_4 = \theta_{4o}$. При $k_1 = 0$ КПД $\eta_{4max} = k$, если функция $H_1(t)$ есть последовательность узких ($\theta_{4o} = 0$) импульсов, совпадающих по фазе с минимумами $H_2(t)$. С ростом k_1 φ_o стремится к $\pi/2$, а θ_{4o} – к π (рис. 5), то есть оптимальной формой $H_1(t)$ становится меандр.

Из рис. 5 видно, что при гармонической функции $H_2(t)$ и функции $H_1(t)$ в виде последова-

4(543).indd 88 20.12.2019 9:33:36

тельности прямоугольных импульсов с оптимальной длительностью θ_{4o} величина КПД незначительно отличается от КПД η_{3max} для гармонической $H_2(t)$ и функции $H_1(t)$, представленной последовательностью импульсов с пологим фронтом и оптимальной длительностью плоской вершины θ_3 (рис. 2, *в*, пунктирная кривая).

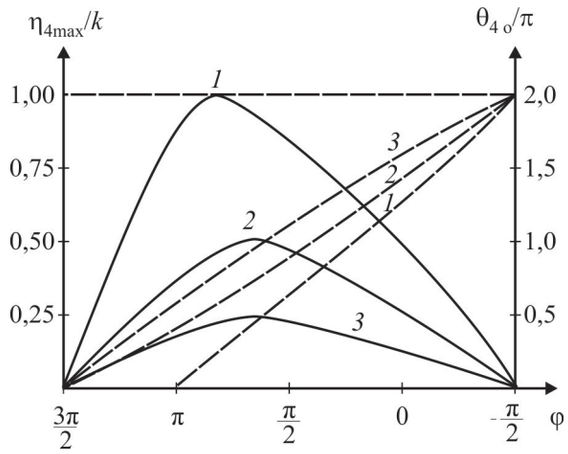


Рис. 5. Зависимости максимального КПД η_{4max} (сплошная линия) и оптимальной длительности импульса θ_{4o} (пунктир) от сдвига фаз φ между гармонической функцией $u(t)$ и импульсной функцией $i(t)$:
1 – $k_1 = 0$; *2* – $k_1 = 0{,}2$; *3* – $k_1 = 0{,}5$

5. $w_1 = v_2 = 0$. Физически реализуемы в этом случае только противофазные функции $H_1(t)$ и $H_2(t)$ с равными углами «среза» $\theta = w_2 = v_1$. Зависимость

$$\eta_5(\theta) = \frac{2\left[\pi - f(\theta)\right]}{2\left\{\pi\left[k_1 + \cos(\theta/2)\right]/(1-k_1) - q(\theta)\right\}\left\{\pi\left[k_2\cos(\theta/2)+1\right]/(1-k_2) + q(\theta)\right\}} \qquad (14)$$

для $k_1 = k_2 = 0$ представлена на рис. 3 (кривая *5*). Анализ формулы (14) показывает, что для произвольных k_1 и k_2 существует оптимальный угол θ_{5o}, меньший π, но приближающийся к π при уменьшении k_2 и увеличении k_1 (рис. *6*, кривая *5*). Максимальные значения $\eta_{5max} = \eta_5(\theta_{5o})$ на несколько процентов превосходят значения КПД (8) при $\varphi = \pi$.

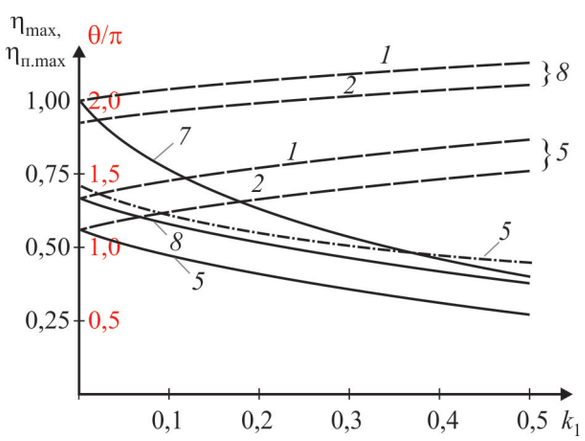


Рис. 6. Зависимости максимального КПД η_{max} (сплошная линия), полного КПД $\eta_{п.max}$ (штрихпунктир) и оптимальной длительности θ_{5o} (пунктир) от k_1:
1 – $k_2 = 0$; *2* – $k_2 = 0{,}2$

4(543).indd 89 20.12.2019 9:33:36

В комбинациях 1…4 из-за наличия среди тока или напряжения чистой синусоиды полный КПД совпадает с КПД на первой гармонике. В случае 5 такого совпадения уже нет, причем отношение $\eta_5/\eta_{5п}$ определяется только величиной угла «среза» θ (рис. 3).

$$\eta_5 / \eta_{5п} = \frac{\left[\pi - f(\theta)\right]^2}{\pi^2 - 2q^2(\theta) + 0{,}5\pi q(2\theta)}.$$

Это соотношение, характеризующее долю первой гармоники во всей переменной мощности, уменьшается с ростом k_1 и уменьшением k_2. Максимальные значения η_{5max} и $\eta_{5п.max}$ в зависимости от k_1 приведены на рис. 6 (кривые *5*).

6. $v_2 = 0$. Для таких функций мощность $P_n < 0$ при $w_1 = w_2 = v_1 = \theta$ и $\varphi = \pi$. Зависимость $\eta_6(\theta)$, изображенная при $k_1 = k_2 = 0$ на рис. 3 (кривая *6*), для всех $0 < \theta < \pi$ мало отличается от 0,5.

7. $w_2 = 0$. В этом случае физически реализуемы только противофазные функции $H_1(t)$ и $H_2(t)$ с равными углами «среза» ($w_1 = v_2 = v_1 = \theta$). Зависимость $\eta_7(\theta)$ при $k_1 = k_2 = 0$ – на рис. 3 (кривая *7*). С ростом $\theta < \pi$ форма напряжения приближается к последовательности полусинусоид, форма тока – к меандру, а $\eta_7(\theta)$ – к наибольшему значению $\eta_{7max} = \eta_7(\pi) = 1$. Для произвольных k_1 и k_2 зависимость

$$\eta_{7max} = \eta_7(\pi) = (1 - k_1)(1 - k_2)/[(1 + k_1)(1 - k_2 + \pi k_2)] \qquad (15)$$

изображена на рис. 6 при $k_2 = 0$ (кривая *7*). Выражение для полного КПД $\eta_{7п}$ в случае $\theta = \pi$ совпадает с (15), то есть мощность на высших ($n > 1$) гармониках не выделяется. В этом случае ряд Фурье функции $H_2(t)$ содержит кроме основной только четные гармоники, а ряд Фурье функции $H_1(t)$ – только нечетные гармоники.

8. При этой комбинации выражение (6) не положительно в двух случаях: а) $w_1 = w_2 = v_1 = v_2 = \theta$ и $\varphi = \pi$; б) $i(t)$ и $u(t)$ – последовательности прямоугольных неперекрывающихся импульсов, сдвинутых друг относительно друга на угол φ (рис. 2, *в*, *г*). В первом случае выражение для КПД легко получается из (4):

$$\eta_{8а}(\theta) = K\,[\pi - 2f(\theta)]^2 / [2\pi^2\cos^2(0{,}5\theta)]. \qquad (16а)$$

Зависимость $\eta_{8а}(\theta)$ имеет максимум при $\theta = \pi$, то есть когда ток и напряжение противофазны. Функция $\eta_{8а}(\theta)$ при $k_1 = k_2 = 0$ изображена на рис. 3 (кривая *8а*). Значение $\eta_{8amax} = 8K/\pi^2$ приблизительно на треть больше соответствующих значений КПД (8) для гармонических функций.

Для случая «б», учитывая условия импульсности функций $i(t)$ ($w_1 + v_1 = 2\pi$) и $u(t)$ ($w_2 + v_2 = 2\pi$) и условия физической реализуемости: $w_1 + w_2 = 2\pi$ (или $v_1 + v_2 = 2\pi$), $\varphi = w_2$ (импульсы без перекрытия), из (4) получим

$$\eta_{8б}(\theta) = \frac{2(1-k_1)(1-k_2)\sin^2(\theta/2)}{\left[\pi k_2 + (1-k_2)(\pi - \theta/2)\right]\left[\pi k_1 + (1-k_1)\theta/2\right]}, \qquad (16б)$$

где $\theta = w_1 = 2\pi - w_2$.

Зависимость $\eta_{8б}(\theta)$, изображенная на рис. 3 (кривая *8б*) при значениях $k_1 = k_2 = 0$, имеет максимум $\eta_{8бmax}$. Функция $\eta_{8бmax}(k_1)$ при $k_2 = 0$ представлена на рис. 6. Там же приведены оптимальные значения угла «среза» θ_{8o} (кривые *8*) для различных k_1 и k_2. При $k_1 = k_2$ имеем $\theta_{8o} = \pi$ и $\eta_{8бmax} = 8[(1 - k_1)/(1 + k_1)]^2/\pi^2$.

4(543).indd 90 20.12.2019 9:33:36

Если k_1 не равно k_2, то оптимальные длительности импульсов θ_{8o} несколько отличаются от π. При $k_2/k_1 > 1$ для получения максимальных значений КПД импульсы $H_2(t)$ должны быть короче импульсов $H_1(t)$, тогда как при $k_2/k_1 < 1$ наоборот. Расчеты показывают, что отклонение $\eta_{8бmax}$ от $\eta_{8б}(\pi)$ при изменении k_1 от 0 до 0,5 составляет 6 %. Полный КПД для случая «б» определяется выражением

$$\eta_{8бп}(\theta) = \frac{(1-k_1)(1-k_2)(\pi-\theta/2)(\theta/2)}{\left[\pi k_2 + (1-k_2)(\pi-\theta/2)\right]\left[\pi k_1 + (1-k_1)\theta/2\right]}. \qquad (17)$$

Отношение $\eta_{8б}/\eta_{8бп}$ не зависит от k_1 и k_2 и как функция θ изображено на рис. 3. При θ не равном π помимо основной и нечетных гармоник возбуждаются четные гармоники и снижается мощность на основной частоте.

Остальные физически реализуемые комбинации функций $u(t)$ и $i(t)$ менее эффективны.

Анализ показывает, что наибольшие значения КПД могут быть достигнуты в генераторах, в которых зависимости тока и напряжения от времени близки к комбинациям: синусоида – последовательность узких импульсов, синфазных с минимумами синусоиды (пп. 3, 4); меандр – последовательность противофазных полусинусоид (п. 7). Несколько меньшие значения КПД соответствуют последовательности прямоугольных импульсов (п. 8).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тагер, А. С.** Полупроводниковые инжекционно-пролетные диоды с динамическим отрицательным сопротивлением / А. С. Тагер // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1974. – Т.17, № 1. – С. 3 – 18.

Статья поступила 18 сентября 2019 г.

4(543).indd 91 20.12.2019 9:33:36

ЭКОНОМИКА

УДК 378:658

ФОРМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ

Н. О. Курдюкова[1], **А. А. Вершинин**[2]

[1]*ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (МГОТУ), г. Королев*

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

Рассматриваются вопросы взаимосвязей «вуз – предприятие», а также формы и методы осуществления этих взаимосвязей в мире. Рассмотрены формы взаимодействия на предприятии наукоемкого машиностроения и предложены альтернативные варианты осуществления взаимодействия.

КС: взаимосвязь «вуз – предприятие», сотрудничество, трудоустройство

FORMS AND PROSPECTS OF COOPERATION BETWEEN ENTERPRISES AND EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN MODERN BUSINESS CONDITIONS

N. O. Kurdyukova[1], **A. A. Vershinin**[2]

[1]*GBOU VO MO «Technological University», Korolev*

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

The issues of the relationship «university – enterprise», as well as forms and methods of implementing these relationships in the world are considered. The forms of interaction of high technology engineering at the enterprise are considered and alternative options for the implementation of interactions are proposed.

Keywords: «university – enterprise» relationship, cooperation, job placement

Для сохранения конкурентоспособности современного предприятия в мировой хозяйственной системе необходимо уделять особое внимание обеспеченности ресурсами, в том числе трудовыми ресурсами. Ключевой фактор конкурентоспособности предприятия при построении экономики, основанной на знаниях, – это интеллектуальный капитал, значение которого в последние десятилетия непрерывно возрастает. Это означает, что растет значимость для предприятий и человеческих активов как фундаментальной составляющей интеллектуального капитала; следовательно, залогом успеха предприятия в экономике, основанной на знаниях, становится обеспечение и эффективное управление нематериальными активами, и в первую очередь человеческим капиталом.

Планирование и прогнозирование потребности в квалифицированном персонале является важнейшей стратегической задачей для предприятия любой сферы деятельности. Об обеспеченности

4(543).indd 92 20.12.2019 9:33:36

трудовыми ресурсами предприятие должно заботиться самостоятельно, формируя совместно с вузами компетенции будущего специалиста, активно участвуя в учебном процессе как на этапе организации и проведения практик, так и на этапе подготовки и оценки выпускных квалификационных работ [1]. Современный специалист должен быть адаптирован к работе в глобальной экономической системе, должен обладать знаниями и умениями в соответствии с требованиями рынка, которые формируются непосредственно на различных отраслевых и региональных рынках. Следовательно, современный специалист должен обладать комплексом знаний, удовлетворяющих потребностям этих рынков, что достаточно сложно при условии получения стандартного образования.

Глубина и интенсивность взаимосвязей «вуз – предприятие» во многом предопределяются государственной политикой в сфере образования. Эти действия обычно основываются на фиксации в государственных программах и законодательных актах необходимости развития связей высшей школы и предприятий [2]. О глубине государственного подхода вполне обоснованно судить по следующим критериям:

– признание или непризнание на государственном уровне необходимости развития связей высшей школы и предприятий;

– наличие или отсутствие законодательных актов и государственных программ по развитию этих взаимосвязей;

– наличие или отсутствие специализированных органов, координирующих взаимоотношения вузов и предприятий;

– наличие или отсутствие практических действий государственного характера, стимулирующих развитие этих взаимосвязей.

В различных странах реализуются разные формы сотрудничества предприятий и вузов.

В странах Евросоюза, таких, как Франция и Германия, сотрудничество организовано в форме стажировок студентов на предприятиях, вовлечения профессионалов-практиков в преподавательскую деятельность; вузами и предприятиями созданы совместные программы подготовки специалистов. Причем в Бельгии и Голландии обучение на предприятиях через регулярные стажировки является ключевым элементом профессионального образования и закреплено законодательно. В США повсеместно присутствует участие руководителей предприятий в управлении вузами, в том числе через попечительские советы, что позволяет своевременно и качественно удовлетворять актуальные потребности предприятий. Во многих странах в вузах организованы службы трудоустройства, которые располагают банками данных с информацией о спросе на выпускников и их предложений и помогают выпускникам – молодым специалистам подобрать вакансию, соответствующую их квалификации.

Формы и методы осуществления взаимосвязи вузов и предприятий в рамках как государственных, так и частных инициатив представлены в таблице.

Формы и методы осуществления в различных странах взаимосвязи «вуз – предприятие»

№ п/п	Содержание формы или метода	Страна
1	Постоянный контакт университетов с рынком труда с целью отслеживания его текущих и прогнозирования перспективных требований	США

4(543).indd 93 20.12.2019 9:33:36

Окончание таблицы

№ п/п	Содержание формы или метода	Страна
2	Оценка успешности учебных курсов среди студентов и учебных программ среди абитуриентов и выпускников, периодические исследования профессиональной карьеры выпускников, использование полученной информации для корректировки курсов и программ	США
3	Учет требований работодателей при разработке учебных программ	США, Италия, Франция
4	Профессионализация высшего образования – сокращение специальностей и специализаций в рамках многопрофильного обучения	Германия, Франция, Китай
5	Развитие партнерских связей, включающих организацию стажировок на предприятии, вклад предприятия в модернизацию образовательного процесса, вовлечение профессионалов-практиков в преподавательскую деятельность; создание вузами и предприятиями совместных программ подготовки специалистов	Франция, США, Германия
6	Обучение на предприятиях через регулярные стажировки как ключевой элемент профессионального образования	Франция, Бельгия, Голландия
7	Участие руководителей предприятий в управлении вузами, в том числе через попечительские советы	США, Франция
8	Развитие различных форм содействия трудоустройству выпускников:	
	поиск вузом мест стажировок	Франция
	поиск вузом мест распределения	Япония, США
	организация в вузах служб трудоустройства	Многие страны
	создание банков данных с информацией о спросе на выпускников и их предложений	Многие страны
	предоставление вузами «гарантии» своим выпускникам на трудоустройство, предусматривающей определенное возмещение в случае его нетрудоустройства в течение определенного периода после окончания вуза	Япония
	предоставление предприятиями неформальных гарантий, предусматривающих обязательство трудоустройства выпускника после окончания вуза	Япония
	использование помощи выпускников прежних лет, личных связей и рекомендательных писем профессоров в трудоустройстве молодых специалистов	США, Япония

Как видно из таблицы, спектр конкретных форм и методов взаимодействия вузов с предприятиями достаточно насыщен. Кроме того, эти формы и методы не статичны: постоянно совершенствуются существующие, появляются новые, главной движущей силой расширения которых для предприятий является заблаговременный отбор и гарантирование получения наиболее перспективных специалистов, для вузов – повышение качества подготовки и содействие трудоустройству выпускников.

На научно-производственных предприятиях обязательно должно происходить взаимодействие «вуз – предприятие». Передача опыта и знаний от старшего поколения к младшему, обучение без отрыва от производства – неотъемлемая составляющая образовательного процесса в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

4(543).indd 94 20.12.2019 9:33:36

Филиал РТУ МИРЭА при АО «НПП «Исток» им. Шокина» был создан совместным приказом Государственного комитета по электронной технике и Минвуза РСФСР № 657/172 от 19.09.1962 г. как завод-втуз Московского энергетического института при НИИ электронной техники [4]. В настоящий момент он является ведущим научным и образовательным центром наукограда Фрязино и всего северо-восточного региона Подмосковья. Предприятие, понимая важность взаимодействия «вуз – предприятие», активно проводит агитационную политику при поступлении, обеспечивает рабочими местами всех желающих выпускников. В последние годы появилась еще одна тенденция: предприятие начало заключать целевые договора с ведущими вузами страны, такими, как МГТУ им. Н. Э. Баумана, Московский авиационный институт й2 (МАИ) и т. д., с последующим трудоустройством на предприятие.

Предприятие активно занимается расширением образовательной деятельности и привлечением молодых кадров, это необходимо и чтобы избежать «утечки умов». Предприятию необходимо активно продолжать пятый метод взаимодействия, указанный в таблице. Создание узконаправленных специальностей необходимо для работы на сверхточном оборудовании. Также необходимо использовать восьмой метод (см. таблицу), по предоставлению гарантий на последующее трудоустройство. Если же это невозможно по стечению обстоятельств, то необходимо или дать возможность перепрофилироваться будущему сотруднику или предоставить похожее место работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукичев, Г. А.** В поисках эффективного взаимодействия высшего образования и работодателей / Г. А. Лукичев // Экономика образования. – 2005. – № 4. – С. 5 – 21.

2. Новая индустриализация и умная экономика: вызовы и возможности: материалы Пермского конгресса ученых-экономистов (г. Пермь, ПГНИУ, 12 февраля 2015 г.): в 2 т. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. – Т. 2. – С. 85.

3. **Кибанова, А. Я.** Управление персоналом организации: учебник / Под. ред. А. Я. Кибанова. – 4-е изд., доп. и перераб. – М.: ИНФРА-М, 2018. – С. 268 – 279.

4. Филиал МИРЭА [Электронный ресурс]. – http:www.istokmw.ru/filial-mirea/ (дата обращения 01.09.2019).

Статья поступила 3 октября 2019 г.

4(543).indd 95 20.12.2019 9:33:36

ИСТОРИЯ

УДК 53:51(09)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ ВЛАДИМИРА СЕРГЕЕВИЧА ЛУКОШКОВА

А. К. Балыко

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL HERITAGE OF VLADIMIR SERGEYEVICH LUKOSHKOV

A. K. Balyko

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

В. С. Лукошков
(1906 – 1975 гг.)

Владимир Сергеевич Лукошков родился 13 июля 1906 г. в г. Сестрорецке Петербургской губернии в семье служащего из мещан.

Как научный работник он стал формироваться ещё будучи студентом Ленинградского физико-механического института (Ленинградского политехнического института). Его учителями были такие известные учёные, как А. Ф. Иоффе, Н. Н. Семенов, А. Н. Щукин, Г. А. Гринберг и многие другие. Свою трудовую деятельность ученого Владимир Сергеевич начал в 1931 году в Отраслевой вакуумной лаборатории при ленинградском заводе «Светлана», которой заведовал будущий академик С. А. Векшинский. В этой лаборатории Владимир Сергеевич возглавил небольшую группу теоретиков, в задачу которой входил теоретический анализ и расчёт различных типов электронных ламп с сетками.

Огромную роль в становлении его как научного работника сыграл выдающийся советский ученый Г. А. Гринберг, который сразу обратил внимание на талантливого молодого инженера, помог ему правильно сориентироваться во множестве задач и проблем, стоявших перед теоретиками. В 1935 году они публикуют в «Журнале теоретической физики» работу «К теории магнетронов с разрезным анодом». Чуть позднее В. С. Лукошков вновь обращается к теории магнетронов с разрезным катодом, исследуя природу возникновения отрицательного сопротивления в этих приборах. Эти работы Владимира Сергеевича являются первыми теоретическими работами, посвященными исследованию электронных процессов во

4(543).indd 96 20.12.2019 9:33:37

взаимно перпендикулярных квазистатическом электрическом и статическом магнитном полях, появившимися до изобретения многорезонаторного магнетрона. Они явились основой для понимания физических процессов, происходящих в магнетронах.

Начальные годы творчества В. С. Лукошкова связаны с теорией электронных ламп, причем с возможным аналитическим решением ряда задач, в том числе и двумерных. Такой двумерной задачей, с блеском решенной Владимиром Сергеевичем чисто аналитическими методами, является задача о расширении под влиянием собственного пространственного заряда длинного цилиндрического идеально сфокусированного электронного пучка, движущегося в пространстве, в котором в отсутствие пучка напряженность поля равна нулю.

Одна из актуальнейших задач, которая стояла в начале тридцатых годов перед разработчиками электронных приборов, заключалась в улучшении основных параметров электронных ламп. В 1936 г. Владимир Сергеевич Лукошков начал серию работ по теории триодов и многосеточных ламп. Им подробно исследованы электронные процессы между двумя плоскопараллельными идеальными сетками при условии, что электроны движутся только в направлении, перпендикулярном плоскости сеток, и имеют одинаковую скорость в каждой плоскости, параллельной сеткам. Рассмотрен также случай усложнения указанной задачи, связанный с отражением электронов тормозящим полем, т. е. созданием встречных электронных потоков, а также с многократными колебаниями электронов около одной из сеток. Решение этих задач имело огромное значение для теории триодов и многосеточных ламп, а также для теории отражательного клистрона.

В результате проведенных исследований электронных ламп с сетками Владимир Сергеевич обосновал метод эквивалентной замены, известный как «метод усредненных граничных условий», который широко используется при расчёте параметров замедляющих систем типа «спираль», «гребенка», решетчатых параболических отражателей СВЧ-антенн, других сложных электродинамических систем и электронных приборов СВЧ. Итогом этого направления научных исследований стала его диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Теоретические основания расчета характеристик и параметров электронных ламп с сетками», которую Владимир Сергеевич с блеском защитил на ученом совете Ленинградского электротехнического института в 1941 году.

При исследовании процессов в электровакуумных приборах приходится одновременно решать уравнения движения электронов и уравнения для поля с источниками. В общем случае решения в аналитическом виде не существует, поэтому задача решалась методом последовательных приближений. Существенным этапом метода последовательных приближений является решение задачи о построении электронных траекторий по заданному электрическому полю какого-либо промежуточного приближения. В. С. Лукошков впервые предложил использовать для этого графоаналитические методы построения электронных траекторий.

Эти работы позволили ему открыть и обосновать пионерное направление в проектировании электронных приборов – электролитические методы и выполнить исследования электростатических и магнитных полей. Метод моделирования магнитного поля впервые был применен В. С. Лукошковым к изучению высокочастотного магнитного поля, возникающего при высокочастотной закалке вблизи закаливаемого объекта. Работы Владимира Сергеевича в области применения метода электролитической ванны к проблемам промышленной электроники отражены в ряде статей и многочисленных технических отчетах теоретического отдела завода «Светлана», которым руководил В. С. Лукошков.

4(543).indd 97 20.12.2019 9:33:37

В первые годы Великой Отечественной войны Владимир Сергеевич работал в Новосибирске, куда было эвакуировано из Ленинграда Конструкторское бюро завода «Светлана». В эти годы тематика его работ несколько изменилась. Потребности войны стимулировали бурное развитие радиолокации – нового эффективного средства противовоздушной обороны. В 1943 году после выхода Постановления ГКО о создании в городе Фрязино НИИ-160 В. С. Лукошкова перевели во Фрязино, где была создана лаборатории 95, в которой под руководством Владимира Сергеевича работали переехавшие вместе с ним ленинградские сотрудники.

К 1948 году на базе этой лаборатории, расширившейся за счет местных жителей и молодых специалистов из других городов, был создан теоретический отдел, состоящий из четырех лабораторий: теоретической, радиофизической, электронной оптики и вычислительной.

Основные результаты работы отдела в период с 1943 по 1953 годы отражены в воспоминаниях Владимира Сергеевича, опубликованных в настоящей статье. Работы В. С. Лукошкова этого периода можно разделить на две группы: относящиеся непосредственно к самим электронным приборам и к проблемам использования приборов в аппаратуре. К первой группе следует отнести работы по расчету СВЧ-явлений в лампах с сетками, в пролетных клистронах, а также работы по расчету катушек, создающих магнитное поле, и другие.

К работам, связанным с проблемами использования приборов, относятся большая теоретическая работа Владимира Сергеевича по расчету устройства с газоразрядной лампой, генерирующего короткие импульсы; работы по импульсным явлениям в электрических цепях, полезные для конструирования импульсных устройств; работы по расчету емкости альтиметра и другие.

В 1946 – 1950 гг. уже четко определилась тематика работ отдела. Помимо обслуживания всего института решениями электронно-оптических задач с помощью электролитической ванны (эти решения выполнялись по заказам различных подразделений института), в отделе были поставлены теоретические исследования основных электронных приборов, которые тогда разрабатывались в институте: магнетронов, отражательных клистронов, антенных переключателей и ламп с сетками. Из тематики, относящейся к использованию электронных приборов в аппаратуре, можно отметить теоретические исследования импульсных процессов в электрических цепях и по стабилизации частоты магнетронных генераторов.

В. С. Лукошков в этот период много самостоятельно работает в различных направлениях. Большая его работа посвящена выявлению высокочастотного предела работы триода в качестве усилителя и генератора. Он продолжает работы в области теории магнетрона и методов стабилизации частоты магнетронных генераторов. Предлагает приближенный метод расчета полых контуров различной формы и выполняет расчет электромагнитных и электронных явлений в мощных клистронах с тороидальными полыми контурами. По-прежнему предметом его интересов остаются электровакуумные лампы. Он рассчитывает характеристики и параметры диодов, предлагает практический метод расчета СВЧ-параметров в диодах (малые амплитуды), изучает электростатическое «холодное» поле электронных ламп с сетками.

На этом этапе развития отдела работы по магнетронам и клистронам, а также по СВЧ-явлениям в диодах и триодах были ещё далеки от решения общей задачи создания соответствующих инженерных расчётов приборов и носили скорее характер уточнения картины физических явлений в этих приборах или даже построения такой картины (например, в случае электроники магнетрона). Позднее уже более высокий уровень развития теории электронных ламп с сетками дал возможность разработать мощные методы точного и практически удобного инженерного

4(543).indd 98 20.12.2019 9:33:37

расчета статических характеристик по геометрическим данным ламп, результаты которого хорошо совпадали с экспериментом. При этом основное внимание В. С. Лукошков уделяет разработке методов расчета явлений СВЧ-электроники при больших амплитудах, где рассматривается обобщенный диод без пространственного заряда, и, наконец, выводит основные уравнения электроники сверхвысоких частот в диоде при больших амплитудах с учетом пространственного заряда.

Продолжаются его работы по исследованию встречных потоков электронов. Им дано обобщение метода полного тока сверхвысокочастотной электроники на случай встречных электронных потоков и разработаны методы математического анализа и методы инженерного расчета электронных процессов в СВЧ-приборах при наличии встречных электронных потоков электронов. К сожалению, результаты большого цикла работ Владимира Сергеевича совместно с сотрудниками по диодам и триодам со встречными потоками электронов были зафиксированы только в отчётах. Между тем в 1955 году аналогичные теоретические исследования электроники СВЧ-диодов и триодов при больших амплитудах, но без встречных потоков были опубликованы на Западе Г. С. Раммом в книге «Триодные генераторы колебаний сверхвысоких частот». Таким образом, можно с полной ответственностью утверждать, что в этом направлении работы В. С. Лукошкова опередили исследования западных ученых.

Слева направо: Лукошкова Лена, Лебедев Борис Сергеевич,
Явич Лев Рафаэлович, Лукошков Владимир Сергеевич

Отметим также несколько оригинальных работ, выполненных Владимиром Сергеевичем: скин-эффект в импульсном режиме; электронно-оптические исследования прикатодной линзы катодно-лучевой трубки АСР-1-Д; проект механической модели движения электронов в электронных приборах и другие. Владимир Сергеевич публикует приложение к переводу книги М. Стретта «Многосеточные электронные лампы», под его редакцией выходит сборник «Магнетроны» и ряд других работ, которые сыграли большую роль в воспитании современного поколения специалистов в области СВЧ-электроники.

Практика конструирования СВЧ-приборов требовала от теории надежных количественных методов расчета электростатических и электронно-оптических систем. Большим успехом оте-

4(543).indd 99 20.12.2019 9:33:38

чественной науки явилась разработка методики математического моделирования электростатических полей с помощью электролитической ванны с придонными токопроводящими элементами. Поэтому основные силы начальник отдела направлял на постановку работ с электролитическими ваннами.

Под руководством и при непосредственном участии В. С. Лукошкова развиваются методы исследования электронных процессов с помощью электролитической ванны, в частности, разрабатываются методы расчета влияния электронного пространственного заряда на электронные траектории с использованием специальной электролитической ванны; электролитические методы изучения электростатического поля с учетом пространственного заряда; изучаются вопросы компенсации металлическими стенками электрического поля, созданного пространственным зарядом внутри полости; анализируется распределение электромагнитного поля полостей на моделях методом зонда с высокой подводкой; выполняется моделирование в электролитической ванне электромагнитного поля однородных волноводов; решаются многие другие задачи. В связи с установкой в отделе большой электролитической ванны число заказов теоретикам со стороны разработчиков приборов существенно возрастает.

В 1958 году В. С. Лукошков защищает диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Моделирование источников поля в электролитической ванне при решении задач математической физики». Результаты этой работы докладывались в 1956 году на Парижском конгрессе по СВЧ-электронике и 1962 году в Праге на Международной конференции по электронике.

В. С. Лукошков на конгрессе в Париже (1956 г.)

В дальнейшем эта методика решения задач о поле была использована в сочетании с аналоговыми методами решения уравнений движения электронов в комбинированных электрических и магнитных полях. Были разработаны автоматические траектографы, позволившие решать широкий круг задач электроники СВЧ-приборов. Однако успешное развитие универсальных цифровых ЭВМ составило серьезную конкуренцию аналоговым машинам.

4(543).indd 100 20.12.2019 9:33:38

Использование цифровых ЭВМ в корне изменило и подход к проектированию электровакуумных приборов (ЭВП). Владимир Сергеевич положительно воспринял надвигающийся прогресс в теоретических методах исследований с помощью цифровых ЭВМ. Это было непростое время, связанное с ломкой психологии теоретиков. И нужны были недюжинные способности начальника, чтобы не свернуть с пути прогресса.

Если в 1967 году в работе только отмечалось, что «цифровые ЭВМ могут составить серьезную конкуренцию аналоговым машинам», то в 1970 году под редакцией В. С. Лукошкова публикуется большая работа «Машинные методы проектирования электровакуумных приборов СВЧ – средство повышения эффективности разработок», в которой впервые в нашей стране были сформулированы основные задачи проектирования ЭВП с помощью цифровых ЭВМ. Эта работа дала начало новому этапу творческой деятельности теоретиков.

Лаборатория 111, 1967 г.
Сидят: Силин Роберт Андреевич, Хапланова Зинаида Ивановна, Ковтунова Зинаида Дмитриевна.
Стоят: Колосов Юрий Александрович, Самохин Геннадий Сергеевич,
Лукошков Владимир Сергеевич, Кутенин Борис Павлович, Бороденко Вадим Георгиевич,
Лейман Владимир Георгиевич, Викулов Игорь Константинович

В то же время сам Владимир Сергеевич сознавал, что новое направление в проектировании электронных приборов должен вести молодой начальник отдела, не столь тесно, как он, связанный с предыдущим этапом развития теории ЭВП. К огромному счастью для отдела и предприятия в целом, передав руководство отделом В. П. Сазонову, Владимир Сергеевич не оставил свою творческую деятельность, а до конца своей жизни активно работал на благо отдела и предприятия в качестве главного теоретика – заместителя академика Н. Д. Девяткова.

В. С. Лукошков фактически возглавил аспирантуру и тем самым помог многим инженерам в защите кандидатских диссертаций: Я. И. Местечкину, Т. П. Кущевской, И. И. Голеницкому,

4(543).indd 101 20.12.2019 9:33:38

В. Б. Хомичу, В. С. Морозову и другим. Кроме того, он оказал большую помощь в защите докторских диссертаций В. П. Сазонову, А. С. Тагеру, Р. А. Силину.

В семидесятые годы Владимир Сергеевич Лукошков продолжал заниматься вопросами моделирования статических магнитных полей, различными задачами теплопередачи, модернизацией своего метода решения уравнения Пуассона применительно к ЭВМ, с интересом относился к подотраслевому фонду алгоритмов и программ для ЭВМ.

На протяжении многих лет В. С. Лукошков неизменно входил в редколлегию журнала «Электроника СВЧ», всем своим опытом и знаниями помогая аспирантам и соискателям в публикации результатов выполненных ими работ. Он руководил теоретической секцией НТС предприятия. Был членом ученого совета по защитам диссертаций. Входил в состав экспертного совета Высшей Аттестационной комиссии.

Развитие новейших областей электроники потребовало учёта так называемых начальных или тепловых скоростей электронов. Владимир Сергеевич с жаром взялся за решение этой сложнейшей задачи. На теоретическом семинаре он собирался докладывать о планах своих работ, о тех направлениях работ, в которых следует работать, для того чтобы можно было достигнуть положительных результатов.

Неожиданная кончина оборвала многие его планы…

В.С. Лукошков умер на своем рабочем месте 1 июля 1975 г. Владимир Сергеевич Лукошков оставил для потомков большое научно-техническое наследие и добрую память о себе.

ИЗ ИСТОРИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОТДЕЛА 110 (1943 – 1953 гг.)

В. С. Лукошков

Если начинать изложение истории отдела 110 с деятельности группы сотрудников, занимавшихся теоретическими исследованиями и затем составивших основное ядро отдела, то начинать надо с 4 июля 1943 года, то есть с момента, когда вышло Постановление ГКО о создании НИИ-160 как специализированного института, призванного обеспечить отечественную радиолокацию электронными приборами. Я затрудняюсь назвать точную дату официального создания лаборатории 95 (начальник В. С. Лукошков), в которой работали эти сотрудники. Однако уже в течение 1948 года на базе этой лаборатории был официально оформлен отдел 110 (начальник В. С. Лукошков), состоящий из четырех лабораторий: лаборатории теоретиков 111, радиофизической 112, электронной оптики 113 и вычислительной лаборатории 114. Тогда же была создана электромеханическая мастерская отдела. Начиная уже с 1946 года лабораториям 111, 113 и 114 соответствовали небольшие группы сотрудников из лаборатории 95. Историю отдела за рассматриваемый период целесообразно разделить на три этапа. Именно в такой последовательности излагается история.

Начальный этап (1943 – 1945 гг.). *Для первых трех лет характерно отсутствие закрепленной за каждым сотрудником определенной личной тематики. Исключение составила И. Вайнштейн, только что окончившая МЭИ. Под руководством кандидата технических наук В. С. Лукошкова она с 1945 г. начала развертывание работ по моделированию электростатических полей на электролитической ванне и на резиновой модели, что составило зародыш лаборатории 113. Таким образом, инженеры В. А. Ельманова (с 1944 по 1945 г. включительно), В. Н. Готгельф (с 1944 г.), а также В. С. Лукошков (с 1943 г.) работали по тематике, задаваемой лично научным руководителем НИИ С. А. Зусмановским и его ближайшими сотрудниками: профессором Ф. Н. Хараджой, кандидатом технических наук А. М. Андриановым и другими.*

4(543).indd 102 20.12.2019 9:33:38

Работы этого этапа целесообразно разделить на две группы: относящиеся непосредственно к самим электронным приборам и к проблемам использования приборов в аппаратуре. Упомяну сначала работы первой группы. Кроме работ Вайнштейн и Лукошкова по моделированию, сюда следует отнести работы Лукошкова и Ельмановой по расчету СВЧ-явлений в лампах с сетками, в пролетных клистронах, а также работы по расчету катушек, создающих магнитное поле, и другие. Сюда же относится большая (неопубликованная) работа Готгельфа по расчету предложенной Зусновским специальной генераторной лампы сантиметрового диапазона, использующей принцип отклонения электронного луча. Эта лампа не была реализована. К работам, связанным с проблемами использования приборов, относится большая теоретическая работа Лукошкова и Андрианова по расчету устройства с газоразрядной лампой, генерирующего короткие импульсы; работы Лукошкова и Ельмановой по импульсным явлениям в электрических цепях, полезные для конструирования импульсных устройств; работы по расчету емкости альтиметра (не опубликована) и другие.

Следует отметить, что около половины вполне законченных работ этого этапа оказались (по ряду причин) не оформленными даже в виде отчетов.

***Этап оформления отдела (1946 – 1950 гг.).** В эти годы довольно четко определяется тематика работ отдела. Помимо обслуживания всего института решениями электронно-оптических задач с помощью электролитической ванны (эти решения выполнялись по заказам различных подразделений института), в отделе были поставлены теоретические исследования в связи с основными электронными приборами, которые тогда разрабатывались в институте: магнетроны, отражательные клистроны, антенные переключатели и лампы с сетками. Из тематики, относящейся к использованию электронных приборов в аппаратуре, проводились теоретические исследования импульсных процессов в электрических цепях и тема «Дельта» (стабилизация частоты магнетронных генераторов). Эти годы характеризуются обилием научно-технической литературы. Это была литература на немецком языке, привезённая иностранными специалистами: отчёты, справочники и личные книги, а также пополнение технической библиотеки института трофейными немецкими книгами. Через несколько лет после окончания войны сначала в научно-технических журналах, а затем в специальных книгах стало публиковаться много материалов по работам, которые были строго секретными во время войны. Особенно сильное впечатление произвели на нас несколько книг 30-томного издания Массачусетского института технологии (США), посвященного радиолокации. Эти книги были посвящены клистронам, магнетронам, СВЧ-диодам и триодам, антенным переключателям, передающим линиям и другим деталям СВЧ-техники. Таким образом, для советских специалистов отдела 110 годы с 1946 по 1950 были годами упорного и быстрого овладения новой СВЧ-тематикой с использованием литературы в основном на немецком и английском языках. Этими языками успешно овладевали также и вновь приходящие молодые специалисты. Для развития отдела в эти годы имело также большое значение наличие группы специалистов – немцев из Берлина, во время войны работавших на ведущем электронно-ламповом предприятии фирмы «Телефункен».*

Уже три первых иностранных специалиста, пришедших в лабораторию 95 ещё в конце 1944 г.: математик Доббрак, специалист по моделированию на электролитической ванне инженер Пробст и очень талантливый изобретатель, доктор технических наук Роозенстейн, а также перешедший в отдел 110 в 1947 году математик доктор Хаген – все они и по возрасту, и по опыту, и по стажу работы, и по знаниям значительно превосходили наличный состав советских специалистов отдела. Это положение относится и к иностранным специалистам,

4(543).indd 103 20.12.2019 9:33:38

пришедшим позднее в отдел 110. Следует отметить энергию и инициативу молодых наших специалистов отдела 110, которые сравнительно быстро освоили разговорный и научно-технический немецкий язык. Поэтому всё необходимое общение с иностранными специалистами шло на их родном языке без специальных переводчиков, что, безусловно, способствовало «выкачиванию» из них знаний и опыта работы. Так, например, лекции доктора физико-математических наук Карла Штеймеля, крупнейшего в предвоенной и военной Германии специалиста по электронным лампам и по СВЧ-электронике, в 1950 – 1951 гг. на немецком языке слушал весь основной инженерный состав отдела 110. Лишь в редких случаях аудитория нуждалась в некоторых пояснениях на русском языке. Лекции читались на очень высоком научно-техническом уровне, причём лектор охотно подбирал темы лекций в соответствии с желаниями слушателей. В 1949 – 1951 гг. руководителями целого ряда дипломников отдела были иностранные специалисты (официально оформлять их руководителями или даже консультантами было нельзя). Теперь можно перейти к краткому обзору работ, выполнявшихся в это пятилетие в лабораториях отдела 110.

В лаборатории 111 (начальник Готгельф) проводился большой цикл работ по контурным системам магнетронов (Лукошков, Готгельф, Доббрак), по расчёту волноводов и контурных систем клистронов, включая вывод энергии (Лукошков, Доббрак), а также по электронике магнетрона (Иванов, Лукошков). С приходом в отдел математика-упругиста М. Б. Цейтлина начались теоретические исследования по лампам с сетками и электронной оптике (Лукошков, Цейтлин), а затем он занялся строгой теорией отражательного клистрона. Цейтлиным был также выполнен ценный для текущих разработок расчёт резонансных систем антенных газоразрядных переключателей.

С приходом Л. В. Шубина начались систематические работы по теории и методам расчета статистических характеристик электронных ламп с сетками с экспериментальной проверкой результатов расчета на установках, создаваемых в отделе. Работы теоретического характера по импульсной тематике выполняли в лаборатории 111 Лукошков (неопубликованная работа) и Н. Д. Иванов, а также иностранный специалист Хаген и др.

К тематике лаборатории 111 относятся по своему стилю также работы тех лет Лукошкова по обобщению некоторых литературных данных о СВЧ-явлениях в диодах и триодах в случае малых амплитуд и начало его работ по электронике диода и триода при больших амплитудах (совместно с Е. И. Фокиной и другими сотрудниками вычислительной лаборатории). Следует также упомянуть о большой работе, выполненной Лукошковым при участии Я. Я. Акменьтыша, по критике теории электроники пролетного двухконтурного клистрона, предложенной Ю. А. Кацманом.

На этом этапе развития отдела работы по магнетронам и клистронам, а также по СВЧ-явлениям в диодах и триодах были ещё далеки от решения общей задачи создания соответствующих инженерных расчётов приборов и носили скорее характер уточнения картины физических явлений в этих приборах или даже построения такой картины (например, в случае электроники магнетрона). Более высокий уровень развития теории электронных ламп с сетками дал возможность Л. В. Шубину в его работам по статистическим характеристикам поставить целью создание возможно более точного и практически удобного инженерного расчета статических характеристик по геометрическим данным ламп, результаты которого хорошо совпадали с экспериментальными данными.

Лаборатория 113 (начальник Э. П. Тевелёва) за это пятилетие быстро оснащалась оборудованием. Ещё в 1944 г. были выполнены значительные работы по моделированию с использованием резиновой мембраны. По заказу А. П. Федосеева производился предварительный подбор формы

4(543).indd 104 20.12.2019 9:33:38

фокусирующих электродов специальной очень мощной модуляторной лампы (отчёт не сохранился). Форма этих электродов далее уточнялась на электролитической ванне. С помощью ванны выполнялись и другие разнообразные заказы. С запуском большой электролитической ванны число выполняемых заказов стало расти.

Работы по этим заказам, как правило, отчётами не оформлялись.

С 1949 года иностранный специалист Пробст начал (при активном участии доктора Штеймеля) разработку и изготовление траектографа, т. е. вычислительного устройства моделирующего типа, вычисляющего и автоматически вычерчивающего на бумаге в увеличенном масштабе электронные траектории, реально существующие в приборе, электрическое поле которого моделировалось в электролитической ванне, являющейся частью траектографа в целом. Строительство этого траектографа явилось, в известной мере, начальным этапом больших, позднее развёрнутых в отделе работ по созданию многочисленных траектографов, работающих в настоящее время в НИИЭТ и на других предприятиях.

Основное принципиальное отличие траектографа Пробста – это использование электромеханических интеграторов, кустарно изготовленных самим Пробстом из трофейных электрических счетчиков. Особенно много времени и сил потратили Пробст и Штеймель на компенсацию трения в подшипниках счетчиков. Другое отличие – в электролитической ванне, на основе которой был построен траектограф Пробста, еще не было устройства для учета влияния на поле пространственного заряда электронного пучка. В наладке и запуске траектографа принимала участие Тевелёва. Однако траектограф Пробста оказался неудовлетворительным ни по устойчивости работы, ни по повторяемости результатов. Но опыт создания и освоения траектографа Пробста, безусловно, оказал положительное влияние на последующее развитие траектографостроения.

В лаборатории 113 проводились также исследования с помощью электролитической ванны электронно-оптических свойств межвитковых линз сеток электронных ламп для цикла работ Шубина. Аналогичные работы, выполненные инженером Головкиной аналитическими методами с последующими расчетами на арифмометре, оказались не оформленными в виде отчета и теперь полностью утеряны.

Лаборатория 114 (начальник В. И. Бацев, с 1949 г. – Б. И. Водовоз) за это пятилетие быстро укреплялась кадрами и оснащалась сначала арифмометрами, а затем трофейными клавишными настольными вычислительными машинами. Эта лаборатория обслуживала тогда почти исключительно сотрудников лаборатории 111. Система экзаменов на повышение разряда по программе, разработанной Бацевым, стимулировала рост квалификации работниц-вычислительниц. В отдельных случаях их квалификация поднималась до уровня техников.

Около 1950 г. в отделе появилась аналоговая вычислительная машина ЭЛИ-14, специально приспособленная для решения систем обыкновенных линейных дифференциальных уравнений до десятого порядка с выводом результатов решения на экран большого осциллографа. Точность решения была очень малой. Машина работала крайне неустойчиво, несмотря на неоднократные приезды специалистов Пензинского завода, изготовителя этих машин. Позднее, около 1953 г., кандидату технических наук Г. И. Рукману удалось поставить на этой машине решение конкретной задачи по нестационарным тепловым процессам. Затем машина была передана Фрязинскому техникуму из-за невозможности использования в отделе.

Лаборатория 112 была создана в 1949 году по предложению главного инженера института А. А. Сорокина как лаборатория для экспериментальной проверки результатов теоретических

4(543).indd 105 20.12.2019 9:33:38

исследований. Первые работы лаборатории – создание соответствующей измерительной аппаратуры и проверка формул для расчета характеристик электронных ламп с сетками. Первым начальником этой лаборатории стал В. И. Бацев. Укреплению этой лаборатории кадрами и оборудованием значительно способствовало выполнение темы «Дельта» (стабилизация частоты магнетронных резонаторов). Руководство института было против включения этой темы в план института, как явно не соответствующей профилю НИИ-160. Однако эта тема всё же вошла в Постановление Совета Министров СССР как подлежащая выполнению именно в нашем институте. Несмотря на энергичное сопротивление начальника отдела Лукошкова, тему всё же пришлось выполнять в отделе 110. Кроме Доббрака и Пробста с механиком, на эту тему были мобилизованы все иностранные специалисты отдела, а также переброшены иностранные специалисты из других отделов. Из советских специалистов над этой темой работали Бацев и Лукошков. После обсуждения темы на научно-техническом совете института было решено использовать магнетрон, разработанный С. А. Зусмановским, отличающийся очень быстрой механической перестройкой частоты. Иностранные специалисты стали разрабатывать следующую систему: проектировать и делать собственными руками (Педерцани) специальный электромоторчик с очень малой инерционностью для перемещения органа настройки магнетрона; проектировать специальный высокодобротный резонатор с термостатированием, используемый как пассивный датчик опорной частоты. Доктор Хаген теоретически исследовал установление колебаний в магнетроне в импульсном режиме и создал специальную теорию, чтобы доказать, что разрабатываемая по теме «Дельта» система стабилизации «держит» на заданной частоте «центр тяжести» спектра в импульсном режиме. Одновременно проводилась большая работа по созданию специальной измерительной аппаратуры для темы «Дельта», в частности Гергардт спроектировал и изготовил специальное устройство для наблюдения уходов частоты и спектр-анализатор, основанный на резонаторе с высокой добротностью и подвижным дном.

Слева направо: Веневич Соломон Вульфович, Евтифеева Евгения Степановна, Лукошков Владимир Сергеевич, Бацев Владимир Иванович

4(543).indd 106 20.12.2019 9:33:39

В самый разгар работы тема «Дельта» была закрыта, а иностранных специалистов начали отправлять обратно в Германию. По теме «Дельта» написано несколько отчётов и статей, не считая отчётов на немецком языке. Описание дальнейшего развития лаборатории 112 в 1950 г. лучше перенести в следующий этап развития отдела, так как речь пойдет уже в основном о молодых советских специалистах. Особо следует остановиться на работе в отделе иностранного специалиста доктора Роозенстейна. Рекомендованные им методы измерения комплексных электронных проводимостей СВЧ электронных приборов с помощью измерительной линии, подключаемой к прибору через специальный четырехполюсник, с известными параметрами, отражённые в ряде его отчётов, были затем развиты и использованы в работах Бацева, Костиенко и Петрова. Роозенстейн также пропагандировал способ исследования СВЧ электромагнитного поля на увеличенных моделях резонаторов с помощью диполя, имеющего высокоомные выводы. Этот способ был развит и реализован позднее в работах А. С. Бондарева, выполнявшихся под руководством Лукошкова в лаборатории 112. Роозенстейн также указал на возможность моделирования СВЧ электромагнитного поля однородных волноводов произвольного поперечного сечения путём возбуждения электростатического поля в длинной трубе того же сечения. Этот метод затем был развит Лукошковым (с применением электролитической ванны с токовводами) и значительно позднее независимо Г. П. Рудковским (Институт физических проблем). Роозенстейну также принадлежат теоретические работы по кольцевым волнам, искусственным диэлектрикам (искусственные диэлектрики можно рассматривать как прообраз замедляющих систем), расчёту выводов энергии из электронных приборов, расчёту неоднородных линий, проектированию прибора для измерения свойств диэлектриков на дециметровых волнах и др. Он также ознакомил сотрудников лаборатории 112 с давно известным, но удачно развитым им на случай СВЧ методом приближённого исследования электромагнитных полей в резонаторах и неоднородных линиях, в котором используется рисование полей от руки.

С 1946 года организуется аспирантура при нашем институте. Из отдела 110 поступили в аспирантуру Готгельф (1946 г.), Иванов (1947 г.), Цейтлин (1948 г.), Шубин (1949 г.) и Бацев (1949 г.).

***Этап укрепления отдела молодыми специалистами (1951 – 1953 гг.).** За эти три года в отдел пришло 17 молодых специалистов из вузов и техникумов. Замедление роста отдела в 1953 г. объясняется тем, что приказом директора института были переведены из отдела пять специалистов с относительно большим стажем (Готгельф, Тевелёва, Цейтлин и Водовоз – на предприятия г. Саратова, Бацев – в отдел 200) и один молодой специалист (В. Н. Гинзбург – в Москву).*

За описываемое трехлетие Готгельфу удалось в лаборатории 111 закончить большой цикл работ по контурным системам магнетрона, причём особое внимание было обращено на вопросы асимметрии контурной системы, в частности на вопросы назначения допусков на геометрические размеры деталей магнетронного анодного блока. Этот цикл работ можно охарактеризовать как теоретические основы инженерного расчёта магнетронного блока по заданным его параметрам. Цейтлину также удалось в 1953 году закончить в лаборатории 111 большой цикл теоретических исследований, приведших к созданию уточнённой теории электроники отражательного клистрона, учитывающей пространственный заряд вблизи отражателя и разброс скоростей электронов. Позднее Петров с сотрудниками положили в основу развитого им метода инженерного расчёта отражательного клистрона именно эту теорию, как наиболее близкую к действительности. Из других достижений лаборатории 111 за эти годы следует отметить работы Иванова по электронике магнетрона; работы Шубина по статистическим характеристикам ламп с сетками, на основе которых позднее был создан

4(543).indd 107 20.12.2019 9:33:39

не превзойдённый до сих пор по точности расчёт статистических характеристик ламп с сетками по заданной их геометрии, а также работы А. С. Тагера по устойчивости колебаний магнетронных генераторов. В эти же годы Тагер начинает работать в области ЛБВ. В это трехлетие по прямому указанию министерства в лаборатории 111 были начаты работы по внедрению методов математической статистики в электровакуумное производство. Сначала эту работу поручили Цейтлину, а после его ухода – новому сотруднику отдела, кандидату технических наук Г. И. Рукману. Помимо организации научного контроля над постановкой статистики в ОТК опытного производства, Рукману с другими сотрудниками лаборатории 111 удалось провести несколько интересных работ в цехах опытного производства по выявлению статистических закономерностей текущей продукции. В эти же годы при большой помощи со стороны научного руководителя института Н. Д. Девяткова и совместно с Институтом точной механики АН СССР удалось организовать межведомственный семинар, посвящённый общей проблеме применения современных методов математической статистики к производству электронных приборов (вопросы текущего контроля производственного процесса, предупреждения брака, вопросы назначения допусков, точности, взаимозаменяемости и пр.). Было проведено несколько занятий этого семенара. Однако ни дирекция нашего института, ни Техническое отделение АН СССР не поддержали этого начинания. После перевода Г. И. Рукмана в отдел 105 в 1955 г. работы по статистике в отделе 110 были полностью прекращены.

В лабораторию 112 в 1951 – 1953 гг. пришло много молодых специалистов. Большая часть работ лаборатории относилась к проверке результатов теоретических исследований, проводимых сотрудниками лаборатории 111. Так, на специальной установке исследовались магнетронные блоки для проверки основных положений теории «Розы» и теории асимметрии магнетронного блока, созданных Готгельфом; Тагер с молодым специалистом Чепигой развёртывали здесь экспериментальную часть работы по устойчивости колебаний; инженер Белинский и молодой специалист Решетникова проводили большую экспериментальную работу по сопоставлению характеристик ламп с сетками с расчётами Шубина; аспирант МГУ Петров отрабатывал метод измерения электронной проводимости отражательного клистрона, давший возможность доказать преимущества упомянутой выше новой теории Цейтлина. Этот же метод (с некоторыми вариантами) применяли здесь же для экспериментального исследования свойств диодов и триодов на сверхвысоких частотах Бацев с молодым специалистом Балашёвой и аспирант МГУ Костиенко.

Из других работ лаборатории следует отметить очень интересную дипломную работу В. Н. Гинзбурга по теоретическому и экспериментальному изучению спектров амплитудно- и частотно-модулированных импульсов. Им были удачно использованы результаты работы отдела по теме «Дельта». С приходом в 1952 году в лабораторию 112 кандидата технических наук Б. Н. Швецова (с 1953 г. он начальник лаборатории) началось развитие нового большого цикла работ по метрике шумов СВЧ электронных приборов. Основные достижения в этой области относятся к периоду после 1953 года.

В лаборатории 113, начальником которой с 1953 г. стал Л. В. Шубин, в эти годы группа молодых специалистов осваивает траектограф Пробста. Ешё с 1950 г. молодой специалист Л. А. Шерель начала под руководством Лукошкова практическое освоение метода моделирования пространственного заряда электронных пучков СВЧ-приборов путём введения в электролит ванны через её дно строго дозированных токов. Поток заказов отделов института на решение разнообразных электронно-оптических и других задач методом электролитической ванны продолжал возрастать.

4(543).indd 108 20.12.2019 9:33:39

В лаборатории 114 число сотрудников увеличивалось и быстро сменялись руководители – пришли молодые математики Фокина, Симонова, Чугунова. В конце описываемого периода на длительное время начальником лаборатории 114 стал Н. Д. Иванов после ухода с этого поста Б. И. Водовоза.

Безусловной заслугой заместителя начальника отдела Д. П. Сортова явилось приобретение большой партии вполне современных по тому времени и высокачественных настольных клавишных вычислительных машин типа «Рейнметалл». В эти годы все больше возрастает поток заказов на вычисления из других отделов института, в то время как раньше заказы поступали только из лаборатории отдела 110. Еще до 1953 г. Лукошков прекратил свои теоретические исследования по электронным явлениям в СВЧ-диодах и триодах при больших амплитудах. К этому его вынудили в основном две причины. Во-первых, это направление не поддерживалось экспериментами и разработками ни в нашем, ни в других институтах или ОКБ. Во-вторых, наиболее оригинальная по методике и по ожидаемым результатам часть работы этого направления оказалась настолько трудоемкой, что ее практически невозможно было выполнить наличными кадрами и оборудованием лаборатории 114. Речь идет о так называемых «встречных электронных потоках», т. е. о таких режимах работы СВЧ-диодов и триодов, при которых в одной и той же точке межэлектродного пространства находятся две или более групп электронов, имеющих различные скорости, включая и случай скоростей различных знаков. Убедившись, что в этих случаях не удается найти чисто аналитические методы решения и что следует ориентироваться только на цифровой счет, Лукошков решил отложить эти работы до того времени, когда станет практически доступна работа с электронными цифровыми машинами в нашем институте.

Результаты большого цикла работ Лукошкова совместно с Акменьтышем, Романовым, Фокиной, Цейтлиным и Шакировой зафиксированы только в отчётах. В 1955 году аналогичные теоретические исследования электроники СВЧ: диодов и триодов при больших амплитудах, но без встречных потоков – были опубликованы Раммом в его книге «Триодные генераторы колебаний сверхвысоких частот».

В заключение следует упомянуть ещё о семи работах, тематика которых не уложилась в изложенное выше. Это три работы по тепловой тематике, выполненные в 1948 году Водовозом, в 1951 году Ивановым и в 1952 году Цейтлиным; две работы по расчёту упругости и прочности деталей электронных приборов, выполненные Водовозом в 1947 году и в 1951 году; работа по методике измерения крутизны преобразования, выполненная также Водовозом в 1949 году, и ещё одна работа по теории упругости, выполненная приблизительно в 1950 году Цейтлиным и Водовозом, отчёта по которой не сохранилось. Нужно было рассчитать натяжения в стеклянной оболочке откачиваемого тороида. Авторы работы показали, что при неправильно выбранной форме поперечного сечения тороида в оболочке могут развиваться под влиянием атмосферного давления растягивающие усилия, опасные для стекла. Их расчёты дали возможность подобрать правильную форму тороидальной оболочки.

Несколько моих личных воспоминаний. Работая над статьей о научно-техническом наследии В. С. Лукошкова, я невольно вспоминал некоторые эпизоды, связанные с непродолжительным периодом моего знакомства с Владимиром Сергеевичем.

В конце мая 1972 года я был принят на работу в теоретический отдел в лабораторию А. С. Тагера и стал первым принятым со стороны сотрудником лаборатории. У нас не было еще своего помещения. Э. В. Погорелова, Е. И. Голант и я располагались в лаборатории Р. А. Силина.

4(543).indd 109 20.12.2019 9:33:39

В первые дни я познакомился со всеми сотрудниками лаборатории. В. С. Лукошков в эти дни отсутствовал, возможно, находился в отпуске.

Примерно через неделю со дня начала моей работы в лабораторию вошел небольшого роста седовласый мужчина. Он остановился у порога, минуту смотрел на сотрудников, затем сказал: «Здравствуйте!» и прошел на свое место за шкафом. На следующий день он вновь постоял минуту у порога, рассматривая сотрудников, но теперь уже прошел по лаборатории и с каждым сотрудником, в том числе и со мной, поздоровался за руку. Так продолжалось ежедневно. В. С. Лукошков то говорил всем: «Здравствуйте!», то молча здоровался со всеми за руку. Меня это заинтересовало, я стал делать заметки, пытаясь найти в этом закономерность. Но получался случайный ряд, не связанный ни с определенными днями недели, ни с погодными условиями. Тогда я обратился за разгадкой этого явления к Е. И. Голанту. Евгений Исайевич сказал, что Владимир Сергеевич пользуется оригинальным методом приветствия. Войдя в лабораторию, он пересчитывал число находящихся в ней сотрудников и, если их было больше 7, говорит всем: «Здравствуйте!», в противном случае он с каждым здоровался за руку.

В лаборатории Р. А. Силина в те годы практически каждую неделю проводились научные семинары, отчеты молодых специалистов и аспирантов, выступления приезжих соискателей на кандидатскую или докторскую степени. Владимир Сергеевич садился за первый стол и внимательно выслушивал доклады. На вопрос председательствующего: «У кого есть вопросы?» он неизменно говорил: «У меня есть три вопросика», причем число вопросов могло быть и больше, но эта фраза была характерной для В. С. Лукошкова. Его первый вопрос был: «А что по осям?» Он ставил в неудобное положение докладчика, поскольку на графиках было нарисовано десять кривых, а какие переменные откладывались по осям, докладчик в пылу подготовки забывал поставить. Либо просто не мог объяснить смысла переменных. Вопрос Владимира Сергеевича: «А что по осям?» настолько запал в память, что, рассматривая научную работу, я первым делом обращаю внимание, что на рисунках отложено по осям. Лет тридцать назад неожиданно увидел в «Электронике СВЧ» статью уважаемого ученого, доктора наук, в которой у половины рисунков по осям вообще не были отмечены переменные. Думаю, что этому ученому было бы не по себе, если бы ее увидел В. С. Лукошков.

В. С. Лукошков в последние годы жизни

На одном из научных семинаров в лаборатории Р. А. Силина выступал А. С. Тагер с сообщением о теоретически предсказанном учеными США высокоэффективном режиме работы ЛПД, так называемом ключевом режиме. Шуму по поводу этой публикации было много, поскольку заявленный КПД превышал 70 %. Самый, пожалуй, острый вопрос задал В. С. Лукошков: «Александр Семенович, почему этот эффект предсказали американцы, а не Вы?» А. С. Тагер попытался объяснить, что и они были близки к такому предсказанию, но не довели расчеты до конца из-за малых мощностей отечественных ЭВМ. Владимир Сергеевич к Александру Семеновичу относился с глубоким уважением, но ответ его явно не удовлетворил и он пробурчал что-то в адрес американцев.

4(543).indd 110 20.12.2019 9:33:40

Стол В. С. Лукошкова располагался за шкафом, рядом стояла немецкая печатная машинка, на которой он много печатал, и стул для посетителей, который, казалось, никогда не пустовал. Наиболее частым посетителем был В. Ф. Коваленко. Они беседовали подолгу, часто спорили. Подолгу Владимир Сергеевич разговаривал и с В. С. Морозовым.

Вечерами, когда в лаборатории оставалось немного сотрудников, Владимир Сергеевич иногда подзывал меня к доске и рассказывал о пеших походах по окрестным местам, которые он совершил накануне со своими внуками. Рассказывая, он рисовал на доске маршрут с описанием местности, речек, лесных массивов, деревушек. В каждом таком рассказе было столько любви к русской природе, что я слушал его рассказ, как песню, с огромным удовольствием.

Через полгода лаборатории А. С. Тагера выделили помещение на третьем этаже и встречи с Владимиром Сергеевичем стали более редкими. Он не пользовался лифтом. Поднимался до третьего этажа по центральной лестнице, затем шел по этажу и уже на пятый этаж поднимался по боковой лестнице. Иногда он заходил к нам, беседовал с Александром Семеновичем или просто отдыхал перед тем, как подняться на два этажа выше.

1 июля 1975 года после рабочего дня мы оставались в лаборатории с С. Б. Порешем. Часов в 7 дверь отворилась, вошел Владимир Сергеевич и попросил разрешения посидеть в лаборатории. Чего-то особенного в его действиях не было. Поэтому мы не придали особого значения его визиту. Он сел за стол с телефоном, стоящим за моей спиной. Открыл свою записную книжку и начал ее перелистывать. В какой-то момент Владимир Сергеевич начал что-то нашептывать или даже напевать. Я обернулся. Мне показалось, что он стал бледнее обычного, и я спросил, не нужна ли ему помощь. Он отрицательно покачал головой. Посидев еще минут пять, Владимир Сергеевич тихонько поднялся и вышел. А еще через пять минут в нашу лабораторию позвонили и сообщили ужасное известие…

Владимир Сергеевич с супругой и детьми

На даче

Статья поступила 18 сентября 2019 г.

4(543).indd 111 20.12.2019 9:33:40

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ
статей, опубликованных в течение 2019 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

1. *Борисов А.А.* – К 90-летию Сергея Ивановича Реброва. – Вып. 1 (540). – С. 6 – 19.

2. К 100-летию Александра Ивановича Шокина. – Вып. 3 (542). – С. 6 – 19.

3. От редакции. – Вып. 2 (541). – С. 6 – 7.

I. Гражданская продукция

1. *Морозов А.О., Морозов О.А., Воробьев И.Г., Лопин М.И.* – Малогабаритная СВЧ-печь на частоте 915 МГц. – Вып. 3 (542). – С. 100 – 104.

II. История

1. *Балыко А.К.* – Вадим Федорович Коваленко. – Вып. 1 (540). – С. 89 – 101.

2. *Балыко А.К.* – Научно-техническое наследие Владимира Сергеевича Лукошкова. – Вып. 4 (543). – С. 96 – 111.

3. *Балыко А.К.* – Нет предела исканий уму (интервью с В.Г. Калиной). – Вып. 2 (541). – С. 96 – 105.

4. *Балыко А.К., Терёшкин Е.В., Балыко И.А.* – 100 лет дню изобретателя России. – Вып. 3 (542). – С. 117 – 129.

III. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Терешкин Е.В.* – Анализ эффективности генераторов с идеализированными функциями от времени тока и напряжения. – Вып. 4 (543). – С. 84 – 91.

2. *Балыко И.А., Терешкин Е.В., Дерябкина С.М., Балыко А.К.* – Элементы на связанных полосковых линиях передачи. – Вып. 1 (540). – С. 84 – 88.

3. *Балыко И.А., Терёшкин Е.В., Дерябкина С.М., Балыко А.К., Спиричев И.И.* – Движение физического и электрического маятника в поле центральных сил. – Вып. 2 (541). – С. 91 – 95.

IV. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д., Баранова О.А., Щелконогов В.А., Чеканов А.В.* – Экспериментальные результаты изучения эффектов КВЧ-излучения на межклеточные взаимодействия в плазме крови человека. – Вып. 2 (541). – С. 79 – 86.

2. *Казаринов К.Д., Малинин В.С., Полников И.Г.* – Изучение действия микроволнового излучения на поверхностные свойства липидных монослоев – моделей биологических мембран с помощью метода капиллярных волн. – Вып. 1 (540). – С. 76 – 83.

4(543).indd 112 20.12.2019 9:33:40

3. *Казаринов К.Д., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Чеканов А.В.* – Микроволновое излучение снижает активность межклеточного взаимодействия элементов крови в присутствии этанола. – Вып. 4 (543). – С. 78 – 83.

V. Радиоэлектронные устройства

1. *Баранов А.В.* – Близкие по уровню мощности одновременные колебания основной частоты и одной или двух ее гармоник в СВЧ-автогенераторах. – Вып. 3 (542). – С. 88 – 99.

2. *Батаев В.Я., Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С., Гринев А.Ю., Багно Д.В., Зайкин А.Е., Ильин Е.В.* – Разработка излучающего полотна АФАР *X*-диапазона на основе печатного вибраторного излучателя. – Вып. 3 (542). – С. 76 – 87.

3. *Батаев В.Я., Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С., Гринев А.Ю., Багно Д.В., Зайкин А.Е., Ильин Е.В.* – Экранирующий СВЧ-пробник для контроля каналов АФАР *X*-диапазона с печатными вибраторными излучателями. – Вып. 3 (542). – С. 63 – 75.

4. *Богданов С.А., Куприянов П.В., Николаев С.В., Петров С.А.* – Моделирование многосигнального режима работы *p–i–n*-диодных функциональных узлов СВЧ. – Вып. 3 (542). – С. 55 – 62.

5. *Карасев М.С.* – Многофункциональный приемопередающий модуль *X*-диапазона частот. – Вып. 3 (542). – С. 51 – 54.

6. *Лысенко И.Е., Ткаченко А.В.* – Моделирование конструкции интегрального МЭМС-переключателя емкостного типа для микроволновой области применений. – Вып. 2 (541). – С. 67 – 78.

VI. Твердотельная электроника

1. *Алексеев Р.П., Цоцорин А.Н., Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В.* – Механизм насыщения выходной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. – Вып. 4 (543). – С. 15 – 23.

2. *Алексеев Р.П., Цоцорин А.Н., Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В.* – Насыщение передаточной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. – Вып. 4 (543). – С. 6 –14.

3. *Данилин Н.С., Димитров Д.М., Батурин А.В., Булаев И.Ю.* – Термопроектирование СВЧ-компонентов и электронных систем в корпусе. – Вып. 2 (541). – С. 51 – 57.

4. *Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В., Мартынова Н.А., Трофимов А.А.* – Гибридно-монолитная интегральная схема усилителя *Ки*-диапазона с выходной мощностью 1 Вт. – Вып. 3 (542). – С. 105 – 111.

5. *Максимов Н.А., Панас А.И.* – Сверхширокополосный генератор шума на основе системы связанных осцилляторов. – Вып. 1 (540). – С. 63 – 69.

6. *Рогачев И.А., Вакина Д.А., Мешков О.И., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Лаврентьев Д.А., Курочка А.С., Максимов А.С., Белов Р.Г., Половинкина В.А., Седова Ю.К.* – Исследование качества формирования омического контакта к селективно-выращенным сильнолегированным слоям нитрида галлия в зависимости от площади области селективного роста. – Вып. 3 (542). – С. 112 – 116.

4(543).indd 113 20.12.2019 9:33:40

7. *Рогачёв И.А., Мешков О.И., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Вакина Д.А., Лаврентьев Д.А., Курочка А.С., Максимов А.С., Белов Р.Г., Половинкина В.А.* – Формирование омических контактов на селективно-выращенных сильнолегированных полупроводниковых слоях для создания мощного СВЧ-транзистора на гетероструктурах AlGaN/GaN. – Вып. 1 (540). – С. 70 – 75.

8. *Самохин С.А., Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Терёшкин Е.В., Федоров Н.А.* – Малогабаритный опорный СВЧ-генератор на коаксиальном резонаторе. – Вып. 2 (541). – С. 58 – 66.

VII. Технология и материаловедение

1. *Вашин С.А.* – Методики снижения токов утечки в отпаянных ЭВП. – Вып. 2 (541). – С. 16 – 26.

2. *Вашин С.А., Евсеев С.В., Корепин Г.Ф., Хамицев Б.Г., Пашков А.Н.* – Исследование детонационных покрытий в качестве поглотителей СВЧ-энергии. – Вып. 3 (542). – С. 36 – 43.

3. *Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Волков С.А., Булаев И.Ю.* – Создание электронных ВЧ-компонентов с применением аддитивной технологии. – Вып. 1 (540). – С. 39 – 43.

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

5. *Налогин А.Г., Семенов М.Г., Мясников А.В., Семенов А.С., Панков Р.П., Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Еремин И.С., Федосеев Н.А., Налогин И.А., Ескин А.Е.* – Резонаторный метод неразрушающего контроля электромагнитных параметров ферритовых пластин на СВЧ. – Вып. 4 (543). – С. 67 – 77.

6. *Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А., Шаталов А.С., Черкасов Д.А., Загорский Д.Л.* – Создание массива нанопроволок с магнитными переходами для генерации излучения терагерцового диапазона. – Вып. 2 (541). – С. 8 – 15.

7. *Пархоменко М.П., Калёнов Д.С., Ерёмин И.С., Федосеев Н.А., Колесникова В.М., Баринов Ю.Л.* – Волноводный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. – Вып. 1 (540). – С. 20 – 38.

8. *Сериков Д.Д., Слабченко В.С., Герольд И.В.* – Получение отверстий профильным электродом на электроискровом прошивочном оборудовании. – Вып. 2 (541). – С. 32 – 38.

9. *Слабченко В.С., Косенко М.С., Сериков Д.Д.* – Удаление заусенцев на деталях из меди методом электролитно-химической обработки. – Вып. 2 (541). – С. 27– 31.

VIII. Экономика

1. *Курдюкова Н.О., Вершинин А.А.* – Формы и перспективы сотрудничества предприятий и учебных заведений в современных условиях хозяйствования. – Вып. 4 (543). – С. 92 – 95.

2. *Мамонтова Е.В., Вершинин А.А.* – Система менеджмента качества и управление рисками на предприятиях наукоемкого машиностроения. – Вып. 2 (541). – С. 87 – 90.

4(543).indd 114 20.12.2019 9:33:40

IX. Электровакуумные приборы

1. *Асташов С.Г., Пугнин В.И., Мельников С.А., Арефьев А.С., Юнаков А.Н.* – Разработка конструкции выходной системы мощного многолучевого клистрона. – Вып. 1 (540). – С. 57 – 62.

2. *Богомолова Е.А., Галдецкий А.В., Коломийцева Н.М.* – Исследование и оптимизация замедляющей системы на цепочке связанных резонаторов для ЛБВ *W*-диапазона. – Вып. 3 (542). – С. 29 – 35.

3. *Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Закурдаев А.Д.* – Исследование возможности создания мощной ЛБВ *X*-диапазона с расширенной полосой. – Вып. 4 (543). – С. 61 – 66.

4. *Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Бакунин Г.В., Лопин М.И.* – Возможности повышения средней мощности в многолучевой ЛБВ *Ки*-диапазона. – Вып. 4 (543). – С. 53 – 60.

5. *Жабин Г.А., Архипов Д.Ю., Пелипец О.В.* – Влияние повышенного отбора тока на элементный состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода. – Вып. 4 (543). – С. 24 – 34.

6. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Модель с заданной полосой пропускания. – Вып. 1 (540). – С. 44 – 56.

7. *Каргин А.Н., Соколов А.М.* – Аналитическая тепловая модель оксидного катода магнетрона. – Вып. 2 (541). – С. 44 – 50.

8. *Крачковская Т.М., Мельников Л.А.* – Перспективы применения различных форм наноуглерода в катодных системах. – Вып. 3 (542). – С. 20 – 28.

9. *Одиноков В.В., Панин В.В.* – Современное вакуумное оборудование для микроэлектронных технологических процессов на пластинах диаметром 150…200 мм. – Вып. 4 (543). – С. 35 – 42.

10. *Тормозов В.Т., Мизинов П.В., Рыбин М.Г., Жарый Е.В., Резнёв В.А., Образцова Е.Д., Образцова Е.А.* – Металлопористый катод, модифицированный графеном. – Вып. 4 (543). – С. 43 – 52.

11. *Фурсаев М.А.* – Частотная зависимость сопротивления резонаторной системы магнетрона и ее влияние на его работу в режиме синхронизации. – Вып. 2 (541). – С. 39 – 43.

4(543).indd 115 20.12.2019 9:33:40

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2019 г.

Цифры, стоящие рядом с фамилией автора, показывают: первая (римская) – номер раздела тематического указателя, в котором помещена статья, вторая (арабская) – порядковый номер статьи в соответствующем разделе.

Алексеев Р.П. VI.1, 2
Арефьев А.С. IX.1
Архипов Д.Ю. IX.5
Асташов С.Г. IX.1
Багно Д.В. V.2, 3
Бакунин Г.В. IX.4
Балыко А.К. II.1 – 4; III.1 – 3
Балыко И.А. II.4; III.2, 3
Баранов А.В. V.1
Баранова О.А. IV.1, 3
Баринов Ю.Л. VII.7
Батаев В.Я. V.2, 3
Батурин А.В. VI.3
Белов Р.Г. VI.6, 7
Богданов С.А. V.4
Богомолова Е.А. IX.2 – 4
Борисов А.А. 1
Бормонтов Е.Н. VI.1, 2
Будзинский Ю.А. IX.6
Булаев И.Ю. VI.3; VII.3
Быкадорова Г.В. VI.1, 2
Быковский С.В. IX.6
Вакина Д.А. VI.6, 7
Вашин С.А. VII.1, 2
Вершинин А.А. VIII.1, 2
Вилков Е.А. VII.6
Волков С.А. VII.3
Воробьев И.Г. I.1
Галдецкий А.В. IX.2 – 4
Герольд И.В. VII.8
Горюнов И.В. VI.8
Гринев А.Ю. V.2, 3
Данилин Н.С. VI.3; VII.3
Демшевский В.В. V.2, 3
Дерябкина С.М. III.2, 3
Димитров Д.М. VI.3; VII.3
Димитров М.Д. VII.3
Дудинов К.В. VI.4
Евсеев С.В. VII.2
Еремин И.С. VII.5, 7
Ескин А.Е.. VII.5
Ефимов А.С. VI.4
Жабин Г.А. VII.4; IX.5
Жарый Е.В. IX.10
Заварин Е.Е. VI.6
Загорский Д.Л. VII.6
Зайкин А.Е. V.2, 3
Закурдаев А.Д. IX.3
Злыгостов М.В. VII.4
Ильин Е.В. V.2, 3
Иовдальский В.А. VI.8
Казаринов К.Д. IV.1 – 3
Каленов Д.С. VII.5, 7
Калина В.Г. IX.6
Карасев М.С. V.5
Каргин А.Н. IX.7
Колесникова В.М. VII.7
Коломийцева Н.М. IX.2
Корепин Г.Ф. VII.2
Косенко М.С. VII.9
Крачковская Т.М. IX.8
Куприянов П.В. V.4
Курдюкова Н.О. VIII.1
Курочка А.С. VI.6, 7
Лаврентьев Д.А. VI.6, 7
Левашов М.С. V.2, 3
Лопин М.И. I.1; IX.4
Лундин В.В. VI.6, 7

4(543).indd 116 20.12.2019 9:33:40

Лысенко И.Е. V.6
Максимов А.С.. VI.6, 7
Максимов Н.А. VI.5
Малинин В.С. IV.2
Мамонтова Е.В. VIII.2
Мартынова Н.А. VI.4
Мельников Л.А. IX.8
Мельников С.А. IX.1
Мешков О.И. VI.6, 7
Мизинов П.В. IX.10
Морозов А.О. I.1
Морозов О.А. I.1
Мясников А.В. VII.5
Налогин А.Г. VII.5
Налогин И.А. VII.5
Натура И.П. IX.3, 4
Николаев С.В. V.4
Образцова Е.А. IX.10
Образцова Е.Д. IX.10
Одиноков В.В. IX.9
Панас А.И. VI.5, 6
Панин В.В. IX.9
Панков Р.П. VII.5
Пархоменко М.П. VII.5, 7
Пашков А.Н. VII.2
Пелипец О.В. IX.5
Петров С.А. V.4
Полников И.Г. IV.2, 3
Половинкина В.А. VI.6, 7
Пугнин В.И. IX.1
Резнев В.А. IX.10
Рогачев И.А. VI.6, 7
Рыбин М.Г. IX.10
Самохин С.А. VI.8
Седова Ю.К. VI.6
Семенов А.С. VII.5
Семенов М.Г. VII.5
Сериков Д.Д. VII.8, 9
Слабченко В.С. VII.8, 9
Соколов А.М. IX.7
Спиричев И.И. III.3
Темнов А.М. VI.4
Терешкин Е.В. II.4; III.1 – 3; VI.8
Ткаченко А.В. V.6
Тормозов В.Т. IX.10
Трофимов А.А. VI.4
Федоров Н.А. VI.8
Федосеев Н.А. VII.5, 7
Фурсаев М.А. IX.11
Хамицев Б.Г. VII.2
Цацульников А.Ф. VI.6, 7
Цитович А.А. V.2, 3
Цоцорин А.Н. VI.1, 2
Чеканов А.В. IV.1, 3
Черкасов Д.А. VII.6
Чигарев С.Г. VII.6
Шаталов А.С. VII.6
Щелкогонов В.А. IV.1, 3
Юнаков А.Н. IX.1

4(543).indd 117 20.12.2019 9:33:41

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.

4(543).indd 118 20.12.2019 9:33:41

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 29.11.2019 г.	Усл. п. л. 14,5	Формат 60×88$^{1/8}$
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Уч.-изд. л. 15,0	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	12 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

4(543).indd 119 20.12.2019 9:33:41

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2019, вып. 4(543), с. 118

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

4(543).indd 120 20.12.2019 9:33:41