ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (531)

2016

4(531).indd 1 15.12.2016 14:48:36

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(531) **2016** **Издается с 1950 г.**

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

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*),
к.т.н. **В.И. Бейль**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
Б.Ф. Горбик, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малыщик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченков** (МКУ «Дирекция Наукограда» г. Фрязино),
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякиньков**, д.ф.-м.н. **А.И. Панас**,
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**, к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин.**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещения и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь 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», 2016 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(531) **2016** **Founded in 1950 г.**

Editor-in-chief
D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **V.I. Beyl'**, **U.A. Budzinsky**, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
B.F. Gorbik, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**, D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**,
C.T.Sc. **V.G. Lapin**, D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov** (MBD «Directorate of the Science Town» Fryazino),
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**,
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**, C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**, D.T.Sc., professor **R.A. Silin**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **V.P. Stebunov** (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**

The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate ПИ № ФС 77-24651 date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

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

СОДЕРЖАНИЕ

Катоды и материалы

Мелешкевич П.М. – О возможности применения автоэмиссионных катодов в мощных приборах СВЧ..... 6

Макаров А.П., Берснева Е.Ю., Земчихин Е.М., Чистова Г.И., Закурдаев А.Д., Иванов В.В., Уразов М.Н., Хрустов В.Р. – Скандатные катоды с высокой плотностью тока для применения в приборах СВЧ..... 15

Электровакуумные приборы

Симоненко Л.В., Симоненко А.Н. – Оптимизация режима накала мощных магнетронов для технологических установок СВЧ-нагрева..... 25

Твердотельная электроника

Былкин В.И., Гаврилов И.А., Пугнин В.И. – Серия импульсных усилителей *X*-диапазона на полевых GaAs- и GaN-транзисторах..... 33

Радиоэлектронные устройства

Карасев М.С. – Методика измерения параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя..... 37

Гусев А.П., Павлов А.В., Павлова С.Г., Мякиньков В.Ю., Сытилин С.Н., Синицына Т.В. – Высокоизбирательный малогабаритный СВЧ-модуль в керамике LTCC с применением монтажа «flip-chip» 45

Технология и материаловедение

Налогин А.Г., Семенов М.Г., Костишин В.Г., Иванов В.В., Семенов А.С., Бакланов А.В. – Феррогранаты для подложек микрополосковых ферритовых приборов *X*-диапазона 56

Налогин А.Г., Семенов М.Г., Урсуляк Н.Д. – Термостабильные ферриты для микрополосковых ферритовых приборов высокого уровня мощности..... 65

Экономика

Чекаданова М.В. – Бизнес-модель инновационно-территориального радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне..... 72

Производственно-технический опыт

Цай П.И., Фадеев А.А., Катанова Л.А., Дубровкин С.И. – Испытательная база: современное состояние, проблемы, пути их решения и предложения по переоснащению..... 79

Квантовая электроника

Балько А.К. – Уравнение фотоэффекта..... 85

Тематический указатель..... 94

Алфавитный указатель..... 98

4(531).indd 4 15.12.2016 14:48:37

CONTENTS

Cathodes and materials

Meleshkevich P.M. – On possibility of using field-emission cathodes in high-power microwave devices..... 6

Makarov A.P., Bersneva E.U., Zemchikhin E.M., Chistova G.I., Zakurdaev A.D., Ivanov V.V., Urazov M.N., Khrustov V.P. – Scandate cathodes with high current density for application in microwave devices..... 15

Electrovacuum devices

Simonenko L.V., Simonenko A.N. – Optimization of high-power magnetron heating mode for microwave heating process installations..... 25

Solid-state electronics

Bylkin V.I., Gavrilov I.A., Pugnin V.I. – A series of *X*-band pulse amplifiers on GaAs and GaN FETs..... 33

Radioelectronic devices

Karasev M.S. – The methodology of parameter measurement of perspective active phased array transceiving modules using surface contact connector..... 37

Gusev A.P., Pavlov A.V., Pavlova S.G., Myakinkov V.U., Sytilin S.N., Sinitsina T.V. – High selective small-size microwave module in LTCC ceramics using «flip-chip» mounting.. 45

Techology and material science

Nalogin A.G., Semenov M.G., Kostishin V.G., Ivanov V.V., Semenov A.S., Baklanov A.V. – Ferrogarnets for substrates of *X*-band microstrip ferrite devices..... 56

Nalogin A.G., Semenov M.G., Ursulyak N.D. – Thermostable ferrites for microstrip ferrite devices of high power level..... 65

Economics

Chekadanova M.V. – Business model of innovative regional radioelectronic cluster in a special economic zone..... 72

Production and engineering experience

Tsai P.I., Fadeev A.A., Katanova L.A., Dubrovkin S.I. – Test base: modern state, problems, the way of their solution and proposals on reequipment..... 79

Quantum electronics

Balyko A.K. – Photoelectric equation..... 85

Subject index..... 94

Alphabetical index..... 98

4(531).indd 5 15.12.2016 14:48:37

КАТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.385.7

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ В МОЩНЫХ ПРИБОРАХ СВЧ

П. М. Мелешкевич

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

Приведены результаты анализа возможности применения автоэмиссионных катодов в мощных приборах СВЧ О-типа – клистронах и ЛБВ. Рассмотрены вопросы временной стабильности характеристик автоэмиссионных катодов, их влияние на электрическую прочность приборов, некоторые эксплуатационные характеристики.

КС: автоэмиссионный катод, мгновенное время готовности, мощные приборы СВЧ, нестабильность, выгорание, «шнурование» тока, локальный перегрев, деградация

ON POSSIBILITY OF USING FIELD-EMISSION CATHODES IN HIGH-POWER MICROWAVE DEVICES

P. M. Meleshkevich

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

The results of analysis on possibility of using field-emission cathodes in O-type high-power microwave devices – klystrons and TWTs – are presented. The issues of time stability of field-emission cathode characteristics, their effect on device electric strength and some performance specifications have been considered.

Keywords: field-emission cathode, instantaneous readiness time, high-power microwave devices, instability, burn-out, current "pinching", local overheating, degradation

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность создания приборов СВЧ с мгновенным временем готовности на основе применения автоэмиссионных катодов (АЭК) всегда привлекала внимание разработчиков приборов СВЧ. Краткая история развития этого направления приведена в работе [1]:

– 1958 г. Первые образцы СВЧ-приборов (фемитрон) с АЭК [2];

– 1968 г. Изготовлен первый АЭК по полупроводниковой технологии [3];

– 1986 г. Изготовлена первая электронная пушка для ЛБВ [4];

– 1993–1995 гг. НПП Алмаз. Испытана экспериментальная ЛБВ с АЭК из стеклоуглерода (Григорьев Ю. А., Шестеркин В. И., Ярцева З. А.). В ЛБВ *L*-диапазона зафиксированы ток пучка 1,5 мА при напряжении 3000 В и выходная мощность 33 мкВт в непрерывном режиме;

4(531).indd 6 15.12.2016 14:48:37

– 1997 г. NEC Corporation. Испытана ЛБВ с АЭК [5]. В ЛБВ *X*-диапазона термокатод был заменен на АЭК. При скважности 33 на частоте 10,5 ГГц зафиксированы ток пучка 58 мА, выходная мощность 27,5 Вт. Последующего развития нет;

– 1999–2002 гг. Nortrop Grumman Corporation. ЛБВ *C*-диапазона. В режиме одиночных импульсов получены ток 91 мА, выходная мощность 55 Вт на частоте 4,5 ГГц; при скважности 100 зафиксированы ток 5 мА, выходная мощность 280 мВт на частоте 6,75 ГГц. Последующего развития нет;

– 2007 г. L-3 Communications-ED. ЛБВ *C*-диапазона. При скважности 100 достигнут ток 30 мА, при скважности 10 – ток 10 мА, выходная мощность – 18 Вт на частоте 4,1 ГГц. Долговечность составила 6 ч при скважности 100 и 2 ч при скважности 10;

– 2008 г. L-3 Communications-ED. ЛБВ С-диапазона. При скважности 100 зафиксированы ток 120 мА, выходная мощность 100 Вт на частоте 5,0 ГГц. ЛБВ работала 58 ч при скважности 100 и еще 80 ч при скважности 10.

Таким образом, можно констатировать, что, несмотря на все усилия, предпринятые различными компаниями, ни один прибор СВЧ-диапазона с АЭК серийно не выпускается. Созданные образцы работали кратковременно, достигнутая выходная мощность не превышала нескольких десятков ватт. Для сравнения – корпусированные СВЧ-транзисторы на GaN уже обеспечивают выходную импульсную мощность 300 Вт в *X*-диапазоне [6].

В настоящее время в связи с появлением новых типов АЭК: алмазоподобных, стеклоуглеродных и прочих, с порогом полевой эмиссии порядка $1 \cdot 10^5$ В/см (т. е. на 2 порядка меньше, чем у АЭК на основе тугоплавких металлов) и плотностью тока свыше 2…5 А/см^2, наблюдается новый технический бум – в различных коллективах проводится большое количество исследовательских работ с надеждой применить АЭК в разнообразных устройствах повышенной мощности, включая мощные приборы СВЧ.

В данной работе сделана попытка проанализировать принципиальные ограничения, присущие АЭК, с целью оценить реальную возможность их применения в мощных электровакуумных приборах СВЧ.

2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ МОЩНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ

К мощным электровакуумным приборам СВЧ О-типа (клистронам и ЛБВ) можно условно отнести приборы с выходной мощностью от одного до нескольких сотен киловатт. Такие приборы работают при напряжении катода от единиц до десятков киловольт и применяются в системах связи и когерентной радиолокации. Требования к качеству приборов достаточно высокие:

– стабильность выходной мощности в процессе эксплуатации;

– жесткие требования к спектру выходного сигнала, в том числе к уровню шумов;

– эксплуатационная надежность при возможных аварийных режимах (например, при высоковольтных пробоях в приборе).

Соответственно выдвигаются требования и к катодам СВЧ-приборов:

– плотность тока катода должна составлять от 1…2 до 35…40 А/см^2;

– долговечность катодов (стабильность эмиссии в процессе эксплуатации) – от 1000 ч при плотности тока 20…25 А/см^2 до сотен тысяч часов при плотности тока 1…2 А/см^2;

4(531).indd 7 15.12.2016 14:48:37

– устойчивость катода к высоковольтным пробоям, включая восстановление эмиссионных свойств после кратковременного ухудшения вакуума в приборе;

– устойчивость к ионной бомбардировке;

– низкий уровень шумов электронного потока;

В приборах СВЧ применяются оксидные, импрегнированные и металлосплавные катоды, работающие в режиме ограничения тока пространственным зарядом.

3. ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК АЭК

Работа АЭК основана на эффекте полевой эмиссии, возникающей при напряженности электрического поля более $10^5 \ldots 10^7$ В/см^2, при этом ток катода определяется формулой $\lg i = A - B/E$, где A и B – константы; E – напряженность электрического поля.

АЭК выполняются в виде микроострий различного типа (острийные, торцевые, лезвийные, пленочные), на которых и формируется высокая напряженность электрического поля. Катоды изготавливаются из тугоплавких металлов, полупроводниковых материалов, различных пленок на основе углерода, включая стеклоуглерод, алмазоподобные пленки и нанотрубки. При этом используются как технологии фотолитографии и термохимического травления, так и различные методы нанесения тонких пленок. И каждый тип катода имеет свои особенности – особенности конструкции, структуры, эмиссионных характеристик. И тем не менее, у них есть общие свойства и закономерности, которые могут определять возможность применения этих катодов в приборах с большой плотностью токоотбора.

Проведем ориентировочную оценку токовых нагрузок АЭК для простейшего варианта, приведенного на рис. 1. Здесь катод представляет собой матрицу из отдельных микроострий, выполненных в виде усеченных конусов, а анодом служит расположенная над ним плоскость.

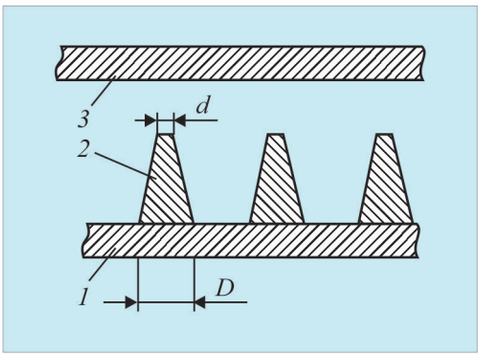


Рис. 1. Автоэмиссионный катод:
1 – основание; *2* – микроострие; *3* – анод

В качестве примера рассмотрим матрицу катода с максимально плотной упаковкой микроострий, выполненных в виде усеченных конусов с диаметром основания D = 20 мкм и диаметром вершины d = 5 мкм. При этом на поверхности площадью 1 см^2 можно разместить $n = 2{,}5\times10^5$ конусов. Примем, что ток катода равномерно распределен по всем микроострия, тогда плотность тока j_i, протекающего через вершины микроострий, будет определяться формулой $j_i = 4j_0/n\pi d^2$, где j_0 – плотность тока по основанию катода.

При j_0 = 1, 10 и 40 А/см^2 величина j_i будет равна соответственно 20, 200 и 800 А/см^2. Это

4(531).indd 8 15.12.2016 14:48:37

небольшие токи. Однако в реальной конструкции плотность тока может быть значительно больше. Так, в работе [7] приводятся экспериментальные данные для АЭК из стеклоуглерода с плотностью тока катода 6,6 А/см^2. Оказывается, что эффективная площадь эмиссии с микроострия чрезвычайно мала по сравнению с площадью вершины острия и составляет миллионную ее долю, соответственно на этом участке пропорционально увеличивается плотность тока. В этой же работе приводится ссылка, что аналогичное явление наблюдалось для молибденовых микроострий. Естественно, столь высокие плотности тока будут приводить к сильному локальному нагреву участка микроострия с максимальным током.

Данное явление носит, по-видимому, общий характер для сильноточных АЭК. Действительно, при локальном разогреве эмитирующей поверхности до высокой температуры за счет полевой эмиссии, с нее начнется термоэмиссия, соответственно возрастет и плотность тока на этом участке, что приведет к его дополнительному разогреву. Это послужит причиной для очередного увеличения тока на этом участке. Таким образом, мы наблюдаем эффект увеличения локальной проводимости на поверхности микроос11трия с ростом температуры, соответственно возникает тенденция к стягиванию тока в узкий «шнур» на перегретом участке микроострия.

Этот эффект аналогичен известному эффекту «шнурования» тока в полупроводниковых материалах, связанному с увеличением проводимости полупроводниковых материалов с ростом температуры. Он проявляется при достижении определенных критических токов через полупроводниковую структуру, развивается лавинообразно и приводит к выгоранию *p–n*-переходов.

По аналогии с полупроводниковыми приборами, эффект увеличения плотности тока АЭК при высоких температурах также можно назвать эффектом «шнурования» тока. Он будет проявляться при возникновении значительной термоэмиссии с поверхности микроострия, т. е. при высоких локальных температурах поверхности микроострия АЭК – порядка 800…1000 ^{o}C и выше.

Таким образом, АЭК можно условно разделить на 2 группы: слаботочные «холодные» АЭК, с локальной температурой поверхности меньше пороговой температуры термоэмиссии (ХАЭК), и сильноточные «горячие» АЭК, с локальной температурой поверхности микроострий выше пороговой температуры термоэмиссии (ГАЭК). Отличие их друг от друга заключается только в величине плотности тока – при малых плотностях тока они могут работать как ХАЭК, с увеличением плотности тока – переходить в категорию ГАЭК, но в ГАЭК происходит «шнурование» тока и сильный локальный перегрев поверхности микроострий.

Кроме разброса плотности тока по площади микроострия, плотность тока может быть очень неравномерна по площади АЭК. Например, в работе [8] приводятся данные о распределении эмиссионных центров по поверхности АЭК на нанокристаллических углеродных пленках, демонстрирующие, что эмиссионные центры занимают очень небольшую часть поверхности катода и токи в этих центрах очень сильно отличаются. Данное явление объясняется технологическим разбросом высоты микроострий – от него зависит величина напряженности поля и величина тока.

В целом можно констатировать:

– в мощных приборах СВЧ из-за высокой плотности тока АЭК будут работать как ГАЭК;

– ГАЭК работают в очень жестких условиях, т. к. микроострия катода находятся в сильном электрическом поле и имеют сильный локальный перегрев поверхности.

Очевидно, стабильность эмиссионных характеристик ГАЭК полностью зависит от стабильности отдельных микроострий, работающих в таких жестких условиях.

4(531).indd 9 15.12.2016 14:48:37

Определенную помощь в понимании явлений, происходящих в ГАЭК, могут оказать результаты исследования характеристик нитевидных кристаллов (вискеров) в сильных электрических полях.

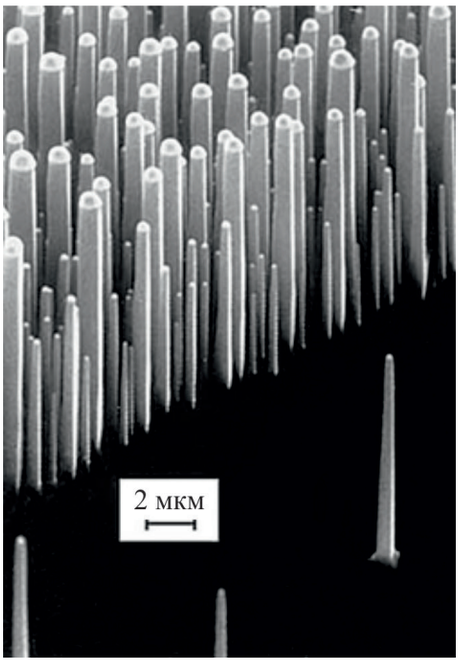


Рис. 2. Вискеры кремния

Следует отметить, что структура автоэмиссионных катодов очень похожа на структуру вискеров, которые могут быть выращены искусственно или образуются самостоятельно практически на любых материалах при создании соответствующих условий. Для примера на рис. 2 приведена фотография выращенных вискеров кремния [9].

Свойства вискеров исследовались многими авторами примерно с середины прошлого века и изучены достаточно подробно, в том числе при их нахождении в условиях технического и высокого вакуума.

Основные характеристики вискеров в вакуумных условиях при воздействии температуры и сильного электрического поля следующие [10]:

1. Образование вискеров обусловлено поверхностной диффузией атомов – перемещением атомов по поверхности материала.

2. Вискеры имеют тенденцию к образованию и росту на дефектах кристаллической решетки.

3. Скорость роста вискеров определяется скоростью поверхностной диффузии.

4. Скорость роста вискеров значительно возрастает при увеличении температуры материала.

5. Скорость роста вискеров очень сильно возрастает при создании на поверхности материала сильного электрического поля.

6. Увеличение температуры вискера приводит к сглаживанию его острия за счет сил поверхностного натяжения. Но если при этом вискер находится в сильном электрическом поле, происходит сильное вытягивание острия вискера как за счет сил притяжения между катодом и анодом, так и за счет увеличения скорости поверхностной диффузии в электрическом поле (рис. 3).

7. Вискеры являются инициаторами пробоя в вакууме. Первичный разогрев вискера за счет автоэмиссионного тока и рост вискера в сильном электрическом поле приводят к развитию лавинообразного процесса развития пробоя по следующему механизму. Постепенное увеличение длины острия вискера сопровождается увеличением автоэмиссионного тока и температуры

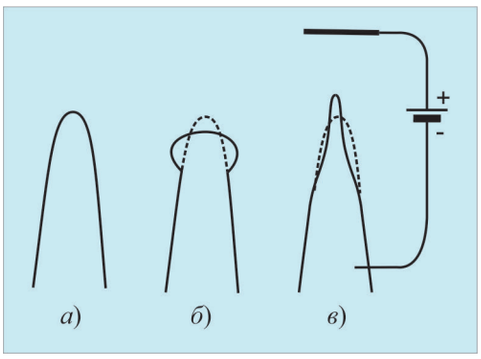


Рис. 3. Изменение формы острия:
а – исходная форма; *б* – после нагрева;
в – после нагрева с приложением напряжения
(термополевая перестройка)

4(531).indd 10 15.12.2016 14:48:37

острия, начинается термоэмиссия, ток резко возрастает, и разогревается весь вискер, происходит выделение в вакуумный объем адсорбированных на вискере газов. Далее происходит развитие пробоя между электродами по типичной схеме: ионизация газа эмиссионным током, ионная бомбардировка катода, его дополнительный разогрев и дополнительное газовыделение и т. д., в результате формируется дуговой разряд между электродами. Этот процесс на начальном этапе протекает сравнительно медленно, но когда вискер достигает определенной критической длины, все происходит очень быстро, лавинообразно, и при достаточной мощности источника питания имеет место распыление материала вискера с образованием зоны взрывной эмиссии и оплавлением близлежащей области.

8. Характеристики вискеров нестабильны в условиях низкого вакуума и высокого напряжения. При плохом вакууме происходит ионизация атомов имеющихся газов током полевой эмиссии и вискер подвергается ионной бомбардировке. Это сопровождается дополнительным нагревом бомбардируемой поверхности и химическим взаимодействием поверхности вискера с газами. В результате меняются размеры вискера и эмиссионные свойства его поверхности.

9. Характеристики вискеров неустойчивы в сильном электрическом поле. Данное явление обусловлено тем, что в сильном электрическом поле происходит постепенный рост вискеров, их выгорание и зарождение новых вискеров с соответствующими флуктуациями величины тока.

Следует отметить, что изменение характеристик вискеров в условиях вакуума, повышенной температуры и сильных электрических полей обусловлено поверхностной диффузией атомов, т. е. носит фундаментальный характер и присуще для любых материалов. Но скорость протекания этих процессов для разных материалов будет разной.

Возвращаясь к АЭК, отметим, что режим работы микроострий ГАЭК ничем не отличается от режима работы вискеров – они также работают в условиях высокого или технического вакуума, при большой напряженности электрического поля и высокой локальной температуре поверхности, т. е. в условиях, которые ускоряют скорость поверхностной диффузии атомов. Поэтому очевидно, что они будут претерпевать все вышеописанные изменения, характерные для вискеров: постепенное изменение размеров, переход полевой эмиссии в термоэмиссию, взрывное увеличение тока и выгорание микроострия с распылением материала – с вытекающими отсюда хаотическими флуктуациями тока катода. В условиях технического вакуума также будут происходить изменения характеристик катодов. И чем выше отбираемая плотность тока с катода, тем быстрее будут происходить эти процессы.

Большинство приводимых в литературе данных по флуктуациям тока АЭК в зависимости от времени и при разном давлении в вакуумном объеме (см., например, [7]) хорошо подтверждают это утверждение.

Для практического применения огромное значение имеет стабилизация параметров микроострий. Кардинальным решением является уменьшение температуры и напряженности электрического поля, но такие структуры имеют малую плотность тока и не представляют интереса для мощных приборов СВЧ. Возможно – это выбор материала с минимальной скоростью поверхностной диффузии или какие-то схемотехнические решения.

Однако принципиальным фактором остается следующее – из-за фундаментальных физических процессов в материале при высокой температуре и большой напряженности электрического поля (т. е. феномена поверхностной диффузии атомов) в ГАЭК будут неизбежно происходить деградационные изменения структуры катода, сопровождающиеся флуктуацией тока катода.

4(531).indd 11 15.12.2016 14:48:37

4. АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ И ВНУТРИВАКУУМНЫЕ ПРОБОИ

В мощных приборах СВЧ О-типа используются, как правило, электронно-оптические системы с напряженностью электрического поля между электродами 5…10 кВ/мм. Практический опыт эксплуатации таких приборов показывает, что при данной напряженности в приборах периодически возникают электрические пробои. Механизм этих пробоев фактически описан выше – на электродах имеются микродефекты (острия), на которых возникает повышенная напряженность электрического поля (порядка 10^6…10^7 В/мм). Начинается их рост за счет поверхностной диффузии, зарождается полевая эмиссия и происходит разогрев микроострия, полевая эмиссия переходит в термоэмиссию, в вакуумный объем выделяются адсорбированные газы и развивается дуговой пробой, который может вывести прибор из строя. Для снижения энергии пробоев источники питания мощных приборов СВЧ всегда имеют элементы защиты от пробоев.

С целью повышения электрической прочности, практически для всех мощных приборов СВЧ проводится технологическая операция высоковольтной тренировки, основной задачей которой является устранение на электродах различных случайных микродефектов. Принцип высоковольтной тренировки заключается в организации межэлектродных пробоев небольшой мощности, достаточной для выгорания различный микроострий на электродах прибора.

При использовании в приборе АЭК мы фактически изначально вводим в прибор конструктивный элемент с микроострыями, на которых напряженность электрического поля – порядка 10^6 В/мм. Этот элемент (АЭК) неизбежно будет источником внутривакуумных пробоев, согласно описанному выше механизму. И начало пробоев – это чисто вопрос времени – времени, при котором отдельные микроострия катода подрастут до своего критического значения и начнется лавинообразный процесс их электротермического разрушения с выделением адсорбированных газов. Далее начинает развиваться дуговой пробой между электродами. И первый пробой в области катода приведет к его полному разрушению.

Следует отметить принципиальную разницу между работой АЭК при низких (несколько десятков вольт) и высоких (единицы и десятки киловольт) напряжениях. В первом случае даже полное электротермическое распыление микроострия не приведет к развитию пробоя между электродами: приложенного напряжения недостаточно для ионизации выделившихся газов и развития пробоя. Во втором случае развитие пробоя неизбежно и его мощность будет определяться только мощностью источника питания и элементами схемы защиты от пробоя.

Высоковольтный пробой в приборе СВЧ может начинаться в любом месте, например на поверхности управляющего электрода с большим сопротивлением в цепи питания. Однако начавшееся газовыделение неизбежно приводит к развитию мощного пробоя между катодом и анодом. И начало этого пробоя – это начало катастрофического разрушения АЭК.

Таким образом, АЭК, с одной стороны, является источником внутривакуумных пробоев в высоковольтном приборе, с другой – полностью разрушается при этих пробоях.

5. ПРОЧИЕ НЕДОСТАТКИ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

Можно дополнительно перечислить следующие недостатки АЭК:

– повышенный уровень шумов тока катода, обусловленный флуктуационными явлениями на катоде;

4(531).indd 12 15.12.2016 14:48:37

– повышенный уровень модуляционных шумов по напряжению питания, обусловленный высокой крутизной зависимости тока катода от рабочего напряжения;

– деградация параметров катода при ионной бомбардировке и ухудшении вакуума. Это известные явления, и для исключения ионной бомбардировки катода предлагаются различные конструктивные решения. Например, в работе [11] предлагаются варианты построения АЭК, в которых эмитирующая часть катодов вынесена из зоны мощного ионного потока, сформированного в пролетном канале клистрона или ЛБВ. Однако и в этих конструкциях при пониженном вакууме будет происходить ионизация газов на пути прохождения электронных потоков к аноду от каждого эмиссионного центра. И образовавшиеся ионы, двигаясь по силовым линиям электрического поля, будут неизбежно бомбардировать эмиссионные центры при любом их расположении. Конечно, энергия этих ионов будет поменьше, поэтому деградация катодов будет идти медленнее, но полностью исключить ее невозможно;

– существенно более жесткие требования к стабильности напряжения источника питания, также обусловленные высокой крутизной зависимости тока катода от рабочего напряжения. Обеспечить эти требования непросто. Например, для приборов СВЧ импульсного режима работы используются источники питания с емкостным накопителем. За время импульса накопитель частично разряжается и напряжение на нем уменьшается на 1…2 %. Это приводит к падению выходной мощности в пределах 5 %. При экспоненциальной зависимости тока от напряжения (в случае применения АЭК) уменьшение выходной мощности в течение импульса может быть на порядок больше. Конечно, для практического использования это недопустимо. Поэтому для приборов с АЭК требуются высоковольтные источники питания со стабилизацией тока. И если для приборов непрерывного режима это выполнить сравнительно несложно, то для приборов импульсного режима с высокой частотой следования импульсов это большая проблема;

– низкая эксплуатационная надежность конструктивных решений с применением АЭК. Использование АЭК в реальных конструкциях электронно-оптических систем приборов СВЧ предполагает наличие мелкоструктурных «вытягивающих» электродов. При этом расстояние между катодом и «вытягивающим» электродом должно быть небольшим (от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров для разных типов катодов) и выдерживаться с жестким допуском.

Если это расстояние обеспечивается за счет применения керамического изолятора, расположенного на катоде, то существует очень высокая вероятность его «закоротки» за счет напыления материала катода (испарение материала с перегретых участков микроострий или распыление его при микропробоях) с последующим выходом прибора из строя. Если этот зазор обеспечивается за счет вакуумного промежутка, то возникают очень большие технологические проблемы. Обеспечить такие размеры с жестким допуском на расстояние катод – «вытягивающий» электрод чрезвычайно сложно.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АЭК имеют ограничения для применения в мощных приборах СВЧ. К принципиальным ограничениям, обусловленным фундаментальными физическими процессами, можно отнести следующие:

– высокая (непредсказуемая) нестабильность тока эмиссии катода от времени работы;

– провоцирование АЭК внутривакуумных пробоев;

– катастрофическое выгорание АЭК любого типа при внутривакуумном пробое.

4(531).indd 13 15.12.2016 14:48:37

К второстепенным, но также очень важным ограничениям можно отнести существенное ухудшение эксплуатационных характеристик мощных приборов СВЧ при использовании АЭК:

– нестабильность выходной мощности во время эксплуатации;

– очень жесткие требования к стабильности рабочих напряжений;

– очень жесткие требования к схемам защиты от пробоев;

– повышенный уровень собственных и модуляционных шумов;

– низкая эксплуатационная надежность.

Из вышеизложенного следует, что АЭК не имеют реальных перспектив применения в мощных приборах СВЧ.

Автор выражает признательность В. И. Пугнину за полезные технические замечания при подготовке данного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Морев, С. П.** Автоэмиссионные ячейки из стеклоуглерода с высоким аспектным отношением острий (расчет, изготовление, эксперимент) / С. П. Морев, В. И. Шестеркин, Т. Н. Соколова, Д. А. Бессонов, Е. Л. Сурменко, А. Н. Дармаев, Д. А. Комаров, Э. К. Муравьев, П. Д. Шалаев, К. В. Шумихин // Материалы конференции по электронике СВЧ, май 2016, Фрязино.

2. **Chabonner, F. M.** / F. M. Chabonner, J. P. Barbour, L. F. Garret, W. P. Dyke // Pros. IEEE. – 1963. – Vol. 51, No 7.

3. **Spindt, C. A.** // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39, No 7.

4. **Lally, P. M.** / P. M. Lally, C. D. Mack, C. A. Spindt // Microwave power tube conf., Monterey, USA, 1986.

5. **Makishima, H.** JVMC'97 / H. Makishima, H. Imura, M. Takahashi, H. Fukui, A. Okamoto // Technical Digest. – 1997.

6. // SEI Technical Review. – Oktober 2015. – No 81. – P. 40 – 44.

7. **Бушуев, Н. А.** Матричные автоэмиссионные катоды из стеклоуглерода: современное состояние и перспективы использования в СВЧ-приборах / Н. А. Бушуев, В. И. Шестеркин, А. А. Бурцев, Ю. А. Григорьев, В. П. Кудряшов, П. Д. Шалаев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 4 (519) . – С. 175 – 182.

8. **Рахимов, А. Т.** Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) на нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленках (физика, технология, применение) / А. Т. Рахимов // Конференции и симпозиумы. – 2000. – Т. 170, № 9. – С. 996 – 999.

9. **Гиваргизов, Е. И.** Кристаллические вискеры и наноострия / Е. И. Гиваргизов // Природа. – 2003. – № 11.

10. **Ашкинази, Л. А.** Вакуум для науки и техники / Л. А. Ашкинази. – М.: Наука, 1987.

11. **Дармаев, А. Н.** О возможности применения автоэмиссионных катодных матриц планарного типа для ОЭС мощных СВЧ-приборов / А. Н. Дармаев, Д. А. Комаров, А. Э. Макеев, С. П. Морев, Н. П. Абаньшин, Б. И. Горфинкель, А. Н. Якунин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 4 (519) . – С. 167 – 170.

Статья поступила 15 августа 2016 г.

4(531).indd 14 15.12.2016 14:48:37

УДК 621.385.7

СКАНДАТНЫЕ КАТОДЫ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИБОРАХ СВЧ

А. П. Макаров, Е. Ю. Берснева, Е. М. Земчихин, Г. И. Чистова, А. Д. Закурдаев

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

В. В. Иванов, М. Н. Уразов, В. Р. Хрустов

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Представлены результаты исследования эмиссионной способности, долговечности, структуры и элементного состава поверхности скандатного импрегнированного катода с матрицей из мелкозернистого порошка вольфрама с добавкой окиси скандия (0,5…2 % весовых), пропитанной алюминатом бария-кальция состава $4BaO–CaO–Al_2O_3$. Испытания в малогабаритном многолучевом клистроне показали, что такие катоды устойчивы к электропробоям и обеспечивают токоотбор плотностью 25…30 А/см^2.

КС: термоэлектронная эмиссия, скандатный импрегнированный катод, субмикронная структура, элементный анализ, плотность тока катода, модель работы

SCANDATE CATHODES WITH HIGH CURRENT DENSITY FOR APPLICATION IN MICROWAVE DEVICES

A. P. Makarov, E. U. Bersneva, E. M. Zemchikhin, G. I. Chistova, A. D. Zakurdaev

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

V. V. Ivanov, M. N. Urazov, V. R. Khrustov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

The results of investigating the emissive ability, life time, structure and elemental composition of scandate impregnated cathode surface with a matrix of fine-grain tungsten powder with scandium oxide addition (0.5…2 % weight) impregnated with barium-calcium aluminate $4BaO–CaO–Al_2O_3$ are presented. The tests in a small-size multiple-beam klystron showed that such cathodes are resistant to electrical breakdowns and provide current selection with 25…30 A/cm^2 density.

Keywords: thermionic emission, scandate impregnated cathode, submicron structure, elemental analysis, cathode current density, work model

Создание современных электронных приборов связано с разработкой термоэмиссионных катодов с повышенной плотностью тока. В настоящее время много внимания уделяется разработке и исследованию различных типов скандатных импрегнированных катодов, поскольку эти катоды имеют наиболее высокую эмиссионную способность [1–3]. Скандатные катоды, однако, недостаточно устойчивы к действию ионной бомбардировки и пробоям. В работах [1–7] установлено, что для получения высокой эмиссионной способности и устойчивости эмиссии скандатных катодов к электронной и ионной бомбардировке при их использовании в электронных приборах необходимо применение микроструктурных или наноструктурных однородных матриц с равномерным распределением бария, кислорода и скандия по объему.

4(531).indd 15 15.12.2016 14:48:37

Следует отметить, что в настоящее время механизм высокой эмиссионной способности скандатных катодов полностью не установлен. В работах [2–4] предложена пленочная модель работы скандатных катодов с монослоем Ba–Sc–O на поверхности. В работе [5] приведена оперативная модель, основанная на обнаружении на поверхности активированных скандатных катодов относительно тонкого мультислоя, состоящего из бария, скандия и кислорода. В работе [8] предложена полупроводниковая модель, в основе которой обнаружение на поверхности активированных скандатных катодов относительно толстого слоя из бария, скандия и кислорода. В работах [9, 10] представлена модель влияния скандия на уменьшение работы выхода катодных материалов, содержащих скандий, созданная в результате установления влияния ионного радиуса и валентности легирующего элемента на величину расщепления электронного уровня и величину эффективного заряда кислородных вакансий в оксиде бария. В работах [11–12] предлагается термополевой механизм эмиссии скандатных катодов.

В настоящей работе представлены результаты исследования эмиссионной способности, долговечности, структуры и элементного состава поверхности скандатных катодов с матрицей из вольфрама с добавкой окиси скандия, пропитанных алюминатом бария-кальция. Для получения матриц катодов с равномерным распределением бария, кислорода и скандия по объему в данном случае использовали порошок вольфрама марки ВЧДК (фракция В). Равномерное распределение скандия по объему матрицы достигалось путем тщательного перемешивания порошков вольфрама и окиси скандия либо путем пропитывания порошка вольфрама водным раствором нитрата скандия с последующими сушкой и отжигом в среде водорода (золь-гель технология).

Матрица катодов диаметром 4 мм и толщиной 1 мм изготавливалась путем прессования в молибденовый керн и последующего спекания в водороде при 1600 °С смеси порошков вольфрама и окиси скандия (0,5…2 % весовых). Пористость матрицы составляла 25…28 %. Исследование поверхности этих матриц после спекания методом растровой электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп JSM-7001F) показало, что поверхность зерен вольфрама равномерно покрыта мелкими кристаллами (размером 10…100 нм) окиси скандия (рис. 1, образец № 573/0/127). Затем матрица пропитывалась в атмосфере водорода при температуре 1700…1750 °С эмиссионно-активным составом – алюминатом бария-кальция ($4BaO–CaO–Al_2O_3$).

Эмиссионные свойства катодов испытывались в диодах в условиях высокого вакуума (менее 10^{-5} Па). Расстояние между катодом и анодом составляло 1 мм. Эмиссионные свойства измерялись при подаче импульсного анодного напряжения длительностью 2…5 мкс с частотой 50 Гц. Для исследования структуры и элементного состава поверхности полученных скандатных катодов применялись также методы термоэлектронной эмиссионной микроскопии, растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, электронной Оже-спектроскопии и рентгеновского энергодисперсионного анализа.

Эмиссионная способность катодов исследовалась после активации при температуре 1150 °С в течение 2 ч. Как показано на рис. 2, скандатные катоды с матрицей из порошка вольфрама имеют высокие эмиссионные свойства, плотность тока с катода достигает более 100 А/см^2 при температуре 980…1070 °С. Следует отметить, что скандатные катоды имеют аномально высокий коэффициент Шотки, который связан с неоднородностью эмиссии по поверхности катодов. Исследование в термоэлектронном эмиссионном микроскопе распределения эмиссии по поверхности скандатных катодов после активации показало (рис. 3) её существенную неодно-

4(531).indd 16 15.12.2016 14:48:38

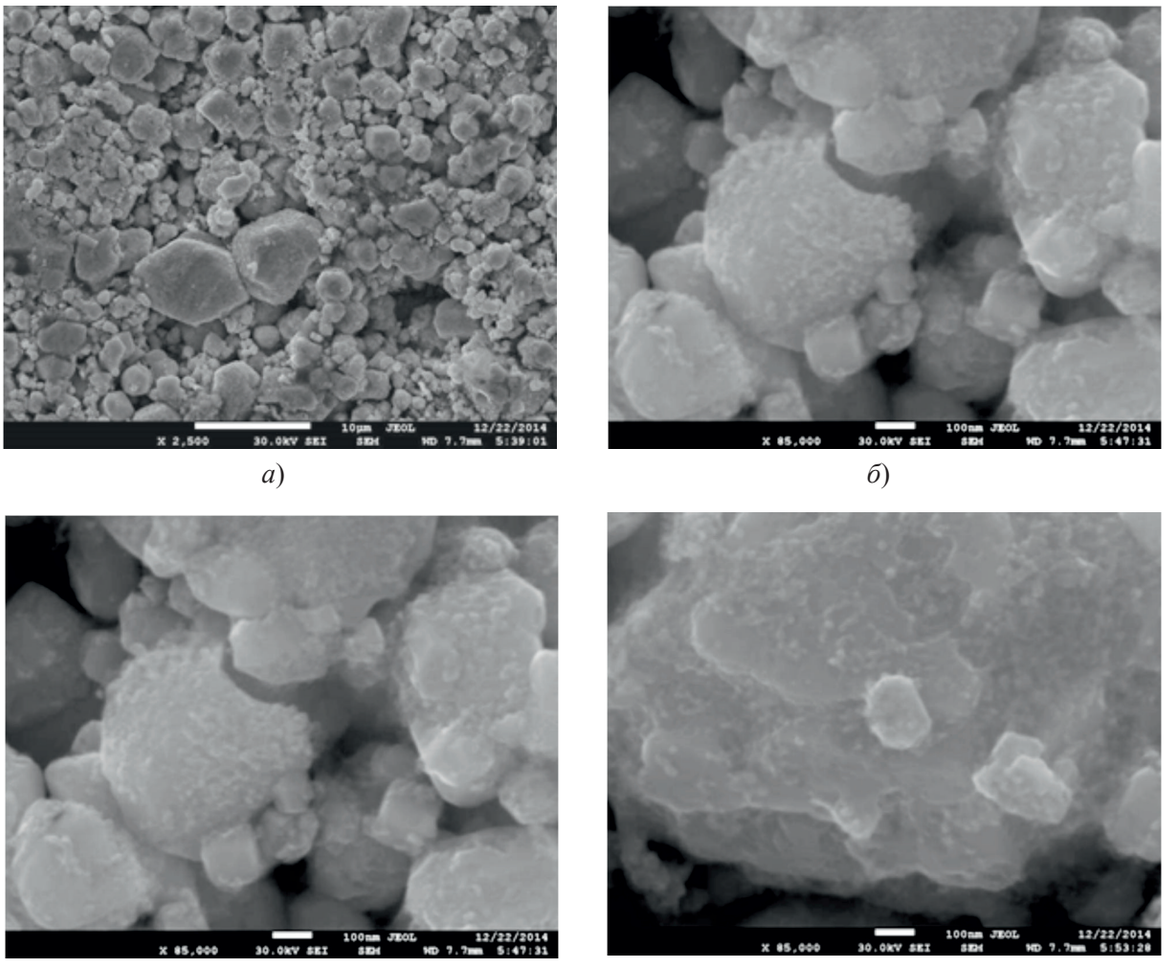


Рис. 1. Морфология образца № 573/0/127 до испытаний:
а – ×2500; *б* – ×20000; *в* – ×85000; *г* – ×85000

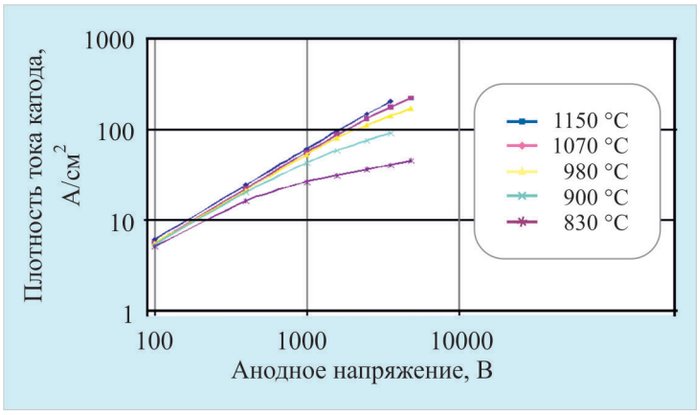


Рис. 2. Зависимости плотности тока эмиссии скандатного катода от анодного напряжения и температуры

4(531).indd 17 15.12.2016 14:48:38

родность, что связывается с существованием на поверхности этих катодов эмиссионно-активных кристаллов или групп кристаллов. Аналогичный результат при исследовании оксидных катодов был получен в работах [13, 14].

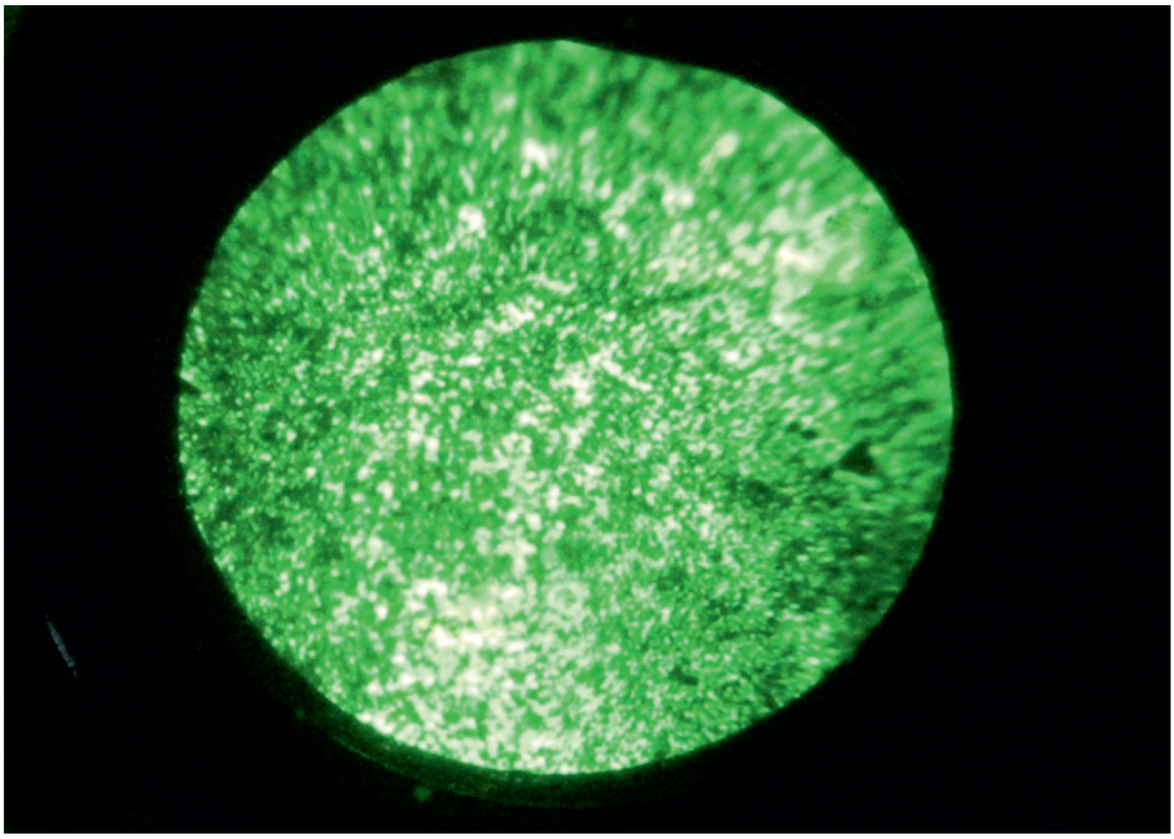


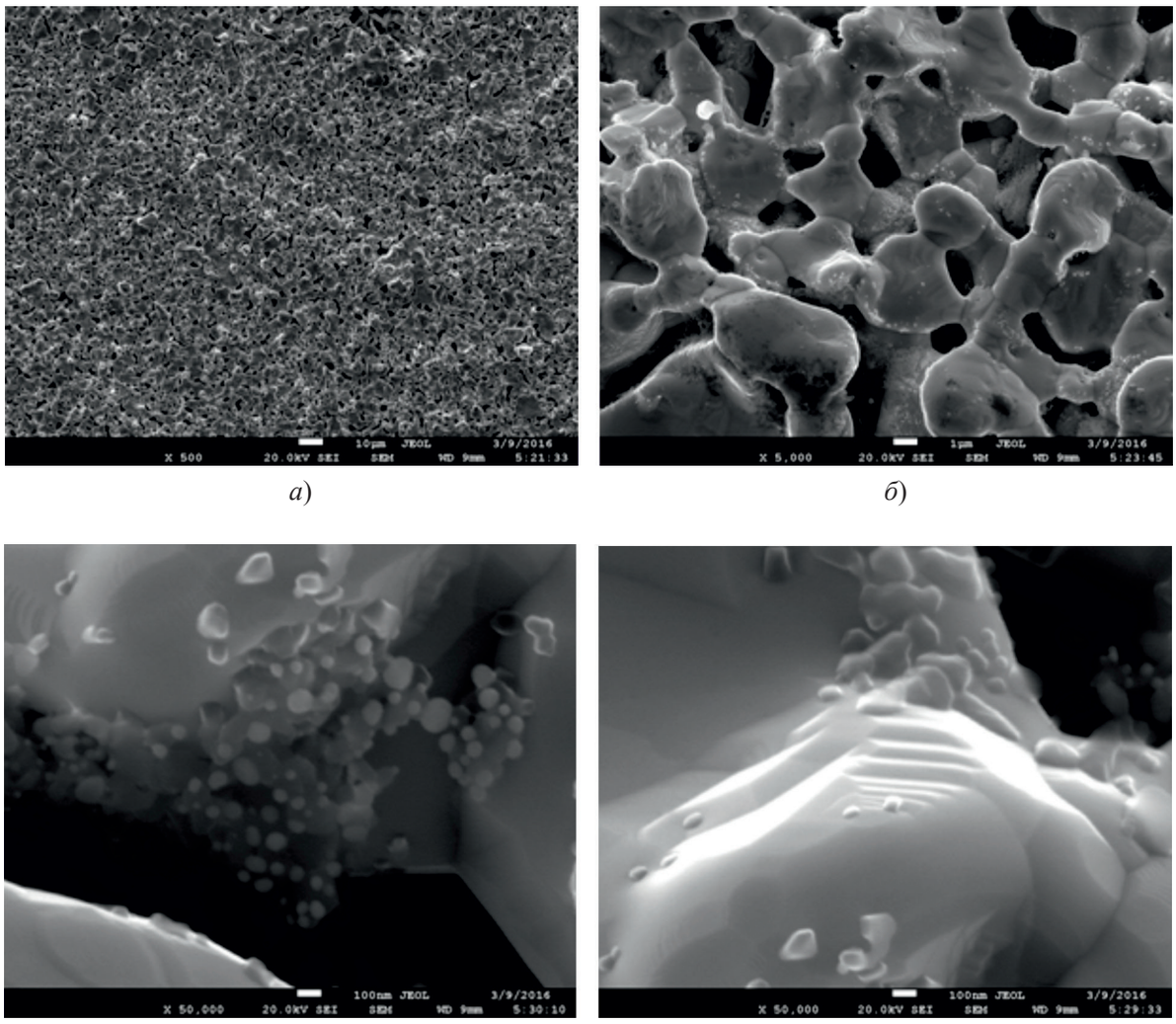
Рис. 3. Эмиссионное изображение поверхности скандатного катода. ×100

Испытания скандатных катодов на долговечность проводились в интервале температур 950…1000 °С. Установлено, что катоды с вольфрамовой матрицей при температуре до 1000 °С работают без заметного падения тока эмиссии в течение 10000 ч.

Исследование эмитирующей поверхности после проведения активации и испытаний на долговечность методом атомно-силовой микроскопии и сканирующей вторичной электронной спектроскопии показало, что она имеет существенную неоднородность в различных точках (рис. 4…6). На поверхности катодов, как видно из рисунков, образуются пирамидальные или иглообразные кристаллы размером 20…100 нм. Образование пирамидальных структур на поверхности скандатных катодов было обнаружено и ранее [12] при исследовании их методом атомно-силовой микроскопии. На рис. 7 изображены сравнительные гистограммы распределения размеров зерен вольфрама (*а*) и находящихся на них частиц на основе окиси скандия (*б*) на поверхности скандатного катода (образец № 573/0/127) до и после проведения испытаний. Из представленных результатов следует, что на поверхности скандатного катода при проведении испытаний на долговечность размер зерен вольфрама (среднечисленное значение) увеличивается от значения 1930 до 3680 нм, а размер кристаллов на основе окиси скандия (среднечислен-

4(531).indd 18 15.12.2016 14:48:38

ное значение) уменьшается от значения 170 нм до 72 нм. С изменением структуры и состава поверхности скандатного катода в процессе испытания на долговечность, очевидно, связано изменение его эмиссионных свойств.



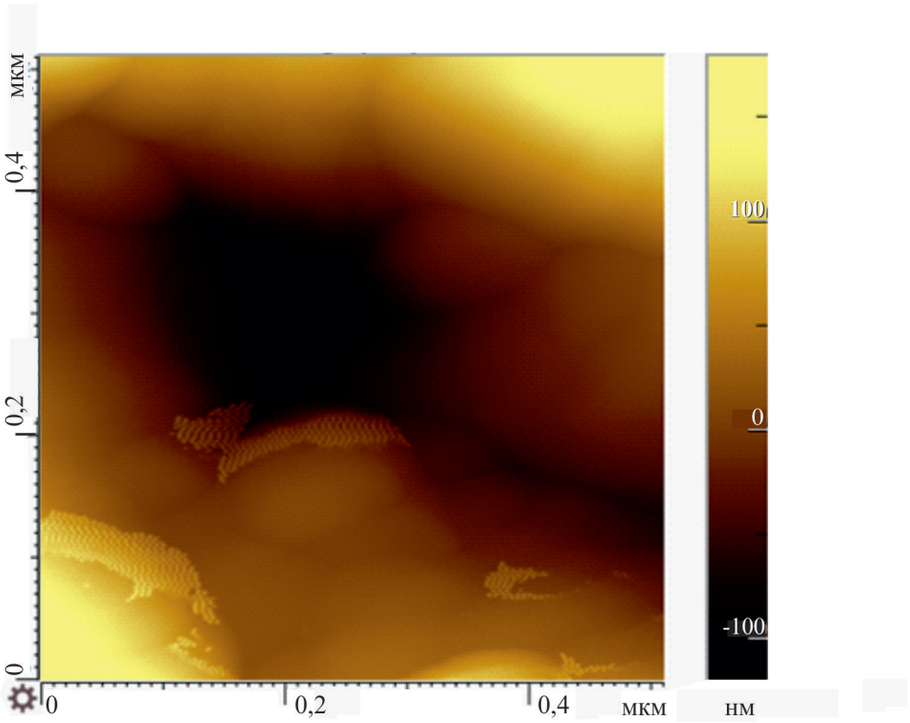
а) *б*)

в) *г*)

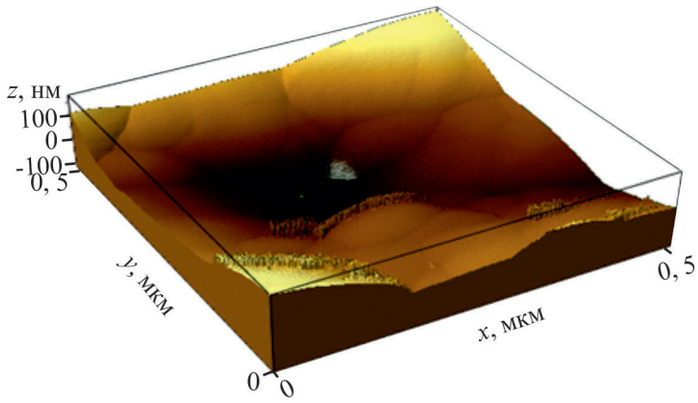
Рис. 4. Морфология образца № 573/0/127 после 1000 ч испытаний:
а – ×500; *б* – ×5000; *в* – ×50000 (точка 1); *г* – ×50000 (точка 2)

Элементный состав поверхности скандатных катодов исследовался методами Оже-спектроскопии. Оже-спектральный анализ показал, что после активации на поверхности скандатных катодов формируется эмиссионно-активная пленка, состоящая в основном из бария, скандия и кислорода при соотношении компонентов (1,5…2):1:(1,5…2,5). Исследование эмитирующей поверхности скандатных катодов, прошедших активацию и испытание на долговечность, методом рентгеновского энергетического дисперсионного анализа также показало, что на поверхности этих катодов присутствуют кристаллы, состоящие из окиси скандия и окиси бария [14].

4(531).indd 19 15.12.2016 14:48:39



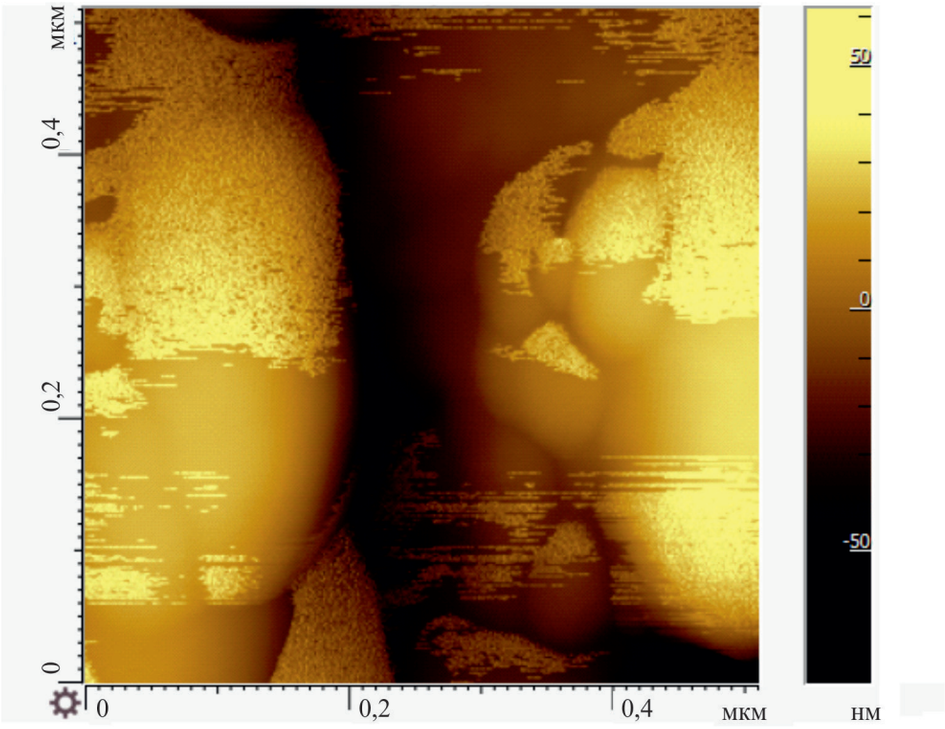
а)



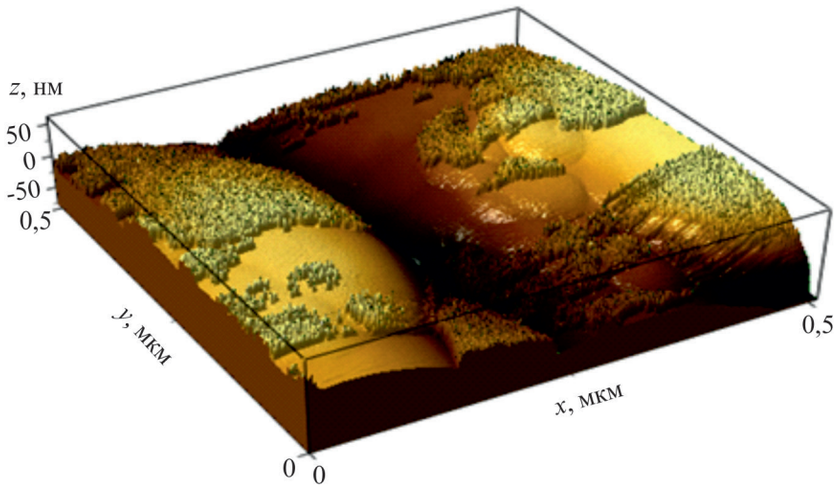
б)

Рис. 5. Атомно-силовая микроскопия скандатного катода (точка 1) после 1000 ч испытаний:
а – изображение поверхности катода размером 500 × 500 нм;
б – 3*d*-реконструкция поверхности катода

4(531).indd 20 15.12.2016 14:48:39



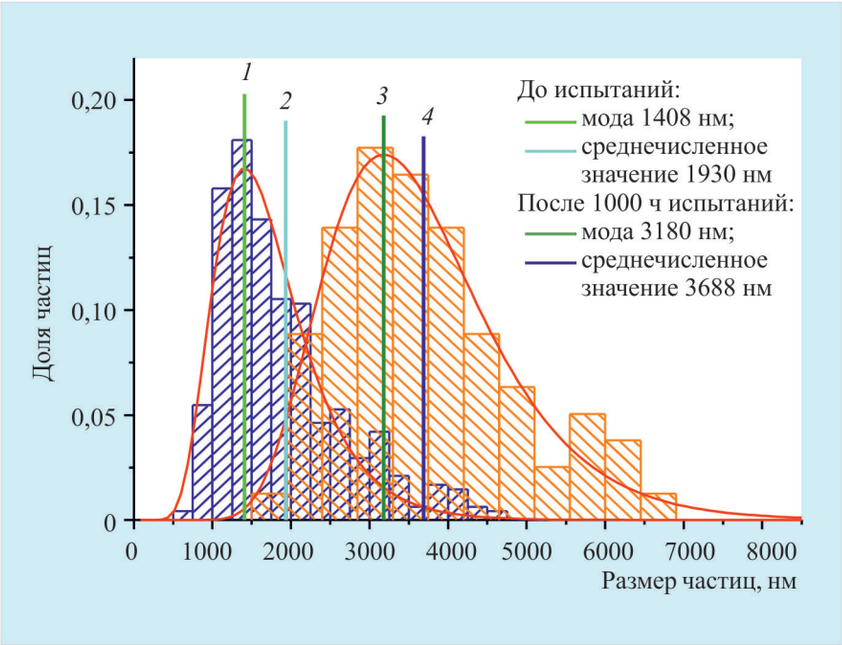
а)



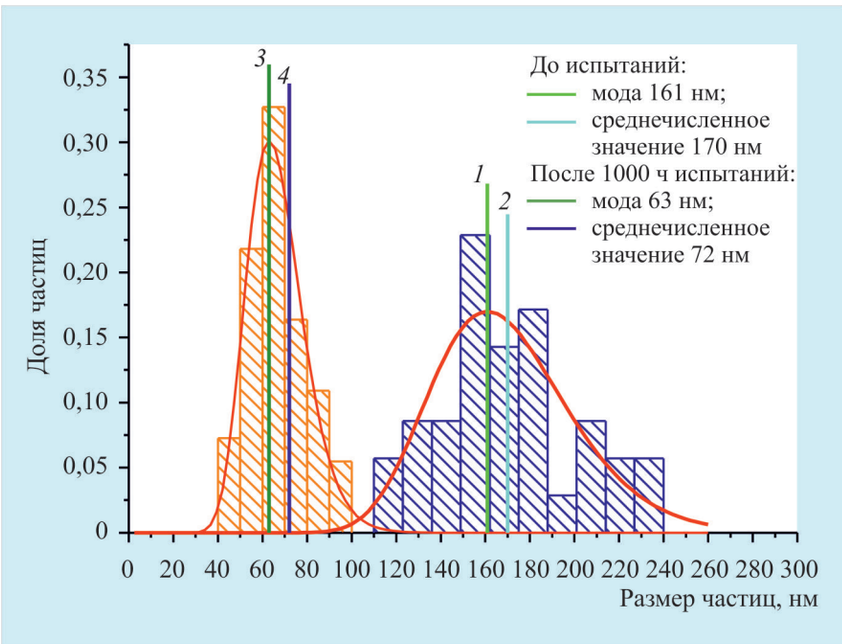
б)

Рис. 6. Атомно-силовая микроскопия скандатного катода (точка 2) после 1000 ч испытаний:
а – изображение поверхности катода размером 500 × 500 нм;
б – 3*d*-реконструкция поверхности катода

4(531).indd 21 15.12.2016 14:48:39



а)



б)

Рис. 7. Сравнительные гистограммы распределения размеров зерен вольфрама (*а*) и находящихся на них кристаллов на основе окиси скандия (*б*) на поверхности скандатного катода № 573/0/127 до (*1*, *2*) и после (*3*, *4*) проведения испытаний

4(531).indd 22 15.12.2016 14:48:40

На основании полученных результатов можно утверждать, что модель работы скандатных катодов, основанная на образовании на эмитирующей поверхности наноразмерных кристаллов, состоящих в основном из окиси скандия и окиси бария и активированных монослойной пленкой атомов бария, является предпочтительной. Механизмом высокой эмиссионной способности скандатных катодов может являться термоавтоэлектронная эмиссия, как отмечалось в работах [11, 12, 14, 15], или «низковольтная» термоавтоэлектронная эмиссия [16]. Феноменологическая модель такой низковольтной термоавтоэлектронной эмиссии представлена в работе [17].

По описанной технологии была изготовлена партия скандатных катодов для применения в малогабаритном многолучевом клистроне. Катод представлял собой узел с 18-ю эмиссионными лучами диаметром 0,4 мм. Неэмитирующая часть поверхности катода покрывалась пленкой антиэмиссионного материала – дисилицида молибдена.

Проведенные испытания показали, что скандатные катоды обеспечивают в СВЧ-приборе отбор катодного тока с плотностью 25…30 А/см^2, время готовности прибора (при использовании форсированного режима накала подогревателя катода) до 3 с, устойчивы к пробоям.

В настоящее время проводится работа по расширению применения скандатных катодов в приборах СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gartner, G.** Emission properties of top-layer scandate cathodes prepared by LAD / G. Gartner, P. Geittner, H. Lydting, A. Ritz // Appl. Surf. Sci. – 1997. – Vol. 111, No 11.

2. **Hasker, J.** / J. Hasker, C. Crombeen // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1990. – Vol. ED-37. – P. 2589 – 2594.

3. **Zagwijn, P. M.** Model system for scandate cathodes / P. M. Zagwijn, J. W. M. Frenken, U. van Slouten, P. A. Duine // Appl. Surf. Sci. – 1997. – Vol. 111. – P. 35 – 41.

4. **Muller, V.** Work function for models of scandate cathode surface / V. Muller // Appl. Surf. Sci. – 1997. – Vol. 111. – P. 30 – 34.

5. **Liu, W.** Operating model for doped matrix scandate cathode / W. Liu, K. Zhang, Y. Wang, K. Pan, X. Gu, J. Wang, J. Li, M. Zhou // Appl. Surf. Sci. – 2005. – Vol. 251. – P. 80 – 88.

6. **Zang, M.** Investigation of recovery characteristics after ion bombardment on scandate cathode / M. Zang, H. Zhang, P. Liu, Y. Li // Proc. IVESC, Beijing, China. – 2004. – P. 153 – 154.

7. **Gaertner, G.** Life-limiting mechanisms in Ba-oxide, Ba-dispenser and Ba-scandate cathodes / G. Gaertner, D. Barratt // Appl. Surf. Sci. – 2005. – Vol. 251. – P. 73 – 79.

8. **Raju, R. S.** / R. S. Raju, C. E. Melony // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1994. – P. 2460 – 2467.

9. **Ли, И. П.** Физико-химические особенности скандатных катодных материалов / И. П. Ли, В. Н. Капустин и др. // Наукоемкие технологии. – 2014. – Т. 15, № 11. – С. 40 – 49.

10. **Ли, И. П.** Структура электронных уровней кислородных вакансий в оксиде бария / И. П. Ли, В. Н. Капустин и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2. – С. 45 – 58.

11. **Bekh, I. I.** The influence of the surface structure on emission properties of the Sc-Ba dispenser cathode / I. I. Bekh, V. V. Ilchenko, A. F. Lushkin // Proceedings of IVESC 2004 P-3, Beijing. – 2004. – P. 197.

12. **Дюбуа, Б. Ч.** Влияние структуры поверхности металлопористых катодов на их эмиссионные свойства / Б. Ч. Дюбуа, А. Г. Михальченков, О. В. Поливникова, М. П. Темирязева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 1 (504). – С. 25 – 34.

13. **Brodie, I.** The nature of the emitting surface of scandate cathodes / I. Brodie, B. Vavcil // Proceedings of IVEC 2014. – P. 53 – 54.

4(531).indd 23 15.12.2016 14:48:40

14. **Makarov, A. P.** Emission properties, microstructure and surface composition of scandate impregnated cathodes with a tungsten and a tungsten-rhenium matrix / A. P. Makarov, E. U. Bersneva, E. M. Zemchikhin, G. I. Chistova // Proceedings of IVESC 2014, P-3. – P. 147 – 148.

15. **Makarov, A. P.** The change of a multilayer film work function of jointly adsorbed atoms of barium, scandium and oxygen on the facet (100) of a tungsten crystal at adsorption and heating / A. P. Makarov // Proceedings of IVESC 2015, P-3.

16. **Malter, L.** / L. Malter // Phys. Rev. – 1936. – Vol. 49. – P. 876.

17. **Ptitsin, V. E.** Phenomenological model of so-cold “Low Voltage” field emission / V. E. Ptitsin // Proceedings of IVESC 2014, P-3. – P. 215 – 216.

Статья поступила 31 мая 2016 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ГРИГОРЬЕВ А. Д., ИВАНОВ В. А., МОЛОКОВСКИЙ С. И. **Микроволновая электроника.** Учебник / Под ред. А. Д. Григорьева. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 496 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).

Рассматриваются основные типы и разновидности микроволновых приборов, их принцип действия, теория, характеристики и параметры, конструктивные особенности. Подробно изложены механизмы взаимодействия электромагнитного поля с заряженными частицами, законы их движения в различных средах. Физические основы вакуумной и твердотельной микроволновой электроники рассмотрены с единых позиций. Изложение сопровождается большим количеством иллюстраций.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров «Электроника и наноэлектроника», «Конструирование и технология электронных средств», «Приборостроение», аспирантов и магистров смежных направлений подготовки, а также будет полезен инженерно-техническим работникам и всем, интересующимся микроволновой электроникой.

4(531).indd 24 15.12.2016 14:48:40

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.642.3

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НАКАЛА МОЩНЫХ МАГНЕТРОНОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СВЧ-НАГРЕВА

Л. В. Симоненко

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

А. Н. Симоненко

ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Ввиду растущего спроса в промышленности на технологические установки СВЧ-нагрева с мощным магнетронным генератором непрерывного действия, вопрос об увеличении срока службы магнетрона становится более актуальным. Поэтому появляется необходимость в исследованиях и разработке методов оптимизации режимов работы, которые улучшают такие немаловажные характеристики магнетрона, как долговечность и надежность. В статье проведен обзор существующих технических решений и предложен альтернативный метод оптимизации температуры накала магнетрона в динамическом режиме работы.

КС: магнетрон, горячее сопротивление, накал, прямонакальный катод, оптимизация режима

OPTIMIZATION OF HIGH-POWER MAGNETRON HEATING MODE FOR MICROWAVE HEATING PROCESS INSTALLATIONS

L. V. Simonenko

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

A. N. Simonenko

CJSC «RPE «Magratep», Fryazino

Due to increasing of the industrial demand for microwave heating process installations with a CW high-power magnetron oscillator the issue of magnetron life increase becomes more actual. That's why there is a necessity to study and develop optimization methods of operating modes which improve such important magnetron characteristics as long life and reliability. The paper covers the existing technical solutions and proposes an alternative method for optimizing magnetron heating temperature in dynamic operating mode.

Keywords: magnetron, hot resistance, heating, directly heated cathode, mode optimization

1. ВВЕДЕНИЕ

Области применения СВЧ-энергии в технологических процессах постоянно расширяются благодаря ряду полезных свойств, таких, как простота и безынерционность регулировки выходной мощности, быстрота и равномерность СВЧ-нагрева по всему объему, экологическая чистота получаемой продукции, высокая эффективность и т. д. СВЧ-энергия внутри вещества

4(531).indd 25 15.12.2016 14:48:40

преобразуется в тепловую, благодаря чему достигается качество продукции, повышается производительность труда и снижается стоимость работ [1].

Как правило, в качестве источников СВЧ-энергии в технологических установках применяют магнетронный генератор. В отличие от других источников СВЧ-энергии, которые широко применяются в различных областях науки и техники: радиолокация, связь, телевидение, телеметрия и т. д., к магнетронам, предназначенным для СВЧ-нагрева, не предъявляют жестких требований по фазовым и временным искажениям сигнала, когерентности, широкополосности и др. Актуальными требованиями для магнетронов, используемых в технологических установках СВЧ-нагрева, являются их надежность, стоимость и простота регулировки выходной мощности. Экономически целесообразным является применение для промышленных технологических установок методов оптимизации в системах управления и коррекции режима работы магнетронного генератора, благодаря чему представляется возможность значительно повысить надежность магнетрона. Что, в свою очередь, позволит снизить затраты на обслуживание установки СВЧ-нагрева.

Одним из таких методов является оптимизация параметров прямонакального катода в динамическом режиме.

2. ОПТИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПРЯМОНАКАЛЬНОГО КАТОДА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ МАГНЕТРОНА

В промышленной установке СВЧ-нагрева с началом технологической операции, связанной с использованием СВЧ-энергии, магнетрон запускается и работает по определенному алгоритму (рис.1). Режимы работы катода в магнетроне можно условно разделить на статический и динамический. Статический режим включает в себя подачу тока накала на катод и являет собой, по сути, его подготовку к запуску магнетрона. В динамическом режиме работы на катод поступает помимо тока накала еще и мощность от обратной электронной бомбардировки, что вызывает дополнительное повышение температуры катода. Обеспечение оптимальной температуры катода является одним из основных условий стабильной и надежной работы магнетрона в технологической установке СВЧ-нагрева.

Снижение и повышение температуры катода относительно оптимального значения влечет за собой негативные последствия. Так, при недостаточной температуре катода и, как следствие, низкой эмиссии магнетрон в динамическом режиме может перескочить с основного режима генерации π на генерацию моды π–1. Частота генерации π–1 для мощных магнетронов с рабочей частотой 915 МГц составляет примерно 1400…1600 МГц. В связи с этим появляется проблема отвода энергии из прибора в нагрузку, так как конструкция такого магнетрона оптимизирована для отвода СВЧ-энергии с частотой 915 МГц и не может оптимально отводить СВЧ-энергию частотой 1540 МГц. Работа в режиме генерации π–1 приводит к выходу из строя магнетрона [2].

Ниже отражены негативные последствия при работе магнетрона в режиме генерации π–1:

– вследствие высокой интенсивности обратной бомбардировки температура катода резко увеличивается. Перегретая спираль подогревателя провисает, закорачивая электрическую цепь накала;

– между клеммами накала и электрической «землей» развивается СВЧ-поле высокой напряженности, излучение которого вызывает выход из строя электронных компонентов оборудования,

4(531).indd 26 15.12.2016 14:48:40

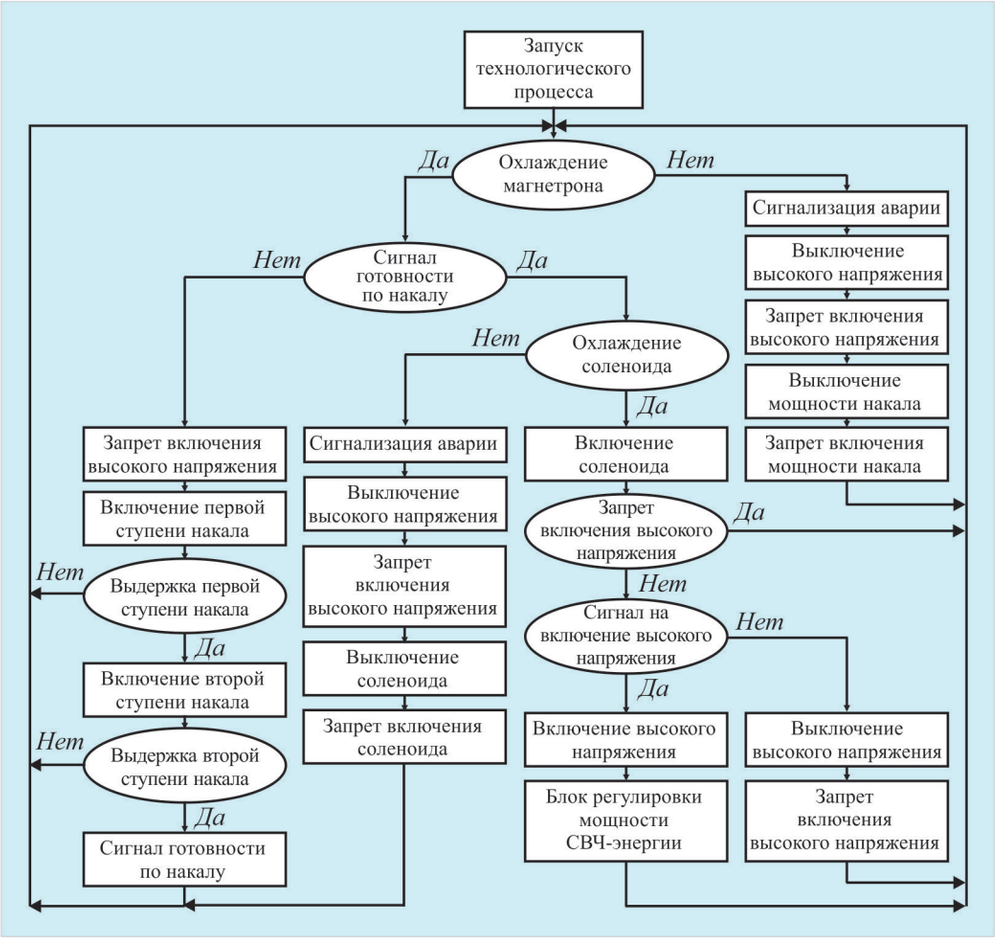


Рис.1. Типовой алгоритм запуска и работы магнетронного генератора в технологических установках СВЧ-нагрева

диэлектрические и внешние дуговые пробои. Велика вероятность того, что дуговой пробой в высоковольтном керамическом изоляторе магнетрона приведет к разрушению керамики;

– высокая напряженность СВЧ-поля приводит к внутреннему дуговому пробою, который влечет ухудшение вакуума в магнетроне. Ухудшение вакуума в магнетроне обычно приводит к более мощному внутреннему дуговому пробою.

Работа в режиме π–1 сопровождается следующими признаками:

1. Изменение сопротивления катода магнетрона в сторону увеличения сопровождается понижением тока накала при постоянном значении напряжения.

2. Незначительный уровень или полное отсутствие мощности на частоте 915 МГц.

3. Низкий КПД и большое рассеивание тепла на аноде магнетрона.

4. Большой уровень излучаемой мощности на частоте 1400…1600 МГц из области катодной ножки магнетрона.

Если эксплуатация прибора происходит с повышенной температурой катода, то это приводит к избыточному испарению вольфрама и проседанию нити накала, что значительно снижает срок службы магнетрона.

4(531).indd 27 15.12.2016 14:48:40

Поэтому контроль температуры накала катода является критически важным условием для обеспечения долговечности и надежности магнетрона. Считается, что для обеспечения оптимальной температуры накала необходимо постоянно поддерживать горячее сопротивление накала во всем диапазоне динамического режима работы магнетрона [3]. Горячее сопротивление накала катода определяется из соотношения:

$$R_{гор} = U_{нак}/I_{нак.ст}, \quad (1)$$

где $U_{нак}$ – напряжение накала катода; $I_{нак.ст}$ – ток накала, обеспечивающий температуру катода, необходимую для запуска магнетрона.

В 70-х годах специалисты из фирмы Burle Industries Inc. (США) рекомендовали при эксплуатации магнетронов для обеспечения оптимальной температуры катода постоянно поддерживать горячее сопротивление накала. Затем в 90-х годах были проведены исследования работы подогревателя в магнетронах с различным уровнем мощности для нахождения оптимальной температуры спирали накала. По результатам исследований было установлено, что поддержание горячего сопротивления не обеспечивает оптимальной температуры накала. Также при поддержании горячего сопротивления имеются технические сложности измерения напряжения подогревателя, так как подогреватель находится под высоким напряжением, которое может достигать 20 кВ. Было предложено оптимизировать температуру накала магнетрона путем контроля спектра выходной мощности, осуществляя при этом регулировку тока подогревателя на минимальный уровень шумов около несущей частоты. Если система автоматики технологической установки не обеспечивает этот способ контроля, то предлагался более простой метод решения. Этот метод подразумевает корректировку тока подогревателя магнетрона по снятой заранее зависимости тока накала от выходной мощности магнетронного генератора [4].

3. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НАКАЛА В УСТАНОВКАХ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Методы оптимизации режима работы магнетрона в технологических установках СВЧ-нагрева улучшают параметры долговечности и надежности и часто являются коммерческой тайной, так как дают производителю конкурентное преимущество. Поэтому информация по данной проблематике в печатных публикациях и на интернет-ресурсах практически отсутствует. По результатам анализа работы установок зарубежного производства можно сделать выводы о системе оптимизации температуры накала магнетрона в динамическом режиме.

Фирмы – производители магнетронов предоставляют линейный график зависимости тока накала от выходной мощности магнетронного генератора. По этому графику можно оценить, какой ток накала является оптимальным и соответствует режиму работы магнетрона при конкретной выходной мощности, а также стартовое значение тока накала, необходимое для запуска магнетрона. Этот график приводится в паспорте на прибор. На рис. 2 приведен линейный график на магнетрон CWM-75KW мощностью 75 кВт на частоте 915 МГц.

Когда магнетрон встраивают в технологическую установку, данные с графика зависимости вводят в постоянное запоминающее устройство автоматизированной системы управления накалом. В процессе работы магнетронного генератора система управления в режиме реального времени отслеживает уровень выходной мощности и корректирует значение тока накала

4(531).indd 28 15.12.2016 14:48:40

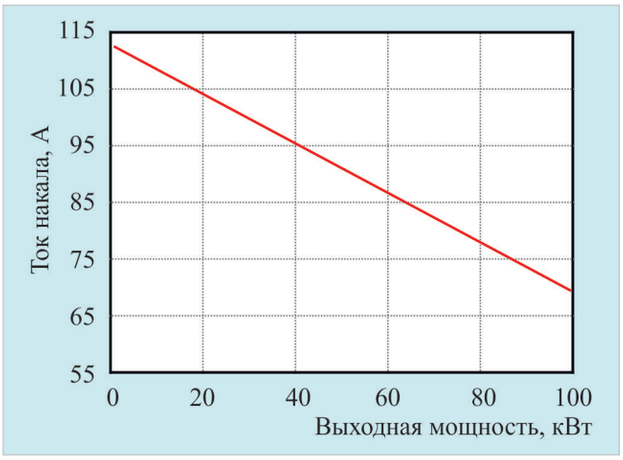


Рис. 2. Линейный график зависимости тока накала магнетрона от его выходной мощности

согласно введенным данным. Работа автоматизированной системы управления накалом наглядно показана на рис. 3.

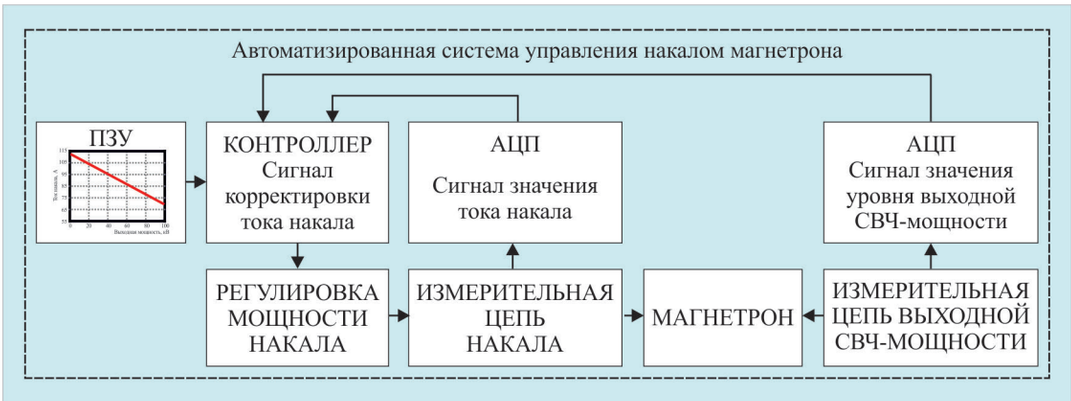


Рис. 3. Структурная схема системы управления накалом магнетрона:
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

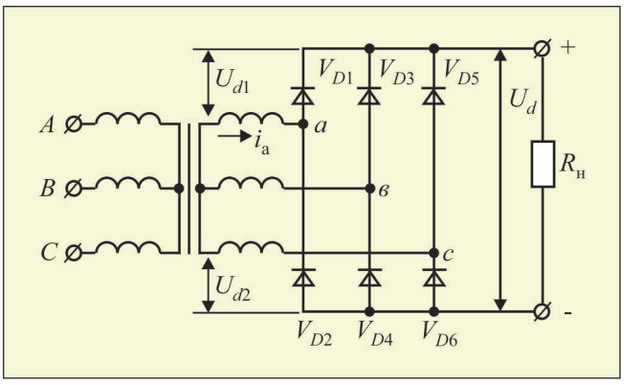
4. КОНТРОЛЬ СПЕКТРА ОГИБАЮЩЕЙ АНОДНОГО ТОКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ МАГНЕТРОНА

Несмотря на простоту технической реализации, описываемый выше метод оптимизации режима работы магнетрона, применяемый зарубежными производителями, содержит ряд недостатков. Главным из них является отсутствие прямого контроля за режимом работы магнетрона. Это чревато тем, что при незначительных изменениях электрических параметров накала, которые могут произойти в процессе эксплуатации прибора, система управления будет привязывать работу магнетрона к введённым ранее значениям с линейного графика зависимости в ПЗУ. При таком режиме работы системы управления оптимальная температура катода не достигается, так как в этом случае график не отражает оптимальный ток накала в конкретной точке

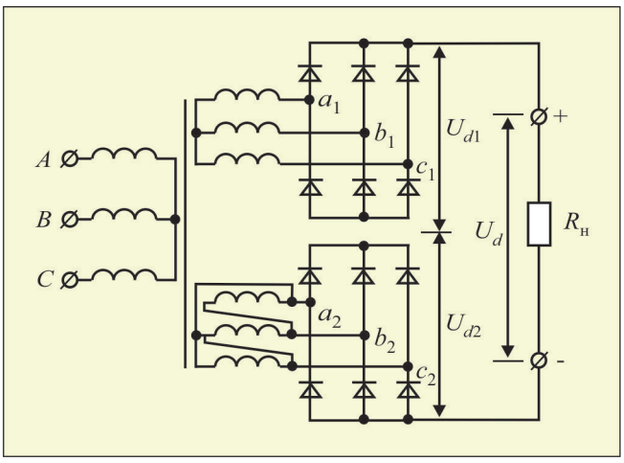
4(531).indd 29 15.12.2016 14:48:40

выходной мощности. Что может привести к перескоку в режим генерации π–1. С другой стороны, использование анализатора спектра сигналов для корректировки тока накала до минимального уровня шумов около несущей, как рекомендовано специалистами фирмы Burle Industries Inc., не всегда оправдано, ввиду высокой стоимости измерительного оборудования. Альтернативным техническим решением организации мониторинга за работой магнетрона в режиме реального времени может служить контроль формы огибающей анодного тока.

Как правило, в источнике питания анода технологических установок СВЧ-нагрева применяют шестифазную или двенадцатифазную схему выпрямления Ларионова (рис. 4). Если в низкопотенциальную цепь источника питания анода встроить резистор *R*, как показано на рис. 5, то напряжение на этом резисторе будет повторять форму анодного тока.



а)



б)

Рис. 4. Шестифазная (*а*) и двенадцатифазная (*б*) схемы выпрямления Ларионова

Напряжение сигнала огибающей можно определить соотношением:

$$U_{ог} = RI_а, \tag{2}$$

где *R* – сопротивление резистора, встроенное в цепь питания анода; $I_а$ – ток анода магнетрона.

4(531).indd 30 15.12.2016 14:48:41

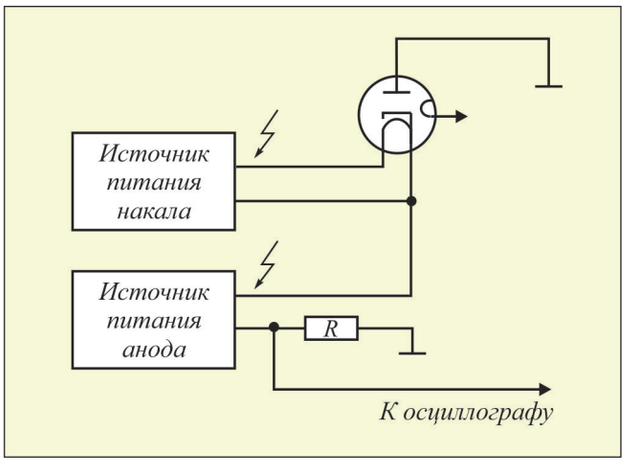


Рис. 5. Схема питания магнетрона

При наблюдении за формой сигнала огибающей анодного тока осуществляется контроль в реальном времени температурного режима работы катода. По характеру изменения формы сигнала огибающей можно определить режим работы накала магнетрона. Так, если на сигнале огибающей анодного тока присутствуют незначительные искажения или искажения отсутствуют вовсе, то режим работы и температуру катода $T_к$ можно считать оптимальными для данного прибора (рис. 6). На рис. 7 показана огибающая анодного тока, сигнал которой имеет искажения, характерные для избыточной температуры катода $T_к$. На рис. 8 – огибающая, сигнал которой имеет искажения, присущие режиму работы накала с недостаточной температурой $T_к$.

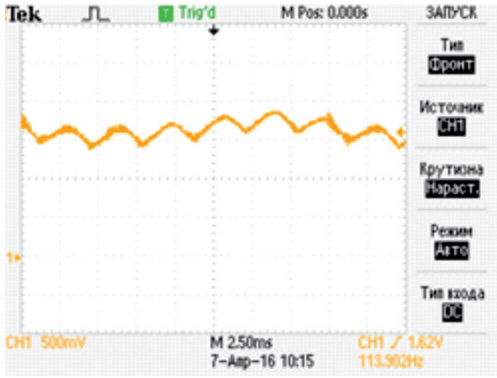


Рис. 6. Осциллограмма анодного тока при оптимальной $T_к$

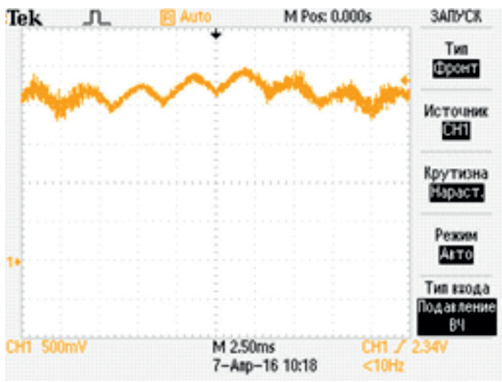


Рис. 7. Осциллограмма анодного тока при повышенной $T_к$

4(531).indd 31 15.12.2016 14:48:41

Рис. 8. Осциллограмма анодного тока при пониженной $T_к$

Таким образом, чтобы обеспечить оптимизацию режима работы магнетрона, необходимо корректировать ток накала для достижения минимального уровня искажения на сигнале огибающей анодного тока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ методов и систем оптимизации режима накала мощных магнетронов в технологических установках зарубежных и отечественных производителей. Предложен метод оптимизации, который позволяет избежать выхода из строя магнетрона из-за перескока с основного режима генерации π на генерацию моды π–1, вызванного низкой температурой катода. Перспективность исследования и разработок методов оптимизации очевидна и обусловлена увеличением надежности магнетрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Морозов, О. А.** Современное состояние и тенденция развития магнетронов для СВЧ-нагрева в промышленности и медицине / О. А. Морозов, И. В. Соколов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2 (476). – С. 3 – 9.

2. http://www.ok1rr.com/tubes/burle/TP-116-Application_Guide_for_BURLE_Large_Power_Magnetrons.pdf.

3. **Соколов, И. В.** Механизм уменьшения электронной бомбардировки спирального катода в магнетронах для СВЧ-нагрева / И. В. Соколов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1971. – Вып. 5. – С. 133 – 134.

4. **George Solomon.** Power tube engineering / George Solomon // Burle Industries Inc., International Microwave Power Symposium, 1995.

Статья поступила 8 июля 2016 г.

4(531).indd 32 15.12.2016 14:48:41

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.375.4

СЕРИЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ *X*-ДИАПАЗОНА НА ПОЛЕВЫХ GaAs- И GaN-ТРАНЗИСТОРАХ

В. И. Былкин, И. А. Гаврилов, В. И. Пугнин

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

Разработаны транзисторные усилители *X*-диапазона и изготовлены экспериментальные образцы трех частотных диапазонов. Выходные мощности усилителей в импульсе – не менее 40 и 60 Вт. Усилители могут быть применены в передатчиках систем связи и радиолокации, а также в составе технологических стендов для испытаний мощных вакуумных СВЧ-приборов.

КС: транзисторные усилители, GaAs- и GaN-транзисторы, СВЧ-сигнал, X-диапазон

A SERIES OF *X*-BAND PULSE AMPLIFIERS ON GaAs AND GaN FETs

V. I. Bylkin, I. A. Gavrilov, V. I. Pugnin

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

***X*-band transistor amplifiers have been developed and experimental samples for three frequency ranges have been manufactured. The amplifiers output pulse powers were not less than 40 and 60 W. The amplifiers can be used in transmitters of communication systems and radiolocation, as well as technological stands for testing high-power vacuum microwave devices.**

Keywords: transistor amplifiers, GaAs and GaN transistors, microwave signal, X-band

Разработаны и изготовлены импульсные транзисторные усилители 3-см диапазона, предназначенные для применения в качестве предварительных каскадов на испытательных стендах для мощных вакуумных СВЧ-приборов.

Диапазон рабочих частот перекрыт тремя литерами транзисторных предварительных усилителей (ТПУ). Усилители всех литер имеют одинаковую структуру и разработаны на основе гибридно-интегральной технологии. Все СВЧ-каскады усилителей собраны по балансной схеме, с мостами Ланге в качестве делителей и сумматоров мощности. Каскады образуют последовательную цепь, за исключением предпоследнего и выходного каскадов, в которых использовано параллельное соединение.

Структурная схема ТПУ приведена на рис. 1. СВЧ-часть схемы состоит из трех усилителей: *3*, *5*, *8* – и ответвителя *10*. Остальные устройства выполняют функции управления и питания усилителей. На логический вентиль *1* подаются два управляющих сигнала ТТЛ-уровней: запрет излучения *ЗИ* и сигнал синхронизации импульсов *СИ*. Активный уровень *ЗИ*, равный логической «1», вырабатывается в стенде при высоковольтных пробоях и блокирует работу модуляторов.

4(531).indd 33 15.12.2016 14:48:41

Сигнал синхронизации импульсов *СИ* с активным уровнем логической «1» открывает все модуляторы, которые обеспечивают питание стоков полевых транзисторов и определяют режим импульсной модуляции сигналов СВЧ.

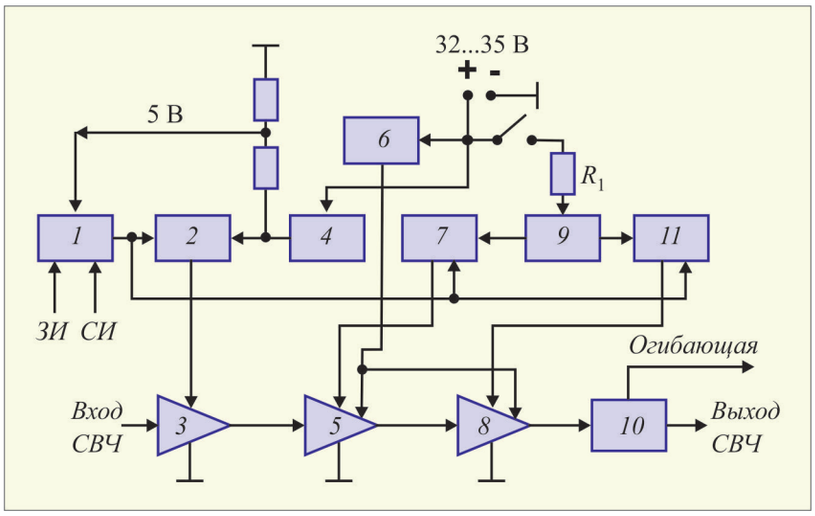


Рис.1. Структурная схема ТПУ:
1 – логический вентиль; *2* – первый модулятор с накопителем; *3* – предусилитель; *4* – источник питания первого модулятора и вентиля; *5* – промежуточный усилитель; *6* – источник напряжения «-5 В»; *7* и *11* – модуляторы; *8* – выходной усилитель; *9* – накопитель модуляторов *7* и *11*; *10* – ответвитель с детекторной секцией

В схеме ТПУ использованы три модулятора: *2*, *7*, *11* – с накопителями заряда. Модулятор *2* формирует импульсы амплитудой 10 В для включения предусилителя *3*, имеющего однополярное питание. Модуляторы *7* и *11* вырабатывают импульсы амплитудой 31…34 В для промежуточного *5* и выходного *8* усилителей, имеющих двуполярное питание.

Источник питания *6* обеспечивает отрицательное смещение на затворах усилителей *5* и *8*. Модуляторы *7*, *11* имеют общий накопитель заряда *9* емкостью 2000 мкФ. Ответвитель с детекторной секцией *10* формирует сигнал огибающей импульсов выходной СВЧ-мощности.

Предусилитель СВЧ-сигнала *3* собран на одной гибридной микросборке на кристаллах полевых GaAs-транзисторов 3П612А-5 и 3П976Г-5 производства АО «НПП «Исток» им. Шокина». В усилителях *5*, *8* использованы микросборки на полевых GaN-транзисторах фирмы TriQuint.

Промежуточный усилитель *5* собран на одной или двух микросборках в зависимости от требуемой выходной мощности ТПУ. Из них первая микросборка – двухкаскадный усилитель, в котором первый каскад спроектирован на кристаллах TGF2023-01 (или TGF2023-2-01), а второй – на TGF2023-02 (или TGF2023-2-02). Вторая микросборка промежуточного усилителя содержит четыре кристалла TGF2023-02 (или TGF2023-2-02) с параллельным суммированием мощности по схеме 2×2.

Выходной усилитель *8* суммирует мощности восьми подобных транзисторов по схеме 2×2×2 и состоит их двух вышеупомянутых микросборок, включенных параллельно в балансный каскад.

4(531).indd 34 15.12.2016 14:48:41

Выходная импульсная мощность насыщения предусилителя равна 0,8…1,0 Вт, промежуточного усилителя – 16…20 Вт без второй микросборки и 28…33 Вт со второй микросборкой. Выходная мощность насыщения всего ТПУ в импульсе составляет не менее 40 Вт без второй микросборки и не менее 60 Вт со второй микросборкой в промежуточном усилителе. Если вторая микросборка не используется в ТПУ, то ее место занимает пассивный полосок. Неравномерность выходной мощности насыщения составляет не более 1 дБ в 10%-ной полосе частот. Согласно каталогам фирмы изготовителя [1], примененные транзисторы имеют выходную мощность насыщения не менее 6,8 и 10,4 Вт в любой точке диапазона частот до 18 ГГц при условии идеального согласования и при рекомендованных токах стоков 125 и 250 мА соответственно.

Как показали экспериментальные исследования на однокаскадных микросборках, согласовать эти транзисторы в 10%-ной полосе частот *X*-диапазона и получить указанные выходные мощности удается в форсированном режиме питания с трекратным превышением токов стоков. Коэффициенты усиления транзисторов в этом режиме составляют примерно 9 и 4 дБ соответственно. Снижение токов стоков до номинальных приводит к уменьшению выходной мощности транзисторов на 0,5 дБ. Еще на 0,5 дБ снижается выходная мощность каскада при использовании модифицированных транзисторов TGF2023-2-01 и TGF2023-2-02, в состав которых введен «четвертый» электрод [2].

Мощность оптимального входного непрерывного сигнала СВЧ, обеспечивающего наибольшую выходную мощность, составляет 1…10 и 10…20 мВт для ТПУ с максимальной выходной мощностью не менее 60 и 40 Вт соответственно.

ТПУ питаются от внешнего стабилизированного источника питания напряжением 32…35 В при токе потребления от 0,55 до 0,85 А и скважности 20. Резистор R_1 =1,3 Ом введен в схему для ограничения тока внешнего источника питания при включении накопителя *9*.

Общий КПД усилителя составляет не менее 10 %. Скос вершины импульса огибающей СВЧ при длительности 1 мс составляет не более 16 %. Фронт огибающей задержан относительно фронта сигнала *СИ* примерно на 50 нс. Наблюдается также сжатие импульса огибающей по отношению к длительности импульса *СИ* на 0,3 мкс.

Для повышения устойчивости схемы в цепь затворов транзисторов введены фильтры высоких частот, хотя это приводит к некоторому снижению коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот.

Разработанная серия твердотельных ТПУ для стендовых измерений и испытаний мощных СВЧ вакуумных приборов имеет ряд преимуществ по сравнению с ЛБВ. Это пониженное напряжение питания и высокая наработка на отказ. К недостаткам можно отнести сравнительно узкую полосу рабочих частот и невысокий КПД. Полоса частот ТПУ может быть расширена на весь *X*-диапазон, если вместо кристаллов транзисторов использовать кристаллы монолитных интегральных схем (МИС) [3]. Применению мощных GaN МИС препятствует их высокая стоимость (примерно на порядок выше, чем для транзисторов) и возможные ограничения на поставку импорта.

На рис. 2 представлена фотография ТПУ. Габаритные размеры усилителя с радиатором – 70×157×280 мм, масса – 2,8 кг. Усилитель предназначен для работы при нормальных климатических условиях и не требует принудительного охлаждения. ТПУ могут быть использованы в передатчиках систем связи и радиолокации.

4(531).indd 35 15.12.2016 14:48:41

Рис. 2. Внешний вид ТПУ

Авторы благодарят Ю. Н. Виноградова за предоставление плат ГИС предусилителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог компании TriQuint, 2014 // Новости СВЧ-техники / АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2014. – № 4. – С. 34.

2. www. triquint.com/GaN products.

3. Каталог компании Qorvo.2016, www.qorvo.com.

Статья поступила 9 сентября 2016 г.

4(531).indd 36 15.12.2016 14:48:41

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.62:621.396.677.494

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ППМ АФАР С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО КОНТАКТНОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

М. С. Карасев

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

Рассмотрены основные особенности разработки приемопередающего модуля АФАР и представлено обоснование использования поверхностного контактного соединения модулей в составе АФАР. Приведены основные характеристики и конструкция СВЧ- и НЧ-соединителей, обеспечивающих поверхностное контактное соединение. Разработана измерительная оправка для контроля выходных параметров приемопередающего модуля, приведены расчетно-экспериментальные данные для ее аттестации.

КС: поверхностный контактный соединитель, ППМ, измерительная оправка, расчетно-экспериментальные данные, аттестация

THE METHODOLOGY OF PARAMETER MEASUREMENT OF PERSPECTIVE ACTIVE PHASED ARRAY TRANSCEIVING MODULES USING SURFACE CONTACT CONNECTOR

M. S. Karasev

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

The main peculiarities of developing an active phased array transceiving module have been considered and the foundation of using surface contact connection of modules within the active phased array has been presented. The main characteristics and the design of microwave and low-frequency connectors providing the surface contact connection are given. The test fixture for checking the output parameters of transceiving module has been worked out and the experiment-calculated data are presented for its certification.

Keywords: surface contact connector, transceiving module, test fixture, experiment-calculated data, certification

1. ВВЕДЕНИЕ

В радиолокации в настоящее время широко применяются активные фазированные антенные решетки (АФАР), которые позволяют суммировать в пространстве мощности входящих в их состав приемопередающих модулей (ППМ), управлять диаграммой направленности и производить электронное сканирование пространства приемопередающей антенны. Применение АФАР для создания сканирующих антенн позволяет реализовать высокую скорость отслеживания

4(531).indd 37 15.12.2016 14:48:41

целей и способствует увеличению получаемой информации о распределении источников излучения или отражения [1].

Одним из самых важных факторов производства является обеспечение контроля выходных параметров выпускаемых ППМ. Инструментом для контроля выходных параметров ППМ являются, помимо радиоизмерительных приборов, измерительные оправки. Разработка измерительных оправок и их аттестация являются важнейшими задачами, т. к. измерительная оправка, выполненная с высокой точностью и имеющая расчеты для ее аттестации, может обеспечить достоверность выходных измеряемых параметров ППМ.

2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ППМ АФАР

ППМ используется для обработки сигнала в АФАР. Выбранные схемотехнические решения при разработке ППМ АФАР обеспечивают минимальное энергопотребление, минимальные массогабаритные параметры, а также максимальное использование МИС, разрабатываемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина» или на других российских предприятиях [2, 3]. При этом соблюдается безусловное выполнение технических требований ТЗ и надежности ППМ.

Общий вид ППМ АФАР представлен на рис. 1. Все составные элементы модуля располагаются на многослойном керамическом LTCC-основании. Применение такого основания в составе ППМ АФАР обеспечивает низкие потери СВЧ-энергии и невысокую стоимость производства, что является ключевым преимуществом для производства СВЧ-приборов.

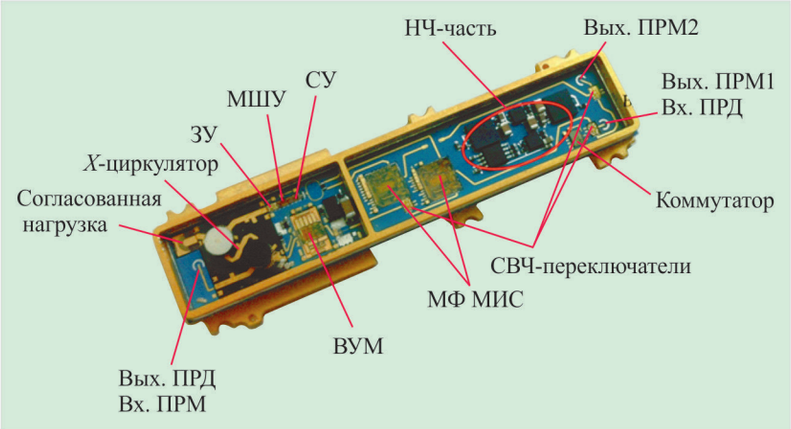


Рис. 1. ППМ АФАР

Многослойность LTCC позволяет произвести необходимую разводку СВЧ- и НЧ-проводников внутри основания и тем самым обеспечить значительную экономию места внутри ППМ.

Выбор LTCC-керамики в данной работе был обоснован необходимостью обеспечения поверхностно-контактного соединения модулей (ПКСМ).

3. ПОВЕРХНОСТНОЕ КОНТАКТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ МОДУЛЕЙ И КОАКСИАЛЬНЫЙ LTCC-ПЕРЕХОД

ПКСМ – способ соединения (рис. 2), основанный на прижатии, через контактный соединитель, выходного СВЧ-контакта модуля и поверхности, на которой размещаются ППМ для дальнейшей работы.

4(531).indd 38 15.12.2016 14:48:41

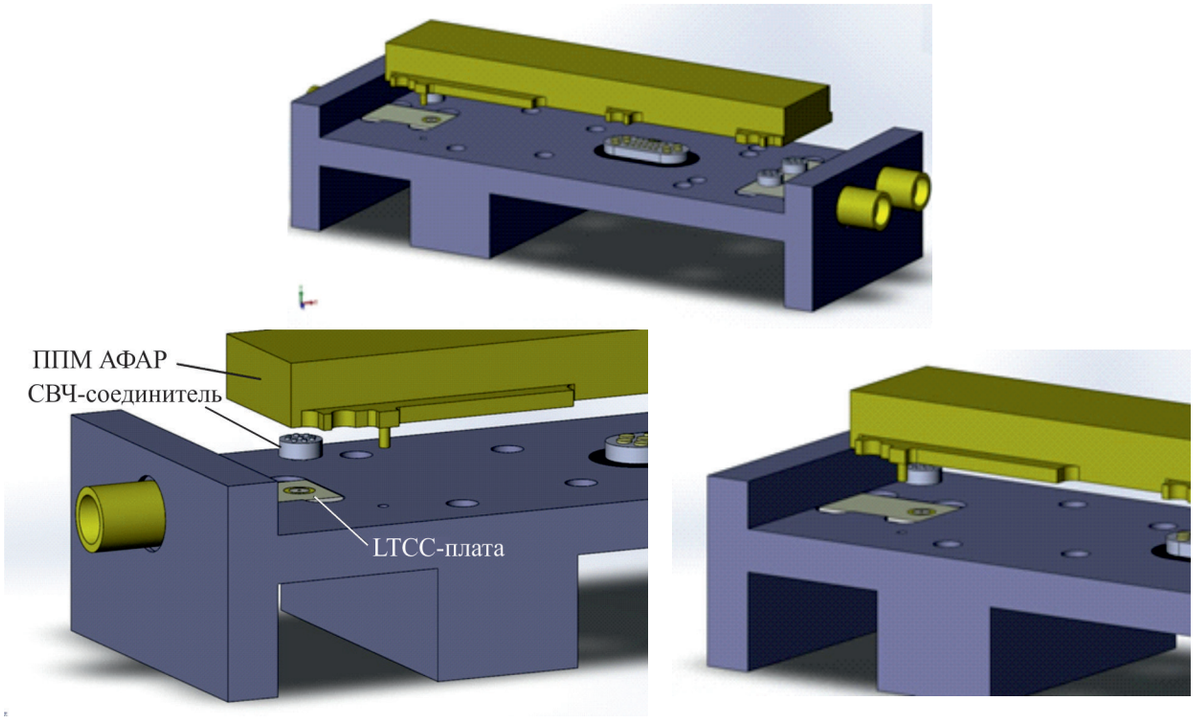


Рис. 2. Поверхностное контактное соединение модулей

За счет особенностей LTCC-технологии контакты СВЧ и НЧ можно вывести на нижний поверхностный слой LTCC-основания и выполнить в виде круглых площадок. На рис. 3 показаны контактные площадки, выведенные на нижний поверхностный слой LTCC-основания.

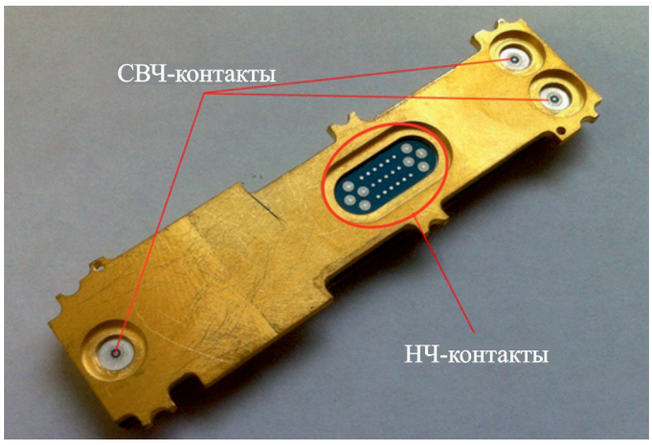


Рис. 3. Контактные площадки, выведенные
на нижний поверхностный слой LTCC-основания модуля

Наличие таких поверхностных контактных площадок позволяет обеспечить соединение модуля с поверхностью для передачи СВЧ-энергии через контактный соединитель. Данный способ минимизирует нежелательные СВЧ-потери, связанные с соединением модулей кабелями и возникающими при этом недостатками сборки.

4(531).indd 39 15.12.2016 14:48:42

Структура СВЧ-перехода из LTCC-основания модуля показана на рис. 4. Данная структура рассчитывается так же, как и для коаксиального кабеля, и выполняется при помощи «земляных» металлизированных отверстий, расположенных на заранее высчитанном расстоянии от центрального переходного отверстия, по которому происходит передача СВЧ-энергии.

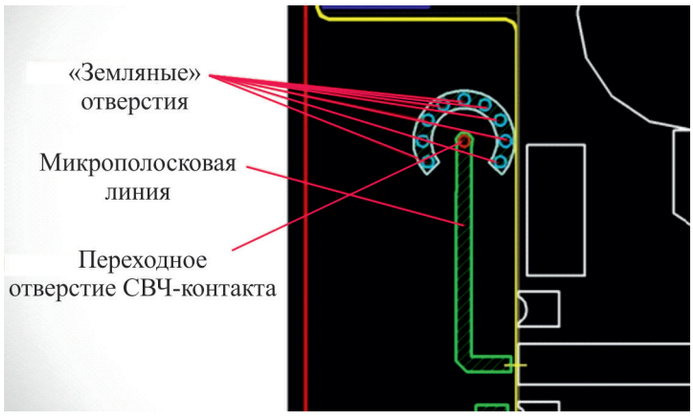


Рис. 4. Структура СВЧ-перехода из LTCC-керамики

Так как LTCC-керамика размещена на металлическом основании, которое обеспечивает хороший теплоотвод от мощных чипов СВЧ (ПУМ, ВУМ), для передачи СВЧ-энергии требуется контактный СВЧ-соединитель. Такой же контактный соединитель требуется и в НЧ-части модуля для обеспечения питания и управления основными узлами модуля.

4. СВЧ- И НЧ-СОЕДИНИТЕЛИ

В настоящее время по заказу НИИП им. В.В. Тихомирова в ОАО «Карачевский завод «Электродеталь» разработаны и изготовлены СВЧ- и НЧ-соединители с параметрами, позволяющими использовать их в составе ППМ АФАР. Виды СВЧ- и НЧ-соединителей приведены на рис. 5.

Рис. 5. СВЧ- и НЧ-соединители,
разработанные в ОАО «Карачевский завод «Электродеталь»

4(531).indd 40 15.12.2016 14:48:42

Данные СВЧ- и НЧ-соединители помещаются в выборку в металлическом основании модуля и фиксируются резиновым уплотнителем, который позволяет обеспечить надежную фиксацию соединителя внутри выборки.

Далее приемопередающие модули устанавливаются на плиту, где имеются такие же поверхностные СВЧ- и НЧ-контакты. Прижатие и фиксация модулей обеспечивает передачу СВЧ-энергии.

5. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ОПРАВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ППМ АФАР

Для контроля выходных параметров ППМ АФАР была разработана измерительная оправка (рис. 6).

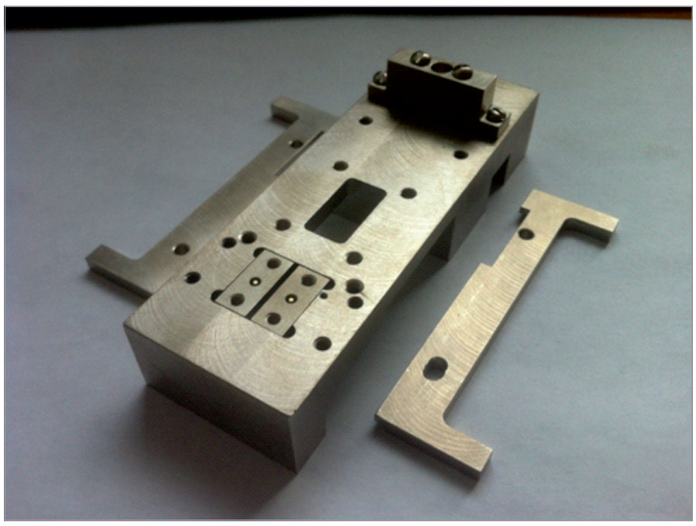


Рис. 6. Измерительная оправка для контроля выходных параметров ППМ АФАР

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОПРАВКИ И НЕОБХОДИМЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ

Чтобы измерить вносимые измерительной оправкой СВЧ-потери, с помощью элементов, используемых в оправке, была собрана конструкция для измерения потерь (рис. 6 и 7).

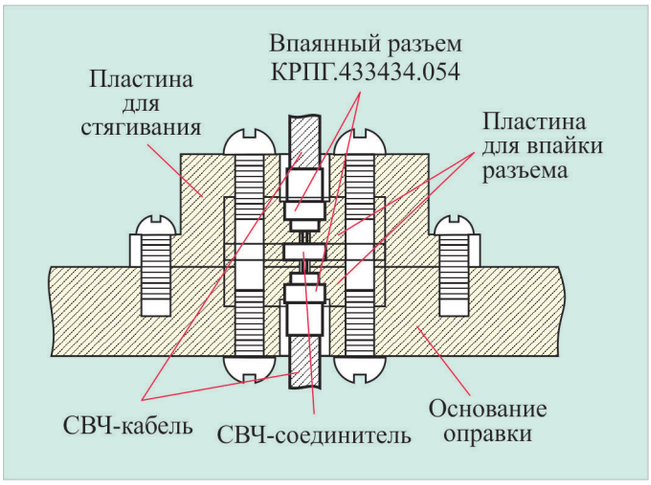


Рис. 7. Конструкция для измерения потерь в измерительной оправке

4(531).indd 41 15.12.2016 14:48:42

Между двумя разъемами КРПГ.433434.054 [4] размещен СВЧ-соединитель, который передает СВЧ-энергию из одного разъема в другой [5]. Но в связи с отсутствием кабелей, имеющих в своем составе разъем КРПГ.433434.054, в данной работе использовались переходники с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054 фирмы Rosenberger (рис. 8).

Для измерений потерь в оправке был собран стенд (рис. 9).

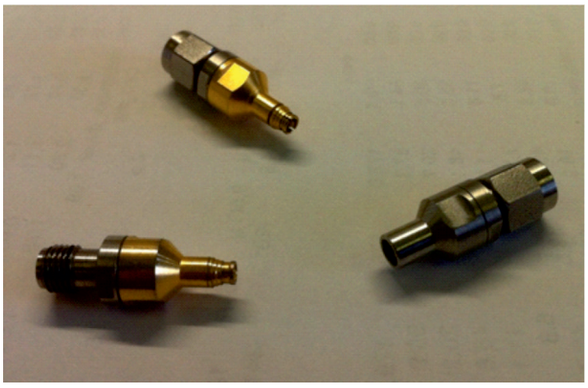


Рис. 8. Переходники с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054 фирмы Rosenberger

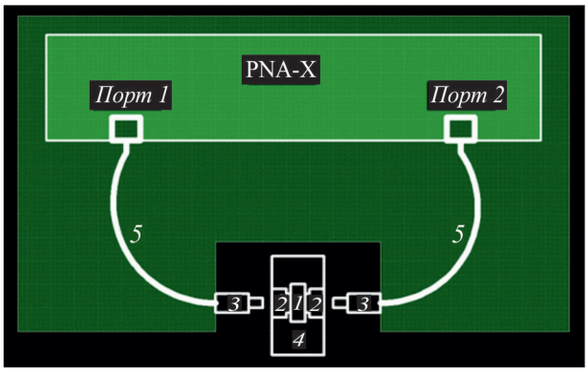


Рис. 9. Собранный стенд для измерений потерь в оправке:

1 – СВЧ-соединитель; *2* – разъем КРПГ.433434.054 («штырь»); *3* – переходники с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054 («гнездо»); *4* – измерительная оправка; *5* – СВЧ-кабели

Калиброванной частью на рис. 9 является область, обведенная зеленым цветом. Получившиеся параметры всей собранной конструкции для измерения потерь изображены на рис. 10 и сведены в табл. 1.

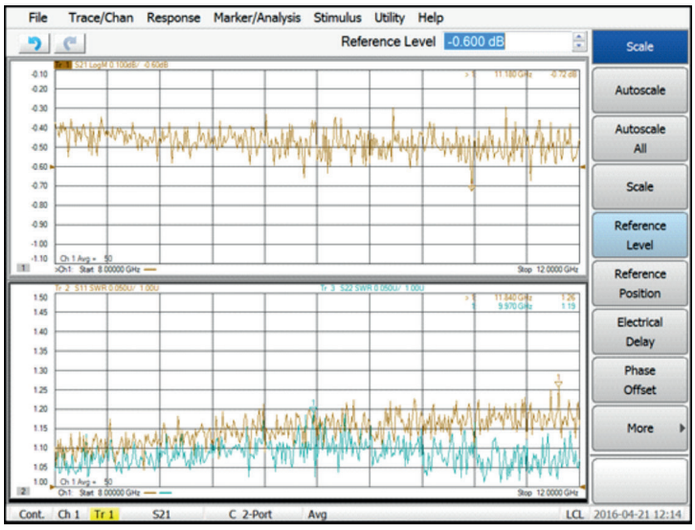


Рис. 10. Параметры собранной конструкции для измерения потерь

4(531).indd 42 15.12.2016 14:48:42

Таблица 1

Результаты экспериментальной проверки всей конструкции для измерения потерь

Максимальный *S21* (потери), дБ	0,72
Максимальный КСВН: входа выхода	 1,26 1,19

Полученные результаты являются общими для всех элементов конструкции. Для вычисления потерь только в оправке необходимо произвести измерения двух переходников с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054.

С помощью собранной конструкции, показанной на рис. 11, можно измерить потери, возникающие в переходниках с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054. Если предположить, что разъем «гнездо» равен разъему «штырь», то можно вычислить потери, которые возникают в самой оправке.

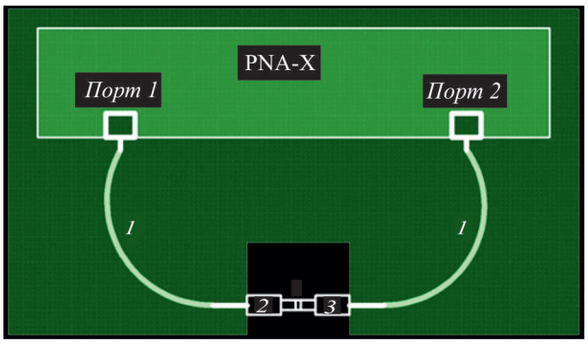


Рис. 11 Конструкция для измерения потерь переходов:
1 – СВЧ-кабели; *2* – переходник с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054 («штырь»);
3 – переходник с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054 («гнездо»)

Получившиеся результаты экспериментальной проверки изображены на рис. 12 и сведены в табл. 2.

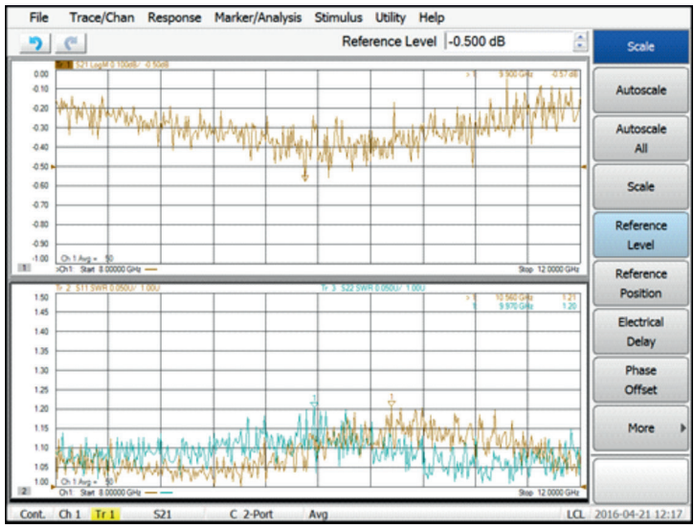


Рис. 12. Получившиеся параметры измерения переходников с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054

4(531).indd 43 15.12.2016 14:48:43

Таблица 2

Результаты экспериментальной проверки переходников с КРПГ.434511.015 на КРПГ.433434.054

Максимальный *S21* (потери), дБ	0,57
Максимальный КСВН:	
входа	1,21
выхода	1,20

Произведя расчет, для которого необходимо использовать максимальные значения, полученные при экспериментальной проверке, можно вычислить потери (дБ), возникающие в связке КРПГ.433434.054 – СВЧ-соединитель – КРПГ.433434.054:

$$П_{054\text{-СВЧ-соед-}054} = П_{общ} – П_{пер} = 0,72 – 0,57 = 0,15.$$

Из результатов расчета и экспериментальной проверки следует, что потери в разработанной измерительной оправке составляют менее чем 0,15 дБ на каждый из выходов ППМ. Результаты расчета доказывают, что выбранные решения при разработке измерительной оправки оказались верными.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы произведено обследование отечественных СВЧ- и НЧ-соединителей (производства ОАО «Карачевский завод «Электродеталь»), позволяющих выполнить разработку измерительной оправки с поверхностным контактным соединением для ППМ АФАР.

Результаты расчета и экспериментальной проверки разработанной измерительной оправки доказывают, что выбранные решения оказались верными и данная измерительная оправка полностью удовлетворяет требованиям для измерения достоверных выходных параметров ППМ АФАР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воскресенский, Д. И.** Активные фазированные антенные решетки / Д. И. Воскресенский, А. И. Канащенков. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

2. **Темнов, А. М.** Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2*D*- и 3*D*-модулей АФАР *X*-диапазона / А. М. Темнов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1(520). – С. 45 – 53.

3. **Темнов, А. М.** Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2*D*- и 3*D*-модулей АФАР *X*-диапазона. Ч. 2 / А. М. Темнов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника – 2014. – Вып. 2(521). – С. 23 – 32.

4. **Джуринский, К. Б.** Зарубежные и отечественные радиочастотные соединители. Современное состояние / К. Б. Джуринский, А. Н. Королев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 1(516). – С. 13 – 30.

5. **Джуринский, К. Б.** Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / К. Б. Джуринский. – Санкт-Петербург: Издательство ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. – 428 с.

Статья поступила 16 августа 2016 г.

4(531).indd 44 15.12.2016 14:48:43

УДК 621.372.63

ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ В КЕРАМИКЕ LTCC С ПРИМЕНЕНИЕМ МОНТАЖА «FLIP-CHIP»

А. П. Гусев, А. В. Павлов, С. Г. Павлова, В. Ю. Мякиньков, С. Н. Сытилин

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

Т. В. Синицына

ООО «БУТИС», г. Москва

Представлены результаты разработки гибридно-монолитного частотно-преобразовательного многослойного СВЧ-модуля, выполненного по технологии LTCC. Использование нового схемотехнического решения модуля в совокупности с монтажом «flip-chip» для кристаллов, изготовленных по ПАВ-технологии, впервые позволило обеспечить частотную избирательность свыше 50 дБ в диапазоне частот до 4,5 ГГц за счет устранения электромагнитной наводки, а также уменьшить массогабаритные характеристики изделия более чем в 2 раза по сравнению с существующим аналогом.

КС: частотно-преобразовательный модуль, фильтр на поверхностных акустических волнах, избирательность

HIGH SELECTIVE SMALL-SIZE MICROWAVE MODULE IN LTCC CERAMICS USING «FLIP-CHIP» MOUNTING

A. P. Gusev, A. V. Pavlov, S. G. Pavlova, V. U. Myakinkov, S. N. Sytilin

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

T. V. Sinitsina

JSC Ltd «Butis», Moscow

The results of development of hybrid-monolithic multilayer frequency-converter microwave module based on LTCC technology are presented. For the first time using the new module circuitry solution in conjunction with the flip-chip technology of planting crystals made by SAW technology allowed to provide frequency selectivity of more than 50 dB in the frequency range up to 4.5 GHz by eliminating electromagnetic interference as well as to reduce weight and size of device more than 2 times in comparison with the existing analogue.

Keywords: frequency-converter module, surface acoustic wave filter, selectivity

Создание новой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и решение задач модернизации существующих систем управления и связи невозможно без одновременного развития технологии производства электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности частотно-избирательных компонентов и модулей. Так, снижение массогабаритных характеристик РЭА, выполненных на основе печатного монтажа, обеспечивается в основном за счет повышения степени интеграции межкомпонентных соединений на печатной плате, а также за счет уменьшения размеров и повышения степени интеграции элементной базы.

4(531).indd 45 15.12.2016 14:48:43

Наиболее перспективной с точки зрения повышения степени интеграции РЭА на сегодняшний день является технология низкотемпературной керамики (LTCC – Low Temperature Cofired Ceramics), основными достоинствами которой являются [1]: более экономичное производство по сравнению с традиционной толстопленочной технологией; возможность вырезания ленты/подложки любой формы; неограниченное число рабочих слоев; возможность 3*D*-проектирования; возможность интеграции пассивных компонентов, что уменьшает размер контуров более чем на 50 % по сравнению с печатными платами; высокие технические характеристики и надежность (высокие рабочие частоты, контролируемый импеданс цепей, хорошая теплопроводность, расширенный диапазон рабочих температур, до 350 °С, и механических нагрузок); возможность проверки каждого слоя до сборки модуля, что повышает процент выхода годных изделий; высокая герметизация слоев; экологическая чистота и компактность технологического цикла; отсутствие химических процессов; возможность автоматизации при серийном производстве; сокращение производственных циклов по сравнению с обычными толстопленочными технологиями. Кроме того, LTCC хорошо сочетается с различными материалами, что позволяет интегрировать и создавать различные типы высокодобротных компонентов на ее основе благодаря низким диэлектрическим потерям LTCC на высоких частотах [2], и может быть использована в качестве проводников металлов с малым удельным сопротивлением, поскольку температура обжига не превышает 850 °С [3].

Благодаря своей универсальности, технология LTCC нашла широкое применение в различных областях радиоэлектроники: телерадиовещании, телекоммуникациях, мобильной связи, портативных компьютерах, системах радиочастотной идентификации, ВЧ- и СВЧ-микросхемах низкой и средней степени интеграции, высокочастотных модулях обмена данными с высокой степенью интеграции, т. е. там, где требуется реализовать малые габаритные размеры в совокупности с предельными эксплуатационными характеристиками.

Элементы частотной селекции для данных системных применений выполняются либо на сосредоточенных *LC*-элементах и полосковых конструкциях [4], либо с помощью устройств, выполненных по технологии поверхностных акустических волн (ПАВ). Последний класс радиочастотных фильтров является предпочтительным для диапазона частот 30…3000 МГц, поскольку обеспечивает широкий диапазон полос пропускания, малое вносимое затухание, малые габаритные размеры, конструктивную и технологическую совместимость с изделиями микроэлектроники и обладает высокой надежностью [5, 6]. Тем не менее, использование проволочных перемычек при монтаже ПАВ-фильтра в корпус и его последующая установка на плату по технологии «chip on board» существенно ухудшают избирательность на высоких частотах, особенно в диапазоне СВЧ (см. рис.1), что может приводить к появлению паразитных спектральных составляющих сигнала на выходе РЭА.

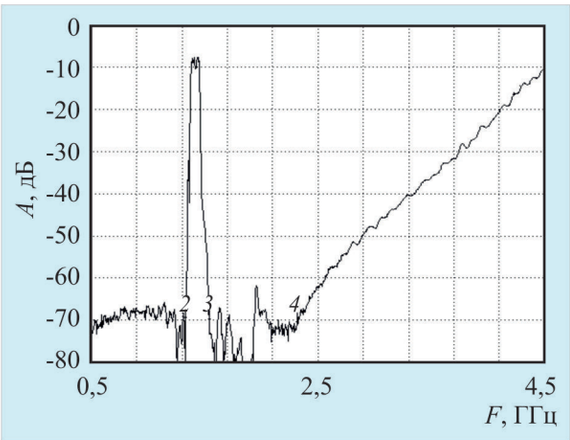


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика ПАВ-фильтра на номинальную частоту 664 МГц в корпусе SMD, установленного на плату по технологии «chip on board»

Для решения данной проблемы авторами использовано новое схемотехническое решение

4(531).indd 46 15.12.2016 14:48:43

СВЧ-модуля для преобразователя частоты [7], структурная схема которого показана на рис. 2, основанное на применении технологии LTCC в совокупности с «flip-chip» («перевернутый кристалл») монтажом ПАВ-фильтров.

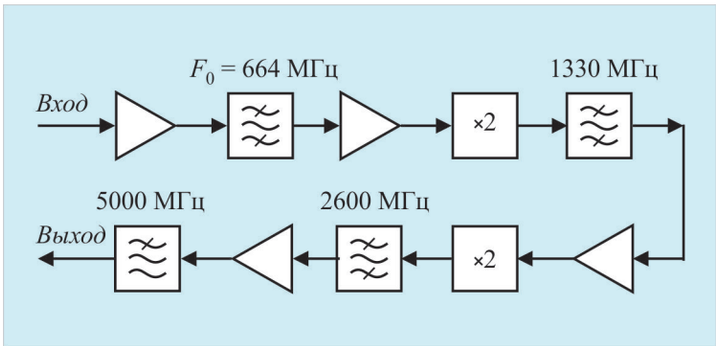


Рис. 2. Структурная схема частотно-преобразовательного СВЧ-модуля

Исследования показали, что керамика LTCC производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», изготовленная на основе стандартного технологического процесса (рис. 3), по своим физико-техническим свойствам не уступает керамике LTCC фирмы DuPont. Сравнительные характеристики керамики LTCC приведены в табл. 1.

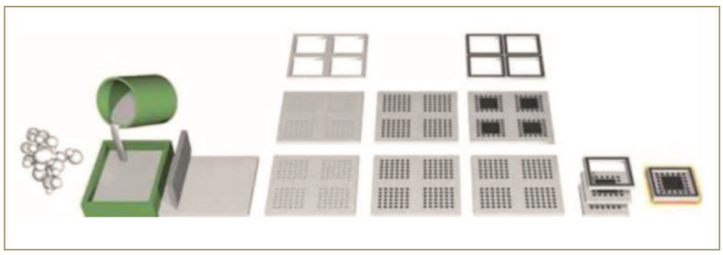


Рис. 3. Стандартный маршрут изготовления LTCC-компонентов (последовательность процессов: подготовка шликера; отливка керамики; резка на карты; пробивка отверстий и окон; заполнение отверстий и формирование топологии проводников; сборка)

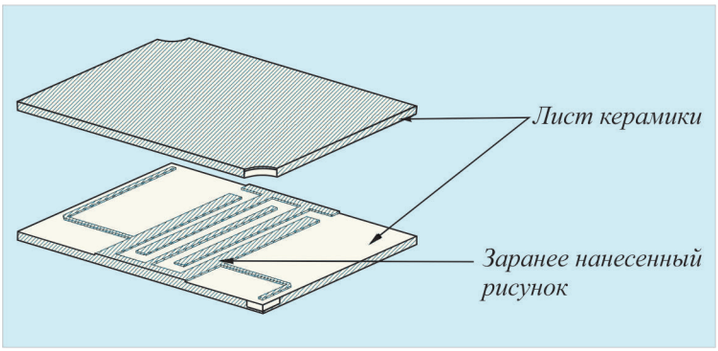
Таблица 1

Сравнительные характеристики керамики LTCC

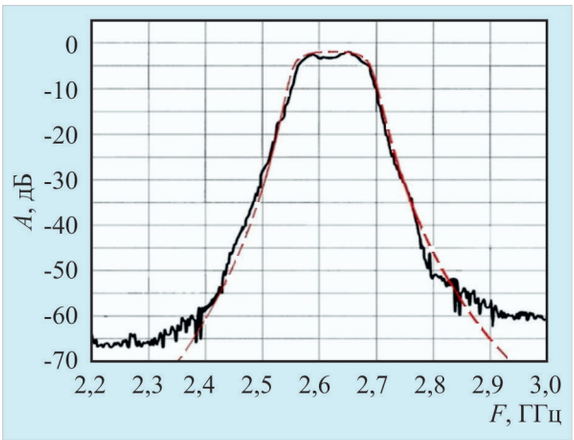
Параметр	Керамика LTCC			
	АО «НПП «Исток» им. Шокина»	DuPont 951	DuPont 943	Ferro A6-S
ε	7,0	7,8	7,7	6,0
tgδ	0,0018	0,0015	0,0010	0,0020
Усадка, %:				
по оси *X*, *Y*	8,5	12,7	9,5	17
по оси *Z*	15	15	10,3	22
Сопротивление, ТОм	12	12	12	12
ТКЛР, 10^{-6}/°С	5,5	5,8	6,0	8,0
Плотность, г/см^3	3,0	3,1	3,2	2,4

4(531).indd 47 15.12.2016 14:48:43

Модуль реализован на одиннадцатислойной керамической плате с разводкой внутри слоев проводников питания и СВЧ-трактов. Плата также содержит фильтр низких частот с частотой среза 5 ГГц и планарный пятизвенный полосно-пропускающий фильтр (рис. 4) с центральной частотой 2,6 ГГц и полосой пропускания 5 %. Полученные экспериментальные результаты совпадают с расчетными данными и аналогами, изготовленными на керамике фирмы DuPont марки DuPont 951. Кроме того, на плате предусмотрены посадочные места для навесных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) и кристаллов умножителей частоты, усилителей мощности и ПАВ-фильтров (рис. 5).



а)



б)

Рис. 4. Конструктивное исполнение (*а*) и амплитудно-частотная характеристика (*б*) СВЧ-фильтра на частоту 2,6 ГГц (------- расчет; —— эксперимент), изготовленного на керамике LTCC производства АО «НПП «Исток» им. Шокина»

В целях улучшения спектральной чистоты выходного сигнала, в составе частотно-преобразовательного СВЧ-модуля применены два ПАВ-фильтра (рис. 6) на номинальные частоты 664 (*1*) и 1330 МГц (*2*). Поскольку данные фильтры имеют одинаковую относительную полосу пропускания порядка 5 %, то их топологии разрабатывались на основе одной базовой конструкции – многозвенной продольно-связанной резонаторной структуры [8].

Принцип действия данной структуры основан на исключении потерь, связанных с двунаправленностью излучения поверхностных акустических волн встречно-штыревым преобразователем (ВШП). С конструктивной точки зрения это достигается путем применения двустороннего

4(531).indd 48 15.12.2016 14:48:43

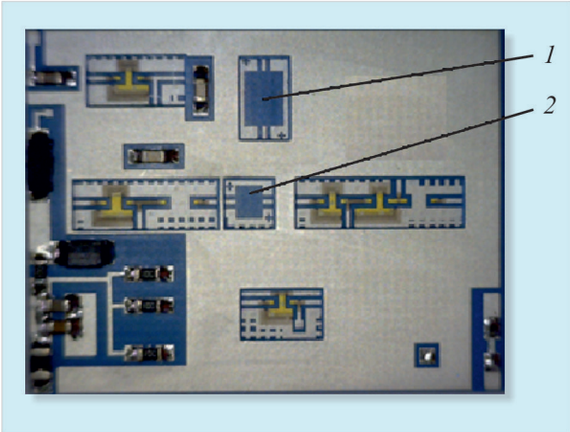


Рис. 5. Плата LTCC с установленными пассивными элементами и окнами для посадки элементов ПАВ-фильтров (поз.*1* и *2*) методом «flip-chip»

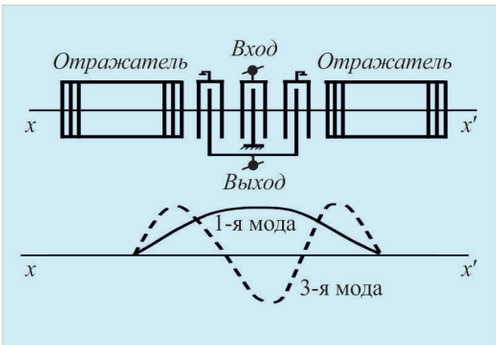


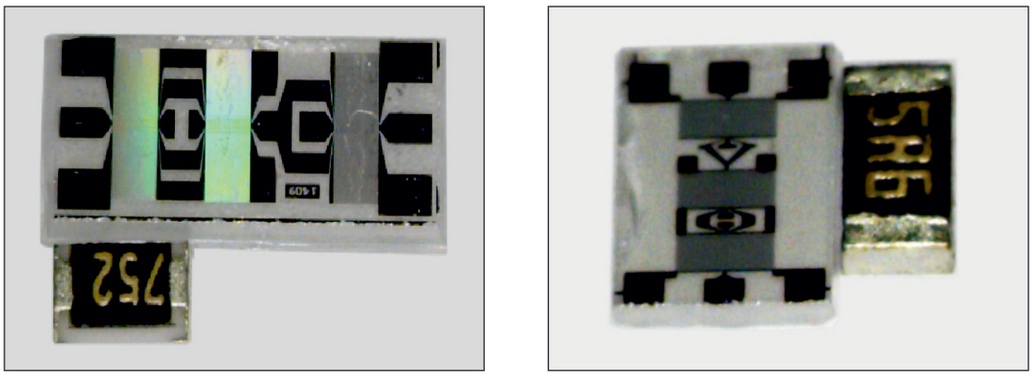
Рис. 6. Конструкция ПАВ-фильтра (одного звена) на основе продольно-связанных резонаторов

приема (используются два выходных преобразователя, включенных параллельно) и введения дополнительных отражателей по краям структуры.

Поскольку оба фильтра являются достаточно широкополосными, то в качестве материала подложки использовались пьезоэлектрики с большим коэффициентом электромеханической связи: YXl/36° – срез ниобата лития для ПАВ-фильтра на частоту 664 МГц и YXl/41° – срез ниобата лития для ПАВ-фильтра на частоту 1330 МГц.

Рабочие характеристики фильтров были рассчитаны на основе теории связанных мод [9] и модифицированного *P*-матричного метода представления частотно-избирательных элементов, входящих в конструкцию фильтра [10]. Оптимальные параметры получены для следующей топологии: центральный преобразователь содержал 10 пар одинарных штырей, боковые – по 6 пар и отражатели – по 100 пар электродов. Для согласования с 50-Ом трактом и с целью обеспечения малой неравномерности АЧХ в полосе пропускания рабочая апертура преобразователей была выбрана равной 75 длинам волн. Для обеспечения требуемой избирательности было использовано последовательное каскадирование структур, показанных на рис. 6 (три звена). Разработанные топологии фильтров приведены на рис. 7. Габаритные размеры кристалла фильтра *1* составили 2,0×4,5 мм, фильтра *2* – 1,5×2,0 мм, что значительно меньше размеров корпусированных изделий (7,1×9,1 и 5,0×5,0 мм соответственно).

4(531).indd 49 15.12.2016 14:48:43



а) *б*)

Рис. 7. Топологии ПАВ-фильтров *2* (*а*) и *1* (*б*),
выполненных на основе продольно-связанной резонаторной структуры.
Для сравнения рядом расположен резистор типоразмера 0603

Как было указано выше, с целью увеличения динамического диапазона и улучшения спектральной чистоты выходного сигнала модуля для монтажа ПАВ-фильтров была применена технология «flip-chip» [11], основными достоинствами которой являются:

- сокращение длины соединений, что обеспечивает лучшие электрические параметры;
- меньшее количество соединений, что сокращает количество потенциальных узлов отказа и обеспечивает более эффективное распределение тепловой энергии;
- небольшая высота и незначительная масса изделия;
- экономия места на печатной плате;
- снижение стоимости материалов.

В настоящее время широко используются следующие способы монтажа «flip-chip» кристалла на подложку:

– формирование оловянно-свинцовых выводов и припаивание их к подложке методом оплавления;

– формирование золотых столбиковых выводов гальваническим методом и создание контакта с золотыми площадками подложки способом термокомпрессии;

– приклеивание выводов кристалла к подложке с помощью электропроводного клея.

В основном они используются в полупроводниковой промышленности, при этом процесс монтажа методом «flip-chip» заключается в присоединении полупроводникового кристалла интегральной схемы на подложку активной стороной вниз. Выводы кристалла могут быть выполнены из проводящего полимера, а также представлять собой металлические шарики или столбики из металла (Au, Cu), припоя или металлические контактные площадки. Методы присоединения кристаллов по технологии «flip-chip» включают ультразвуковую и термозвуковую сварку, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайку оплавлением. В зависимости от используемой технологии могут потребоваться дополнительные операции, например создание добавочного слоя металлизации под будущими выводами, что связано с затратами времени и средств. При пайке оплавлением возникает необходимость в операции очистки от остатков флюса, т. к. их наличие способствует образованию пустот в толще паяного соединения и растеканию флюса в сторону от места расположения вывода.

4(531).indd 50 15.12.2016 14:48:44

При автоматизированном монтаже кристаллов на ленточном носителе столбики из золота получают электролитическим осаждением на алюминиевых контактных площадках кристалла после вскрытия пассивирующего слоя (рис. 8).

После ионной очистки наносят контактный барьерный слой толщиной 100 нм, являющийся проводящим при электролитическом осаждении золота. Критической операцией, влияющей на выход годных приборов, является селективное травление слоев, нанесенных вакуумным или ионно-лучевым распылением. При химическом травлении этих слоев реактив может проникать в пассивирующее покрытие и растворять алюминиевое межсоединение. Во избежание технологических потерь применяют плазменное травление, что удорожает стоимость изделий. Таким образом, формирование столбиков припоя гальваническим методом или напылением является сложным технологическим процессом и требует использования дорогостоящего оборудования.

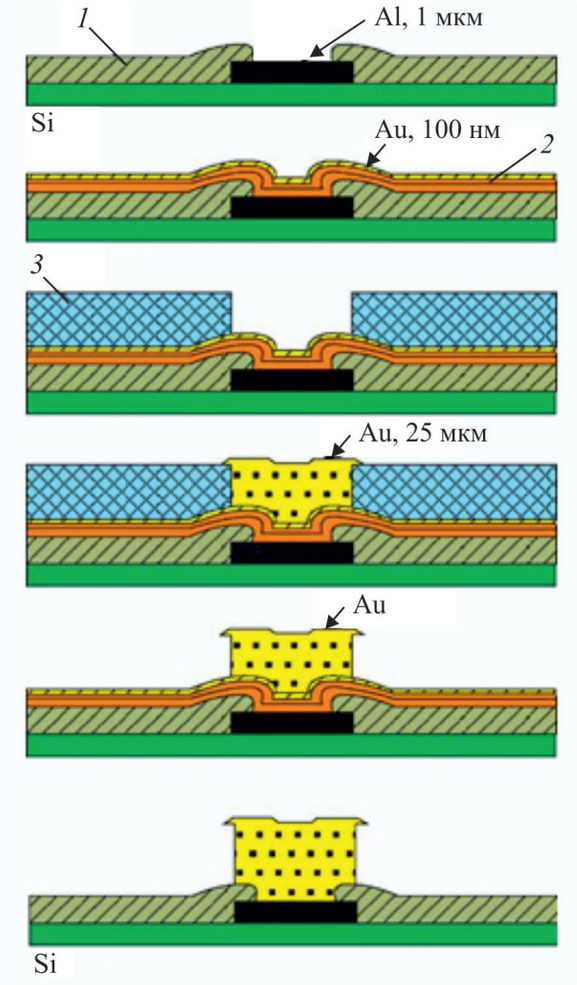


Рис. 8. Формирование золотых столбиков на алюминиевых контактных площадках

В рамках данной работы в качестве альтернативной замены столбиковых выводов из золота была разработана и успешно применена технология монтажа ПАВ-фильтров методом «flip-chip», основанная на использовании электропроводного клея ЭКС-1 с гранулами серебра размером 7 мкм (разработка АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

Следует отметить, что в процессе работы были исследованы несколько различных типов клея: ЭЧС (ЫУО.028.052 ТУ), ЭКС-1 (ТУ 2225-001-07622667-2009) и ЭКС-2 (ТУ 2225-001-07622667-2009). Данные клеи являются электропроводными и серебросодержащими и предназначены для обеспечения омического контакта и теплоотвода при монтаже деталей и узлов электронной техники. Диапазон рабочих температур клеев при длительном воздействии составляет -60…+150 °С; при кратковременном воздействии – до 300 °С в течение 5 мин. Также клеи допускается использовать в условиях повышенной влажности, резкой смены температур, вибромеханических нагрузок, хранения в отапливаемых складских помещениях. Свойства клеев приведены в табл. 2.

Учитывая, что клей ЭКС-1 является однокомпонентным, имеет достаточно большую жизнеспособность, не требует высокой температуры для полного отверждения и нетоксичен в отвержденном состоянии, он был принят за базовый вариант для проведения последующих монтажных работ методом «flip-chip».

4(531).indd 51 15.12.2016 14:48:44

Таблица 2

Свойства электропроводных клеев

Наименование показателя и единица измерения	Норма для марок		
	ЭЧЭ-С	ЭКС-1	ЭКС-2
Неотвержденное состояние			
Внешний вид	Пастообразная однородная масса светло-серого цвета	Пастообразная масса светло-серого цвета	Пастообразная масса темно-серого цвета
Жизнеспособность, ч, не менее	120	720	4300
Режим полного отверждения клея, ч, при температуре:			
120 °С	1,5	1,0 – 2,0	–
120 °С, затем 175 °С*	–	–	1,0; затем 1,0
175 °С	–	–	0,75**– 1,0
Отвержденное состояние			
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см, не более	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Теплопроводность, Вт/(м·К), не менее	4	6	60

*Рекомендуется для обязательного применения при посадке кристаллов или склеивании деталей размером не менее 6×10 мм при скорости увеличения температуры 5…10 °С/мин.

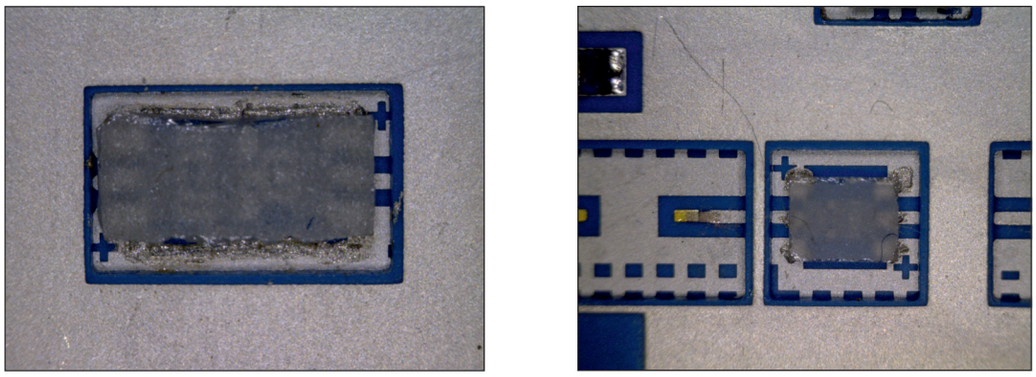
**Скорость увеличения температуры – не более 10 °С/мин.

Для обеспечения электрического соединения с контактными площадками на поверхности кристаллов ПАВ-фильтров, на поверхность керамики были нанесены проводники, имеющие многослойную структуру Au/Pd+Ag с общей толщиной слоя 15 мкм. Ширина проводников составляла 300 мкм, зазор между проводниками – 100 мкм. Данная геометрия проводников обеспечивает волновое сопротивление тракта 50 Ом и приемлемый уровень электромагнитной наводки.

Электропроводный клей ЭКС-1 наносили с помощью шприца, имеющего точность позиционирования ±25 мкм. Далее в полость монтировался кристалл (рабочей стороной вниз, рис. 9) и вся структура помещалась в сушильный шкаф. На рис.10 показан вид на приклеенный кристалл с торцевой стороны.

Для удобства монтажа все контактные площадки ПАВ-структуры были выведены на края кристалла, а для обеспечения необходимой точности совмещения ± 25 мкм они имели габаритные размеры 280×280 мкм, при этом расстояние между центрами контактных площадок составляло 400 мкм. С целью обеспечения радиочастотной защиты кристаллы закрывались крышкой методом контактной (термокомпрессионной) сварки. Экспериментальные амплитудно-частотные характеристики ПАВ-фильтров, смонтированных по описанной выше технологии, приведены на рис.11.

4(531).indd 52 15.12.2016 14:48:44



а) *б*)

Рис. 9. Кристаллы ПАВ-фильтров *1* (*а*) и *2* (*б*), смонтированные методом «flip-chip» на плату LTCC

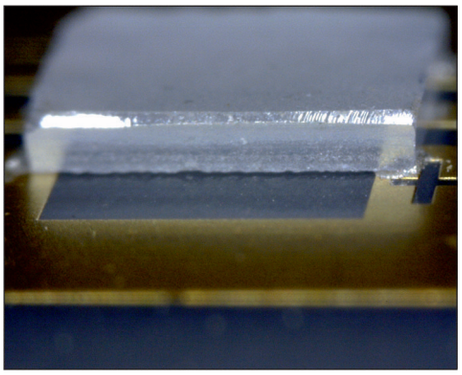
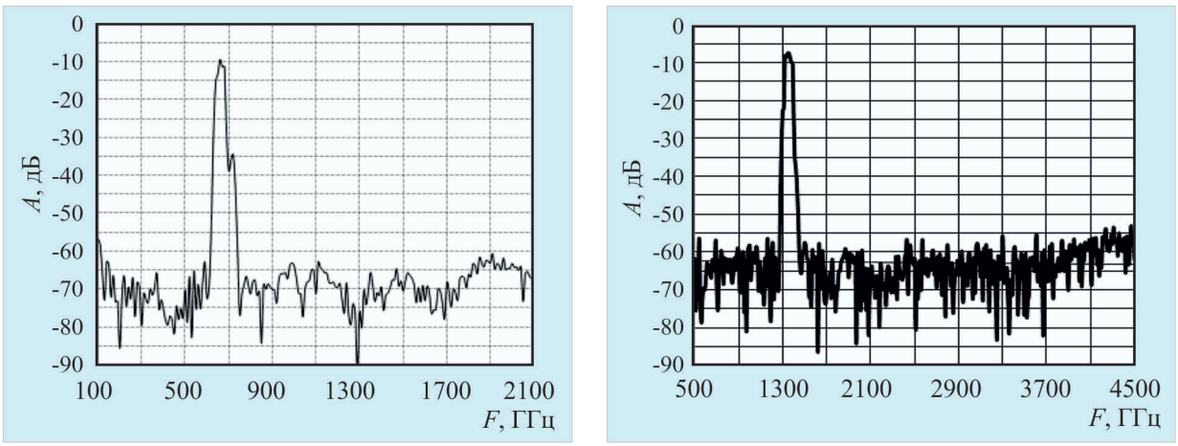


Рис.10. Приклеенный кристалл ПАВ-фильтра, вид с торцевой стороны

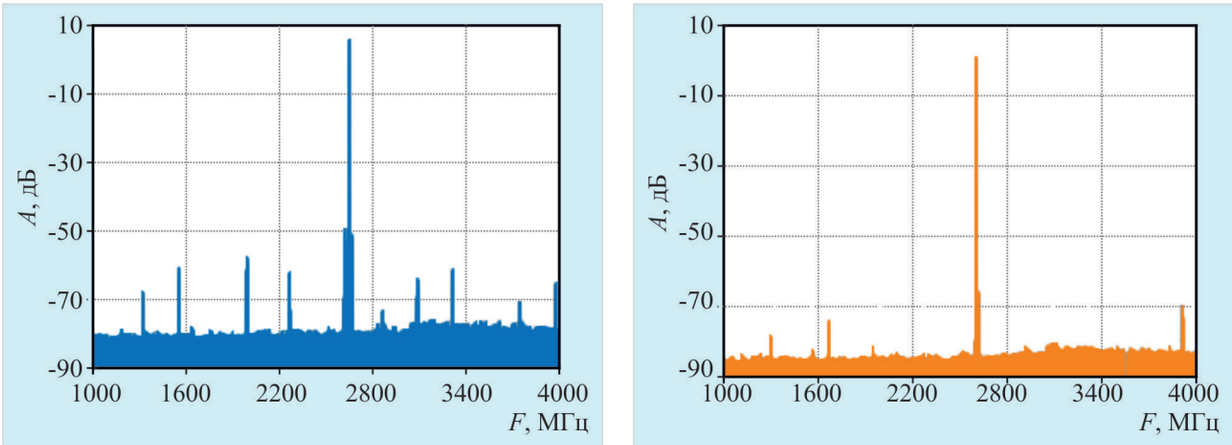


а) *б*)

Рис.11. Амплитудно-частотные характеристики ПАВ-фильтров *1* (*а*) и *2* (*б*) на номинальные частоты 664 и 1330 МГц, смонтированных по технологии «flip-chip»

4(531).indd 53 15.12.2016 14:48:44

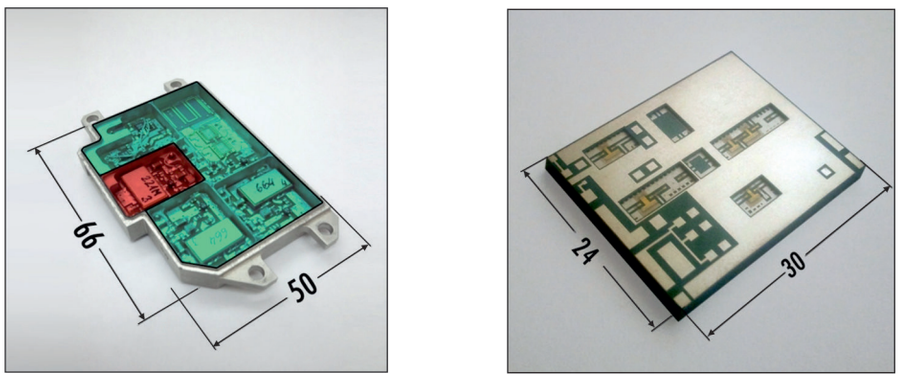
Из сравнения рис. 1 и 11 видно, что получено значительное увеличение уровня гарантированного затухания в высокочастотной полосе заграждения (до 40 дБ), что подтвердило высокую эффективность данного метода (особенно для частот свыше 500 МГц) и обеспечило существенное улучшения спектральной чистоты выходного сигнала частотно-преобразовательного СВЧ-модуля (рис.12).



а) *б*)

Рис.12. Сравнение спектра модуля МНГ,
серийно выпускаемого АО «НПП «Исток» им. Шокина» (*а*),
и разработанного частотно-преобразовательного СВЧ-модуля (*б*)

Таким образом, в результате проведенной работы авторами разработано и изготовлено гибридно-монолитное устройство, выполненное по технологии LTCC с применением монтажа «flip-chip», что позволило более чем в 2 раза уменьшить массогабаритные показатели модуля (рис.13), а также сделало более спектрально-чистым сигнал на выходе устройства.



а) *б*)

Рис.13. Сравнение габаритных показателей модуля МНГ,
серийно выпускаемого АО «НПП «Исток» им. Шокина» (*а*),
и разработанного частотно-преобразовательного СВЧ-модуля (*б*)

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 11411.1006800.11.190.

4(531).indd 54 15.12.2016 14:48:45

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чигиринский, С.** Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) / С. Чигиринский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 11. – С. 130.

2. **Гусев, А. П.** Исследование поверхностного сопротивления проводящих паст для изготовления СВЧ-устройств на основе LTCC / А. П. Гусев, А. В. Павлов, С. Г. Павлова, В. Ю. Мякиньков // 24-я Международная крымская конференция «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). – 2014. – С. 688.

3. **Симин, А.** Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига.Ч. 3. Активные устройства, антенны и многофунциональные СВЧ-модули / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7. – С. 208.

4. **Перцель, Я.** Преимущества использования технологии низкотемпературной керамики для реализации радиоэлектронных устройств / Я. Перцель, А. Яковлев // Современная электроника. – 2012. – № 8. – С. 16.

5. **Гуляев, Ю.** ПАВ-фильтры во входных каскадах приемопередающих устройств / Ю. Гуляев, А. С. Багдасарян, Т. В. Синицына, О. В. Машинин, В. В. Прапорщиков, М. Орлов, Р. В. Егоров // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – № 4. – С. 82.

6. **Багдасарян, А.** Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации / А. Багдасарян, Т. Синицына, О. Машинин, П. Иванов, Р. Егоров // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2013. – № 8 (131). – С. 128.

7. **Gusev, A. P.** Hybrid-monolithic frequency converter device created with LTCC technology, using flip-chip / A. P. Gusev, A. V. Pavlov, S. G. Pavlova, V. Yu. Myakinkov, T. V. Sinitsina, S. N. Sytilin // 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (CriMiCo' 2013). – 2013. – С. 86.

8. **Синицына, Т. В.** ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур / Т. В. Синицына, А. С. Багдасарян, М. М. Егоров // Электронная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 14.

9. **Багдасарян, А. С.** Анализ ВШП методом связанных мод / А. С. Багдасарян, Т. В. Синицына // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2003. – № 1–2. – С. 11.

10. **Синицына, Т. В.** Фильтры на ПАВ с высокой входной мощностью: базовые модели для анализа электродных структур / Т. В. Синицына, А. С. Багдасарян, В. В. Бутенко, А. Л. Данилов, П. Г. Иванов // Электросвязь. – 2015. – № 10. – С. 65.

11. **Li J., Han L., Zhong J**. Power and interface features of thermosonic flip-chip bonding // IEEE Trans. on Advanced Packaging. – 2008. – Vol. 31. – No 3.

Статья поступила 15 августа 2016 г.

4(531).indd 55 15.12.2016 14:48:45

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.318.134.029.64

ФЕРРОГРАНАТЫ ДЛЯ ПОДЛОЖЕК МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ ПРИБОРОВ *X*-ДИАПАЗОНА

А. Г. Налогин[1], М. Г. Семенов[1], В. Г. Костишин[2], В. В. Иванов[3], А. С. Семенов[1], А. В. Бакланов[1]

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

[2]*НИТУ «МИСиС», г. Москва*

[3]*МФТИ (государственный университет), г. Долгопрудный*

Исследовано влияние нетрадиционных приемов изготовления ферритов, встроенных в классическую керамическую технологию, на плотность и микроструктуру железоиттриевого граната (ЖИГ) $Y_3Fe_5O_{12}$. Такими приемами являются магнитно-импульсное прессование ферритовых заготовок и радиационно-термическое спекание. Положительные результаты испытаний ферритовых микрополосковых приборов, изготовленных на ферритовых пластинах из ЖИГ с использованием данных технологий, подтвердили динамическую устойчивость, термостабильность и малые потери при высоком уровне мощности.

КС: железоиттриевый гранат (ЖИГ), оксидная технология, магнитно-импульсное прессование (МИП), радиационно-термическое спекание (РТС), микроструктура, металлографический анализ, микрополосковый ферритовый развязывающий прибор (ФРП), высокий уровень мощности (ВУМ), низкий уровень мощности (НУМ)

FERROGARNETS FOR SUBSTRATES OF *X*-BAND MICROSTRIP FERRITE DEVICES

A. G. Nalogin[1], M. G. Semenov[1], V. G. Kostishin[2], V. V. Ivanov[3], A. S. Semenov[1], A. V. Baklanov[1]

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

[2]*NUST "MISiS", Moscow*

[3]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

The influence of non-traditional methods of ferrite manufacturing, built into classical ceramic technology, on density and microstructure of yttrium-iron garnet (YIG) $Y_3Fe_5O_{12}$ has been investigated. Such methods include magnetic-impulse pressing of ferrite work pieces and radiation-thermal sintering. The positive results of testing ferrite microstrip devices manufactured on YIG ferrite wafers using the above technologies confirmed dynamic stability, thermal stability and low losses at high power level.

Keywords: yttrium-iron garnet (YIG), oxide technology, magnetic-impulse pressing (MIP), radiation-thermal sintering (RTS), microstructure, metallographic analysis, microstrip ferrite decoupling device (FDD), high power level (HPL), low power level (LPL)

4(531).indd 56 15.12.2016 14:48:45

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие СВЧ-электроники выдвигает повышенные требования к уровню параметров поликристаллических ферритов, применяемых в качестве подложек для микрополосковых ферритовых развязывающих приборов (вентилей, циркуляторов). Требования к ферриту определяются конкретным его применением в данном функциональном устройстве, и при этом оптимизируются те его свойства, которые ранее не рассматривались. Характерной особенностью ферритов, работающих на высоком уровне мощности (ВУМ), являются дополнительные потери за счет нелинейного ферромагнитного резонанса. Эта нелинейная зависимость проявляется при уровнях мощности, превышающих некоторое пороговое значение, и приводит к резкому ухудшению рабочих параметров устройств, ограничивая допустимый уровень входной мощности для устройств дорезонансного типа.

Целью настоящей работы было исследование новых инновационных технологий для получения ферритов с кристаллической структурой граната, используемых в качестве подложек для СВЧ-микрополосковых ферритовых развязывающих приборов высокого уровня мощности, сантиметрового диапазона длин волн.

Необходимые изменения свойств твердофазных соединений могут быть достигнуты в результате различных физических или химических воздействий. Рассмотрены два способа повышения пороговых свойств феррита: путем введения быстрорелаксирующих ионов Sm (ферриты изготавливают по типовой оксидной технологии) и создания мелкозернистой структуры, с использованием магнитно-импульсного прессования и радиационно-термического спекания

Возможность использования ионов редкоземельных металлов, в частности Sm, для эффективного увеличения ширины линии спиновых волн обусловлена особенностями строения электронной оболочки этих ионов, в которой имеются недостроенные 4*f*-слои, экранированные 5*s*- и 5*p*-слоями. Вследствие этого появляется нескомпенсированность их спиновых и орбитальных моментов. Внутреннее кристаллическое поле вызывает очень слабое расщепление электронных уровней в атомах и ионах и не препятствует существованию сильного спин-орбитального взаимодействия [1].

Частоты релаксации возбужденных состояний ионов Sm велики, и они быстро передают энергию решетке. В приборе ионы сильно связаны с магнитной подсистемой, они легко возбуждаются под воздействием СВЧ-колебаний и выполняют роль промежуточного звена в передаче энергии кристаллической решетке феррограната от колебаний подсистемы. Этот процесс сопровождается увеличением ширины линии спиновых волн, т. е. увеличением пороговых свойств.

Одним из способов повышения порога возбуждения спиновых волн, определяющего динамический диапазон ферритовых устройств, является использование мелкозернистых поликристаллов. В ферритах наблюдается сильная зависимость порогового поля $h_{кр}$ от величины размера зерна. В мелкозернистых ферритах пороговое поле более чем на порядок больше, чем у поликристаллических ферритов с крупным зерном, без увеличения линейных магнитных потерь. На рис. 1 приведена зависимость порогового поля от размера частиц [2].

Известно, что различные технологические приемы (горячее прессование, легирование легкоплавкими добавками и т. д.) позволяют получать ферриты с размером кристаллитов порядка 1 мкм. Однако процесс горячего прессования при синтезе ферритов характеризуется как трудо-

4(531).indd 57 15.12.2016 14:48:45

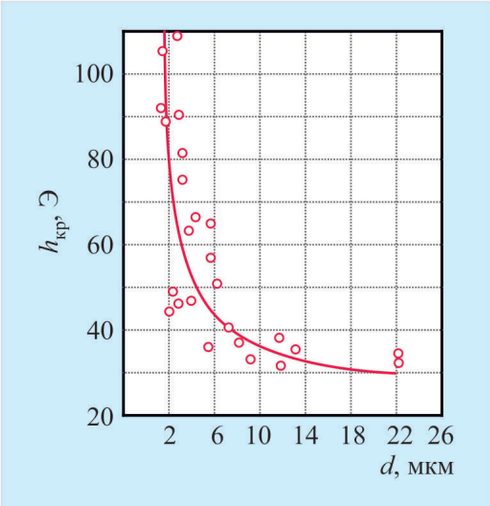


Рис. 1. Зависимость порогового поля $h_{кр}$ от размера частиц феррита d

емкий, дорогостоящий и низкопроизводительный, а легирование легкоплавкими добавками ведет к ухудшению электромагнитных параметров. В данной работе были использованы новые способы формирования мелкозернистой микроструктуры железоиттриевого граната (ЖИГ): магнитно-импульсное прессование ферритовых заготовок и радиационно-термическое спекание.

2. МЕХАНИЗМ СПЕКАНИЯ ФЕРРОГРАНАТОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Интерес представляет механизм спекания феррогранатов при низких температурах, когда объемная диффузия ионов в кристаллической решетке незначительная. Принцип неравноценности объемных и поверхностных свойств широко используется при получении функциональной керамики, в которой помимо геометрической поверхности исключительную роль играет межкристаллитная поверхность: ее протяженность и состав, которые определяются, в свою очередь, размером и формой кристаллитов, размером, формой и распределением пор. Поэтому при уплотнении заготовок феррогранатов на низких температурах ощутимый вклад в спекание вносят процессы пластического течения вещества, скольжения и двойникования частиц, т. е. поверхностная диффузия вакансий вдоль границ зерна, и при этом не наблюдается значительного роста кристаллитов.

Одна из наиболее универсальных теорий, при помощи которой могут быть описаны вышеперечисленные процессы уплотнения порошковых материалов, – теория Ивенсена [3]. В её основе лежит формальное предположение о термической активации процесса уплотнения дисперсной кристаллической массы спекаемой заготовки за счет увеличения дефектности кристаллической структуры материала. Температура спекания зависит от концентрации дефектов N. При спекании происходит залечивание этих несовершенств, уменьшение их концентрации во времени.

Принимается, что изменение объёма пор во времени в процессе спекания происходит за счет вязкого течения и описывается уравнением

$$dV'/dt = -BNV'. \quad (1)$$

4(531).indd 58 15.12.2016 14:48:45

Скорость устранения несовершенств описывается уравнением второго порядка

$$dN/dt = -AN^2. \quad (2)$$

Здесь $V' = V_n/V_n^0$ – относительный объём пор; V_n и V_n^0 – объём пор после спекания и до него; A и B – константы при T = const.

Уплотнение ферритовых заготовок и формирование микроструктуры ЖИГ при использовании методов магнитно-импульсного прессования и радиационно-термического спекания реализуется через механизм поверхностной диффузии вакансий по границам зерна, что позволяет снизить температуру спекания на 100...200 °С.

3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ ПРЕССОВАНИЕ

Теоретическому описанию процессов одноосного магнитно-импульсного прессования посвящены работы [4, 5]. Магнитно-импульсный способ прессования порошковых материалов характеризуется быстрым нарастанием прессующего давления и высокоскоростным перемещением среды, приводящим к дополнительным эффектам адиабатического разогрева и понижения внутреннего трения среды, что улучшает уплотняемость порошковых материалов. Пресс для одноосного магнитно-импульсного прессования порошков с блоком дегазации имеет следующие характеристики:

Давление……... до 2 ГПа
Усилие …….. до 100 т
Температура дегазации и прессования……. до 500 °С
Вакуум в камере прессования…… до 1 Па

В качестве исходного порошка для прессования был использован порошок ЖИГ ($Y_3Fe_5O_{12}$), полученный по стандартной оксидной технологии (смешивание исходных оксидов в шаровой мельнице, ферритизация при 1150 °С, размол ферритизованной массы в шаровой мельнице). Порошок полидисперсен (фазы: $Y_3Fe_5O_{12}$; перовскит $YFeO_3$; гематит Fe_2O_3) и имеет степень ферритизации не ниже 95 %. Порошок ЖИГ характеризуется удельной площадью поверхности около 6,5…8,0 м^2/г, размер кристаллитов порядка 1,8…1,45 мкм. Для измерения удельной поверхности порошков и среднемассового размера частиц порошков использовали высокоточный автономный прибор дисперсионного анализа ПСХ-1. Степень ферритизации определяли по измерению намагниченности порошка.

Прессование осуществляли в пресс-форме с разборной матрицей. Пресс-форму с порошком помещали в вакуумно-плотную камеру, в верхней крышке которой имеется сальниковый ввод для передачи прессующего усилия от концентратора к верхнему пуансону пресс-формы. Перед прессованием из порошка удаляли газы и адсорбированные вещества (дегазация) путем прогрева камеры с пресс-формой до температуры 450 °С при непрерывной вакуумной откачке до остаточного давления 10 Па. Импульсное прессование проводили в условиях вакуума при температуре 425 °С. Для снятия внутренних напряжений прессовку затем подвергали высокотемпературной выдержке внутри пресс-формы также при непрерывной вакуумной откачке. Были изготовлены две заготовки (№ 1 и 2). Диаметр заготовок – 16 мм, остаточная пористость – не более 6…7 %. Причем пористость заготовок при обычном одноосном прессовании под давлением 1,2 т/см^2 составляет 35…40 %.

Далее заготовки спекали по следующему технологическому режиму.

4(531).indd 59 15.12.2016 14:48:45

Заготовка № 1: подъем температуры со скоростью 200 °С /ч до 1400 °С, изотермическая выдержка 3 ч, снижение температуры до 1300 °С, изотермическая выдержка 1 ч, остывание с выключенной печью.

Заготовка № 2: подъем температуры со скоростью 200 °С /ч до 1400 °С, изотермическая выдержка 1 ч, снижение температуры до 1300 °С, изотермическая выдержка 1 ч, остывание с выключенной печью. Диаметр заготовок после спекания составил 15 мм.

В табл. 1 приведены параметры ЖИГ-ферритов в зависимости от способа изготовления (поз. 1 и 2). Результаты говорят о высокой плотности заготовок, полученных с использованием магнитно-импульсного прессования. Кроме того, благодаря более низким температурам и меньшей длительности процесса, по сравнению с обычным спеканием, рост кристаллитов был ограничен и полученный материал имеет мелкозернистую структуру.

Таблица 1

Параметры ЖИГ-ферритов, изготовленных различными способами

Номер заготовки	Размеры, мм	Плотность ρ, г/см^3	$\rho/\rho_т$, %	Намагниченность $4\pi M_s$, кА/м
1	∅15; h = 7	5,15	99,6	142±5
2	∅15; h = 5	5,15	99,6	142±5
3	55×34×8	5,10 – 5,11	98,6 – 98,8	139±5
4	55×34×8	5,07	98,0	137±5

4. РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЕ СПЕКАНИЕ

Заготовки $Y_3Fe_5O_{12}$ для радиационно-термического спекания были изготовлены по классической оксидной технологии. Радиационно-термическое спекание образцов феррогранатов осуществлялось на воздухе быстрыми электронами с энергией 2,5 МэВ в электронном ускорителе ИЛУ-6. При этом температура спекания составила 1300 °С, время отжига – 1 ч. Параметры феррограната, изготовленного по данной технологии, показаны в табл. 1 (поз. 4).

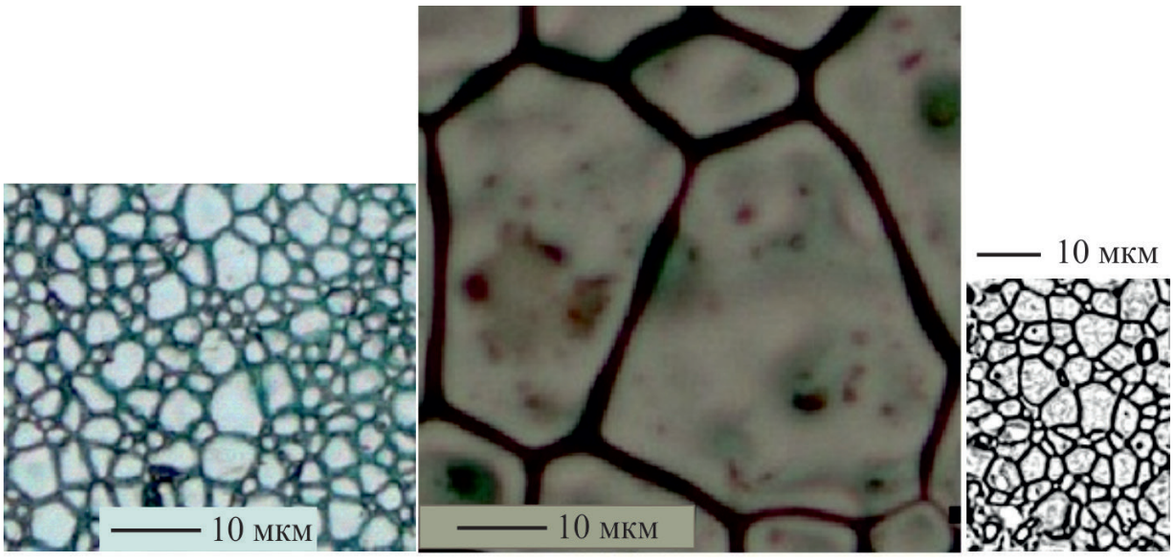
Основное достоинство радиационно-термического спекания состоит в том, что электронный пучок не только разогревает образец до заданной температуры, но и, самое главное, существенно стимулирует диффузионные процессы, снижающие температуру (на 100…200 °С) и время спекания. Это приводит к следующим особенностям структуры керамики: мелкозернистость, оптимальное строение межзёренных границ [6, 7]. Подобные структурные особенности обеспечивают рекордно высокие эксплуатационные свойства феррогранатов при работе на высоких уровнях мощности.

Для сравнения из той же партии исходного сырья были приготовлены партии образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ (табл. 1, поз. 3), $Y_{2,97}Sm_{0,03}Fe_5$ по классической стандартной технологии (спекание – на воздухе, температура спекания – 1500 °С, изотермическая выдержка – 8 ч).

5. АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ФЕРРОГРАНАТОВ

Ниже приведены результаты микроструктурного анализа образцов. Определение размера зерна производили с использованием автоматического анализа, используя изображения структуры зерна, полученные под микроскопом Olympus BX-51 (рис. 2). Микроскоп предназначен для ис-

4(531).indd 60 15.12.2016 14:48:45



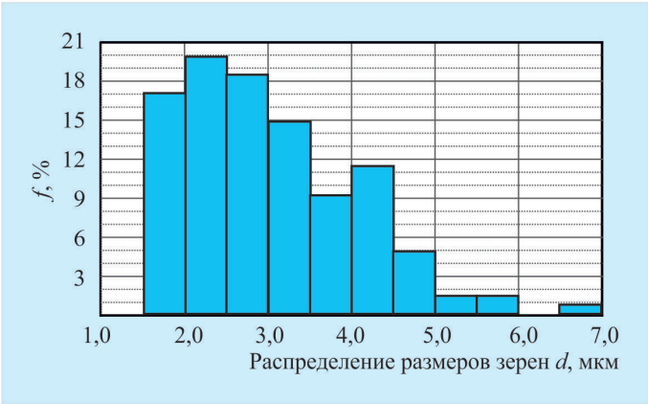
а) *б*) *в*)

Рис. 2. Микроструктуры образцов ЖИГ:
а – образец изготовлен с применением магнитно-импульсного прессования;
б – по стандартной керамической технологии;
в – с применением радиационно-термического спекания

пользования различных методов контрастирования и для работы с флуоресцентным и дифференциально-интерференционным контрастом. Микроскоп сопряжен с компьютером. Специальное программное обеспечение позволяет проводить обработку полученных изображений в автоматическом режиме по стандартам ASTM E112, ASTM E1382. Подготовка образцов для исследований включала операции: шлифовку, полировку и термическое травление поверхности заготовок.

Результаты металлографического анализа поверхности образца, изготовленного с применением магнитно-импульсного прессования

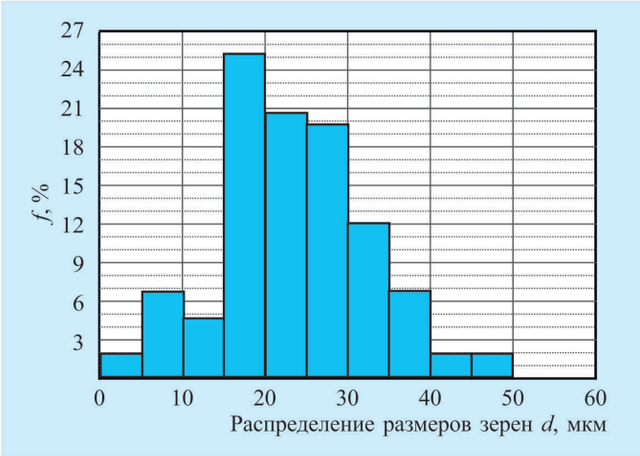
Число полей зрения…… 1
Общая площадь анализа…… 1421,3 мкм^2
Число зерен…….. 140
Количество зерен на 1 мм^2…… 98504
Средняя площадь зерна……. 10,2 мкм^2
Площадь наибольшего зерна…… 44,7 мкм^2
Размер зерна:
минимальный ……..… 1,5 мкм
максимальный……..….. 6,7 мкм
средний …….. 3,02 мкм



4(531).indd 61 15.12.2016 14:48:45

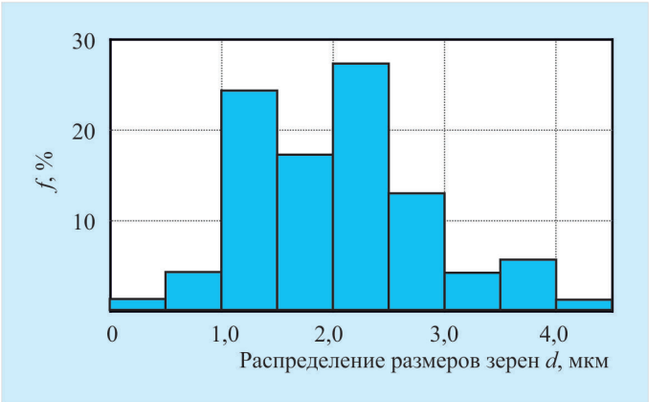
Результаты металлографического анализа поверхности образца, изготовленного по стандартной керамической технологии

Число полей зрения……... 1
Общая площадь анализа……... 0,067 мм^2
Число зерен……... 108
Количество зерен на 1 мм^2…..... 1603
Средняя площадь зерна……..... 623,5 мкм^2
Площадь наибольшего зерна…… 2392,7 мкм^2
Размер зерна:
минимальный ……... 3,4 мкм
максимальный……..….. 48,9 мкм
средний …….. 23,36 мкм



Результаты металлографического анализа поверхности образца, изготовленного с применением радиационно-термического спекания

Число полей зрения…… 1
Общая площадь анализа…… 329,8 мкм^2
Число зерен……. 69
Количество зерен на 1 мм^2……... 209195
Средняя площадь зерна……. 4,8 мкм^2
Площадь наибольшего зерна…… 16,3 мкм^2
Размер зерна:
минимальный ……... 0,43 мкм
максимальный……..….. 4,04 мкм
средний …….. 2,044 мкм



Контроль элементного состава феррита производился на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе. Анализатор реализует рентгеноспектральный флуоресцентный метод анализа, относящийся к неразрушающим аналитическим методам. Диапазон определения содержаний химических элементов: 11Na ÷ 92U. Диаметр пятна, в котором производился анализ, – 8 мм. Результаты анализа говорят об идентичности образцов, состав основных элементов образцов соответствует ЖИГ и примеси в них отсутствуют (табл. 2).

Таблица 2

Состав основных элементов образцов ЖИГ

Элемент	Концентрация, %			
	Заготовка № 1	Заготовка № 2	Заготовка № 3	Заготовка № 4
Fe_2O_3	53,2	53,05	53,3	53,1
Y_2O_3	46,8	46,95	46,7	46,9

4(531).indd 62 15.12.2016 14:48:45

6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ НА ВЫСОКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ (*X*-ДИАПАЗОН)

Прямые и обратные потери вентиля $\alpha_в$ определяются путем сравнения отношения прошедшей мощности $P_{пр}$ к падающей $P_{пад}$ в результате двух циклов измерений:

– в первом цикле измеряются падающая на подключающее устройство (ПУ) мощность $P_{пад1}$ и прошедшая через ПУ мощность $P_{пр1}$, когда между ПУ включена калибровочная микрополосковая линия (МПЛ) с потерями $\alpha_л$;

– во втором цикле измеряются падающая на ПУ мощность $P_{пад2}$ и прошедшая через ПУ мощность $P_{пр2}$, когда между ПУ включен микрополосковый вентиль.

Потери при многократных отсчётах определяются по формуле

$$\alpha_в = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} 10\lg\frac{P_{пр1i}\cdot P_{пад\,2i}}{P_{пр2i}\cdot P_{пад\,1i}} + \alpha_л .$$

Структурная схема стенда для измерения ослабления на ВУМ представлена на рис. 3.

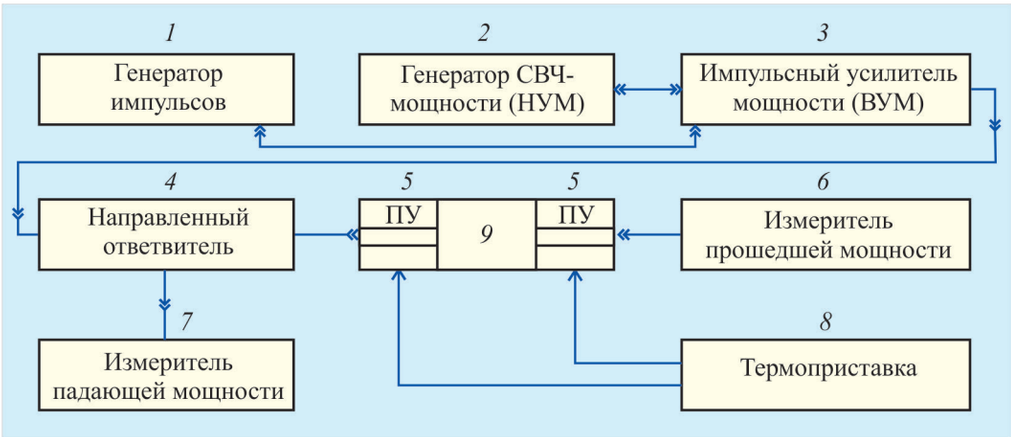


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерения ослабления на ВУМ:
5 – подключающее устройство; *9* – плоскость электро- и теплоконтакта МПЛ и вентиля с ПУ и теплоотводящей поверхностью

Из полученных образцов изготовлены полированные пластины, на которых методами тонкопленочной технологии изготовлены *X*-циркуляторы. Электрические характеристики этих циркуляторов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики *X*-циркуляторов МПЦ 10-1X, изготовленных на пластинах ЖИГ с использованием различных технологических приёмов

Технология изготовления	$P_{вх}$, Вт	$\alpha_{пр}$, дБ, плеч *2-3* ВУМ	$\alpha_{разв}$, дБ, плеч *3-2*	$\alpha_{пр}$, дБ, плеч *2-3* НУМ
Стандартная	20,0	0,9	22	0,25

4(531).indd 63 15.12.2016 14:48:46

Окончание табл. 3

Технология изготовления	$P_{вх}$, Вт	$\alpha_{пр}$, дБ, плеч *2-3* ВУМ	$\alpha_{разв}$, дБ, плеч *3-2*	$\alpha_{пр}$, дБ, плеч *2-3* НУМ
Стандартная, ЖИГ, допированная редкоземельными металлами	20,0	0,33 – 0,35	22	0,3
Магнитно-импульсное прессование	20,0	0,44 – 0,48	22	0,25
Радиационно-термическое спекание	20,0	0,31 – 0,33	22	0,25

Примечание. ВУМ – высокий уровень мощности; НУМ – низкий уровень мощности.

Как видно из таблицы, наиболее высокие значения характеристик ферритовых приборов (уровень прямых потерь ниже более чем на 0,5 дБ) достигнуты при использовании инновационных технологий.

7. ВЫВОДЫ

Применение магнитно-импульсного прессования пресс-порошка и радиационно-термического спекания в процессе производства феррогранатов позволяет существенно уменьшить температуру и длительность спекания, получать ферритовые материалы с минимальной пористостью, с малым размером зерна и высокими электрофизическими свойствами. Практическая значимость определяется еще тем, что уменьшение размера кристаллитов феррита ЖИГ, изготовленного предложенными методами, позволяет увеличить величину порогового поля, по сравнению с традиционной оксидной технологией, и соответственно изготавливать ферритовые развязывающие приборы в микрополосковом исполнении, функционирующие при более высоких уровнях мощности без увеличения прямых потерь. Развитие данных направлений в технологии производства ферритовых материалов позволит расширить возможности при разработке ферритовых развязывающих приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крупичка, С.** Физика ферритов и родственных им окислов. Т. 2 / С. Крупичка. – М.: Мир, 1976. – 229 с.

2. **Прокошкин, Д. А.** Горячее прессование ферритов / Д. А. Прокошкин, Ю. А. Степанов, Ю. А. Быков, В. А. Рыбкин. – М.: Металлургия, 1971. – 124 с.

3. **Ивенсен, В. А.** Феменология спекания / В. А. Ивенсен. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.

4. **Болтачев, Г. Ш.** Модель динамического прессования гранулированной среды / Г. Ш. Болтачев, Н. Б. Волков, В. В. Иванов, С. Н. Паранин // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 211.

5. **Боков, А. А.** Одноосное компактирование нанопорошков на магнитно-импульсном прессе / А. А. Боков, Г. Ш. Болтачев, Н. Б. Волков, С. В. Заяц, А. М. Ильина, А. А. Ноздрин, С. Н. Паранин, Е. А. Олевский // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 10.

6. **Притулов, А. М.** Радиационно-термическое спекание ферритовой керамики / А. М. Притулов, А. П. Суржиков, А. П. Воронин, В. А. Кожемякин, Б. Б. Мозес // 5-ое Всеросийского совещания «Радиационно-гетерогенные процессы. Кемерово,1990: тез. докл.

7. **Костишин, В. Г.** Магнитная структура и свойства Mn–Zn ферритов, полученных методом радиационно-термического спекания / В. Г. Костишин, В. В. Коовушкин, Л. В. Панина, В. Г. Андреев, А. С. Комлев, Н. А. Юзанов, А. Ю. Адамцов, А. Н. Николаев // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50, № 12. – С. 1352 – 1356.

Статья поступила 16 ноября 2016 г.

4(531).indd 64 15.12.2016 14:48:46

УДК 621.318.134.029.64

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ ПРИБОРОВ ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

А. Г. Налогин, М. Г. Семенов, Н. Д. Урсуляк

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

Изложены основные требования, предъявляемые к материалу подложки для СВЧ микрополосковых ферритовых приборов высокого уровня мощности. Рассмотрены вопросы изготовления ферритовых материалов. Приведены параметры никелевой шпинели и ферритовых микрополосковых приборов высокого уровня мощности в полосе частот 9,4…10,7 ГГц, изготовленных на подложках из разработанного материала.

КС: никелевая шпинель, микрополосковый ферритовый развязывающий прибор (ФРП), высокий уровень мощности (ВУМ)

THERMOSTABLE FERRITES FOR MICROSTRIP FERRITE DEVICES OF HIGH POWER LEVEL

A. G. Nalogin, M. G. Semenov, N. D. Ursulyak

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

The main requirements to the substrate material for microwave microstrip ferrite devices of high power level are stated. The questions of manufacturing ferrite materials are considered. Parameters of nickel spinel and ferrite microstrip devices of high power level made on substrates of the developed material within 9.4…10.7 frequency band, are given.

Keywords: nickel spinel, microstrip ferrite decoupling device (FDD), high power level (HPL)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие повышенный интерес к ферритовым микрополосковым приборам высокого уровня мощности практически во всем СВЧ-диапазоне проявляется в связи с разработкой и производством СВЧ-модулей АФАР РЛС [1]. В такой аппаратуре сочетание требований миниатюризации, широкополосности и малости потерь к приборам высокого уровня мощности (ВУМ) в интервалах рабочих температур могут быть удовлетворены за счет использования ферритовых микрополосковых приборов (ФМП) дорезонансного типа.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основой для успешной разработки комплекта ФМП ВУМ являлось получение ряда ферритовых материалов со следующими электромагнитными параметры: диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 13…16$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon \approx 1\cdot10^{-4}$, тангенс угла магнитных потерь

4(531).indd 65 15.12.2016 14:48:46

$tg\delta_м \approx 1\cdot10^{-4}$, в сочетании с динамической устойчивостью, термостабильностью и малыми потерями на высоком уровне мощности.

На основе базовых технологий был разработан феррит – никелевая шпинель, электромагнитные параметры которого соответствуют вышеуказанным требованиям.

При разработке выбор пал на материал никелевой системы по нескольким причинам:

– во-первых, ферриты никелевой системы находятся по уровню пороговых свойств выше ферритов литиевой системы [2, 3];

– во-вторых, ферриты литиевой системы чувствительны к технохимическим процессам при изготовлении ферритовых плат микрополосковых устройств [4, 5];

– в-третьих, использование при разработке ферритовых развязывающих приборов (ФРП) нормализованной марки литиевой шпинели ЛТ-200 [6] не дало положительных результатов.

В каталогах российских предприятий никелевый феррит с такими параметрами отсутствует.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА

Материал синтезирован на основе многокомпонентной системы оксидов $NiO–Fe_2O_3–TiO_4–Al_2O_3–MnO–ZnO–Co_3O_4–Bi_2O_3$ с намагниченностью насыщения M_s = 180 кА/м и отличается высокой термостабильностью M_s, низким уровнем магнитных, диэлектрических потерь и комплексом электромагнитных параметров, устойчивых к высокому уровню мощности. Основная задача при синтезе замещенных шпинелей с таким комплексом требуемых параметров заключалась в подборе элементов в узлы кристаллической решетки шпинели, так как отдельный компонент отвечает за конкретные параметры материала: намагниченность насыщения, температурную зависимость намагниченности насыщения в диапазоне температур, диссипативные параметры, диэлектрическую постоянную, плотность материала, а также технологические параметры синтеза ферритов.

Для получения заданного комплекса параметров в никелевый феррит вводили различные ионы металлов: цинка, алюминия, титана, марганца, висмута и кобальта. За основу при разработке феррита был выбран твердый раствор состава $Ni_{0,9}Zn_{0,1}Mn_{0,3}Fe_{1,67}Al_{0,3}O_4$, что связано с чувствительностью термомагнитных характеристик Ni–Al-ферритов к концентрации ионов Al^{+3}. К примеру, магнитный момент в системе $NiAl_tFe_{2-z}O_4$ меняет знак на противоположный при концентрации ионов Al^{+3} и t = 0,7 [7]. К данному составу пришли экспериментально-расчетным путем: с учетом имеющихся литературных данных по зависимости намагниченности от состава простых шпинельных систем (Ni–Al–Fe, Ni–Zn–Fe, Mn–Fe) [7, 8] и по результатам опытных партий ферритов.

В структуре шпинели существуют две различные катионные подрешетки: тетраэдрическая (A) и октаэдрическая (B). В нормальной шпинели тетраэдрическая подрешетка заполнена ионами двухвалентного металла, а октаэдрическая – трехвалентными. Суммарная намагниченность ферромагнетика определяется в первом приближении следующим выражением:

$$M_s = \sum M_{i\,тетр} - \sum M_{i\,окт},$$

где i – парамагнитный ион, вносящий вклад в намагниченность.

При замещении ионов Ni^{+2} ионами Zn^{+2}происходит уменьшение магнитного момента в тетраэдрической подрешетке и одновременное увеличение $M_{окт}$. При замещении ионов Fe^{+3} ионами Al^{+3}величина $M_{тетр}$ сохраняется постоянной, уменьшается только $M_{окт}$. Изменение коли-

4(531).indd 66 15.12.2016 14:48:46

чества парамагнитных ионов по подрешеткам позволило получить феррит с необходимым M_s и с ее малым уходом в рабочем диапазоне температур. Однако диэлектрическая постоянная составила 12,0, поэтому для увеличения диэлектрической константы часть ионов алюминия в октаэдрической подрешетке заменили на ионы титана Ti^{4+}. На рис. 1 приведена зависимость ε от содержания оксида титана (содержание оксида титана приведено в формульных единицах, ф. е.). Увеличение диэлектрической постоянной до значения 14,2 ведет к уменьшению области циркуляции, т. е. к миниатюризации ферритового микрополоскового прибора, но в то же время возрастают диэлектрические потери в феррите.

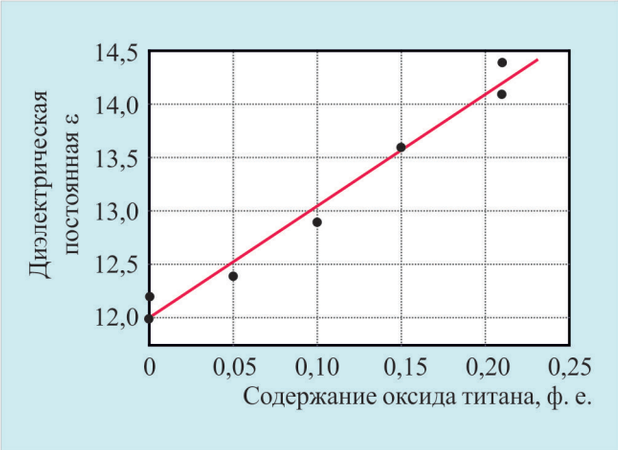


Рис. 1. Зависимость ε от содержания оксида титана

Электропроводность, диэлектрические потери в феррите зависят от состава и кристаллической структуры. Отклонение состава феррита от стехиометрии в сторону избытка железа в кристаллической структуре шпинели приводит к тому, что ионы Fe^{+2} занимают октаэдрические позиции, которые заняты ионами Fe^{+3}, в результате сильно возрастает электропроводность и уменьшается энергия активации электронов. Для снижения диэлектрических потерь в кристаллическую решетку шпинели ввели ионы Mn, что способствовало переводу ионов двухвалентного железа, ответственных за потери в феррите, в трехвалентное состояние: $Fe^{+2} + Mn^{+3} \leftrightarrow Fe^{+3} + Mn^{+2}$.

Точка равновесия в этой реакции сдвинута вправо, поэтому введение в кристаллическую решетку ионов Mn^{+3} снижает содержание Fe^{+2} в феррите. С точки зрения зонной теории проводимости снижение потерь при введении ионов Mn^{+2} объясняется тем, что комбинация ионов $Fe^{+3} + Mn^{+2}$ является энергетически более выгодной. Ввиду того что уровень ионов Fe^{+2} расположен выше уровня ионов Mn^{+2}, ионы Mn^{+2} препятствуют смещению уровня Ферми ближе к уровню Fe^{+2}, так что для образования носителей заряда требуется сравнительно большая энергия. Лишь после того как уровни примесных ионов полностью заполнятся, уровень Ферми приблизится к уровню Fe^{+2}, энергия активации для возникновения носителей станет меньше проводимости и диэлектрические потери начнут возрастать. Поэтому основное назначение марганца в шпинели – снижение диэлектрических потерь.

Для снижения потерь ферритов при высоком уровне мощности необходимо повышать порог нестабильности спиновых волн. Повышение пороговых свойств (увеличение ширины линии спиновых волн $\Delta H_к$) осуществили путем введения быстрорелаксирующих ионов Co^{+2} в кристаллическую структуру шпинели в количестве 0,004 ф. е.

4(531).indd 67 15.12.2016 14:48:46

Одним из факторов, сильно ускоряющих процессы спекания, является локальное появление в материалах жидкой фазы, например, за счет образования микроэвтектик, что часто используется на практике, если данное явление не приводит к нарушению заданного фазового состава феррита.

Для снижения температуры спекания и уменьшения диэлектрических потерь феррита в состав ввели 0,003 ф.е. оксида висмута. Оксид висмута, ввиду большого эффективного радиуса трехвалентного иона висмута (0,117 нм), локализуется по границам зерен и образует с оксидом железа легкоплавкую эвтектику. Образование эвтектики из простых оксидов при твердофазных реакциях начинается при температуре 720 °С [9].

Добавки оксидов кобальта и оксида висмута вводили сверх стехиометрического состава феррита, и их количество было определено исходя из опыта предыдущих работ.

Окончательный формульный состав шпинели выглядит следующим образом:

$$Ni_{0,9}Zn_{0,12}Mn_{0,19}Fe_{1,5}Ti_{0,21}Al_{0,08}O_4 + 0,003Bi_2O_3 + 0,004Co_3O_4.$$

4. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТА

Температурные исследования намагниченности НТ-180, а также положительные результаты испытаний ферритовых микрополосковых приборов высокого уровня мощности подтвердили динамическую устойчивость, термостабильность и малые потери разработанного материала на высоком уровне мощности. Температурная зависимость намагниченности разработанного феррита приведена на рис. 2.

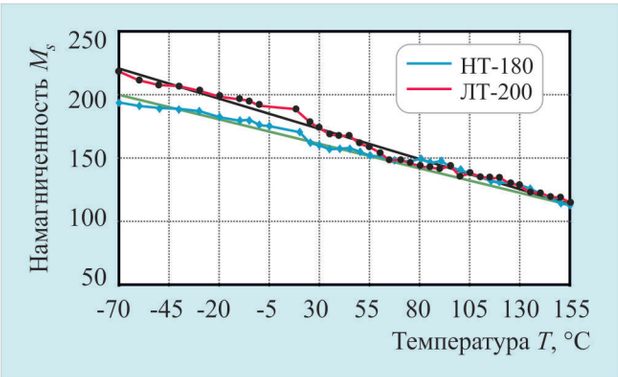


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности разработанного феррита НТ-180 и ЛТ-200

Как видно из рис. 2, материал НТ-180 имеет меньший температурный коэффициент намагниченности насыщения (0,16 %/°С) в диапазоне температур -60…+85 °С, а для ЛТ-200 M_s = 0,23%/°С.

Данные зависимости были получены измерением намагниченности образцов в диапазоне температур -70…+155 °С. Для этого была собрана специальная установка. Положительные температуры обеспечивали нагревом в электропечи, отрицательные – охлаждением в жидком азоте. Образцы для измерений представляли собой пластины размером 24×30×3,0 мм, которые помещались в футляр из фторопласта. К футляру с пластиной прикреплена термопара, изменение

4(531).indd 68 15.12.2016 14:48:46

термоЭДС которой контролировалось с помощью блока терморегулятора – измерителя ВАРТА ТП 703. При достижении нужной температуры образец перемещался в зазоре измерительного блока (в зазоре между двумя катушками Гельмгольца), а показания намагниченности фиксировались микровеберметром Ф 199. Время измерения составляло не более 2 с. Погрешность при измерении намагниченности для прибора – не более 3 %, а изменение температуры ферритовой пластины за время измерения – не более 2 °С.

$$M_s[\text{кА/м}] = \Delta\Phi/K\cdot V,$$

где $K = 2{,}225\cdot10^{-3}$ – коэффициент; V – объем пластины, мм^3; ΔФ – потокосцепление, мкВб.

Параметры материала НТ-180

Намагниченность насыщения M_s..... (180±5) кА/м
Диэлектрическая постоянная ε…… 14,0±0,2
Тангенс суммарных потерь $(\text{tg}\delta_\varepsilon + \text{tg}\delta_м)\cdot10^{-3}$…. 1,6

Тангенс суммарных потерь, диэлектрическая проницаемость феррита определены на плоскопараллельных пластинах квазиоптическим методом [10].

6. КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ НА ВУМ

На подложках из никелевого феррита НТ-180 были разработаны и изготовлены по тонкопленочной технологии микрополосковые приборы на базе *Y*-циркулятора. Топология приборов разработана расчетно-экспериментальным методом, исходя из требований к электрическим параметрам приборов в интервале рабочих температур от -60 до +85 °С.

Контроль прямых потерь ферритовых приборов производился на стенде для измерения ослабления на ВУМ.

Испытания феррита для приборов ВУМ проводились в следующей последовательности:

– настройка прибора в диапазоне частот 9,4…10,7 ГГц на низком уровне мощности с подбором поля подмагничивания, обеспечивающего работу прибора в дорезонансном режиме;

– измерение зависимости $\alpha_{пр}$ циркулятора от величины $P_{вх.имп}$ при скважности $Q = 100$, что исключало влияние нагрева на электрические параметры прибора;

– настройка прибора в диапазоне частот 9,4…10,7 ГГц на высоком уровне мощности с подбором поля подмагничивания, обеспечивающего работу прибора в дорезонансном режиме.

Результаты измерений зависимости $\alpha_{пр}$ циркулятора от величины $P_{вх.имп}$ при $Q = 100$ известных марок и для разработанного ферритового материала представлены на рис. 3.

Ранее были измерены зависимости прямых потерь от входной импульсной мощности известных марок ферритов. Для 40СЧ2 пороговая входная импульсная мощность составила 8 Вт, дальнейшее увеличение мощности влечет за собой резкое увеличение прямых потерь; для 40СЧ4 пороговая мощность составила 19 Вт, для 10СЧ6 – 10 Вт при частоте 7,1 ГГц. Измерения прямых потерь микрополоскового циркулятора ФПЦН2-112, изготовленного на платах из феррита НТ-180, в диапазоне входной импульсной мощности до 30 Вт на частоте 10 ГГц показали стабильность по прямым потерям (прямые потери возросли от 0,3 до 0,35 дБ). В таблице представлены параметры циркулятора.

4(531).indd 69 15.12.2016 14:48:46

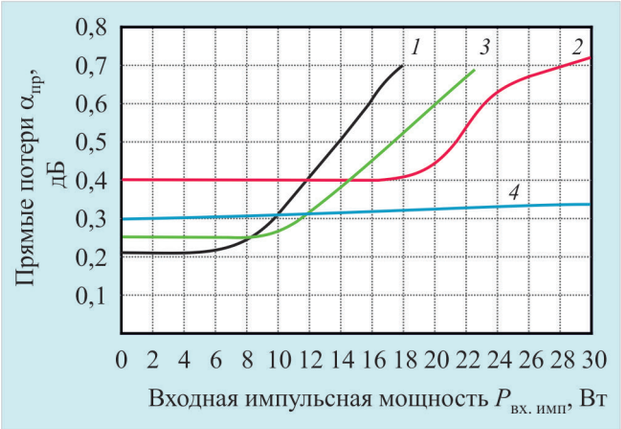


Рис. 3. Зависимости $\alpha_{пр}$ циркуляторов от $P_{вх.имп}$ для различных марок ферритов:
1 – 40СЧ2; *2* – 40СЧ4; *3* – 10СЧ6 на частоте 7,1 ГГц;
4 – НТ-180 на частоте 10 ГГц

Тип прибора	Рабочий диапазон частот, ГГц	Параметр, по которому определен запас	Результаты испытаний $\Delta T_р$ = -60…+70 °С	Коэффициент запаса в $\Delta T_р$ = -60…+70 °С	Входная мощность, Вт
Циркулятор ФПЦН2-112	9,5 – 10,5	Прямые потери плеч 1-2, дБ	0,35	1,1	30
	9,5 – 10,5	Развязка плеч 2-1, дБ	20,9	1,05	

7. ВЫВОДЫ

Температурные исследования намагниченности НТ-180, а также положительные результаты испытаний ферритовых микрополосковых приборов подтвердили динамическую устойчивость, термостабильность и малые потери разработанного материала на высоком уровне мощности.

Сравнительный анализ электрических параметров и перепадов температур указывает на то, что микрополосковые циркуляторы и вентили дорезонансного типа в значительной степени отвечают современным требованиям для субмодулей АФАР, а разработанный материал позволил создать приборы с $\alpha_{пр} \leq 0{,}35$ дБ при входной СВЧ-мощности 30 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Семенов, М. Г.** Комплект ферритовых полосковых вентилей и циркуляторов высокого уровня мощности *P*-, *L*-, *S*-, *C*- и *X*-диапазонов / М. Г. Семенов, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина, А. Г. Налогин, В. В. Федоров, Н. В. Серов, Н. В. Бовть // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Труды юбилейной конференции, посвященной ФГУП «НПП «Исток». Часть 1. – 2013. – Вып. 3 (518). – С. 247 – 251.

2. **Фомина, Е. С.** Пороговые свойства Ni- и Li-ферритов / Е. С. Фомина, А.А. Луценко, Г. А. Мелков, Л. П. Рашевская, А. П. Сафантьевский, Л. М. Лазебная // Серия 1. Электроника СВЧ. Ферритовые СВЧ-приборы и материалы: тезисы докл. конф. – 1987. – Вып. 1, 2 (247, 248) . – С. 28 – 31.

3. Каталог фирмы ОАО «НИИ «Феррит-Домен».

4(531).indd 70 15.12.2016 14:48:46

4. **Егорова, Л. В.** Оптимизация технологии формования заготовок методом полусухого одноосного прессования с целью получения СВЧ феррошпинелей с малой открытой пористостью / Л. В. Егорова, Э. В. Кожаровская, А. П. Сафантьевский // Серия 1. Электроника СВЧ. Ферритовые СВЧ-приборы и материалы: тезисы докл. конф. – 1987. – Вып. 1, 2 (247, 248). – С. 51 – 53.

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

6. **ТСО.734.002 ТУ.**

7. **Бляссе. Ж.** Кристаллохимия феррошпинелей / Ж. Бляссе. – М.: Металлургия, 1968.

8. **Смит, Я.** Ферриты / Я. Смит, Х. Вейн. – М., 1962.

9. **Казенас, Е. К.** Испарение оксидов / Е. К. Казенас, Ю. В. Цветков. – М.: Наука, 1997. – 543 с.

10. **Семенов, М. Г.** Частотный метод определения показателя преломления и тангенса угла суммарных потерь ферритовых материалов в миллиметровом диапазоне / М. Г. Семенов, Е. Ф. Ушаткин, А. В. Белицкий, А. Г. Налогин // XXII международная конференция. Электромагнитное поле и материалы. – 2014. – 522 с.

Статья поступила 24 ноября 2016 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ГАРЕЕВ Г. З., ЛУЧИНИН В. В. **Терагерцовые системы и технологии** (обзор современного состояния) / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб, 2015. – 228 с.

Представлен системный обзор основных достижений в области разработки терагерцовых излучателей, приемников, компонентов радиотрактов, а также систем радиовидения и спектроскопии на сентябрь 2015 г. Рассмотрены основные области применения терагерцовых систем и технологий в научных исследованиях и разработках в сферах нанотехнологий, биологии и медицины, телекоммуникаций и в аппаратуре для обеспечения безопасности.

Издание содержит значительный объем иллюстраций и ссылок на источники информации с целью обеспечения современного уровня профессиональных компетенций в рассматриваемой быстропрогрессирующей области науки и техники.

Книга может быть полезна научным сотрудникам и инженерам, специализирующимся в области разработки, изготовления и применения терагерцовых систем и технологий, а также преподавателям, аспирантам и студентам, участвующим в образовательном процессе по направлениям «Электроника и наноэлектроника», «Радиотехника», «Приборостроение», «Нанотехнология и микросистемная техника», «Фотоника и оптоинформатика».

Подготовлено сотрудниками каферды микро- и наноэлектроники и Центра микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

4(531).indd 71 15.12.2016 14:48:46

ЭКОНОМИКА

УДК 338:621.37/39

БИЗНЕС-МОДЕЛЬ ИННОВАЦИОННО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КЛАСТЕРА В ОСОБОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

М. В. Чекаданова

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

Проанализирован мировой опыт развития инновационно-территориальных кластеров в радиоэлектронной отрасли, описаны структурные элементы инновационно-территориального радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне.

КС: бизнес-модель, мировой опыт, инновационно-территориальный кластер, особая экономическая зона

BUSINESS MODEL OF INNOVATIVE REGIONAL RADIOELECTRONIC CLUSTER IN A SPECIAL ECONOMIC ZONE

M. V. Chekadanova

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

The world experience of innovative regional clusters in the electronic industry is analyzed, the structural elements of innovative regional radioelectronic cluster in the special economic zone are described.

Keywords: business model, world experience, innovative regional cluster, special economic zone

Мировая практика показывает, что создание инноваций в высокотехнологичных отраслях экономики возможно только при случайном возникновении или искусственном создании благоприятных условий. Под инновационной деятельностью понимается вид деятельности, связанной с трансформацией идей (результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений) в технологически новые или усовершенствованные продукты и услуги, внедренные на рынке, в новые или усовершенствованные технологические процессы или способы производства услуг, использованные в практической деятельности. Инновационная деятельность предполагает целый комплекс научных, технологических, организационных, финансовых и коммерческих мероприятий, и именно в своей совокупности они приводят к инновациям. Таким образом, образуется кластер в виде партнерского объединения производственных, научно-исследовательских институтов, образовательных учреждений, центров коллективного пользования, коммерческих и маркетинговых организаций, финансовых фондов, органов власти и государственных институтов развития с целью разработки, внедрения и производства коммерчески успешной инновационной продукции.

4(531).indd 72 15.12.2016 14:48:46

Различают технологические, маркетинговые и организационные инновации. В рамках создания и развития инновационно-активной площадки на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» в г. Фрязино и решения задачи разработки и выпуска гражданской продукции на научно-промышленной базе предприятия ОПК сфокусируемся на процессе формирования технологических инноваций. Технологические инновации представляют собой конечный результат инновационной деятельности, получившей воплощение в виде нового или усовершенствованного продукта или услуги, внедренных на рынке, нового или усовершенствованного процесса или способа производства услуг, используемых в практической деятельности. Инновация считается осуществленной в том случае, если она потребляется рынком или внедрена в производственном процессе.

Общемировая идея создания условий для формирования высокотехнологичных инноваций состоит в организации инновационно-территориальных кластеров (ИТК) (технопарковых зон) со следующими атрибутами.

Прежде всего, необходимы определенные экономические условия (которые предоставляет ОЭЗ) в виде налоговых льгот, грантов, субсидирования операционных затрат и пр. В этом случае частный бизнес готов вкладывать собственные средства в инновационные проекты, которые характеризуются высокой степенью риска по сравнению с альтернативными вариантами инвестиций.

Кроме того, необходима концентрация высокотехнологичных компаний на определенной территории, что позволяет создавать деловую среду и тесную кооперацию между компаниями, отличающимися по размеру бизнеса, работающими на разных переделах цепочки создания стоимости, представляющими собой филиалы международных компаний и т. д.

Еще одним важным фактором является государственно-частное партнерство (ГЧП), благодаря которому создается дорогостоящая инфраструктура внутри подобных территориальных конгломератов, что позволяет малым и средним предприятиям (МСП) иметь доступ к современной научной аппаратуре, а крупному бизнесу значительно экономить на капитальных затратах.

Инновационно-территориальные зоны обычно имеют четкие территориальные границы, и к резидентам таких зон довольно легко применимы различные механизмы стимулирования и поддержки, в том числе со стороны государства.

Как только любой мировой ИТК с течением времени начинает создавать устойчивые внутренние деловые связи между резидентами и внешние – между резидентами и нерезидентами, в этот момент в рамках этой территориальной зоны происходит формирование полной цепочки создания стоимости конечного продукта, от идеи до массового производства.

В разных странах используется различная терминология относительно инновационных зон развития. В США их называют «технопарками», в Японии – «технополисами», в Китае – «зонами развития технологий». Но основная идея создания подобных зон во всех странах заключается в масштабной концентрации национальных и зарубежных исследовательских, проектных и научно-производственных компаний.

Исторически ИТК могли образовываться стихийно, как, например, в США, или создаваться специально в рамках государственной поддержки вокруг крупных научных центров, как, например, в Японии и Китае. Самым известным примером технопарка является американская «Кремниевая долина», в которой на сегодняшний день на территории в 480 тыс. га создано более 1,5 млн рабочих мест.

Глобальный формат организации деятельности технопарков претерпевает эволюцию примерно каждые два десятилетия (таблица).

4(531).indd 73 15.12.2016 14:48:46

Трансформация бизнес-моделей мировых ИТК

	Эра наукоградов (1950 - 1970 гг.)	Эра бизнес-инкубаторов (1980 - 2000 гг.)	Эра экосистем (2010 - XXXX гг.)
Организационная специфика	• Наукограды • Университетские городки • Региональные кооперации	• Технопарки по специализациям • Центры трансфера технологий	• Сетевые технопарки • Сообщества технопарков • Коворкинг-центры
Основная задача	Внедрение НИОКР в производство, т. е. «внедрение всего передового»	Коммерциализация НИОКР, т. е. «использование рыночного потенциала»	Развитие и капитализация инструмента «Площадка обмена информацией», т. е. «создание инновационной экосистемы»
База для развития	• Университеты • НИИ • Дизайн-бюро транснациональных компаний	• Офисные комплексы технологических бизнес-инкубаторов	• Сетевое взаимодействие технопарков • Виртуальные сети
Инициаторы создания	• Университеты • Крупные компании	• Правительства стран • Руководство регионов • Муниципалитеты	• Венчурные компании • Инвестиционные фонды
Услуги потребителям	• Доступ к источнику знаний (вуз) • Практические решения (НИОКР)	• Выгодные условия аренды • Прочие услуги «одного окна»	• Синергия нахождения в инновационной экосреде
Конечный продукт	НИОКР-заказы	• Трансфер технологий	• Исследовательский потенциал

В текущем периоде формируется новый формат «сетевой» бизнес-модели под влиянием следующих современных общемировых тенденций:

- Рост затрат на создание и поддержку деятельности современной инновационной инфраструктуры, поскольку новые достижения науки и техники требуют более дорогостоящего оборудования.
- Активное развитие информационных технологий, которые стирают географические барьеры и открывают полноценные возможности коммуникаций, в том числе в научной сфере.
- Снижение инвестиционных возможностей создателей инноваций, поскольку все большую роль в создании инноваций играют не крупные финансово обеспеченные компании, а небольшие стартапы.

Относительно основы и целей создания различают шесть типов ИТК, отдельные элементы которых могут комбинироваться внутри бизнес-моделей действующих ИТК:

- «Университетский технопарк» создается на базе вузов или в виде стратегического партнерства вуза и крупного предприятия. Такой тип ИТК создается в тот момент, когда достига-

4(531).indd 74 15.12.2016 14:48:47

ется критическая масса накопленных научных разработок, требующих рыночной коммерциализации, или, наоборот, для притока практических компетенций в научную среду вуза.

- «Отраслевой ИТК» создается для активации инновационных процессов в определенном секторе региональной экономики. Этот тип эффективен для решения отдельных НИОКРов региональных компаний или для трансфера готовых технологий. В этом случае отдельные дорогостоящие процессы получения инноваций выносятся на аутсорсинг малому бизнесу, являющемуся резидентом ИТК.
- «Индустриальный технопарк» создается как комплекс объектов физической инфраструктуры, универсальной с точки зрения запуска любых инновационных производств. При этом акцент делается в сторону потребностей будущих якорных резидентов.
- «Технологический инкубатор» создает наиболее благоприятную среду для стартапов. Цель инкубатора – предоставление максимального охвата льготных условий малому бизнесу, а не получение прибыли. Проект создания инкубатора изначально является социальным, а не коммерческим проектом.
- «Сетевой технопарк» создается, как правило, по инициативе региональных властей с целью трансфера технологий не только через ИТК к его резидентам, но и далее, в другие города и области региона. Кроме того, с помощью этой модели можно организовывать работу по масштабным НИОКРам, которые требуют вовлеченности гораздо большего числа участников помимо существующих резидентов.
- «Коворкинг-центр» выделяют как отдельный тип технопарка, который является «точкой входа» для отдельных исследовательских организаций и отдельных фрилансеров на глобальный рынок инноваций или в «поле зрения» крупных локальных компаний.

Мировые ИТК, как правило, формируются как группы географически сконцентрированных компаний из одной или нескольких отраслей, которые имеют центральных лидеров в виде крупных компаний. Помимо этого, практически в каждом ИТК прослеживается участие государства, а также наличие научной и образовательной базы, хозяйственных связей посредством координации связующей управляющей компании.

Вышеизложенные положения сделаны на основе анализа эволюционного пути развития следующих мировых лидеров кластерных технопарковых образований в отрасли радиоэлектроники:

- Кластер «Minalogic» (Гренобль, Франция), модель управления «снизу вверх». Якорное предприятие – STMicroelectronics, политика поддержки коммерциализации технологий через спин-оффы (фирмы-отпрыски, выделяющиеся из материнской компании с целью самостоятельной разработки, освоения и внедрения на рынок нового продукта или технологии) и трансфер технологий из науки в бизнес.
- Кластер «Silicon Saxony» (Дрезден, Германия), модель «снизу вверх». Ассоциация объединяет предприятия микроэлектронной отрасли Германии. В качестве бизнес-модели выбран путь размещения инновационных заказов якорных компаний кластера в небольших научных компаниях и организациях.
- Кластер «Hsinchu Science and Industrial Park» (Синьчжу, Тайвань), модель «сверху вниз». Создание кластера и микроэлектроники Тайваня было полностью инициировано государством, удалось организовать процесс трансфера иностранных технологий, создана промышленно-технологическая площадка, рынок венчурного капитала, спин-оффы мировых корпораций.

4(531).indd 75 15.12.2016 14:48:47

- Кластер «Tech Valley» (Олбани, США), модель «сверху вниз». Реализация парадигмы экономической политики штата – развитие наукоемких отраслей с высокой добавленной стоимостью посредством Центра экономического роста, Школы менеджмента и технологий, Центра исследований, создание инфраструктуры якорным промышленным предприятием.
- Израильская «Силиконовая долина» (Silicon Wadi) – это кластер с высоким уровнем взаимодействия всех его компонентов: инкубаторов, промышленных и технологических парков, научно-исследовательских центров и университетов – и с поддержкой государства.
- 15 технопарковых зон Китая, созданных в рамках программы Torch Program, модель «сверху вниз». Создание благоприятного климата для развития национальных компаний через законодательное регулирование и финансовую поддержку государства.
- Технологический парк KL и Kulim Hi-Tech Park in Kedah (Малазия), модель «сверху вниз». Локальные НИОКР-центры, работающие вместе с частным сектором и научными организациями с целью разработки и коммерциализации технологий в электронной отрасли страны, центр высокотехнологичного дизайна в микроэлектронике, 18 государственных инвестиционных организаций.
- Промышленный центр индустрии электроники и сопутствующих отраслей в г. Куми (Южная Корея), модель «сверху вниз». Создана НИОКР-платформа за счет иностранной интеллектуальной собственности.

Изучение их передового опыта позволило понять основные закономерности создания благоприятных условий для развития инноваций, которые нашли отражение в бизнес-модели инновационно-территориального радиоэлектронного кластера (ИТРК) в ОЭЗ.

Предлагаемая структура бизнес-модели позволяет выстроить полную цепочку добавленной стоимости в отрасли производства электронной продукции на территории ОЭЗ ТВТ «Исток» (рис. 1). Предлагаемая типология четырех целевых групп компаний-резидентов подобрана, исходя из базовых принципов бизнес-модели: минимизация инвестиций резидентов в инфраструктуру ИТК, приоритетность трансфера технологий, ограничение области инновационных проектов тематикой СВЧ-кластера.

Механизм организации инноваций:

- *Центр трансфера технологий* – обеспечение транспортировки идеи до рынка гражданской продукции путем проведения исследований, формирования идеи, разработки технологических решений, внедрения в производство, получения продукта и продвижения на рынок, мониторинга реализации проектов.
- *Корпоративный венчурный фонд* – отбор через экспертный совет разработанных центром трансфера технологий проектов и их финансирование.
- *Научно-технический совет* – разработка и обоснование области (сектора) применения инноваций и программы их развития.

Механизм реализации инноваций:

- *Бизнес-инкубатор* – обеспечение выживаемости (поддержки) вновь созданных компаний путем предоставления услуг бэк-офиса.
- *Центр коллективного пользования* – обеспечение проведения исследований для широкого круга научных коллективов и организаций на современном технологическом оборудовании мирового уровня.

4(531).indd 76 15.12.2016 14:48:47

- *Испытательный и сертификационный центр* – испытание и сертификация полученной продукции.
- *Свободная таможенная зона* – обеспечение таможенных преференций.

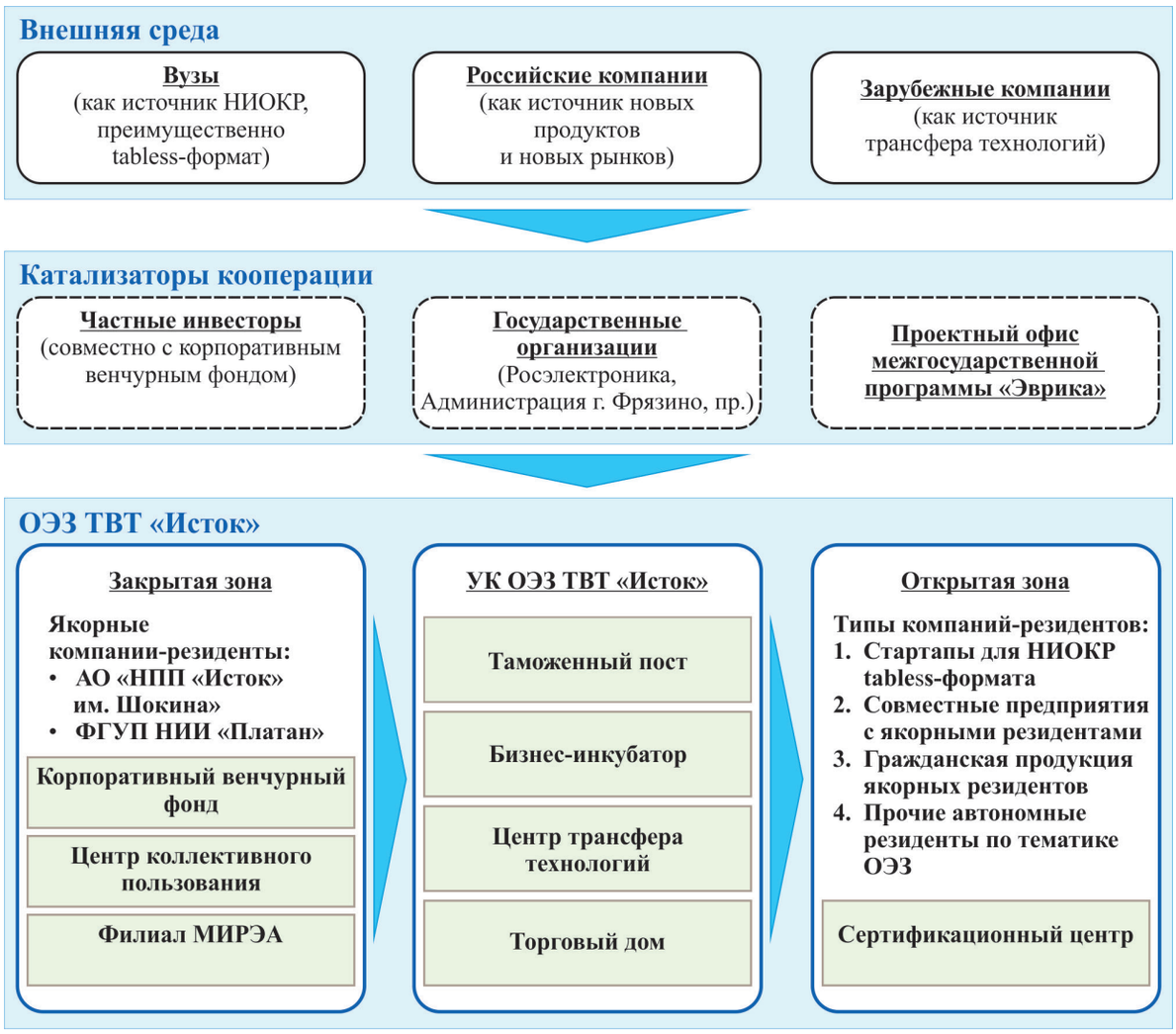


Рис. 1. Бизнес-модели инновационно-территориального радиоэлектронного кластера в ОЭЗ ТВТ «Исток»

Таким образом, ИТРК г. Фрязино может представлять собой комплекс инновационной инфраструктуры ОЭЗ ТВТ «Исток», сгруппированный по принципу связывания исторически закрытой зоны со вновь создаваемой открытой зоной. Элементы инновационной инфраструктуры ОЭЗ ТВТ «Исток» имеют свои деловые, информационные, финансовые и управленческие связи с различными организациями внутри кластера и за его пределами (внешняя среда).

Степень развитости и устойчивости этих связей будет определять, насколько ИТРК г. Фрязино трансформировался от уровня классического малоэффективного наукограда до уровня современной инновационной экосистемы.

4(531).indd 77 15.12.2016 14:48:47

Рис. 2. Цепочка создания стоимости в отрасли производства электроники

Наиболее уязвимыми звеньями в цепочке создания стоимости с позиции ключевого якорного резидента ИТРК (АО «НПП «Исток» им. Шокина») являются переделы: промышленный дизайн научной идеи, маркетинг и продажи. Поэтому основной акцент в процессе формирования бизнес-модели ИТРК сделан на инструменты, которые обеспечивают эффективные решения в данных областях, основываясь на зарубежном и российском опыте.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.minalogic.com/
2. http://www.silicon-saxony.de/en/home/
3. http://www.sipa.gov.tw/english/index.jsp
4. http://www.techvalley.org/
5. **Абашкин, В. Л.** Методические материалы по разработке и реализации программ развития инновационных территориальных кластеров и региональной кластерной политике / В. Л. Абашкин, Е. С. Куценко, П. Б. Рудник. – М.: НИУ ВШЭ, 2016.
6. **Гершман, М. А.** Программы инновационного развития компаний с государственным участием: промежуточные итоги и приоритеты / М. А. Гершман. – М.: НИУ ВШЭ, 2015.
7. **Гохберг, Л. М.** Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации. Вып. 3 / под ред. Л. М. Гохберга. – М.: НИУ ВШЭ, 2015.

Статья поступила 18 ноября 2016 г.

4(531).indd 78 15.12.2016 14:48:47

ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОПЫТ

УДК 658.274

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ БАЗА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПУТЬ ИХ РЕШЕНИЯ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПЕРЕОСНАЩЕНИЮ

П. И. Цай, А. А. Фадеев, Л. А. Катанова, С. И. Дубровкин

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

Дан анализ технического состояния испытательной базы предприятия на сегодняшний день. Приведены сравнительные технические характеристики имеющегося на предприятии и современного оборудования. Выработаны предложения по оснащению и модернизации испытательной базы предприятия.

КС: цифровая система управления виброиспытаниями, автоматизация испытаний, контроллер, СВЧ-модули, транзисторные сборки

TEST BASE: MODERN STATE, PROBLEMS, THE WAY OF THEIR SOLUTION AND PROPOSALS ON REEQUIPMENT

P. I. Tsai, A. A. Fadeev, L. A. Katanova, S. I. Dubrovkin

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

The analysis of the present day technical state of the enterprise test base is presented. The comparative technical characteristics of the equipment available at the enterprise and up-to-date equipment are given. Proposals on reequipment and modernization of the enterprise test base are worked out.

Keywords: digital control system of vibration tests, tests automation, controller, microwave modules, transistor assembling

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого качества и надёжности изделий СВЧ невозможно без испытаний их на воздействие факторов окружающей среды, а также электрических испытаний на надежность.

В связи с этим создана уникальная стендовая испытательная база. Это стенды и оборудование для испытаний на воздействие окружающей среды, стенды для испытаний на безотказность и долговечность.

Ввиду сложности конструкции СВЧ-изделий и важности выполняемых ими функций, стенды безотказности и долговечности уникальны по принципу действия, конструкции и техническим характеристикам, не имеют аналогов и отличаются высокими точностными характеристиками.

Вакуумные СВЧ-изделия несут в себе элементы и узлы, обладающие резонансными явлениями. В этих условиях большое значение имеет качество воспроизводимых механических параметров оборудованием.

4(531).indd 79 15.12.2016 14:48:47

Не менее важное значение для обеспечения высокого качества выпускаемых изделий имеют климатические воздействия.

К сожалению, отсутствие в последние десятилетия средств на техническое перевооружение испытательной базы привело в отдельных случаях к капитальному износу основных средств.

За последние 20…30 лет не приобретено ни одной единицы испытательного оборудования. Возраст 70 % оборудования составляет 20…30 лет, 30 % – 30…40 лет.

Особенно в критическом состоянии находится оборудование для механических (вибрационных) и климатических испытаний.

Высокие современные требования по вибровоздействиям (в частности, для изделий космического применения) составляют по ускорению вибрации 20…25*g*, а по размаху колебаний 25 мм. Такие параметры не гарантируют существующие на предприятии виброустановки.

Имеющиеся в наличии установки ударного действия, основанные на принципах свободного падения платформы, в настоящее время также не могут обеспечить требования к современной аппаратуре из-за недостаточной гибкости в настройке.

Так, по ударным воздействиям требуемый параметр большой длительности ударных импульсов (20…30 мс) не реализуется ни на одном из имеющихся на предприятии ударных стендов.

Термовлагокамеры не соответствуют требованиям к современным изделиям, так как они жестко обеспечивают режимы в узком диапазоне температуры и относительной влажности.

Например, отечественные термовлагокамеры обеспечивают постоянные значения температуры +40 и +55 °С. Относительная влажность регулируется в узких пределах, циклический режим изменения параметров влажности вообще не предусмотрен конструкцией. А современная РЭА требует таких воздействий.

Таким образом, существующее на предприятии испытательное оборудование не только из-за старения не выдает своих паспортных данных, а принципиально не может обеспечить требований к современной аппаратуре.

Модернизация и поддержание этого оборудования в рабочем состоянии позволит использовать его в основном при вспомогательных операциях, например при технологических, отбраковочных и тренировочных испытаниях.

Возраст только около 5 % стендов составляет 5…6 лет. Остальные – выпуска 70-х – 80-х годов прошлого века.

Стенды укомплектованы устаревшими радиоизмерительными и контрольно-измерительными приборами. Это осциллографы, частотомеры, измерители мощности, генераторы импульсные СВЧ. СВЧ волноводные тракты в ряде случаев настраиваются с большим трудом.

В большинстве стендов блоки питания и источники напряжений, изготовленные на предприятии в 80-х годах, в процессе эксплуатации заменены на серийные источники питания Б5-44, Б5-70, Б5-71 и т. д., и в настоящий момент стенды для твердотельных модулей СВЧ в рабочем состоянии. Но разрабатываемые новые СВЧ-модули требуют для своих испытаний персональные стенды.

Таково современное состояние стендовой испытательной базы на сегодняшний день.

Следует отметить, что наличие устаревших аналоговых генераторов управления вибрацией в принципе не позволяло получать требуемые сложные режимы вибровоздействий и отмечались низкая точность, неудовлетворительные качественные частотные характеристики, а порой невозможность воспроизведения требуемых режимов вибровоздействий.

4(531).indd 80 15.12.2016 14:48:47

Цифровая система управления вибровоздействиями обладает высокой точностью, большой разрешающей способностью, высоким коэффициентом динамичности (110 дБ против 40…50 дБ), ничтожно малым коэффициентом гармоник сигнала.

Система многоканальная (8 каналов), что позволяет не только повысить производительность при исследовательских испытаниях, но и качественно и информативно обследовать конструкцию разрабатываемого изделия.

Конструкция вибростенда гибкая и трансформируется из одного вида в другой, что дает возможность пользователю не конструировать три вида сложной по конструкции и металлоемкой оснастки для испытания изделий в различных направлениях, а лишь поворачивать ее на 90 град и испытать в другом ортогональном направлении.

2. ПРОБЛЕМЫ, ПУТЬ ИХ РЕШЕНИЯ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ

Особое внимание следует уделить современным цифровым системам управления вибрацией и виброустановками.

Несколько примеров применения цифровых систем.

1. Для управления вибрацией при помощи отрицательной обратной связи. Устанавливая задающие вибродатчики не только в основном рабочем направлении вибровоздействия, но и на резонирующих элементах конструкции приспособления, можно управлять вибронагрузками, создаваемыми резонирующими элементами приспособления, и гасить их при помощи упомянутой отрицательной обратной связи. При этом упрощается конструирование оснастки и повышается качество вибровоздействий.

2. Для получения импульсов ударных воздействий уникальной формы, для которых необходима была бы разработка сложного испытательного оборудования. Речь идёт об ударных импульсах большой длительности. Серийные ударные стенды позволяют регулировать длительность импульса в очень узком диапазоне (2…5 мс), а для получения длительности даже 10…20 мс необходимы специальные стенды. Получение длительности 20…100 мс вообще нереально. А широко распространенное испытание на виброудар с длительностью импульса до 130 мс, заполненное к тому же спектром случайных колебаний, весьма сложное и дорогостоящее.

Проблема ударных испытаний успешно решается цифровой системой управления.

3. Для реализации ударных и виброударных воздействий безусловно необходимы вибраторы с большим размахом колебаний стола (до 50 мм).

Имеющиеся в наличии на предприятии вибраторы позволяют получать максимум 5…10 мм. У современных зарубежных вибраторов размах колебаний стола – до 50…60 мм.

По программе модернизации предусматривается организация качественно нового испытательного комплекса XXI века, оснащенного испытательно-измерительным комплексом будущего.

В части виброударного комплекса это:

– оснащение цифровой системой формирования и управления вибровоздействиями различных профилей задания режимов;

– оснащение виброударным оборудованием с высокими техническими параметрами воздействующих факторов;

– обеспечение высокой эффективности и информативности испытаний;

– обеспечение высокой производительности.

4(531).indd 81 15.12.2016 14:48:47

В этом плане при вибропрочностных испытаниях весьма эффективным оказывается использование многоосных электродинамических виброустановок. Они различаются количеством осей воздействия или степенями свободы: от 2-осных до 6-осных установок пространственной вибрации (3 линейные, 3 угловые). Эти установки обеспечивают как последовательное, так и одновременное динамичное воздействие.

Последовательное воздействие не позволяет избежать переустановки испытываемого изделия. Это особенно важно при испытаниях крупногабаритных и тяжелых изделий. Такая схема дает возможность объективно локализовать резонансные явления сложных конструкций ответственных изделий.

Одновременное воздействие по нескольким осям приближает к реальным условиям эксплуатации и транспортировки, что обеспечивает высокую эффективность испытаний (сокращение времени испытаний в 3…5 раз).

Этим же целям служат и установки комбинированных испытаний. Это одновременное воздействие на изделие нескольких внешних факторов: вибрация + тепло + холод + влага. Метод комбинированных воздействий при разработке и производстве радиоэлектронной аппаратуры должен стать обязательным не только из-за максимальной приближенности к реальным условиям эксплуатации, но и для обеспечения высокой надежности выпускаемой продукции.

Выше было приведено описание преимуществ использования цифровых систем для формирования и управления режимами вибровоздействий.

Цифровые системы могут и должны использоваться также для управления данными конечных длин, т. е. для формирования ударных профилей.

В набор ударных профилей входят:

– стандартные ударные профили (полусинусоидальная волна, пилообразный профиль, треугольник, трапеция);

– виброудар с различными огибающими;

– имитация ракетно-пушечного воздействия и т. д.

Для реализации описанных воздействий необходимо программное обеспечение цифровых систем управления: программа управления и анализа как синусоидальных, так и случайных воздействий по нескольким степеням свободы; программы для задания ударных воздействий.

4. При вибрационных испытаниях используются приспособления для закрепления изделий к вибростолу. Приспособления должны передавать вибронагрузки к изделию без искажения по форме и по нагрузке, т. е. они не должны иметь резонансных колебаний элементов конструкции. Конструирование и изготовление таких безрезонансных приспособлений практически недостижимо в широком частотном диапазоне.

Для снижения виброперегрузок на резонансных частотах конструируются сложные приспособления с массивными ребрами жесткости, толстыми стенками и основанием. Всего этого можно избежать с помощью цифровой системы управления вибрацией.

5. В программе модернизации большое внимание уделено климатическому испытательному оборудованию, системы управления которого обладают возможностью реализации до 1000 различных режимов воздействия.

Это климатические камеры, специально предназначенные для проведения ускоренных испытаний на надежность сложных высокотехнологичных изделий электроники.

Предусмотрена специальная серия камер для проведения температурных испытаний тепло-

4(531).indd 82 15.12.2016 14:48:47

выделяющих изделий до 4500 Вт, а также для испытаний на циклическое изменение температуры и влажности. Это линейка типоразмеров камер с максимальной производительностью, надежностью и минимальным энергопотреблением. Они могут быть использованы для климатических испытаний, отбраковки, старения, имитации метеорологических условий.

Имеется серия камер термоциклирования, специально предназначенных для проведения ускоренных испытаний на надежность сложных высокотехнологичных изделий электроники.

6. Важное место в инновационной модернизации уделено испытаниям изделий космического назначения. Это испытания на воздействие акустических шумов высокой интенсивности и камеры имитации условий космического пространства.

Акустические установки серийно не выпускаются ни в России, ни за рубежом. Ряд зарубежных фирм производят все компоненты акустических камер (акустические генераторы, системы управления и т. д.). В реверберационной камере воспроизводится акустический шум – случайный шум или гармонический спектр с уровнем 150…160 дБ.

В термовакуумных камерах имитации космоса электронные приборы и узлы устанавливаются на терморегулируемой платформе, поддерживающей температуру от -50 до +60 °С, и в вакууме производится термоциклирование.

7. Проходит исследовательские испытания метод одновременных воздействий факторов окружающей среды: вибрация + тепло + холод + повышенная влажность + пониженное давление.

Такие установки весьма дорогостоящие, однако информативность таких воздействий неоценима, а при конечных испытаниях продукции это повысит ее качество и надежность.

Также при исследовательских испытаниях эффективна цифровая система управления и регистрации виброперегрузок на изделии.

Исследование перегрузок на изделии методом одного датчика непроизводительно и неинформативно, поэтому применение нескольких датчиков одновременно на разных узлах и элементах изделия – необходимое условие качества исследований.

8. Повышение качества и надежности РЭА и её компонентов требует повышения информативности и эффективности испытаний на безотказность и долговечность.

Одним из путей повышения качества испытаний является автоматизация.

Это разработка комплекса для испытаний всех классов СВЧ-модулей, в том числе транзисторных сборок, на безотказность и долговечность, а также для электротермотренировок, обеспечивающего:

– повышение точности задания режимов испытаний, надежности и производительности испытаний за счет использования модульной интегрированной структуры стенда и специализированного программно-аппаратного обеспечения (ПАО);

– одновременное или выборочное использование 15 термокамер, входящих в его состав, с возможностью увеличения их количества по мере роста объемов испытаний. Число используемых термокамер соответствует числу имеющихся в настоящее время и объективно востребованных;

– управление процессом испытаний на безотказность и долговечность, а также процессом электротермотренировки с использование совокупности термокамер, автоматизированного пульта управления (интегрированной системы) в виде локальной АСУ ТП на основе персональных компьютеров (PC), контроллеров, аналого-цифровых преобразователей и ПАО;

– автоматизированное выполнение испытаний на безотказность и долговечность, а также электротермотренировки 100 % СВЧ-модулей в условиях заданных повышенных температурных воздействий и временных интервалов в широком диапазоне величин;

4(531).indd 83 15.12.2016 14:48:47

– выполнение испытаний на безотказность и долговечность, а также электротермотренировки 100 % транзисторных сборок (далее – сборок) в импульсных режимах, в условиях заданных повышенных температурных воздействий и временных интервалов, указанных ниже. Сборки типа ТС-1, ТС-4 используются в импульсных источниках питания, и режимы электротермотренировки должны быть максимально приближены к штатным, эксплуатационным. Задача существенно отличается от электротермотренировки СВЧ-модулей по аппаратурному и программному обеспечению. Используемое оборудование, ПАО и оснастка должны быть максимально унифицированы с аналогичными решениями для СВЧ-модулей и должны образовать единый интегрированный испытательный комплекс. Для подключения внешних приборов, не входящих в комплектацию стенда, предусмотреть удобное расположение контактного соединения;

– режим испытаний на безотказность и долговечность, а также электротермотренировки сборок: температура внутри камеры регулируемая от +25 до +150 °С с точностью ±2 °С. Время непрерывной тренировки каждой сборки в импульсном режиме под нагрузкой – 1 мин при температуре +75 °С;

– контроль состояния каждой сборки и каждого транзистора сборки в процессе тренировки;

– контроль величины и формы импульсного тока на выходе каждого транзистора сборки;

– контроль величины и формы управляющего напряжения на затворе каждого транзистора сборки;

– автоматическое определение и отключение отказавшей сборки, индикация ее номера.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа разработана программа модернизации испытательного комплекса, предусматривающая следующие основные направления:

1. В части обеспечения надежности и прочности при воздействии внешних механических факторов:

– оснащение виброударным оборудованием с большими механическими перегрузками;

– оснащение многоосевыми вибрационными установками, обеспечивающими одновременное воздействие механических нагрузок в нескольких направлениях;

– оснащение стендами комплексных воздействий – одновременное воздействие механических нагрузок в различных климатических условиях;

– воздействие высокоинтенсивных акустических нагрузок;

– широкая автоматизация процесса виброударных испытаний.

2. В части климатических воздействий:

– оснащение климатическими камерами, обеспечивающими режимы термоудара;

– оснащение термовлажностными камерами, обеспечивающими циклические тепловлажностные режимы.

3. В части электрических испытаний:

– реализация разработанного комплексного автоматизированного стенда испытаний на надежность и долговечность СВЧ-модулей всех классов и типов в динамическом режиме, в том числе в импульсном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В. Фёдоров, Н. Сергеев. А. Кондрашин.** Контроль испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. – М.: Техносфера, 2005

Статья поступила 15 июня 2016 г.

4(531).indd 84 15.12.2016 14:48:48

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 530.145

УРАВНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

А. К. Балыко

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

Приведено уравнение фотоэффекта Эйнштейна с релятивистским выражением для кинетической энергии. Высказано предположение, что постоянная Планка определяется из других физических констант.

КС: уравнение фотоэффекта, кинетическая энергия, эффект Комптона

PHOTOELECTRIC EQUATION

A. K. Balyko

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

Einstein photoelectric equation with relativistic expression for kinetic energy is presented. The assumption is made that Planck constant is defined from other physical constants.

Keywords: photoelectric equation, kinetic energy, Compton effect

1. Влияние света на протекание электрических процессов было впервые описано в 1887 г. немецким ученым Генрихом Герцем, который заметил, что проскакивание электрической искры между двумя цинковыми шариками облегчается, если один из них осветить ультрафиолетовым светом. Дальнейшее подробное исследование влияния света на заряженные тела было проведено в 1888–1890 гг. выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым, который, во-первых, использовал вместо шариков цинковые пластины, а во-вторых, помещал их в вакуум. Явление потери заряда под действием света он назвал актиноэлектрическим, в настоящее время это – фотоэффект [1].

А. Г. Столетов первым установил основные закономерности фотоэффекта:

1. Тело теряет заряд только в том случае, если оно заряжено отрицательно.
2. Явление вызывается преимущественно ультрафиолетовыми лучами.
3. Разряжающее действие лучей пропорционально их энергии.
4. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма коротком освещении.

Физическое объяснение фотоэффекта в 1905 г. дал Альберт Эйнштейн, и в 1921 г. он был удостоен Нобелевской премии по физике за теорию фотоэффекта.

В современной физике уравнение

$$(m_0 v^2)/2 = h\nu - P \qquad (1)$$

4(531).indd 85 15.12.2016 14:48:48

носит название уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Здесь P – работа выхода электрона из металла; m_0 – масса покоя электрона; v – скорость электрона; ν – частота фотона света, падающего на металл; h – постоянная Планка.

Известный ученый в области электроники СВЧ Александр Семенович Тагер окончил Ленинградский политехнический институт, руководителем его диплома был видный советский физик Яков Ильич Френкель. Профессор Тагер говорил, что слышал от Я. И. Френкеля о том, что первым уравнение (1) написал выдающийся советский физик Абрам Федорович Иоффе. А. Ф. Иоффе в 1905 г. окончил Мюнхенский университет. Он интересовался фотоэффектом и, живя в Германии, первым из российских физиков познакомился со статьей никому не известного в то время А. Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», опубликованной в 1905 г. в немецком физическом журнале «Annalen Physik». После возвращения в Петербург А. Ф. Иоффе доложил статью на научном физическом семинаре. При этом, для большей ясности изложения, он и написал на доске формулу (1), которая позднее стала всемирно известной как уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Позднее А. Ф. Иоффе много сделал в изучении фотоэффекта, в том числе он первым дал прямое экспериментальное доказательство, что светом вырываются из тел отрицательные частицы – электроны.

В третьем томе советского четырехтомника собрания трудов А. Эйнштейна, в той самой статье 1905 г. «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», содержащей 16 страниц, фотоэффекту А. Эйнштейн уделил всего три абзаца [2]:

Обычное представление о том, что энергия света распределяется в облучаемом пространстве непрерывно, при попытке объяснить фотоэлектрические явления сталкивается с особенно большими трудностями, изложение которых можно найти в известной работе Ленарда.

Представление о том, что возбуждающий свет состоит из квантов с энергией $(R/N)\beta\nu$, позволяет объяснить возникновение катодных лучей следующим образом. В поверхностный слой тела проникают кванты, и энергия их по крайней мере частично превращается в кинетическую энергию электронов. Простейшим будет случай, когда один световой квант отдает всю свою энергию одному электрону; мы будем предполагать, что это и происходит в действительности. Однако нельзя исключить и того, что электроны воспринимают энергию световых квантов лишь частично. Электрон внутри тела, обладающий кинетической энергией, в случае попадания на поверхность лишается части своей кинетической энергии. Кроме того, мы предполагаем, что каждый электрон, покидая тело, должен совершить некоторую работу P (характерную для данного тела). С наибольшей нормальной составляющей скорости будут покидать тело те электроны, которые возбуждены у самой поверхности и получили только нормальную компоненту скорости. Кинетическая энергия этих электронов равна $(R/N)\beta\nu - P$.

Если тело заряжено до положительного потенциала П и окружено проводниками, находящимися при нулевом потенциале, и потенциал П таков, что он препятствует потере заряда телом, то должно выполняться условие: $П\varepsilon = (R/N)\beta\nu - P$, где ε – заряд электрона.

Действительно, уравнение (1) в статье отсутствует!

Более того, в статье А. Эйнштейна вообще отсутствует уравнение в классическом виде, как равенство двух частей, каждая из которых записана математической формулой, а есть некое словесно-математическое представление закона фотоэффекта: «Кинетическая энергия этих электронов равна $(R/N)\beta\nu - P$».

Попутно заметим, что в приведенных формулах А. Эйнштейна используется не постоянная Планка, как в (1), а выражение $(R/N)\beta$, где R – газовая постоянная; N – число Авогадро; β – один из коэффициентов в формуле В. Вина для плотности энергии излучения абсолютно черного тела. Дело в том, что в момент выхода статьи А. Эйнштейна постоянная Планка еще не имела ни своего обозначения, ни названия. Лишь позднее, также с подачи А. Эйнштейна, стали использовать обозначение h для постоянной Планка, при этом, естественно, $h = (R/N)\beta$.

4(531).indd 86 15.12.2016 14:48:48

Конечно, в 1905 г. любой физик, читающий журнал «Annalen Physik», знал, что кинетическая энергия электрона $T = (m_0v^2)/2$. Возможно, так посчитал и А. Эйнштейн и поэтому не написал окончательного уравнения в виде (1). В то же время А. Эйнштейн чуть ниже в приведенной цитате написал другое уравнение уже в классическом виде и при этом использовал столь же очевидное для физиков выражение для энергии электрического поля – $П\varepsilon$.

Почему же 25-летний А. Эйнштейн не стал писать в уравнении (1) широко известное выражение для кинетической энергии? В биографиях ученого нет ответа на этот вопрос, поэтому я выскажу свою точку зрения.

До 1905 года А. Эйнштейн единолично, без соавторов, опубликовал несколько статей: «Следствие из явления капиллярности» (1901), «О термодинамической теории разности потенциалов» (1902), «Кинетическая теория теплового равновесия» (1902), «Теория основ термодинамики» (1903), «К общей молекулярной теории теплоты» (1904) – и подготовил докторскую диссертацию по этой тематике. Важное значение имеет и то обстоятельство, что в середине 1902 года Федеральный совет Швейцарии назначает А. Эйнштейна экспертом третьего класса патентного бюро в Берне. В патентное бюро присылали заявки изобретатели из Швейцарии и других европейских стран. Роль патентного эксперта состояла в признании изобретения технически грамотным и в ходатайстве перед руководством патентного бюро о выдаче заявителю патента. За год эксперт мог обрабатывать до ста заявок на изобретения. Так что в этот период А. Эйнштейн интенсивно занимался не только наукой, но и техникой.

В то же время из приведенного выше перечня публикаций следует, что в 1900 –1904 гг. предмет его исследований не был связан ни с теорией относительности, ни с тепловым излучением, ни с броуновским движением, ни с фотоэффектом.

Поэтому несколько неожиданно, что в 1905 г. А. Эйнштейн публикует в журнале «Annalen Physik» не одну, а четыре статьи, которые позднее были признаны в научном мире как основополагающие в разных областях физики. С учетом сказанного выше, можно полагать, что в этот период он активно «изобретал» новые идеи, одна революционней другой. В частности, в 1905 г. он первым нашел связь между энергией и массой: $E = mc^2$ (c – скорость света). В правильности этой связи он, правда, и сам сомневался, поскольку не имел экспериментальных тому подтверждений, поэтому даже в название статьи поставил вопросительный знак [3].

Из формулы $E = mc^2$ и выражения для массы движущегося тела, впервые выведенного в 1903 году Х. Лоренцем, он получил более общее выражение для кинетической энергии: $T = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}-1\right)$, которое переходило в классическое выражение $T = (m_0v^2)/2$ лишь при малых скоростях v относительно скорости света c. Получается, что в 1905 г. все физики считали, что кинетическая энергия $T = (m_0v^2)/2$ и только А. Эйнштейн уже знал другое, более общее выражения для T. Он, конечно, мог бы написать и общее уравнение фотоэффекта типа $m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}-1\right) = h\nu - P$, но, возможно, не был до конца уверен, что это обобщение кинетической энергии является последним. Поэтому он и использовал словесно-математическое представление закона фотоэффекта.

А. Ф. Иоффе, конечно, не зная об обобщенной формуле для кинетической энергии, написал на доске уравнение (1) с известным выражением для кинетической энергии, а некоторые слушатели его доклада, в их числе и Я. И. Френкель, переписали это уравнение в свои тетради…

4(531).indd 87 15.12.2016 14:48:48

2. В 1909 г. американский физик Роберт Милликен с высокой точностью определил заряд электрона $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В 1914 г. он же первым с высокой точностью определил и постоянную Планка $h = 6{,}62618 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, используя для этого явление фотоэффекта.

Сила тока I, возникающая между двумя электродами, один из которых облучается светом, при неизменном составе и мощности излучения, зависит от разности потенциалов между электродами U. Эта вольт-амперная характеристика (ВАХ) для фотоэффекта имеет две особенности:

а) при увеличении U ток достигает насыщения I_s;

б) существует такое значение задерживающего потенциала $U_з$, при котором ток прекращается.

Поскольку электроны вырываются светом из металла первого электрода с некоторой начальной скоростью, то электроны перестают достигать второго электрода, когда работа задерживающего электрического поля $eU_з$ становится равной их кинетической энергии: $eU_з = (mv^2)/2$. Подставляя это выражение в уравнение (1), получаем $U_з = (h/e)\nu - U_0$, где $U_0 = P/e$. Многочисленные эксперименты Р. Милликена и других ученых показали, что $U_з$ действительно пропорционален частоте света: $U_з = b\nu - U_0$, где b – коэффициент пропорциональности, который может быть определен экспериментально. Так что, зная величины b и e, легко определить h. Для натриевого электрода из измерений Р. Милликена [1] мы получили значение $b = 4{,}13 \cdot 10^{-15}$ В·с и рассчитали: $h = 6{,}616 \cdot 10^{-34}$ Дж·Кл·м/(с·град).

В работе [4] при рассмотрении различных соотношений с мировыми константами мы нашли, что численно постоянная Планка h с большой точностью совпадает с произведением $kce = 6{,}63142 \cdot 10^{-34}$ Дж·Кл·м/(с·град), где $k = 1{,}3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана. Как видим, один из сомножителей (e) был выявлен еще в опытах Р. Милликена. Другой сомножитель (k) также просматривается: поскольку h характеризует действие, то есть, по существу, энергию, которая для газа, как известно, пропорциональна kT (T – температура). Экспериментально этот сомножитель может быть получен из совместного исследования явлений фотоэффекта и термоэмиссии. Для этого рассмотрим следующий мысленный эксперимент.

Если электрод, на который падают лучи света определенной частоты ν, нагреть до температуры T, то помимо фотоэффекта на число электронов, покидающих электрод, будет еще влиять и термоэмиссия электронов. При этом ВАХ будет иметь вид, подобный фотоэффекту, а ток насыщения можно определить из уравнения Ричардсона – Дешмана [5]: $I_s = A_0 S T^2 e^{-\frac{eU_0}{kT}}$, где S – площадь поверхности электрода; $A_0 = 4\pi mek^2/h^3 = 1{,}204 \cdot 10^6$ А/(м·К)^2 – постоянная Ричардсона. Поскольку с ростом температуры возрастает и скорость, с которой электроны вылетают из металла, то возрастает и абсолютное значение $U_з$.

Если для различных температур T измерять $U_з$, то получим зависимость коэффициента b от температуры T. Считая, что в первом приближении эта зависимость линейная: $b = akT + b_0$, можно определить коэффициент пропорциональности a, а затем и $h = ake$.

3. В п. 1 была описана история с уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Интересна и история, связанная с А. Эйнштейном, по определению постоянной тонкой структуры α, которая играет важную роль в современной физике.

В 1909 году А. Эйнштейн опубликовал статью «К современному состоянию проблем излу-

4(531).indd 88 15.12.2016 14:48:48

чения» [6], в которой разными способами вычислил две величины: h и e^2/c. При этом он написал: *...по поводу выражения для h следует отметить, что $h = 6\cdot10^{-27}$ [эрг·с], а $e^2/c = 7\cdot10^{-30}$ [эрг·с]. Здесь не хватает целых трех порядков. Это, конечно, можно отнести на счет неизвестных безразмерных множителей*.

Таким образом, А. Эйнштейн разделил эти величины, увидел, что они разнятся на три порядка, но не стал искать точного отношения этих величин, хотя было ясно, что это отношение – безразмерная постоянная, а к ним у физиков всегда особый интерес. По-видимому, А. Зоммерфельд не прочитал эту статью А. Эйнштейна, поскольку через семь лет, в 1916 г., он, теоретически исследуя атом водорода, подсчитал это отношение, умножил его на 2π и нашел значение, которое он и назвал постоянной тонкой структуры [7]. Почему-то никто из физиков ни тогда, ни позднее не обратил внимание на то, что, по существу, постоянная тонкой структуры впервые была получена А. Эйнштейном. Так приоритет в определении мировой константы остался за А. Зоммерфельдом.

4. Помимо фотоэффекта, другим важным законом, на который опирается квантовая физика, является эффект Комптона [8]. Суть его заключается в том, что если облучать электрон γ-лучами (фотонами) с длиной волны λ, то после облучения длина волны фотона изменится на λ_1, при этом $\lambda_1 - \lambda = 2\lambda_C \sin^2(\varphi/2)$, где φ – угол рассеяния фотонов; λ_C – комптоновская длина волны электрона $(\lambda_C = 2\pi\bar{\lambda}_C,\ \bar{\lambda}_C = \hbar / mc)$. Комптоновская длина волны электрона находится из условия равенства энергии покоя электрона mc^2 и энергии электрона для частицы-волны hc/λ_C. Это равенство само по себе никак не связано ни с радиусом первой орбиты атома водорода $a_0 = 4\pi\varepsilon_0\hbar^2 / me^2$, ни с классическим радиусом электрона $r_0 = e^2 / 4\pi\varepsilon_0 c^2 m$. Однако, если перемножить r_0 и a_0, то получим формулу $r_0 a_0 = (\hbar / mc)^2$, отсюда $\bar{\lambda}_C = \sqrt{r_0 \cdot a_0}$, то есть комптоновская длина волны электрона равна среднему геометрическому радиуса первой боровской орбиты и классического радиуса электрона. Заметим, что в фундаментальном справочнике [5] в формуле для a_0 вместо e^2 ошибочно стоит c^2, поэтому и не было получено выражение $\bar{\lambda}_C = \sqrt{r_0 \cdot a_0}$. Используя известные соотношения $r_0 = \alpha^3 / 4\pi R_\infty$ и $a_0 = \alpha / 4\pi R_\infty$, где R_∞ – постоянная Ридберга [5, 8, 9], получаем $\bar{\lambda}_C = \alpha^2 / 4\pi R_\infty$.

Таким образом, три параметра с размерностью длины: радиус первой боровской орбиты $a_0 = 5{,}292\cdot10^{-11}$ м, комптоновская длина волны электрона $\bar{\lambda}_C = 3{,}862\cdot10^{-13}$ м и классический радиус электрона $r_0 = 2{,}818\cdot10^{-15}$ м выражаются через две фундаментальные физические константы и являются членами геометрической прогрессии со знаменателем α. Можно предположить, что в микромире имеются и другие характерные длины, меньшие r_0, продолжающие эту прогрессию, но пока не получившие широкого распространения.

Отметим также, что, в отличие от r_0 и a_0, которые в настоящее время нельзя измерить, комптоновская длина волны электрона может быть измерена с помощью эффекта Комптона ($\Delta\lambda = 2\lambda_C \cdot \sin^2(\varphi/2)$). Поскольку Δλ и φ могут быть измерены с высокой точностью, то с высокой точностью можно определить и величину λ_C. Постоянная Ридберга измеряется по положениям линий в спектре атомов различных элементов [8]. Тем самым, может быть определена и постоянная тонкой структуры.

5. В 1905 году А. Эйнштейн опубликовал работу о специальной теории относительности, в которой широко использовал преобразования Лоренца [10].

Рассмотрим две инерциальные системы: S и S^*. Пусть S^* движется относительно S вдоль оси X с постоянной скоростью v и в начальный момент начало координат обеих систем совпадает.

4(531).indd 89 15.12.2016 14:48:48

Тогда координата x^* точки в системе S^* связана с координатой x и временем t в той же точке в системе S соотношением $x^* = A(x - vt)$. Уравнения преобразования Лоренца для координат и времени ($u = ct$) имеют вид [11]:

$$x^* = \frac{x - vu/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \quad y^* = y, \quad z^* = z, \quad u^* = \frac{u - vx/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

Обратные преобразования из системы S^* в S имеют схожий вид:

$$x = \frac{x^* + vu^*/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \quad y = y^*, \quad z = z^*, \quad u = \frac{u^* + vx^*/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

Если не рассматривать тождественные преобразования для координат y и z, то видно, что преобразования Лоренца линейные, то есть

$$\begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix},$$

где $[A] = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}$; $a = \dfrac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$; $b = \dfrac{v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$.

Матрица этого преобразования симметричная.

Из аналитической геометрии на плоскости известно, что линейным преобразованием обладает операция поворота осей в декартовой системе координат на угол φ:

$$x^* = x \cdot \cos\varphi - u \cdot \sin\varphi, \quad u^* = x \cdot \sin\varphi + u \cdot \cos\varphi,$$

то есть $\begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = [B] \cdot \begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix}$, где $[B] = \begin{bmatrix} d & -f \\ f & d \end{bmatrix}$; $d = \cos\varphi$; $f = \sin\varphi$.

Матрица B несимметричная, поэтому линейными преобразованиями нельзя преобразовать A в B и наоборот. Симметричной матрицей обладает линейное преобразование с гиперболическими функциями: $x^* = x \cdot \mathrm{ch}\psi + u \cdot \mathrm{sh}\psi$, $u^* = x \cdot \mathrm{sh}\psi + u \cdot \mathrm{ch}\psi$.

$$\begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix},$$

где $[C] = \begin{bmatrix} g & h \\ h & g \end{bmatrix}$; $g = \mathrm{ch}\psi = a$; $h = \mathrm{sh}\psi = b$.

Таким образом, преобразования Лоренца – это поворот системы координат на угол ψ, при этом $\mathrm{th}\psi = v/c$.

Получим с помощью этого преобразования выражение для сложения скоростей в релятивистском случае. Если одна система координат движется относительно неподвижной системы со скоростью v_1, а другая – со скоростью v_2 относительно движущейся, то, применяя дважды преобразование $[C]$, получаем

$$[C] = [C_1] \cdot [C_2] = \begin{bmatrix} \mathrm{ch}\psi_1 & \mathrm{sh}\psi_1 \\ \mathrm{sh}\psi_1 & \mathrm{ch}\psi_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathrm{ch}\psi_2 & \mathrm{sh}\psi_2 \\ \mathrm{sh}\psi_2 & \mathrm{ch}\psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{ch}(\psi_1+\psi_2) & \mathrm{sh}(\psi_1+\psi_2) \\ \mathrm{sh}(\psi_1+\psi_2) & \mathrm{ch}(\psi_1+\psi_2) \end{bmatrix}$$

и $\mathrm{th}(\psi_1 + \psi_2) = v_{12} / c$.

4(531).indd 90 15.12.2016 14:48:48

Применяя формулу для гиперболического тангенса двух углов, получаем известную формулу сложения скоростей для релятивистского случая

$$\frac{v_{12}}{c} = \mathrm{th}(\psi_1 + \psi_2) = \frac{\mathrm{th}\psi_1 + \mathrm{th}\psi_2}{1 + \mathrm{th}\psi_1 \cdot \mathrm{th}\psi_2} = \frac{v_1 / c + v_2 / c}{1 + v_1 \cdot v_2 / c^2}.$$

6. Рассмотрим уравнение движения тела (закон Ньютона) $d\vec{p} / dt = \vec{F}$ с учетом релятивистских выражений для массы m и количества движения $\vec{p}$:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \qquad \vec{p} = m_0 \vec{v} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

где m_0 – масса покоя тела; $\vec{v}$ – скорость; $\vec{a}$ – ускорение.

Поскольку

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{m_0 \vec{a}}{\sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}} + \frac{m_0 (\vec{v}, (\vec{a}, \vec{v}))}{c^2 \cdot \sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}},$$

то, используя выражение $\vec{a} \cdot v^2 = (\vec{v}, (\vec{a}, \vec{v})) + [\vec{v}, [\vec{a}, \vec{v}]]$, получим

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{m_0 [\vec{v}, [\vec{a}, \vec{v}]]}{v^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m_0 (\vec{v}, (\vec{a}, \vec{v}))}{v^2 \cdot \sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}}.$$

Уравнение движения в гравитационном поле имеет вид

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\gamma \frac{mM\vec{r}}{r^3},$$

где r – расстояние между центрами масс; γ – гравитационная постоянная.

Если направления скорости и ускорения взаимно перпендикулярны, как при движении по окружности (движение планет и движение электрона в планетарной модели атома), то

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{m_0 \vec{a}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m\vec{a}$$

и массы в уравнении движения справа и слева от знака равенства будут одинаковые, в полном соответствии с положением А. Эйнштейна о равенстве инертной и тяжелой масс.

Иное дело, если направления скорости и ускорения совпадают, тогда

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{m_0 \vec{a}}{\sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}} = \frac{ma}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

и массы в уравнении движения будут неодинаковые, то есть инертная и тяжелая массы не равны. Этот случай представляет особый интерес.

4(531).indd 91 15.12.2016 14:48:48

Предположим, что тело с массой M покоится, а тело с массой покоя m_0 вносится в гравитационное поле первого тела на некотором расстоянии s. Тогда, согласно закону тяготения Ньютона, второе тело будет двигаться прямолинейно и ускоренно вдоль силовой линии поля первого тела. Как и при любом ускоренном движении, скорость его будет нарастать, возможно, даже приближаясь к скорости света, как к предельной скорости для любого тела, имеющего ненулевую массу покоя.

Поскольку для такого радиального движения тела направления скорости и ускорения совпадают с направлением радиуса, то в уравнении движения знаки векторов могут быть опущены и оно примет вид

$$\frac{m_0}{\sqrt{(1-\frac{v^2}{c^2})^3}}\frac{dv}{dt}=-\gamma\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\frac{M}{r^2}.$$

Отсюда следует важный вывод о том, что инертная масса

$$m_{\text{И}}=\frac{m_0}{\sqrt{(1-\frac{v^2}{c^2})^3}}$$

не равна тяжелой массе

$$m_{\text{Т}}=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$

они совпадают лишь при скоростях тела $v << c$.

Известно, что в 1916 г. А. Эйнштейн опубликовал свою первую работу по теории гравитации, в основу которой он положил именно равенство тяжелой и инертной масс. Как мы видим, из специальной теории относительности А. Эйнштейна следует, что такое равенство имеет место только в том случае, если:

1) направления скорости и ускорения перпендикулярны;

2) направления скорости и ускорения параллельны, но тело движется со скоростью, существенно меньшей скорости света.

Решим уравнение движения. Сокращая правую и левую части на общий множитель, приходим к уравнению

$$\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}\frac{dv}{dt}=-\gamma\frac{M}{r^2}.$$

Поскольку $v = dr/dt$, запишем его в виде

$$\frac{v}{1-\frac{v^2}{c^2}}\frac{dv}{dr}=-\gamma\frac{M}{r^2}.$$

После интегрирования получим

$$\ln(1-\frac{v^2}{c^2})=-\frac{R}{r}+C_1,$$

4(531).indd 92 15.12.2016 14:48:49

где $R = 2\gamma M/c^2$ – гравитационный радиус [8]. Постоянную интегрирования $C_1 = R/s$ найдем из начальных условий и получим окончательное выражение для скорости тела

$$v = c \cdot \sqrt{1 - e^{-R\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right)}}.$$

Пусть R_0 и r_0 – радиусы тел с массой M и m соответственно, причем $R_0 >> r_0$, $s >> R_0 + r_0$, тогда максимальная скорость движения тела m будет достигаться на поверхности тела M и будет определяться как

$$v_{\max} = c \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{R}{R_0}}}.$$

Для Солнца с радиусом $R_0 = 7 \cdot 10^8$ м и массой $M_0 = 2 \cdot 10^{30}$ кг гравитационный радиус $R = 3 \cdot 10^3$ м, так что отношение $R/R_0 = 0{,}43 \cdot 10^{-5}$ мало и $v_{\max} = 0{,}002$ с. В гравитационном поле «белого карлика» эта скорость возрастает примерно в 30 раз и становится равной 0,06 с, но все равно она еще очень мала по сравнению со скоростью света.

С другой стороны, есть частицы, например фотон, которые не имеют массы покоя и которые движутся со скоростью света. Масса движущегося фотона, как известно, равна $m_\nu = h\nu/c^2$, где ν – частота. Для видимого света $m_\nu = 4 \cdot 10^{-36}$ кг.

Пролетая мимо «белого карлика», фотоны с разной частотой и разной массой будут с разной силой притягиваться к звезде, и произойдет расщепление света на гамму цветов. Угол отклонения одного цвета от другого будет ничтожно мал, однако по мере удаления от звезды расстояние между цветами будет возрастать и где-то спектр света станет наблюдаемым.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фриш, С. Э.** Курс общей физики / С. Э. Фриш, А. В. Тимофеева. – М.: ГИТТЛ, 1957.

2. **Эйнштейн, А.** Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов. Т. III. – М.: Наука, 1966. – С. 92 – 107.

3. **Эйнштейн, А.** Зависит ли инерция тела от содержащейся в ней энергии? / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов. Т. 1. – М.: Наука, 1965. – С. 36 – 38.

4. **Балыко, И. А.** Колебательное движение электрона в кулоновском поле / И. А. Балыко, А. К. Балыко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2. – С. 71 – 80.

5. **Кикоин, И. К.** Таблицы физических величин: справочник / Под ред. академика И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.

6. **Эйнштейн, А.** К современному состоянию проблем излучения / / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов. Т. III. – М.: Наука, 1966. – С.164 – 179.

7. **Зоммерфельд, А.** Пути познания в физике / А. Зоммерфельд. – М.: Наука, 1973.

8. **Карякин, Н. И.** Краткий справочник по физике / Н. И. Карякин, К. Н. Быстров, П. С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1964.

9. **Тейлор, Б.** Фундаментальные константы и квантовая электродинамика / Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лвангенберг; пер. с англ. под ред. профессора Б. А. Мамырина. – М.: Атомиздат, 1972.

10. **Эйнштейн, А.** К электродинамике движущихся тел / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов. Т. 1. – М.: Наука, 1965. – С. 7 – 35.

11. **Бергман, П. Г.** Введение в теорию относительности / П. Г. Бергман; с предисловием А. Эйнштейна. – М.: ГИИЛ, 1947.

Статья поступила 22 августа 2016 г.

4(531).indd 93 15.12.2016 14:48:49

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ
статей, опубликованных в течение 2016 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

I. Катоды и материалы

1. *Алёхина В.И., Ермилов А.Н., Королев С.В., Королев Д.С., Шумилин А.П.* – Применение графита и композиций типа углерод-углерод в крупногабаритных катодах с эмитирующим покрытием из гексаборида лантана. – Вып. 1 (528). – С. 19–22.

2. *Алехина В.И., Королев Д.С., Королев С.В.* – Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы. – Вып. 2 (529). – С. 69–80.

3. *Капустин В.И., Ли И.П., Петров В.С., Леденцова Н.Е., Турбина А.В.* – Электронная структура и физико-химические особенности оксидно-никелевых катодных материалов. – Вып. 1 (528). – С. 8–18.

4. *Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В.* – Методика определения параметров эмиссионной неоднородности катодных материалов. – Вып. 2 (529). – С. 54–68.

5. *Макаров А.П., Берснева Е.Ю., Земчихин Е.М., Чистова Г.И., Закурдаев А.Д., Иванов В.В., Уразов М.Н., Хрустов В.Р.* – Скандатные катоды с высокой плотностью тока для применения в приборах СВЧ. – Вып. 4 (531). – С.15–24.

6. *Мелешкевич П.М.* – О возможности применения автоэмиссионных катодов в мощных приборах СВЧ. – Вып. 4 (531). – С. 6–14.

II. Квантовая электроника

1. *Балько А.К.* – Уравнение фотоэффекта. – Вып. 4 (531). – С. 85–93.

2. *Балько И.А., Балько А.К.* – Вывод формулы для спектральной плотности излучения без использования гипотезы о квантах. – Вып. 1 (528). – С. 118–128.

III. Краткие сообщения

1. *Балько А.К.* – Плотности распределения вероятности модуля радиус-вектора со случайными координатами в пространствах различной размерности. – Вып. 2 (529). – С. 106–111.

2. *Кяргинский Б.Е.* – Узкополосный перестраиваемый шумовой генератор. – Вып. 2 (529). – С. 102–105.

IV. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д.* – Терагерцовое излучение – инструмент XXI века (использование в медико-биологических исследованиях). – Вып. 2 (529). – С. 86–101.

4(531).indd 94 15.12.2016 14:48:49

V. Производственно-технический опыт

1. *Цай П.И., Фадеев А.А., Катанова Л.А., Дубровкин С.И.* – Испытательная база: современное состояние, проблемы, пути их решения и предложения по переоснащению. – Вып. 4 (531). – С. 79–84.

2. *Цай П.И., Яковлев С.В., Рокитянский А.Г., Городецкая М.В., Горшкова Е.С., Ланцов Ю.С., Ширяев Д.А.* – Организация системы аттестации испытательного оборудования по предприятию. – Вып. 3 (530). – С.108–115.

VI. Радиоэлектронные устройства

1. *Гармаш С.В., Кищинский А.А., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А.* – Двухканальный волноводный сумматор мощности в *X*-диапазоне длин волн. – Вып. 3 (530). – С. 81–87.

2. *Геворкян В.М., Казанцев Ю.А.* – Анализ волноводного сумматора мощности СВЧ с помощью эквивалентных схем. – Вып. 1 (528). – С. 51–55.

3. *Данилин Н.С., Булаев И.Ю.* – Система искусственного интеллекта на борту космических аппаратов. – Вып. 3 (530). – С. 88–91.

4. *Карасев М.С., Жерновенков В.А.* – Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ-энергии и НЧ-сигналов управления и электропитания. – Вып. 3 (530). – С. 71–80.

5. *Куприянов П.В., Обрезан О.И., Трофимов Д.С.* – Об апостериорной оценке надежности сложных радиоэлектронных устройств СВЧ. – Вып. 3 (530). – С. 62–70.

6. *Семенин С.Н., Колмакова Н.Г., Меджитов Р.Д., Бушкин С.С.* – Широкополосная печатная антенна. – Вып. 1 (528). – С. 56–64.

VII. Твердотельная электроника

1. *Борисов А.А., Зырин С.С., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Маковецкая А.А., Новоселец В.И., Пашковский А.Б., Урсуляк Н.Д., Щербаков С.В., Журавлев К.С., Торопов А.И.* – Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-pHEMT. – Вып. 1 (528). – С. 65–69.

2. *Былкин В.И., Гаврилов И.А., Пугнин В.И.* – Серия импульсных усилителей *X*-диапазона на полевых GaAs- и GaN-транзисторах. – Вып. 4 (531). – С. 33–36.

3. *Далингер А.Г., Иовдальский В.А., Шацкий С.В., Новоселец В.И.*– Конструкция приемопередающего модуля АФАР СВЧ-диапазона. – Вып. 1 (528). – С. 95–104.

4. *Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Гринберг Д.С., Абакумова Н.В.* – Тепловой анализ работы мощной ГИС СВЧ-диапазона. – Вып. 3 (530). – С. 53–61.

5. *Куликова И.В., Приступчик Н.К., Галдецкий А.В., Симонов К.Г., Новоселец В.И., Зырин С.С., Погорелова Э.В., Силин Р.А.* – Методика построения и расчета воздушной системы охлаждения специализированного СВЧ-блока. – Вып. 1 (528). – С. 70–74.

4(531).indd 95 15.12.2016 14:48:49

6. *Маковецкая А.А., Манченко Л.В., Пашковский А.Б., Потапова Т.И., Чепурных И.П., Пчелин В.А., Новоселец В.И., Левашов С.В., Корчагин И.П., Трегубов В.Б., Силин Р.А., Уласюк В.Н., Симонов К.Г.* – Краевые эффекты в согласующих элементах из керамики с большой диэлектрической проницаемостью для мощных гибридных транзисторных усилителей. – Вып. 1 (528). – С. 75–85.

7. *Максимов Н.А., Панас А.И.* – Малогабаритный сверхширокополосный генератор хаоса СВЧ-диапазона на биполярном SiGe-транзисторе. – Вып. 3 (530). – С. 46–52.

8. *Приступчик Н.К., Куликова И.В., Галдецкий А.В., Симонов К.Г., Куприянов П.В., Погорелова Э.В.,Уласюк В.Н., Зырин С.С.* – Моделирование тепловых режимов работы приемопередающего модуля малогабаритной активной фазированной антенной решетки. – Вып. 1 (528). – С. 86–94.

9. *Темнов А.М., Дудинов К.В., Трофимов А.А., Епифанцев А.А., Киселева Е.В.* – Исследование мощных усилительных ГМИС *X*-диапазона на транзисторах из нитрида галлия. – Вып. 2 (529). – С. 45–53.

VIII. Технология и материаловедение

1. *Алексахин А.В., Гулидов Д.Н.* – Разработка автоматизированной системы выбора оптимального технологического процесса резки слитков полупроводниковых и диэлектрических материалов. – Вып. 1 (528). – С. 112–117.

2. *Ваганов И.И., Вашин С.А., Корепин Г.Ф.* – Выбор способа сварки малогабаритных клистронов. – Вып. 3 (530). – С. 103–107.

3. *Калашников Ю.Н., Литвиненко Н.П., Ранжин Ю.С.* – Автоматические установки в процессах сборки многофункциональных модулей. – Вып. 3 (530). – С. 92–96.

4. *Курочкин А.А.* – Исследование влияния режимов резания на характеристики глубоких отверстий малых диаметров в вязких материалах. – Вып. 1 (528). – С. 105–111.

5. *Курочкин А.А.* – Методология изготовления прецизионных тонкостенных изделий сверхмалого размера. – Вып. 3 (530). – С. 97–102.

6. *Налогин А.Г., Семенов М.Г., Костишин В.Г., Иванов В.В., Семенов А.С., Бакланов А.В.* – Феррогранаты для подложек микрополосковых ферритовых приборов *X*-диапазона длин волн. – Вып. 4 (531). – С. 56–64.

7. *Налогин А.Г., Семенов М.Г., Урсуляк Н.Д.* – Термостабильные ферриты для микрополосковых ферритовых приборов высокого уровня мощности. – Вып. 4 (531). – С. 65–71.

IX. Экономика

1. *Чекаданова М.В.* – Модель инновационного развития радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне. – Вып. 2 (529). – С. 112–118.

2. *Чекаданова М.В.* – Бизнес-модель инновационно-территориального радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне. – Вып. 4 (531). – С. 72–78.

4(531).indd 96 15.12.2016 14:48:49

X. Электровакуумные приборы

1. *Баранов А.В., Козиков А.Л., Привер Э.Л.* – Комбинированные СВЧ-фильтры с полосно-пропускающими и режекторными свойствами. – Вып. 2 (529). – С. 32–39.

2. *Борисов А.А., Галдецкий А.В., Закурдаев А.Д., Новоселец В.И., Погорелова Э.В., Силин Р.А.* – О моделировании движения частиц в аксиально-симметричных фокусирующих системах электровакуумных приборов. – Вып. 1 (528). – С. 45–50.

3. *Вагин А.И., Ефремова М.В., Иванов И.М., Курушин А.А., Скрипкин Н.И.* – Расчет и экспериментальное исследование прототипа излучателя ФАР на синхронизированных магнетронах 3-мм диапазона. – Вып. 3 (530). – С. 14–19.

4. *Васильев В.И.* – Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи по мощности с помощью моделирования. – Вып. 2 (529). – С. 22–31.

5. *Васильев В.И.* – Электродинамическая модель перестройки частоты цилиндрического резонатора квантового водородного генератора с помощью петли с варикапом. – Вып. 3 (530). – С. 20–30.

6. *Вашин С.А., Корепин Г.Ф., Климова Н.Н.* – Метод снижения токов утечки изоляторов отпаянных ЭВП. – Вып. 1 (528). – С. 23–30.

7. *Вашин С.А., Корепин Г.Ф., Климова Н.Н.* – Проблемы поиска сложных течей отпаянных ЭВП. – Вып. 2 (529). – С. 13–21.

8. *Галдецкий А.В., Ракова Е.А., Корепин Г.Ф., Смирнов В.А., Зубков Н.П., Лябин Н.А., Парамонов В.С., Дерябкин А.В., Куликов Е.Н., Духновский М.П.* – Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ *W*-диапазона. – Вып. 3 (530). – С. 8–13.

9. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой. – Вып. 2 (529). – С. 8–12.

10. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Расчет характеристического сопротивления резонатора. – Вып. 3 (530). – С. 31–39.

11. *Мамонтов А.В., Перминов И.Г., Симонов К.В.* – Перспективы развития сверхмощного клистроностроения. – Вып. 1 (528). – С. 31–40.

12. *Мирошник П.С., Силин Р.А., Чепурных И.П., Зырин С.С., Симонов К.Г., Урсуляк Н.Д.* – Проектирование широкополосного герметизированного микрополоскового ввода энергии *Ku*-диапазона. – Вып. 1 (528). – С. 41–44.

13. *Семенин С.Н., Скобелев Д.Н., Бушкин С.С., Немирич Д.М.* – Волноводно-микрополосковый переход *X*-диапазона. – Вып. 2 (529). – С. 40–44.

14. *Симоненко Л.В., Симоненко А.Н.* – Направленный ответвитель как способ оптимизации режима работы магнетрона. – Вып. 3 (530). – С. 40–45.

15. *Симоненко Л.В., Симоненко А.Н.* – Оптимизация режима накала мощных магнетронов для технологических установок СВЧ-нагрева. – Вып. 4 (531). – С. 25–32.

4(531).indd 97 15.12.2016 14:48:49

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ
авторов, опубликовавших свои работы в “СВЧ-технике” – первой серии научно-технического сборника “Электронная техника” в течение 2016 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.

Абакумова Н.В. VII.4
Алексахин А.В. VIII.1
Алехина В.И. I.1, 2
Бакланов А.В. VIII.6
Балыко А.К. I.1, 2; III.1
Балыко И.А. II.2
Баранов А.В. X.1
Берснева Е.Ю. I.5
Борисов А.А. VII.1; X.2
Будзинский Ю.А. X.9, 10
Булаев И.Ю. VI.6
Бушкин С.С. VI.6; X.13
Быковский С.В. X.9, 10
Былкин В.И. VII.2
Ваганов И.И. VIII.2
Вагин А.И. X.3
Васильев В.И. X.4, 5
Вашин С.А. VIII.2; X.6, 7
Гаврилов И.А. VII.2
Галдецкий А.В. VII.5, 8; X.2, 8
Ганюшкина Н.В. VII.4
Гармаш С.В. VI.1
Геворкян В.М. VI.1, 2
Городецкая М.В. V.2
Горшкова Е.С. V.2
Гринберг Д.С. VII.4
Гулидов Д.Н. VIII.1
Далингер А.Г. VII.3
Данилин Н.С. VI.3
Дерябкин А.В. X.8
Дубровкин С.И. V.1
Дудинов К.В. VII.9
Духновский М.П. X.8
Епифанцев А.А. VII.9
Ермилов А.Н. I.1
Ефремова М.В. X.3
Жерновенков В.А. VI.4
Журавлев К.С. VII.1
Закурдаев А.Д. I.5; X. 2
Земчихин Е.М. I.5
Зубков Н.П. X.8
Зырин С.С. VII.1, 5, 8; X.12
Иванов В.В. I.5; VIII.6
Иванов И.М. X.3
Иовдальский В.А. VII.3, 4
Казанцев Ю.А. VI.1, 2
Казаринов К.Д. IV.1
Калашников Ю.Н. VIII.3
Калина В.Г. X.9, 10
Капустин В.И. I.3, 4
Карасев М.С. VI.4
Катанова Л.А. V.1
Киселева Е.В. VII.9
Кищинский А.А. VI.1
Климова Н.Н. X6, 7
Козиков А.Л. X.1
Колмакова Н.Г. VI.6
Корепин Г.Ф. VIII, 2; X.6–8
Королев Д.С. I.1, 2
Королев С.В. I.1, 2
Корчагин И.П. VII.6
Костишин В.Г. VIII.6
Куликова И.В. VII.5, 8
Куликов Е.Н. X. 8
Куприянов П.В. VI.5; VII.8
Курочкин А.А. VIII.4, 5
Курушин А.А. X.3
Кяргинский Б.Е. III.2

4(531).indd 98 15.12.2016 14:48:49

Ланцов Ю.С. V.2
Лапин В.Г. VII.1
Левашов С.В. VII.6
Леденцова Н.Е. I.3
Ли И.П. I.3, 4
Литвиненко Н.П. VIII.3
Лукашин В.М. VII.1
Лябин Н.А. X.8
Макаров А.П. 1.5
Маковецкая А.А. VII.1, 6
Максимов Н.А. VII.7
Мамонтов А.В. X.11
Манченко Л.В. VII.6
Меджитов Р.Д. VI.6
Мелешкевич П.М. I.6
Мирошник П.С. X.12
Налогин А.Г. VIII.6, 7
Немирич Д.М. X.13
Новоселец В.И. VII.1, 3, 5, 6; X.2
Обрезан О.И. VI.5
Панас А.И. VII.7
Парамонов В.С. X.8
Пашковский А.Б. VII.1, 6
Перминов И.Г. X.11
Петров В.С. I.3
Погорелова Э.В. VII.5, 8; X.2
Потапова Т.И. VII.6
Привер Э.Л. X.1
Приступчик Н.К. VII.5, 8
Пугнин В.И. VII.2
Пчелин В.А. VII.6
Ракова Е.А. X.8
Ранжин Ю.С. VIII.3
Рокитянский А.Г. V.2
Семенин С.Н. VI.6; X.13
Семенов А.С. VIII.6
Семенов М.Г. VIII.6, 7
Силин Р.А. VII.5, 6; X.2, 12
Симоненко А.Н. X.14, 15
Симоненко Л.В. X.14, 15
Симонов К.В. X.11
Симонов К.Г. VII.5, 6, 8; X.12
Скобелев Д.Н. X.13
Скрипкин Н.И. X.3
Смирнов В.А. X.8
Темнов А.М. VII.9
Торопов А.И. VII.1
Трегубов В.Б. VII.6
Трофимов А.А. VII.9
Трофимов Д.С. VI.5
Турбина А.В. I.3
Уласюк В.Н. VII.6, 8
Уразов М.Н. I.5
Урсуляк Н.Д. VII.1; VIII.7; X.12
Фадеев А.А. V.1
Хрустов В.Р. I.5
Цай П.И. V.1, 2
Чекаданова М.В. IX.1, 2
Чепурных И.П. VII.6; X.12
Чистова Г.И. I.5
Шацкий С.В. VII.3
Ширяев Д.А. V.2
Шуманов А.В. I.4
Шумилин А.П. I.1
Щербаков С.В. VII.1
Яковлев С.В. V.2

4(531).indd 99 15.12.2016 14:48:49

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 Worde 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 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); 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.

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

4(531).indd 100 15.12.2016 14:48:49

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2017 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 3600 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 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 509950001, 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, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (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 2017 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.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.12.2016 г.	Усл. п. л. 12,5	Формат 60×88 1/8
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Уч.-изд. л. 13,0	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	11 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

4(531).indd 101 15.12.2016 14:48:49

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2016, вып. 4(531), с. 1-100

ISSN 1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

4(531).indd 102 15.12.2016 14:48:50