



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (561)

2024

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(561)

2024

Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **В.М. Исаев**;
д.т.н. **П.В. Куприянов**; д.т.н. **Н.А. Лябин**;
д.ф.-м.н. **С.П. Морев**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
д.т.н. **С.А. Гамкрелидзе**, ИСВЧПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «Микроволновые системы», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Учредитель: АО «НПП «Исток» им. Шокина».

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

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2024 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(561)

2024

Founded in 1950

Editor-in-chief

D.T.Sc. A.A. Borisov

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **V.M. Isaev**;
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**;
D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
D.T.Sc. **S.A. Gamkrelidze**, IMWFSE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «Microwave systems», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

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

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

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Технология и материаловедение

- Головкин П.А., Дворецков Р.М., Никифоров А.А.* – О последствиях попадания некоторых загрязнений на мелкие детали из коррозионно-стойких сплавов..... 6
- Пашков А.Н., Налогин А.Г., Алексеев А.А., Полозов Д.Н., Тодосечук Ю.И., Петров П.Г., Пархоменко М.П., Калёнов Д.С.* – Некоторые особенности производства ферритового материала по технологии ЛТСС для изготовления многослойных структур и СВЧ-развязывающих устройств на их основе..... 13
- Налогин А.Г., Пашков А.Н., Алексеев А.А., Полозов Д.Н., Цыберт А.В., Тодосечук Ю.И., Петров П.Г., Демшиевский В.В.* – Микрополосковый ферритовый ЛТСС развязывающий прибор Ka-диапазона частот..... 24
- Жабин Г.А., Пелипец О.В., Шаранов Н.А., Федотов В.В.* – Влияние температуры мишени и мощности распыления на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов..... 40
- Крачковская Т.М., Комаров Д.А., Шестеркин В.И.* – Численное моделирование процесса напыления активного вещества термокатода на электроды ЭВП СВЧ методом статистических испытаний..... 51
- Федоров В.В.* – Современные тенденции в развитии ферритовых развязывающих приборов (на основании обзора отечественных и зарубежных публикаций)..... 57

Электровакuumные приборы

- Алексеева Н.А., Калачев А.Д., Кириченко Д.И., Медведков И.П., Роговин В.И., Чистяков И.А.* – Проектирование и экспериментальное исследование лампы бегущей волны X-диапазона частот для спутниковых систем связи..... 72

Твердотельная электроника

- Борисов А.А., Иовдальский В.А., Клюев С.Б.* – Дальнейшее улучшение электрических характеристик симметричной щелевой линии СВЧ- и КВЧ-диапазонов..... 81

Медицинская электроника

- Полников И.Г., Титов С.В., Титов А.С., Казаринов К.Д.* – Особенности поглощения КВЧ-излучения низкой интенсивности в водных средах..... 88

История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – «Исток» указал нам дорогу по жизни. Часть 2..... 97

CONTENTS

Technology and material science

- Golovkin P.A., Dvoretsov R.M., Nikiforov A.A.* – On the effects of certain contaminants on small parts made of corrosion-resistant alloys..... 6
- Pashkov A.N., Nalagin A.G., Alekseev A.A., Polozov D.N., Todosechuk Yu.I., Petrov P.G., Parkhomenko M.P., Kalyonov D.S.* – Some features of LTCC ferrite material production for manufacturing multilayer structures and microwave decoupling devices based on them..... 13
- Nalagin A.G., Pashkov A.N., Alekseev A.A., Polozov D.N., Tsybert A.V., Todosechuk Yu.I., Petrov P.G., Demshinsky V.V.* – Microstrip ferrite LTCC decoupling microwave device of Ka -frequency range..... 24
- Zhabin G.A., Pelipets O.V., Sharapov N.A., Fedotov V.V.* – The effect of target temperature and sputtering power on the emission properties of molecular sputter-deposited oxide cathodes..... 40
- Krachkovskaya T.M., Komarov D.A., Shesterkin V.I.* – Numerical simulation of the process of spraying the active substance of a thermocathode onto the electrodes of microwave vacuum devices by statistical testing method..... 51
- Fedorov V.V.* – Current trends in the development of ferrite decoupling devices (based on a review of domestic and foreign publications)..... 57

Electrovacuum devices

- Alekseeva N.A., Kalachev A.D., Kirichenko D.I., Medvedkov I.P., Rogovin V.I., Chistyakov I.A.* – Design and experimental study of X-band TWT for satellite communication systems..... 72

Solid-state electronics

- Borisov A.A., Iovdalskiy V.A., Klyuev S.B.* – Further improvement of electrical characteristics of a symmetrical slot line in microwave and EHF ranges..... 81

Medical electronics

- Polnikov I.G., Titov S.V., Titov A.S., Kazarinov K.D.* – Features of absorbing low intensity EHF-radiation in aquatic environments..... 88

History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – «Istok» showed us the road of life. Part 2..... 97

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 681.2; 620.193; 621.7.022.6

О ПОСЛЕДСТВИЯХ ПОПАДАНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МЕЛКИЕ ДЕТАЛИ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СПЛАВОВ*

П. А. Головкин

АО «Плутон», г. Москва

Р. М. Дворецков, А. А. Никифоров

НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

В работе раскрывается опасность попадания загрязнений в виде строительной пыли на поверхности мелких деталей из сплавов типа «монель» и коррозионно-стойких сталей. Показано, что мельчайшая цементная пыль может вызывать их коррозионное поражение.

КС: мелкая тонкостенная деталь, коррозионно-стойкий сплав, пылевое загрязнение, ультразвуковая очистка, электродный потенциал, анодный процесс, коррозионное поражение

ON THE EFFECTS OF CERTAIN CONTAMINANTS ON SMALL PARTS MADE OF CORROSION-RESISTANT ALLOYS

P. A. Golovkin

JSC «Pluton», Moscow

R. M. Dvoretzky, A. A. Nikiforov

NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow

The paper reveals the danger of ingress of contaminants in the form of construction dust on the surface of small parts made of «monel» type alloys and corrosion-resistant steels. It is shown, that the smallest cement dust can cause their corrosion damage.

Keywords: small thin-walled parts, corrosion-resistant alloys, dust contamination, ultrasonic cleaning, electrode potential, anode process, corrosion damage

1. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ТОНКОСТЕННЫХ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ

В настоящей статье рассмотрены особенности изготовления типовых тонкостенных деталей, наибольший габаритный размер которых не превышает 10 мм, а толщина – несколько десятых долей миллиметра, получаемых из коррозионно-стойкого сплава вакуумной плавки НММц 38-2В

*Со стороны НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

типа «монель» [2] и коррозионно-стойкой стали 03X18H12 [3], типа «чашечка» и «тарелочка» соответственно. Такие детали из указанных материалов являются типовыми, входят, в частности, в состав конструкций различных электровакуумных приборов (ЭВП) [4].

Конструктивные особенности тонкостенных и мелких деталей в вакуумном приборостроении накладывают существенные ограничения на технологические решения, которые могут быть использованы при их изготовлении. Так, номинальная толщина монелевой ленты, из которой изготавливается чашечка, составляет 0,5 мм, её толщина в самой детали в ходе штамповки и механической обработки становится ещё меньше. Что касается детали типа тарелочка из стали 03X18H12, то номинальная толщина применяемой для её изготовления ленты составляет и вовсе 0,2 мм, делая механические способы очистки заготовок и деталей неприменимыми и выводя травление как средство очистки также лишь в теоретически возможные способы.

Столь малые размеры и толщины сильно затрудняют очистку заготовок и готовых деталей от технологических и случайных поверхностных загрязнений, особенно во внутренних их полостях, поскольку не позволяют использовать галтовку или травление. Поэтому едва ли не единственным пригодным способом снятия с поверхностей таких деталей загрязнений является ультразвуковая очистка (УЗО).

Применяемые при УЗО металлических деталей водные растворы или хлорорганические жидкости, такие, как регенерированный перхлорэтилен C_2Cl_4 или трихлорэтилен C_2HCl_3 , согласно определяющим их свойства и назначение ГОСТ Р 57835 и ГОСТ 9976, соответственно [5, 6], предназначены в основном для снятия с металлических заготовок и деталей загрязнений в виде жиров, смол и масел, попадающих на них обычно в виде отпечатков пальцев и технологических смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). В то же время эти хлорорганические бесцветные прозрачные летучие жидкости [5, 6] не предназначены для удаления пылевых и иных загрязнений, кроме вышеуказанных.

Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к чистоте производственных помещений, что в привычном представлении слабо связано с образом штамповочных участков большинства предприятий, как правило, входящих в состав их заготовительного производства. Обычно такие участки не находятся в чистых помещениях, отвечающих требованиям ГОСТ Р ИСО 14644-1 [7], и уличный воздух может свободно попадать туда, привнося, например, пыль с дорог и соседнихстроек. Пример того, что может произойти при попадании некоторых видов загрязнений на поверхности описанных деталей, причины и ход развивающихся нежелательных явлений будут показаны далее.

2. ПРИРОДА ОБРАЗОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ

В каждой окислительно-восстановительной реакции участвуют две пары: окислитель и его восстановленная форма, а также восстановитель и его окисленная форма. Мерой окислительно-восстановительной способности такой пары является её окислительно-восстановительный потенциал, называемый также электродным [8]. Электродный потенциал возникает при погружении металла (Me) в водный либо иной раствор его соли, содержащий гидратированные ионы, по схеме $[Me(H_2O)]^{n+2m}$ [8]. Металл приобретает отрицательный заряд, а приповерхностный слой раствора, обогащенный ионами металла, – положительный, и на границе раздела металла и раствора, как в конденсаторе, создается двойной электрический слой. Стандартные электродные потенциалы

некоторых веществ – основных составляющих сплавов НММц 38-2В и 03Х18Н12 – при 298 К относительно стандартного водородного потенциала H_2 , принятого равным 0, приведены в таблице [9].

Количественное содержание и электродные потенциалы основных по массе компонентов сплавов НММц 38-2В и 03Х18Н12

Сплав	Основные элементы сплава	Содержание, % (масс.)	Электродный потенциал $E_{Me^{n+}/Me}^0, В$	
			стандартный	усреднённый
НММц 38-2В	Ni	Основа	-0,234	-0,1048
	Cu	36 – 39	+0,34	
	Mn	1,4 – 2,2	-1,192	
03Х18Н12	Fe	Основа	-0,441	-0,412
	Cr	17 – 19	-0,852	
	Ni	11,5 – 13,0	-0,234	
	Mn	≤ 0,4	-1,192	

Ультразвуковые колебания многократно повышают эффективность очистки, но при этом и ускоряют развитие коррозионных повреждений из-за анодного эффекта, усиливающегося катализаторами загрязнений с большим отличием электродного потенциала от такового показателя металлического материала. Образовавшиеся на поверхностях деталей повреждения показаны на рис. 1 и 2. Как будет показано далее, именно пылевые частицы стали причиной повреждений.

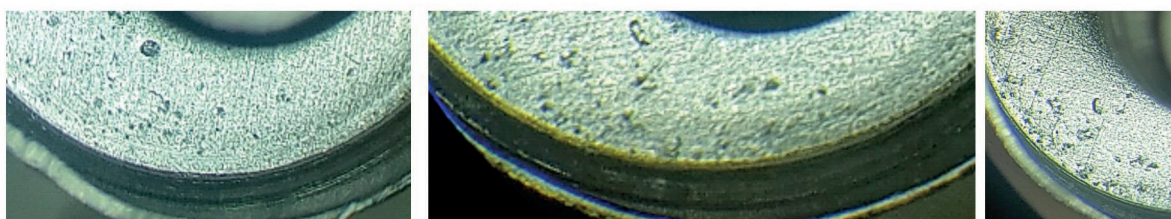


Рис. 1. Повреждения на деталях из сплава НММц 38-2В в местах попадания строительной пыли после УЗО. ×16

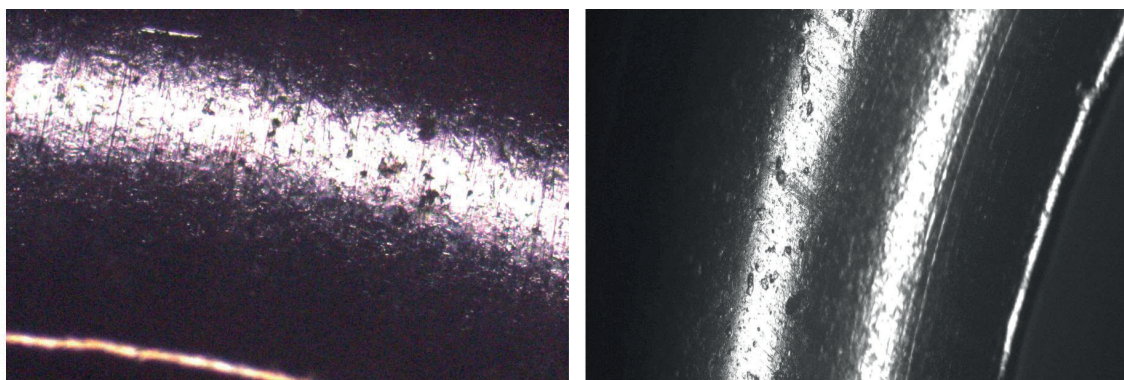


Рис. 2. Повреждения на деталях из стали 03Х18Н12 в местах попадания строительной пыли после УЗО. ×16

На рис. 3 показаны поверхность исходной ленты из сплава НММц 38-2В после отмытки следов загрязнения обычной проточной водой и поверхность ленты, поражённая дефектами, образовавшимися при УЗО после нанесения на неё строительной пыли. Видно, что отмывка водой лишь привела к появлению на материале мелких царапин, в то время как УЗО в хлорсодержащей жидкости дала многочисленные растравы в местах попадания строительной пыли.

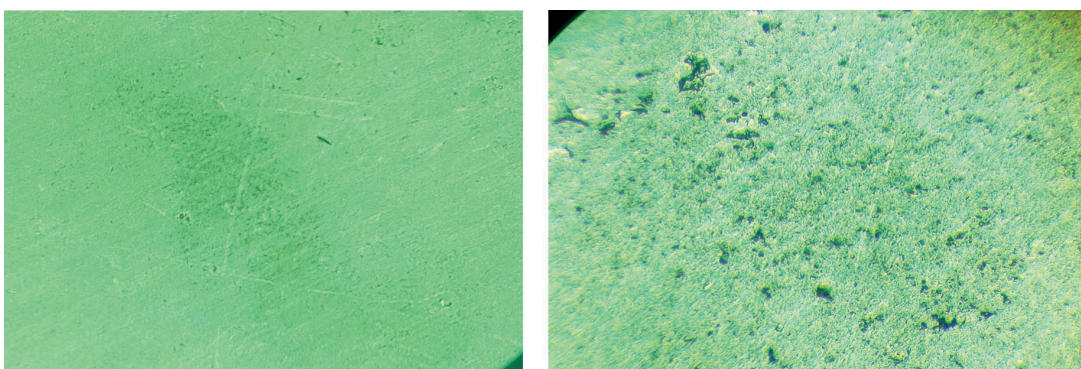


Рис. 3. Поверхность исходной ленты из сплава НММц 38-2В (слева) и её повреждение от строительной пыли после УЗО (справа). $\times 16$

На рис. 4 показаны питтинговые коррозионные повреждения, характерные для пассивируемых металлов и сплавов, и рядом с электронной фотографией – полученные методом электроннозондового микроанализа [10] распределения по поверхности привнесённых примесей на основе оксидов алюминия и магния. Сопоставление фотографий показывает наличие на поверхности растравов частиц загрязнений, которые остались на ней уже после всех пройденных деталями операций.

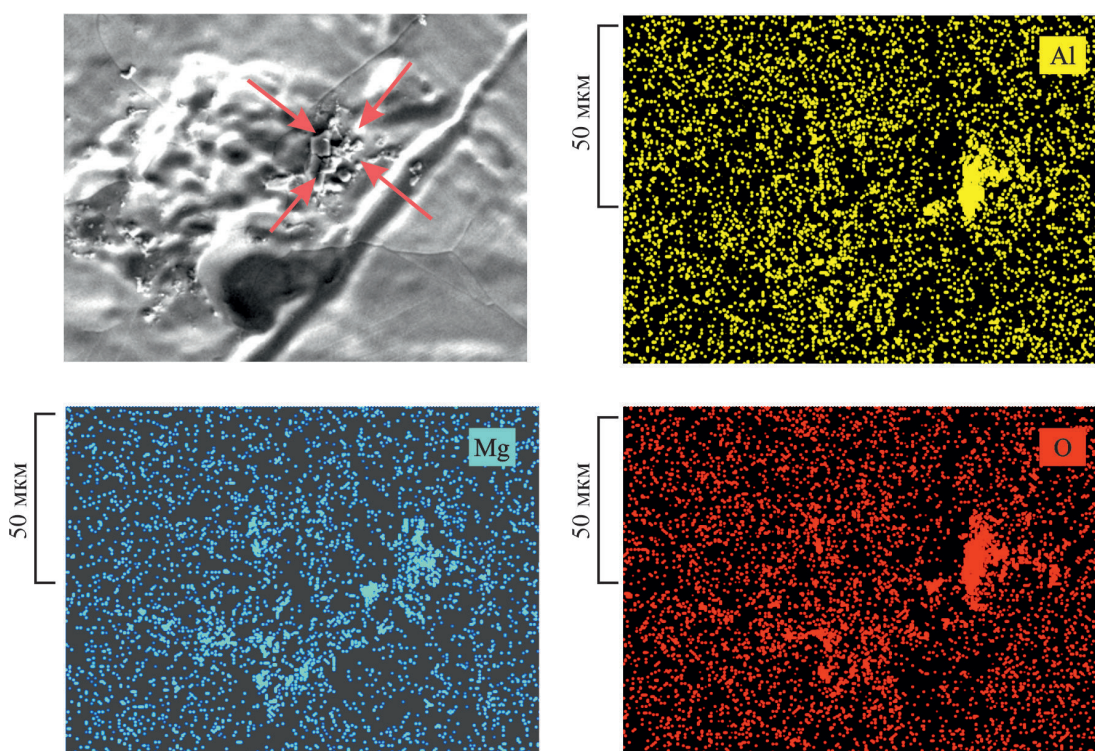


Рис. 4. Повреждения в местах попадания пыли после УЗО и химический состав этих частиц (сохранившиеся частицы показаны стрелками). $\times 500$

Близкие по форме к полусферическим коррозионным поражениям с гладкой поверхностью, их можно причислить к так называемым полированным питтингам, образующимся по близкому к электрополировке механизму, слабо зависящему от структуры сплава [11]. Такие анодные процессы на поверхностях погружённых в раствор деталей могут привести к развитию коррозионных повреждений, которые, с учётом малой толщины деталей, могут привести к потере вакуумной плотности готового ЭВП, в состав которого они входят. Приведённые данные позволяют предположить, что при УЗО находящиеся на поверхностях деталей частички строительной пыли, как окислитель, сместили её электродный потенциал в положительную сторону.

В данном случае активирующими ионами при очистке деталей их сплава НММц 38-2В стали ионы Cl^- , используемого для отмывки деталей перхлорэтилена C_2Cl_4 , а для деталей из стали 03X18H12 – такие же ионы Cl^- трихлорэтилена C_2HCl_3 . В качестве анода выступил моющий хлорорганический раствор, в качестве катода – заготовка, а катализатором ионного обмена стала строительная пыль, включающая оксиды кремния, магния, кальция, алюминия, железа и некоторых других химических элементов [12].

В жидкой среде более электроотрицательные относительно материала деталей частицы пыли образовали с ним разность потенциалов, которая и стала причиной коррозионных повреждений. По сути, произошло электрохимическое растворение металлического материала, как это бывает, например, при электрохимическом шлифовании [13], когда обрабатываемая заготовка выступает в качестве анода, только это растворение в данном случае не желательно, и УЗО облегчила удаление продуктов растворения и ускорила протекающий процесс.

В то же время большая разность потенциалов как одна из основных составляющих адгезии пыли и порошков [14] также обусловила прилипание микрочастиц к поверхностям деталей и сложность их удаления при промывке, когда применяющиеся растворы не смогли удалить находящиеся на внутренних поверхностях частицы пыли. После УЗО и извлечения деталей из ультразвуковой ванны остатки использованных моющих веществ удаляются с деталей 30%-ным водным раствором химически чистой соляной кислоты HCl , поставляемой по ГОСТ 3118 [15].

Именно на этом шаге, видимо, вместе с остатками хлористой органики и были удалены с поверхностей деталей почти все пылевые загрязнения, ставшие катализатором анодного процесса. Из рис. 4 видно, что растратов от воздействия соляной кислоты в показанных стрелками местах загрязнений нет. Это означает, что поражения носят именно анодный характер, а не являются следствием чисто химического взаимодействия материала деталей с применяющимся для удаления с них остатков перхлорэтилена водным раствором азотной кислоты. В то же время большее число повреждений на внутренней поверхности деталей показывает, что они не являются браком материала, а вызваны его загрязнением, ведь в местах вогнутых поверхностей последние удаляются труднее.

В части обеспечения сквозной проверки качества получаемых деталей и изготавливаемых ЭВП в целом следует отметить, что в определяющем техническое требования к металлическим деталям ЭВП ОСТ 11 010.702 [16] не предусмотрена проверка деталей на отсутствие мелких поверхностных дефектов. Указано лишь, что детали «не должны иметь трещин, расслоения материала, коррозионных поражений, заусенцев и острых кромок, видимых невооружённым глазом», что не даёт формального основания для браковки деталей по наличию мелких повреждений.

Из изложенного следует, что угрозу коррозионного повреждения деталей ЭВП легче предупредить, чем не допустить её развития после того, как их поверхность оказалась загрязнена. А это значит, что штамповку и проведение другой обработки мелких тонкостенных деталей ЭВП следует проводить в чистых помещениях, соответствующих требованиям ГОСТ Р ИСО 14644-1.

3. ВЫВОДЫ

1. Малая конструктивная прочность и фактор формы мелких тонкостенных деталей типа «чашка» и «тарелочка» ограничивают применение для их очистки от поверхностных загрязнений химических и механических способов.

2. Отрицательный электродный потенциал составляющих строительной пыли делает опасным их осаждение на околонулевой усреднённый потенциал таких сплавов, как НММц 38-2В и 03Х18Н12, поскольку их дальнейшая ультразвуковая очистка может вызвать анодный эффект с образованием на поверхностях деталей коррозионных повреждений, которые по своей глубине могут быть сравнимы с толщиной последних.

3. При попадании на поверхности мелких тонкостенных деталей строительной пыли, глубина возникающих при их ультразвуковой очистке повреждений может оказаться сравнима с их толщиной, а потому такие повреждения несут прямую угрозу вакуумной плотности материала деталей и работоспособности готовых ЭВП.

4. Ввиду выявленной существенной сложности очистки мелких тонкостенных деталей ЭВП от загрязнений без опасности для их вакуумной плотности, целесообразна организация проведения работ по изготовлению таких деталей, включая заготовительные и штамповочные операции, в чистых помещениях с требованиями в них к пылевым загрязнениям в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14644-1.

5. До момента организации проведения работ по проведению заготовительных и штамповочных операций тонкостенных мелких деталей в соответствующих ГОСТ Р ИСО 14644-1 чистых помещениях, для обеспечения сквозной проверки качества получаемых деталей и изготавливаемых ЭВП в целом следует проводить проверку таких деталей с применением увеличительных приборов с кратностью не менее 16, хотя действующий ОСТ 11 010.702 предусматривает только визуальный их контроль.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каблов, Е. Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Авиационные материалы и технологии: [электрон. науч.-технич. журн.]. – 2015. – № 1. – С. 1. – URL: <http://www.journal.viam.ru>.

2. **Яе0.021.070 ТУ.** Лента из сплава марки НММц 38-2В вакуумной плавки. Технические условия. – М: п/я 4315, ОЗТМиТС, 1986. – 10 с.

3. **ГОСТ 5632–2014.** Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: Стандартинформ, 2017. – 54 с.

4. Технология производства электровакуумных приборов: термовакuumная обработка. Экспериментальное сопровождение технологического процесса: учебное пособие / под ред. И. П. Ли, Ю. В. Панфилова. – М.: Издательство МГТУ им. М.Э. Баумана, 2022. – 119 с.

5. **ОСТ 11 010.702–82.** Детали металлические приборов СВЧ. Технические требования: вступил в действие с 01.01.1983. – М.: ГР № 8256007, 1982. – 16 с.

6. **ГОСТ Р 57835–2017.** Перхлорэтилен регенерированный. Классификация и общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

7. **ГОСТ Р ИСО 14644-1–2017.** Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. – М.: Стандартинформ, 2017. – 35 с.

8. **Иванов, М. Г.** Свойства металлов: учебное издание / М. Г. Иванов, А. В. Нечаев. – Екатеринбург: информационный портал УРФУ. – 168 с. – <http://www.ustu.ru>.
9. Химия / перевод с немецкого к.х.н. В. А. Молочко, С. В. Крынкиной. – М.: Химия, 1989. – 648 с.
10. **ГОСТ Р ИСО 22309–2015.** Государственная система обеспечения единства измерений. Микроанализ электронно-зондовый. Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше. – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
11. **Ангал, Р.** Коррозия и защита от коррозии / Р. Ангал. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2014. – 344 с.
12. **Колокольников, В. С.** Производство цемента: учебное пособие для рабочих / В. С. Колокольников. – М.: Высшая школа, 1967. – 303 с.
13. **Маслов, Е. Н.** Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 332 с.
14. **Зимон, А. Д.** Адгезия пыли и порошков / А. Д. Зимон. – изд. 2-е, пер. и доп. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
15. **ГОСТ 3118–77.** Реактивы. Кислота соляная. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 15 с.
16. **ГОСТ 9976–94.** Трихлорэтилен технический. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 15 с.

Статья поступила 15 ноября 2023 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

БЕЛОУС, А. И. Корпусирование микросхем. Технологии, конструкции, оборудование. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 558 с.

В книге представлены систематизированные результаты детального анализа современного состояния и тенденций развития технологий корпусирования (сборки) микросхем, полупроводниковых приборов, силовых модулей и систем в корпусе.

Впервые в отечественной научно-технической печати подробно изложены теоретические основы методов прецизионного измерения одного из важнейших контролируемых параметров микросхем – теплового сопротивления, представлено описание основных экспериментальных методов его измерения, описаны концепции, методы, инструменты и оборудование для калибровки испытываемых устройств в диапазоне температур.

УДК 621.396.966.9

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРИТОВОГО МАТЕРИАЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ LTCC ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР И СВЧ-РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

**А. Н. Пашков, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев, Д. Н. Полозов,
Ю. И. Тодосечук, П. Г. Петров**

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

М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Представлены результаты разработки ферритового материала на основе технологии LTCC для изготовления многослойных структур с применением их в качестве СВЧ-развязывающих устройств. Выявлены основные задачи, требующие решения для улучшения параметров ферритового материала и его технологичности с целью применения в LTCC-конструкциях многослойных керамических плат изделий АФАР, показаны основные способы их решения.

КС: ферритовый материал LTCC, литий-цинковая шпинель, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика, многослойная ферритовая структура, многослойная керамическая плата для изделий АФАР, металлическая теплопроводящая паста

SOME FEATURES OF LTCC FERRITE MATERIAL PRODUCTION FOR MANUFACTURING MULTILAYER STRUCTURES AND MICROWAVE DECOUPLING DEVICES BASED ON THEM

**A. N. Pashkov, A. G. Nalogin, A. A. Alekseev, D. N. Polozov,
Yu. I. Todosechuk, P. G. Petrov**

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

M. P. Parkhomenko, D. S. Kalyonov

FIRE named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The results of the developing a ferrite material based on the LTCC technology for manufacturing multilayer structures using them as microwave decoupling devices are presented. The main tasks that need to be solved to improve the parameters of the ferrite material and its manufacturability for use in LTCC designs of multilayer ceramic boards of AESA products are identified, and the main ways to solve them are shown.

Keywords: LTCC ferrite material, lithium-zinc spinel, low-temperature co-fired ceramic, multilayer ferrite structure, multilayer ceramic board for AESA product, metal heat-conducting paste

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) в настоящее время быстро развивается и успешно применяется при создании СВЧ-модулей [1, 2]. Модуль, изго-

товленный по технологии LTCC, представляет собой объёмную слоистую структуру, где каждый слой несет в себе определенную функциональную нагрузку. Каждый отдельный слой в LTCC-подложке может иметь определенные толщину и электромагнитные характеристики, что позволяет реализовывать функциональное назначение каждого слоя LTCC-подложки. В частности, один из слоев может быть на основе ферритового материала. На сегодняшний день в России отсутствуют технологии изготовления LTCC ферритовых СВЧ-структур [3].

Данная работа описывает основные технологические особенности производства ферритовых материалов LTCC, выявлены и поставлены основные задачи, решение которых позволит существенно повысить технологичность изготовления ферритовых LTCC-структур и функциональные параметры материалов для их использования в изделиях ППМ АФАР.

2. ОБЗОР ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ LTCC

Технология изготовления LTCC многослойных плат широко известна в мировом сообществе производства электронных компонентов. Одной из важных задач для авиакосмической отрасли является миниатюризация ЭКБ СВЧ. Технология LTCC при производстве ЭКБ позволяет повысить надежность, значительно уменьшить размер, массу и стоимость аппаратуры и спутника в целом.

Данное технологическое направление включает в себя производство гибкой «сырой» керамической пленки и изготовление многослойных плат на ее основе. Указанными технологическими компетенциями владеет АО «НПП «Исток» им. Шокина», что позволяет выпускать широкую номенклатуру изделий многослойных керамических плат для ППМ АФАР [4, 5]. Дальнейшая перспектива развития ферритового направления неразрывно связана с производством ферритовых гибких пленок, из которых возможно создание развязывающих СВЧ-приборов внутри многослойных структур, что в свою очередь позволит миниатюризировать модули, повысить их надежность и улучшить параметры, освободить полезную площадь на поверхности многослойных керамических плат.

Разработки по изготовлению ферритовой пленки были проведены американской компанией Ferro, и получена ферритовая пленка марки ESL 40012 [6], которая обладает намагниченностью насыщения 0,4 Тл и диэлектрической проницаемостью 14,6. Европейскими учеными был проведен ряд исследований, включая рентгеноструктурный анализ [7, 8], в ходе которого исследовалось влияние температуры спекания на структуру LTCC-феррита, результаты представлены на рис. 1.

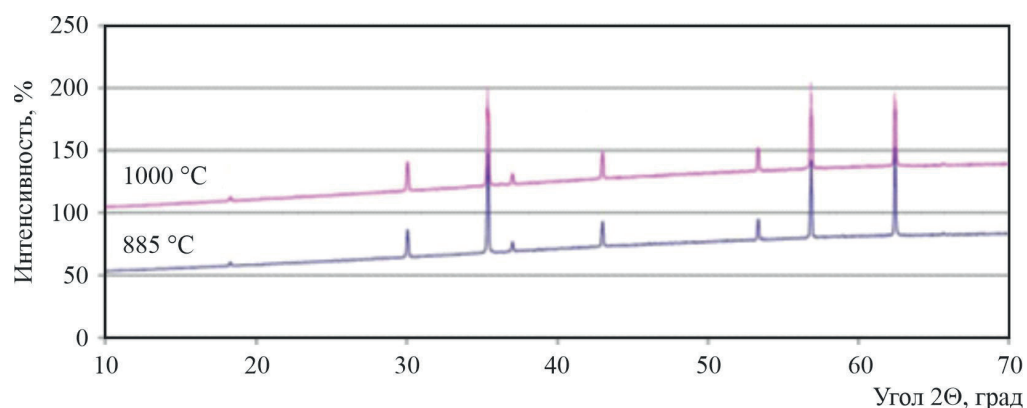


Рис. 1. Рентгеноструктурный анализ ферритового материала ESL 40012 при различных температурах спекания

В ходе данного исследования выяснили, что структура никелевой шпинели феррита после обжига сохраняется как при 885 °С, так и при 1000 °С.

В Университете прикладных наук совместно с кафедрой SciTec был разработан ферритовый композиционный материал на основе LTCC-феррита Ni–Cu–Zn [9]. Толщина сырой ленты Ni–Cu–Zn составляла 100 мкм. Сырые ферритовые ленты NiZn100 были поочередно сложены, заламинированы и совместно спечены в течение 2 ч при температуре 900 °С.

Известны работы о полученных ферритовых ленточных слоях, изготовленных по технологии LTCC, на основе феррита Mn–Zn марки N-27 [10]. Для создания ферритовых лент подготовили ферритовую шихту N-27 с добавлением в неё 0,5 %(масс.) специального стекла BBSZ (Bi₂O₃–B₂O₃–SiO₂–ZnO). Ферритизация шихты происходила при температуре 900 °С в течение нескольких часов. Толщина одной ленты составила 60 мкм. Композиция, состоящая из 4-х ферритовых лент, спрессована при температуре 75 °С под давлением 25 МПа. Завершающим этапом является спекание композита при температуре 900 °С в течение 8 ч. После спекания структура марганцевой шпинели сохранилась. Сводные характеристики вышеуказанных ферритовых материалов LTCC приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ферритовых материалов LTCC

Параметр, единица измерения	Марка ферритовой ленты LTCC		
	ESL 40012	Ni–Cu–Zn	N-27 Mn–Zn
Температура спекания, °С	885	900	900
КТЛР·10 ⁻⁶ , °С ⁻¹	11	10,1	10,8
Структура материала	Шпинель	Шпинель	Шпинель

Информация об отечественных разработках ферритовых материалов LTCC отсутствует.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ LTCC

Для ферритовых развязывающих приборов (ФРП) микрополоскового исполнения в качестве материала подложки в основном применяют иттриевые феррогранаты, литиевые и никелевые феррошпинели. Как правило, феррогранаты применяются в ФРП в диапазоне сантиметровых длин волн, а феррошпинели – в приборах миллиметрового диапазона благодаря их высокой намагниченности насыщения. В рамках работы для исследований представляет интерес литиевая феррошпинель, обладающая самой низкой температурой спекания (≤ 1075 °С) по сравнению с феррогранатами (≤ 1525 °С) и никелевыми феррошпинелями (≤ 1360 °С). Поликристаллические литиевые феррошпинели получают по керамической технологии, а затем из этого материала изготавливают подложки [11]. Литиевые феррошпинели обладают широким диапазоном намагниченностей насыщения, высокой термостабильностью благодаря высокой температуре Кюри, низкими СВЧ-потерями, прямоугольной петлей гистерезиса, высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости (по сравнению с никелевыми феррошпинелями).

Для изготовления макета ферритовой многослойной структуры LTCC в АО «НПП «Исток» им. Шокина» был выбран в качестве перспективного материала подложки состав из литиевой

феррошпинели марки ЛЦ-380 (ТС0.734.002 ТУ). Феррит ЛЦ-380 обладает температурой спекания $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, тангенсом угла суммарных потерь $\leq 1 \cdot 10^{-3}$, относительной диэлектрической проницаемостью 15,4 и намагниченностью насыщения 380 кА/м [12]. Высокая намагниченность насыщения позволит рассчитать конструкцию макета ФРП с рабочим диапазоном частот $30 \dots 40\text{ ГГц}$, который будет разработан на основе феррита ЛЦ-380, изготовленного по LTCC-технологии.

Технология изготовления ферритовой шихты включает в себя ряд ключевых операций для обеспечения требуемых свойств (размер частиц, однородность структуры материала, электромагнитные параметры): мокрое смешивание исходных компонентов, предварительный обжиг (ферритизация) шихты и мокрый размол шихты. Подробная технологическая цепочка изготовления ферритовой шихты приведена на рис. 2.

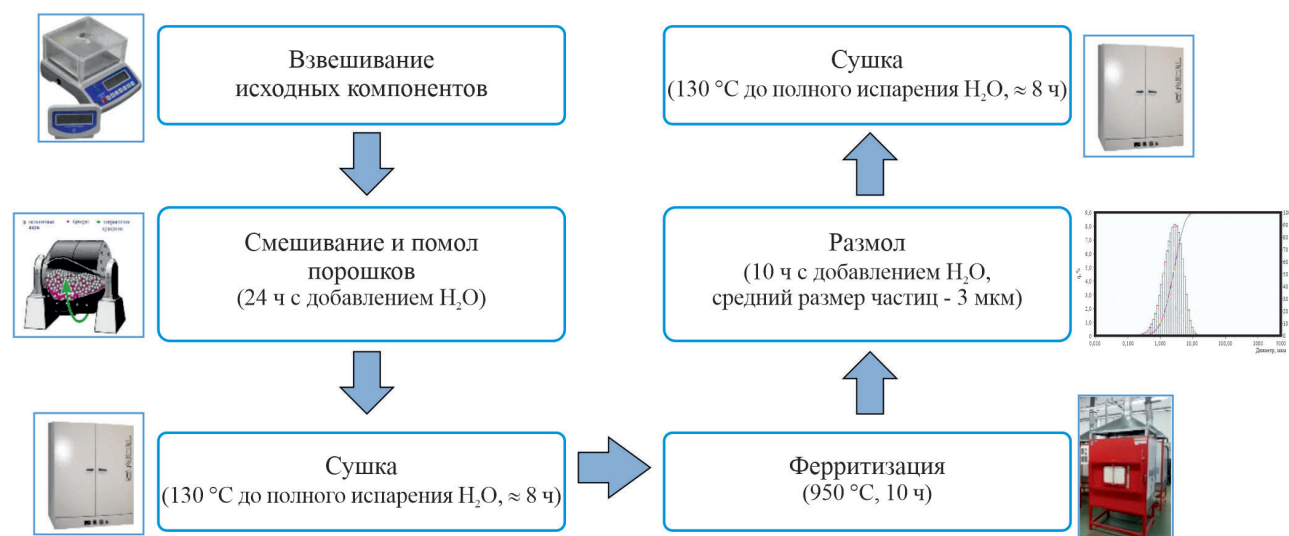


Рис. 2. Технологическая цепочка изготовления ферритовой шихты для получения феррита LTCC

Взвешивание исходных компонентов в требуемых количествах, % (масс.): Li_2CO_3 – 6,04; ZnO – 7,06; Fe_2O_3 – 79,21; MnCO_3 – 7,49; Bi_2O_3 – 0,2, позволяет получить однофазную структуру литиевой шпинели ЛЦ-380, которая образуется в ходе процесса ферритизации [13]. Температура процесса ферритизации и длительность выдержки были повышены по сравнению с обычной технологией с целью получения полностью ферритизированной шихты, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. При изготовлении ферритов по LTCC-технологии важно получить полностью ферритизированную шихту, т. к. из-за низких температур и длительности спекания (до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ вместо $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$) при LTCC-технологии в ферритовом материале не сформируются необходимые электрические и магнитные параметры. Размол ферритизированной массы на шаровой мельнице позволяет получить однородную мелкодисперсную шихту со средним размером частиц 3 мкм, что также влияет на температуры спекания и усадку феррита.

Размер частиц шихты после размола определялся на лазерном дифракционном анализаторе гранулометрического состава частиц HORIBA LA-960. Средний размер частиц шихты ЛЦ-380 после размола составил 3 мкм, а 90 % частиц имели размер не более 7 мкм (рис. 3).

Следующим этапом изготавливался шликер для отливки ферритовой ленты (рис. 4). Для его изготовления был разработан состав со связующим веществом (на основе поливинилбутирала,

ДОС, МЭК) с добавлением растворителя. Шликер изготавливался в двух вариациях: с добавлением боросиликатного стекла и без него.

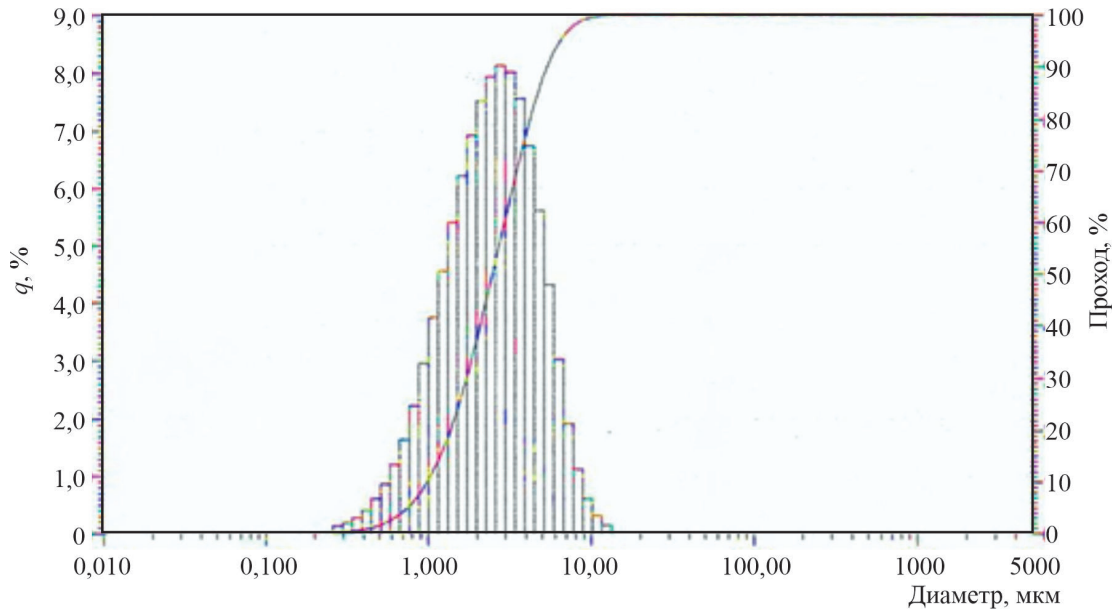


Рис. 3. График распределения размеров частиц шихты феррита ЛЦ-380

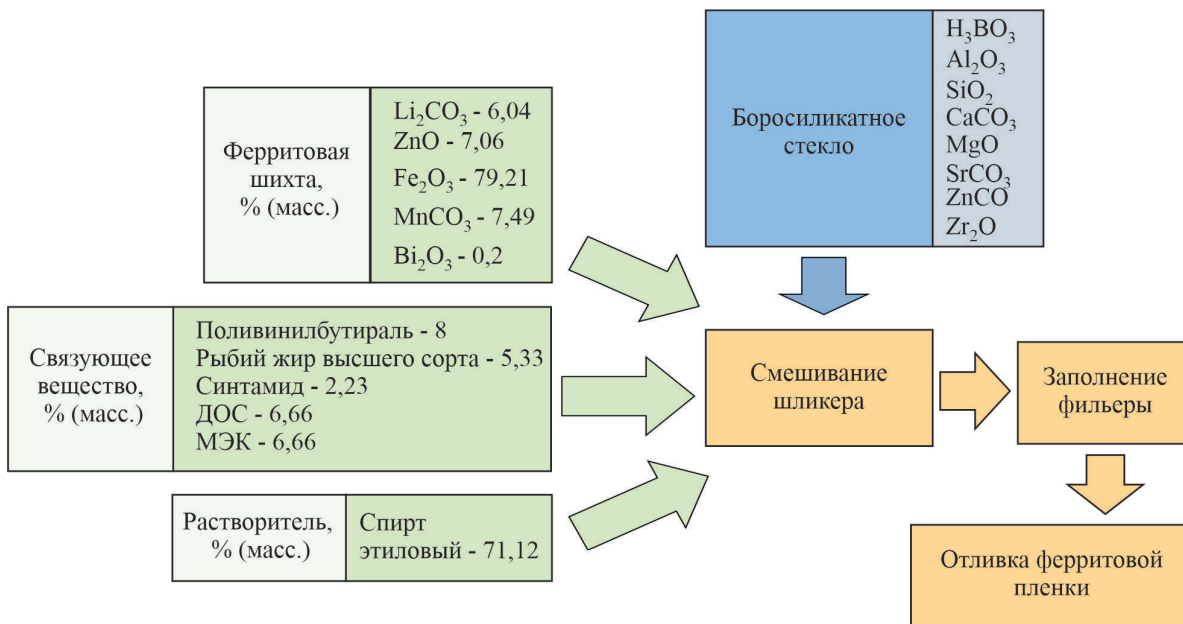


Рис. 4. Схема приготовления шликера из ферритовой шихты

По результатам отливки пленки и серии термических операций спекания опытных образцов были проведены рентгеноструктурные и рентгенофазовые исследования на дифрактометре ДРОН-8 с применением CoK_α-излучения, которые показали наличие примесных фаз в материале с добавлением боросиликатного стекла и разложением исходной структуры литиевой шпинели (результаты приведены на рис. 5).

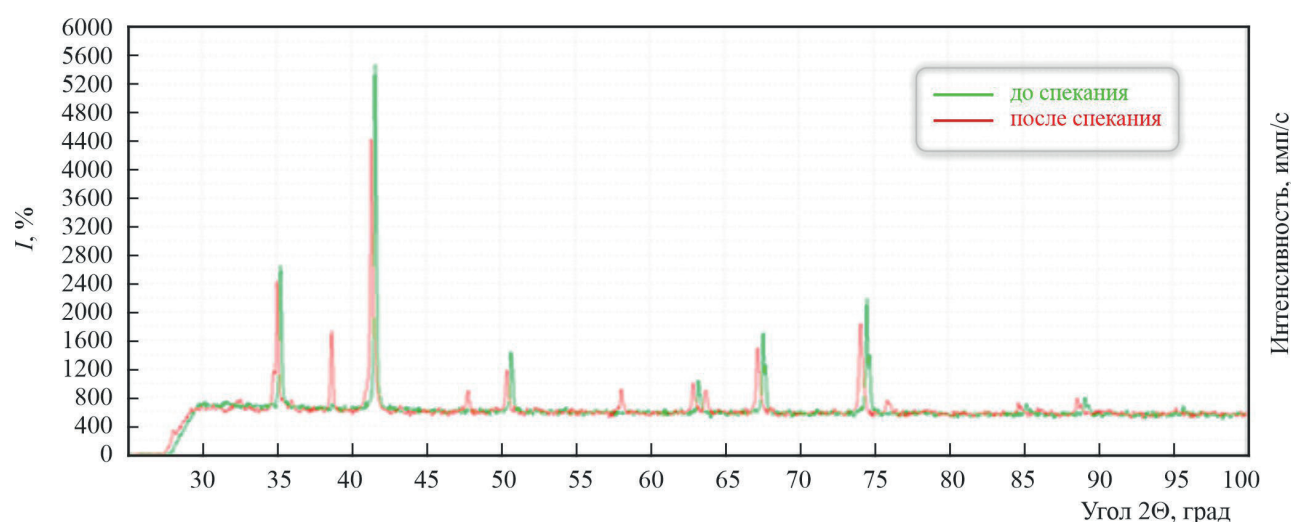


Рис. 5. Дифрактограммы ферритовых образцов с добавлением боросиликатного стекла до спекания (зеленая) и после (красная)

Из рис. 6 видно, что происходит разложение ферритовой фазы литиевой шпинели при взаимодействии с боросиликатным стеклом* на фазы гематита и магнетита.

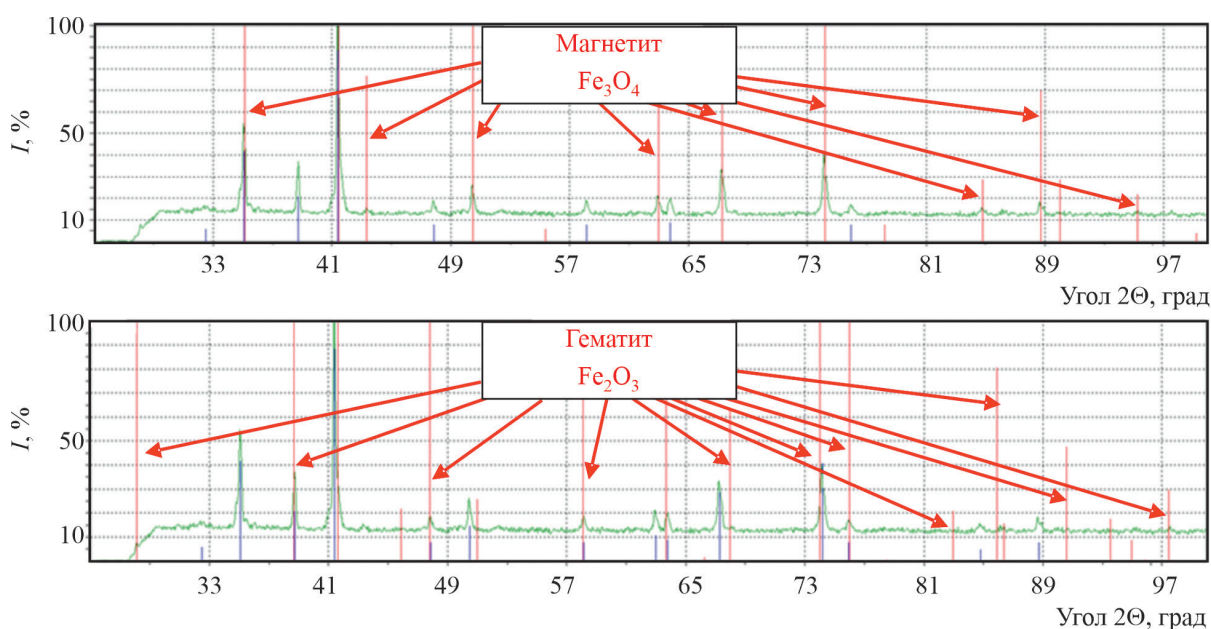


Рис. 6. Дифрактограммы ферритового образца с добавлением боросиликатного стекла после спекания с выделением фаз

Проведенные металлографические исследования подтвердили взаимодействие боросиликатного стекла с ферритовым образцом с последующим разложением структуры материала феррита (рис. 7, а), выделением прожилок стекла и инородных фаз (рис. 7, б).

*Боросиликатное стекло имеет аморфную структуру, что не позволяет его идентифицировать на дифрактограмме.

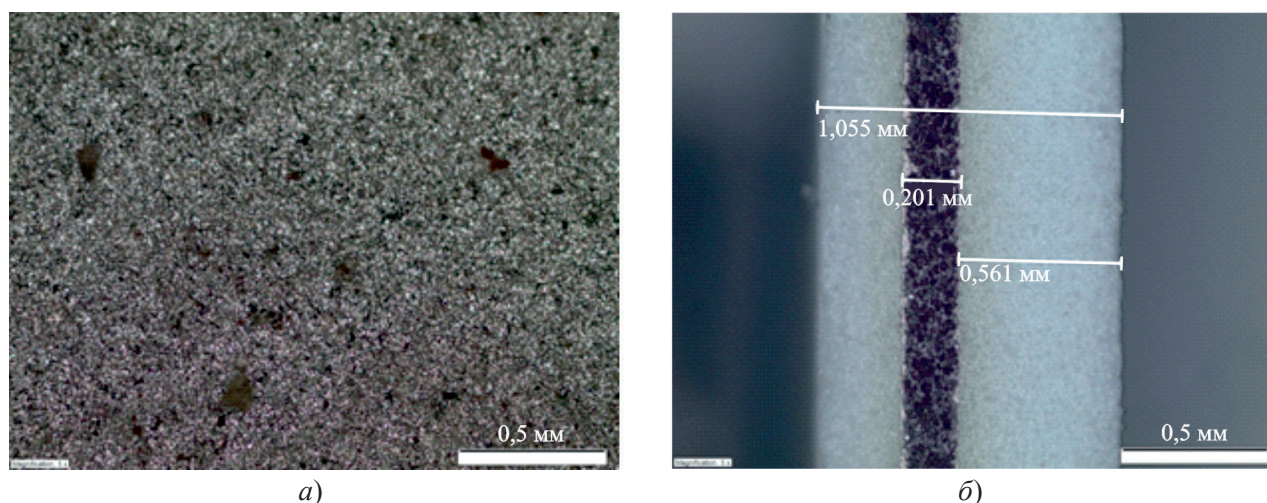


Рис. 7. Микроструктура ферритового образца с добавлением боросиликатного стекла после спекания (а) и сечение многослойного образца после спекания керамики с внедренным промежуточным слоем феррита (б)

Проведенные исследования ферритовых образцов без добавления боросиликатного стекла показали (рис. 8) целостность структуры литиевой шпинели после термических операций (спекания), однако температура спекания образца была значительно выше (1050 °С), чем применяемая в технологиях LTCC (до 900 °С).

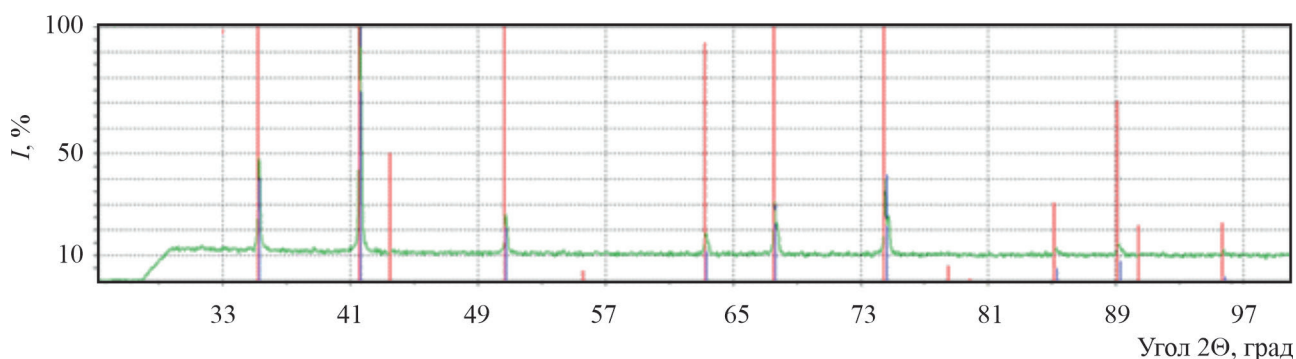


Рис. 8. Дифрактограммы ферритового образца без добавления боросиликатного стекла после спекания (структура литий-цинковой шпинели $\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$)

Дальнейшие совершенствования структуры материала связаны с введением в него легкоплавких добавок (Bi_2O_3) с целью снижения температуры спекания материала до 885 °С. В табл. 2 представлены разработанные составы феррита LTCC с различным содержанием Bi_2O_3 (от 3 до 5 % (масс.)) и разным временем выдержки при спекании (до 4 ч), $T = 885$ °С. Для дальнейших исследований и разработок был определен состав (образец № 5, табл. 2), который имеет целостную структуру литий-цинковой шпинели при 2-часовой выдержке и в котором присутствует фаза Bi_2O_3 . Готовый образец из ферритовых ленточных слоев марки ЛЦ-380 + 3% Bi_2O_3 с выдержкой в печи 2 ч представлен на рис. 9.

Таблица 2

**Структуры и фазы, выявленные
в разных составах ферритовых образцов ЛТСС**

Номер образца	Состав ферритового образца ЛТСС	Структура	Фаза	Сингония
1	ЛЦ-380 (до спекания)	$\text{Li}_x\text{Zn}_y\text{Fe}_{3-x-y}\text{O}_4$ (феррит, литий-цинковая шпинель)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая
			Fe_2O_3	Тригональная
2	ЛЦ-380 (после спекания)		$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая
			Fe_2O_3	Тригональная
3	ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (до спекания)		$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая
			Fe_2O_3	Тригональная
			Bi_2O_3	Кубическая
4	ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (20 мин)		$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая
			Fe_2O_3	Тригональная
		Bi_2O_3	Ромбическая	
5	ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (2 ч)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая	
		Bi_2O_3	Ромбическая	
6	ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (4 ч)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая	
		Fe_2O_3	Тригональная	
		$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$	Ромбическая	
7	ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (до спекания)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая	
		Fe_2O_3	Тригональная	
		Bi_2O_3	Кубическая	
8	ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (20 мин)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая	
		Fe_2O_3	Тригональная	
		$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$	Ромбическая	
9	ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (4 ч)	$\text{Li}_{0,25}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	Кубическая	
		$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$	Ромбическая	

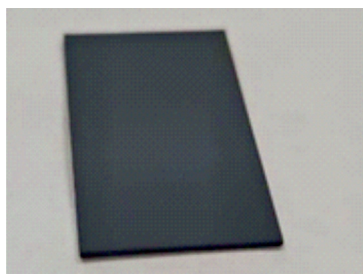


Рис. 9. Многослойный образец феррита ЛТСС марки ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (выдержка – 2 ч)

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Измерение электромагнитных параметров полученных ферритовых ЛТСС-образцов проводилось резонаторным методом №667-RA.RU.311243-2019. Методика измерений электромагнит-

ных параметров материалов с малыми потерями резонаторным методом предназначена для измерений действительной части диэлектрической проницаемости ϵ_1 , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta_\epsilon$, действительной части магнитной проницаемости μ_1 , тангенса угла магнитных потерь $\operatorname{tg}\delta_\mu$ ферритов и диэлектриков [14].

В роли непосредственно измеряемых величин в резонаторных измерительных установках выступают резонансная частота, добротность, а также коэффициент отражения. Наиболее просто связь между измеряемыми величинами и параметрами материала находится с помощью метода малых возмущений. Этот метод позволяет найти связь между изменением резонансной частоты и добротности при внесении в полость резонатора образца и электромагнитными параметрами материала этого образца. Формулы (1) для определения действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 составляющих комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2$ исследуемого материала записываются [15] в виде:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= 1 + \frac{f_0 - f}{f} \frac{V}{2\Delta V}, \\ \epsilon_2 &= \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{4\Delta V}.\end{aligned}\quad (1)$$

Составляющие μ_1 и μ_2 комплексной магнитной проницаемости $\mu = \mu_1 - j\mu_2$ находятся по формулам:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 1 + \frac{f_0 - f}{f} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_0} \right)^2 \frac{V}{\Delta V}, \\ \mu_2 &= \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_0} \right)^2 \frac{V}{2\Delta V},\end{aligned}\quad (2)$$

где f_0 и f – это резонансные частоты резонатора без образца и с образцом; Q_0 и Q – собственные добротности резонатора без образца и с образцом; λ_0 и λ_w – это длины волн в свободном пространстве и в волноводе резонатора с воздушным заполнением на резонансной частоте f_0 резонатора (т. е. без возмущающего тела); V – объём резонатора; ΔV – объём образца. При выводе этих соотношений делается ряд предположений, главные из которых следующие: внесенный в резонатор образец диэлектрика не искажает существенно структуру поля в нём и имеет объём, значительно меньший, чем объём самого резонатора.

Все образцы для измерения параметров изготавливались в виде стержней с поперечными размерами $0,55 \times 0,55$ мм. Измерения электромагнитных параметров образцов ферритов LTCC проводились на частоте 30 ГГц, параметры приведены в табл. 3.

Данные, полученные в ходе проведения исследований диэлектрических параметров ферритовых образцов, позволяют определить дальнейшие направления разработки при оптимизации технологии изготовления ферритовых материалов LTCC. Таким образом, наилучшим составом, обладающим целостностью структуры литий-цинковой шпинели, приближенными к стандартным значениями электромагнитных параметров (ϵ , $\operatorname{tg}\delta_\epsilon$, μ , $\operatorname{tg}\delta_\mu$), является состав ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 при температуре спекания 885°C с выдержкой 2 ч.

Таблица 3

**Параметры образцов ферритов ЛТСС,
полученные резонаторным методом**

Марка	ϵ'	$\text{tg } \delta_{\epsilon}$	μ'	$\text{tg } \delta_{\mu}$
ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (20 мин)	8,02	$6,1 \cdot 10^{-3}$	0,96	$6,7 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (1 ч)	11,25	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,94	$7,2 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (2 ч)	14,72	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,95	$5,5 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380+3% Bi_2O_3 (4 ч)	14,43	$1,5 \cdot 10^{-3}$	–	–
ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (20 мин)	8,29	$3,5 \cdot 10^{-3}$	–	–
ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (1 ч)	10,58	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,94	$6,9 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (2 ч)	14,48	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,91	$5,3 \cdot 10^{-4}$
ЛЦ-380+5% Bi_2O_3 (4 ч)	14,49	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,91	$5,3 \cdot 10^{-4}$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлено взаимодействие феррита со структурой шпинели с боросиликатным стеклом, которое является основным компонентом при изготовлении многослойных керамических плат ЛТСС. Вследствие такого взаимодействия происходит распад структуры шпинели на магнетит и гематит, что не позволяет использовать и применять при конструировании требуемые структуры. Для применения структур феррита на основе литий-цинковой шпинели в составе многослойных керамических плат требуется применение буферных слоев, инертных к взаимодействию с обеими структурами.

В ходе проведения работы в АО «НПП «Исток» им. Шокина» была создана экспериментальная технология получения ферритовых многослойных материалов ЛТСС на основе литий-цинковой шпинели. Добавление 3 % Bi_2O_3 в состав литий-цинковой шпинели позволило снизить температуру спекания материала с 1050 до 885 °С при сохранении основных электромагнитных параметров ($\epsilon' = 14,72 \pm 0,88$; $\text{tg } \delta_{\epsilon} = 1,3 \cdot 10^{-3} \pm 0,33 \cdot 10^{-3}$; $\mu' = 0,95 \pm 0,14$; $\text{tg } \delta_{\mu} = 5,5 \cdot 10^{-4} \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев, М. С. Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ-энергии и НЧ-сигналов управления и электропитания / М. С. Карасев, В. А. Жерновенков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3 (530). – С. 71 – 80.
2. Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, В. А. Жерновенков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 3 (532). – С. 45 – 48.
3. Разработка микро- и нанодисперсных ферритовых композиционных материалов и технологий их производства для ленточных носителей ЛТСС-подложек и исследование их свойств для создания функциональных ферритовых элементов, встраиваемых в объемные многослойные СВЧ-структуры в обеспечение НИР «Лента ЛТСС»: отчет о НИР / АО «НПП «Исток» им. Шокина»: исполн. А. Н. Пашков, А. Г. Налогин, В. В. Демшевский [и др.]. – Фрязино, 2021. – 539 с. – № 13-93264.

4. Высокоизбирательный малогабаритный СВЧ-модуль в керамике LTCC с применением монтажа «flip-chip» / А. П. Гусев, А. В. Павлов, С. Г. Павлова [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 45 – 55.
5. **Ляпин, Л. В.** Низкотемпературная керамика в технологии изготовления многослойных керамических плат LTCC / Л. В. Ляпин, А. В. Осипов, А. Г. Далингер // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (535). – С. 28 – 43.
6. Low temperature electronics and low temperature cofired ceramic based electronic devices // Joint Proceedings of the Seventh International Symposium on Low Temperature Electronics and the International Symposium on Low Temperature Cofired Ceramic Based Electronic Devices / Editors: C. L. Claeys, W. Wong-Ng, K. M. Nair. – 2003. – Vol. 2.
7. Modeling and characterization of frequency and temperature variation of complex permeability of ferrite LTCC material / N. Blaž, A. Marić, G. Radosavljević [et al.] // Progress in Electromagnetics Research B. – 2010. – Vol. 23.
8. Characterization and binder burnout studies of ferrite LTCC tapes / Manuela Franz, Kostja Makarovič, Sigrid Lüftl // Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2013.
9. **Torsten Rabe.** Integration of Ni–Cu–Zn ferrite in low temperature cofired ceramics (LTCC) modules / Torsten Rabe, Hamid Naghib-zadeh and Carsten Glitzky / Division 5.4 «Advanced Ceramics». – Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany, 2011.
10. **Hamid Naghib-zadeh.** Integration of Mn Zn-ferrite tapes in LTCC multilayer/ Hamid Naghib-zadeh, Torsten Rabe, Roman Karmazin. – Received: 9 November 2012 /Accepted: 22 February 2013.
11. **Налогин, А. Г.** Некоторые особенности изготовления СВЧ микрополосковых ферритовых приборов на подложках из литиевой шпинели / А. Г. Налогин, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 63 – 69.
12. **ТС0.734.002 ТУ.** Подложки из феррошпинелей для микросхем. – Введен 1984-13-09 (с изм. 8 от 2022-24-10).
13. **Пат. 2420821 Российская Федерация** / А. Г. Налогин, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина. – Заявлено 05.05.2010; опубл. 10.06.2011.
14. **№ 667-RA.RU.311243-2019.** Резонаторная методика для измерения электромагнитных параметров материалов с малыми потерями.
15. **Пархоменко, М. П.** Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне волн / М. П. Пархоменко, Ю. Ф. Абакумов, Д. С. Калёнов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. 2 (517). – С. 16 – 30.

Статья поступила 7 ноября 2023 г.

УДК 621.396.966.9

МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ФЕРРИТОВЫЙ LTCC РАЗВЯЗЫВАЮЩИЙ ПРИБОР Ka-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

А. Г. Налогин, А. Н. Пашков, А. А. Алексеев, Д. Н. Полозов,
А. В. Цыберт, Ю. И. Тодосечук, П. Г. Петров, В. В. Демшевский

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

Представлены результаты разработки развязывающего СВЧ-прибора, изготовленного на ферритовом LTCC-материале, технологические особенности его производства, определено влияние топологических дефектов на параметры прибора. Выявлены основные задачи, требующие решения для улучшения СВЧ-параметров и технологичности производства ферритовых приборов в LTCC-исполнении, показаны основные способы их решения.

КС: ферритовый LTCC развязывающий СВЧ-прибор, ферритовые LTCC вентиль и циркулятор, ферритовый LTCC-материал, литий-цинковая шпинель, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика, многослойная ферритовая структура, многослойная керамическая плата для изделий АФАР, металлическая теплопроводящая паста

MICROSTRIP FERRITE LTCC DECOUPLING MICROWAVE DEVICE OF Ka-FREQUENCY RANGE

A. G. Nalogin, A. N. Pashkov, A. A. Alekseev, D. N. Polozov,
A. V. Tsybert, Yu. I. Todosechuk, P. G. Petrov, V. V. Demshevsky

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

The results of the development of a decoupling microwave device made on ferrite LTCC material are presented, the technological features of production are presented, and the influence of topological defects on the parameters of the device is determined. The main tasks that need to be solved to improve the microwave parameters of ferrite devices, their manufacturability for use in LTCC designs, and the main ways to solve them are shown.

Keywords: ferrite LTCC decoupling microwave device, ferrite LTCC isolator and circulator, ferrite LTCC material, lithium-zinc spinel, low-temperature co-fired ceramic, multilayer ferrite structure, multilayer ceramic board for AESA, metal heat-conducting paste

1. ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование и разработка современных радиоэлектронных систем, отвечающих повышающимся с каждым днем требованиям, связаны с двумя основными тенденциями:

- миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры;
- разработка новых функциональных материалов, применение которых позволит улучшить характеристики изделий.

Технология LTCC (*low-temperature co-fired ceramics* – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика) позволяет снизить массогабаритные характеристики радиоэлектронной аппаратуры за счет повышения степени интеграции межкомпонентных соединений, а также имеет высокие показатели экономической эффективности [1].

Однако дальнейшая миниатюризация направлена на интеграцию в объемные ЛТСС-структуры более сложных элементов, таких, как, ферритовые вентили и циркуляторы, ферритовые фильтры и др. Решение этой задачи имеет ряд особенностей, которые связаны как с технологией изготовления ферритового материала ЛТСС, так и с его согласованием с керамикой ЛТСС. На сегодняшний день в России отсутствуют технологии изготовления ЛТСС ферритовых СВЧ-структур, однако за рубежом имеются разработки в области изготовления и ферритовых материалов ЛТСС, и ферритовых развязывающих устройств внутри ЛТСС многослойных керамических плат.

2. ОБЗОР ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ ЛТСС

Технология ЛТСС разработана для создания высоконадежных многослойных схем и в последние годы находит применение в миниатюрных герметичных СВЧ-модулях космического назначения. Благодаря применению технологии трафаретной печати резисторов и встраиванию индуктивностей, конденсаторов и других пассивных элементов в подложку ЛТСС, появилась возможность улучшить компактность электронных компонентов.

Работа [2] Китайской академии космических технологий (China Academy of Space Technology Xi'an) посвящена проектированию и технологии изготовления ферритового Y -вентилея Ku -диапазона частот, интегрированного в ЛТСС-структуры.

Для выполнения моделирования и оптимизации вентилея применялся программный комплекс (симулятор) HFSS. По результатам моделирования, диаметр ферритового диска составил 3,8 мм для работы в Ku -полосе. Габаритные размеры вентилея – $10 \times 10 \times 0,9$ мм (рис. 1).

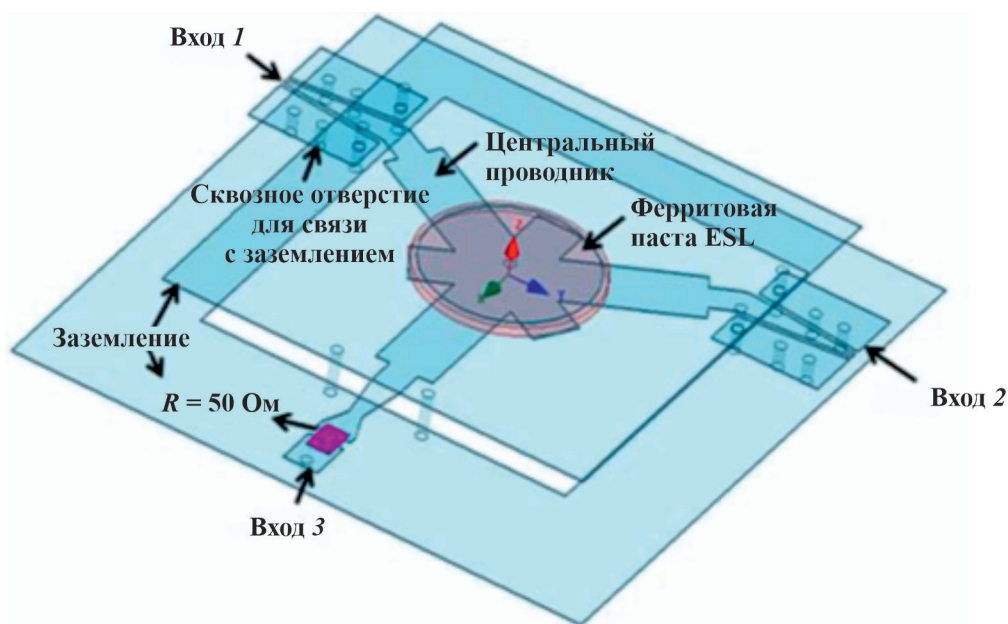


Рис. 1. Модель Y -вентилея ЛТСС Ku -диапазона частот, спроектированного Китайской академией космических технологий в программном комплексе HFSS

На рис. 2 приведены S -параметры модели вентилея. Согласно результатам проектирования, модель прибора функционирует на частоте 17,5 ГГц с прямыми потерями на уровне 1 дБ и развязкой 20 дБ.

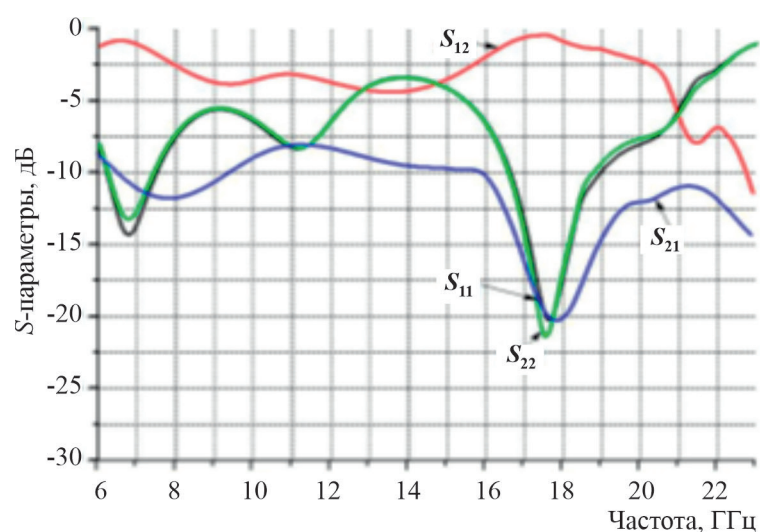


Рис. 2. S -параметры модели Y -вентилля Ku -диапазона частот, спроектированного Китайской академией космических технологий в программном комплексе HFSS

Ферритовый диск изготавливался путем заполнения отверстия в керамическом слое ферритовой пастой, полученной из растворенной ленты ESL 40012 от ESL Eletro-science, которая обладает намагниченностью насыщения 0,4 Тл и диэлектрической проницаемостью 14,6. В конструкции модуля в качестве подложки LTCC применялась керамика Ferro A6ME, состоящая из девяти слоев. Толщина каждого «сырого» слоя составляла 110 мкм, а после обжига и усадки слой имел толщину 96 мкм. Диэлектрическая проницаемость материала равна 5,9.

Функциональный слой с топологией прибора (рис. 3) выполнен по LTCC-технологии посредством трафаретной печати. На третьем плече изготовлен 50-омный резистор.

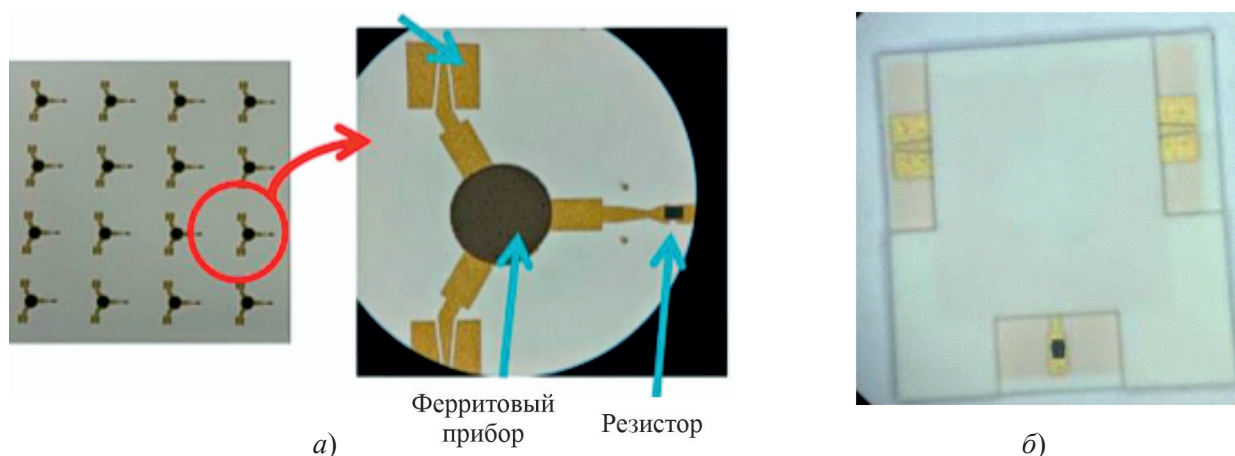


Рис. 3. Макет Y -вентилля LTCC Ku -диапазона частот:

- а* – функциональный слой с топологией прибора, полученного посредством трафаретной печати;
- б* – макет интегрированного прибора в структуру LTCC (без магнитной системы)

Далее на поверхности структуры производился монтаж магнитной системы, в которой диаметр магнита составил 6 мм. Увеличенный диаметр магнита (по сравнению с диаметром ферритового

диска) позволяет обеспечить равномерное однородное вертикальное намагничивание ферритового диска. Затем были измерены S -параметры разработанного прибора, которые приведены на рис. 4.

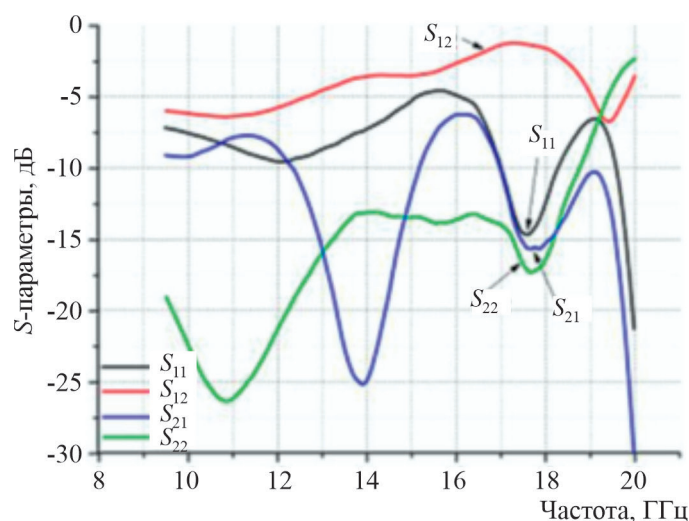


Рис. 4. Измеренные S -параметры макета Y -вентилia LTCC
Ka-диапазона частот

Измеренный макет работает на частоте 17,3 ГГц, что близко соотносится с моделью вентилia, однако прямые потери составляют около 1,5 дБ, что превышает рассчитанные значения. Это связано с рассогласованием при совместном обжиге между материалами Ferro A6M и ESL 40012. Согласно паспорту поставщика, ферритовая лента ESL 40012 спекается при 885 °C в течение 180 мин, чтобы получить плотную структуру, в то время как Ferro A6M спекается при 850 °C в течение 10 мин. Температурный режим совместного обжига всей структуры выбран на основе режима спекания Ferro A6M, при котором не происходит полного уплотнения ферритового материала, что приводит к повышенным значениям потерь. Кроме того, рассогласование усадок разных материалов (феррита и керамики LTCC) приводит к появлению поверхностных дефектов в структуре (трещины, расслоения, поры), которые также вносят дополнительные потери.

Данная работа демонстрирует перспективность и возможность разработки и изготовления ферритовых развязывающих устройств по технологии LTCC.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО СВЧ-ПРИБОРА Ka-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Топология экспериментального ферритового прибора для отработки технологии изготовления методом LTCC была выбрана на основе топологии существующего прибора – Y -циркулятора Ka-диапазона частот, изготовленного в АО «НПП «Исток» им. Шокина» по классической керамической технологии. Выполнен циркулятор на подложке из литиевой шпинели ЛЦ-380 толщиной 0,25 мм [3]. Модель Y -циркулятора и S -параметры представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Проектирование прибора осуществлялось в программном комплексе Ansys HFSS [4].

Параметры циркулятора, полученные в результате проектирования в САПР, представлены в табл. 1.

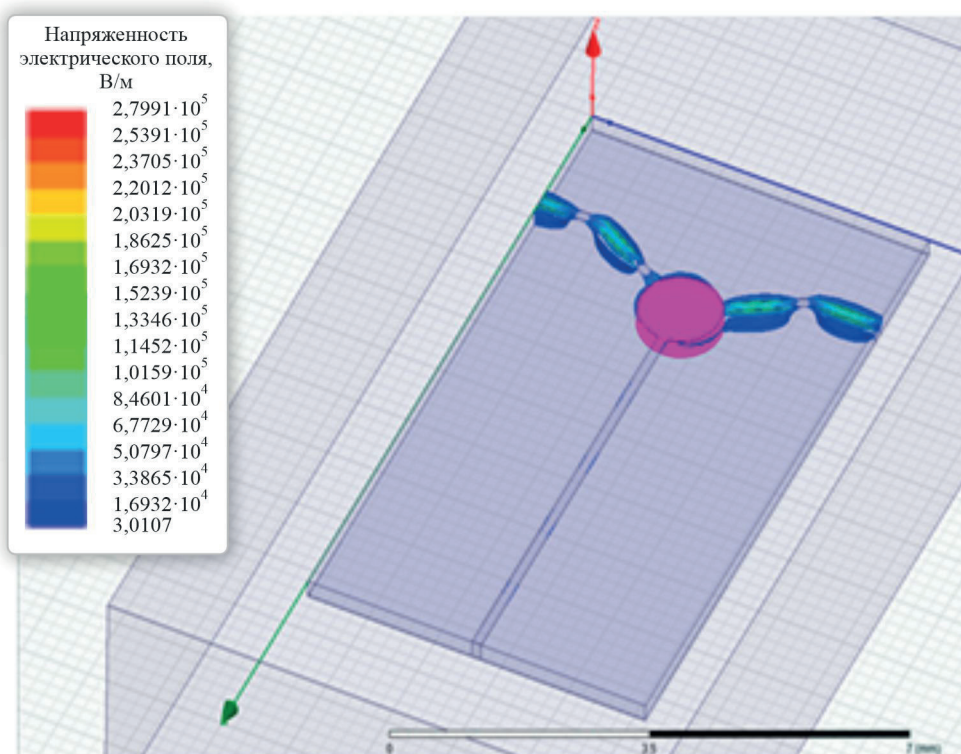


Рис. 5. Модель Y-циркулятора Ka-диапазона частот

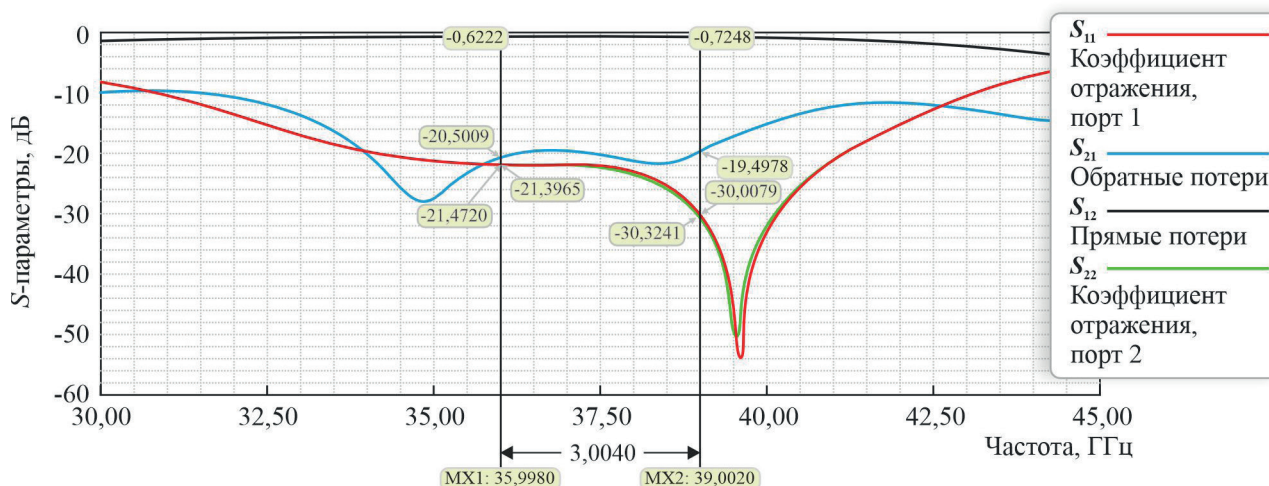


Рис. 6. S-параметры модели Y-циркулятора Ka-диапазона частот

Таблица 1

**Параметры циркулятора,
рассчитанные в программном комплексе Ansys HFSS**

Параметр, единица измерения	Буквенное обозначение	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	Δf	36...39
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	$\alpha_{пр}$	$\leq 0,75$
Развязка, дБ	α_p	≥ 19
КСВН	$K_{свУ}$	$\leq 1,22$

4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ LTCC РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО ПРИБОРА Ka-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Изготовление макета развязывающего прибора Y-типа на феррите LTCC

Для опробования работоспособности и функционирования выбранной топологии прибора на феррите LTCC необходимо было решить ряд задач:

- 1) определить возможность изготовления приборов на пленочных ферритовых структурах LTCC;
- 2) определить способ нанесения металлизации и ее качество, а также вносимые потери линий передачи;
- 3) определить способ измерения параметров приборов на тонких ферритовых структурах (толщиной 0,25 мм), изготовленных по технологии LTCC.

Также одной из проблематик при изготовлении ферритовых многослойных структур является неплоскостность подложек после спекания. Поэтому для решения задачи о возможности изготовления приборов на ферритовых структурах было решено изготовить многослойные ферритовые образцы из материала марки ЛЦ-380 с добавлением 3 % Bi_2O_3 [5, 6] по технологии LTCC с габаритами 30×24 мм и толщиной 0,6 мм (рис. 7). Из образцов впоследствии были получены подложки толщиной 0,25 мм посредством шлифовки/полировки с требуемыми параметрами шероховатости поверхности заготовки. В работе проведены измерения параметров ферритового материала LTCC: $\varepsilon = 14,72$; $\text{tg } \delta_\varepsilon = 1,3 \cdot 10^{-3}$; $\mu = 0,952$; $\text{tg } \delta_\mu = 5,5 \cdot 10^{-4}$ [5, 6].

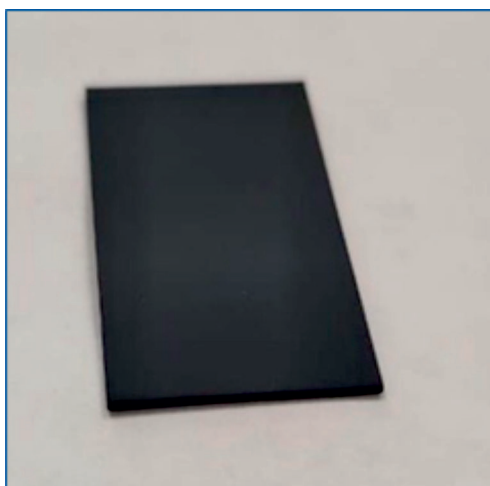


Рис. 7. Внешний вид многослойного ферритового образца из марки ЛЦ-380 с добавлением 3% Bi_2O_3 , изготовленного по технологии LTCC

Для проверки функционирования выбранной топологии прибора на феррите LTCC необходимо максимально качественно создать металлизационное покрытие, которое бы отвечало требованиям точности топологии, адгезии металлизации и соответствующим эксплуатационным характеристикам. Вышеперечисленные требования удовлетворяются при нанесении металлизации на подложку из феррита LTCC методом вакуумного резистивного напыления слоёв Cr/Cu. Точность экспонирования топологии составляет 5 мкм, что удовлетворяет требованиям модели Y-циркулятора. Далее осуществлялась сборка прибора: монтаж на субподложку, настройка и установка магнитной системы, а затем – настройка прибора в целом. Габариты и внешний вид макета Y-циркулятора с платой из многослойного LTCC-феррита представлены на рис. 8.

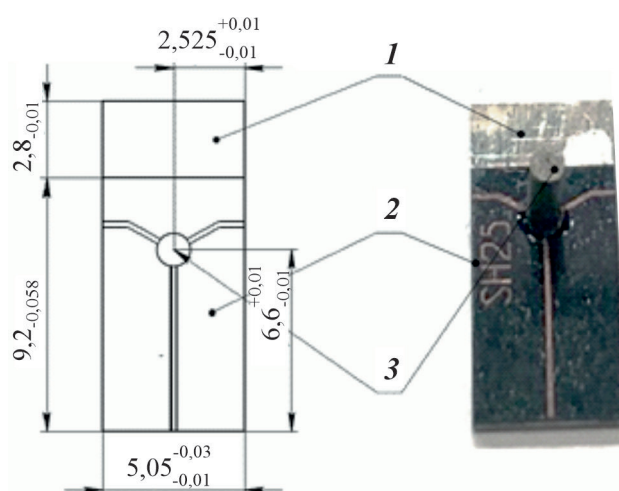
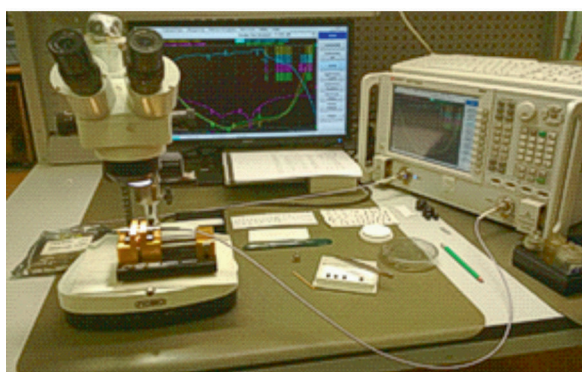


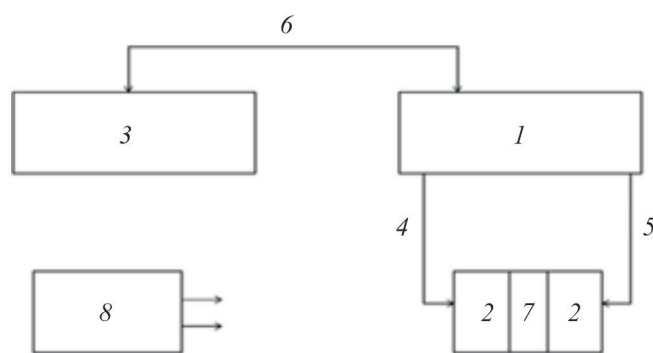
Рис. 8. Габариты и внешний вид макета Y -циркулятора Ka -диапазона частот: 1 – субподложка; 2 – плата из многослойного LTCC-феррита; 3 – магнит

Настройка Y -циркулятора Ka -диапазона частот [7, 8]

Настройка микрополосковых ферритовых развязывающих приборов (МФРП) миллиметрового диапазона длин волн осуществляется на стенде, внешний вид и структурная схема которого представлены на рис. 9. Путем корректировки положения магнита на плате производится подстройка прибора магнитным полем для обеспечения требуемых его выходных параметров.



а)



б)

Рис. 9. Внешний вид (а) и структурная схема (б) стенда для измерения параметров Y -циркулятора Ka -диапазона частот:

1 – векторный анализатор цепей; 2 – подключающее устройство Anritsu; 3 – монитор; 4, 5 – СВЧ-кабели; 6 – соединительный кабель; 7 – исследуемый прибор; 8 – камера тепла и холода UC-20CE

Далее проводилось измерение параметров макета на векторном анализаторе цепей Keysight PNA Network Analyzer N5227A с применением коаксиально-микрополоскового подключающего устройства Anritsu 3680 (рис. 10). Результатом проведённых исследований и разработок стало получение макета Y -циркулятора Ka -диапазона частот с платой из многослойного LTCC-феррита в диапазоне частот 35...40 ГГц, с рабочей полосой 5 ГГц, прямыми потерями 0,24...0,77 дБ, развязкой 20 дБ, КСВН 1,04...1,32. Представленные результаты соответствуют параметрам электро-

динамической модели (сравнение параметров – в табл. 2) и подтверждают возможность применения технологии изготовления ферритового материала по технологии LTCC в разработке ферритовых устройств в многослойных структурах.

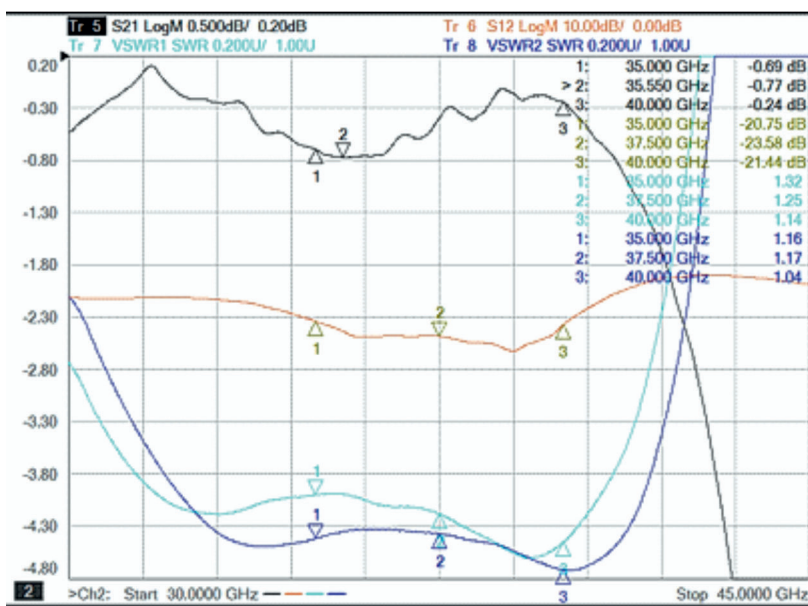


Рис. 10. Измеренные электрические параметры макета Y-циркулятора с платой из многослойного LTCC-феррита

Таблица 2

Сравнение измеренных параметров макета Y-циркулятора на плате из многослойного LTCC-феррита с параметрами модели

Параметр, единица измерения	Модель	Макет циркулятора на ферритовой плате LTCC
Технология изготовления ферритовой платы	–	LTCC
Технология нанесения металлизации	–	Вакуумное напыление
Диапазон рабочих частот, ГГц (полоса, ГГц)	36...39 (3)	35...40 (5)
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	-0,7	-0,2...-0,77
Развязка, дБ	-19	-20,7...-23,5
КСВН	< 1,22	< 1,04...1,32

Следующий шаг, который необходимо было сделать для создания структуры с полным циклом изготовления всего прибора по технологии LTCC, – разработать конфигурацию, которая бы позволяла нести функциональность топологии и конструкции для обеспечения требуемых характеристик прибора и возможности их измерения на векторном анализаторе цепей Keysight PNA Network Analyzer N5227A с применением коаксиально-микрополоскового подключающего устройства Anritsu 3680 (требуемая минимальная толщина прибора для измерения параметров должна быть не менее 0,65 мм). Для решения этой задачи была разработана конфигурация с четырьмя слоями феррита LTCC (два функциональных слоя и два технологических слоя), топологией, межслойными металлизационными отверстиями и экранами (рис. 11).

На основе разработанной конфигурации был изготовлен макет Y -циркулятора на основе феррита LTCC ЛЦ-380 с добавлением 3 % Bi_2O_3 . Режимы спекания и время выдержки соответствовали режимам изготовления макетов ферритовых многослойных заготовок: 885 °С и 2 ч соответственно [1, 2]. Внешний вид макета и поперечное сечение представлены на рис. 12.

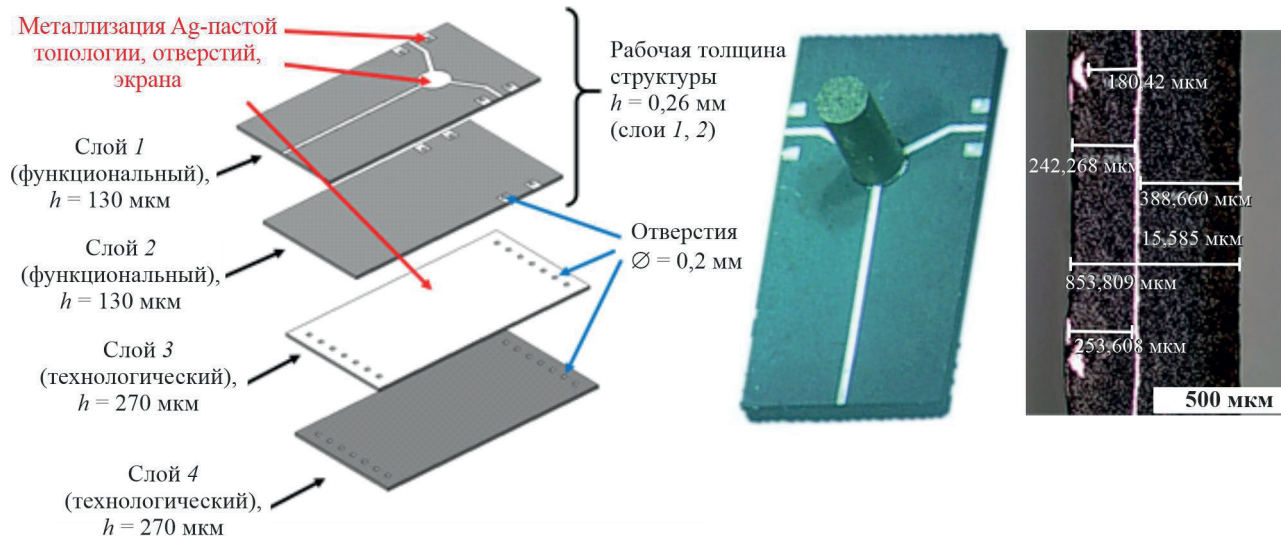


Рис. 11. Конфигурация многослойного ферритового Y -циркулятора LTCC

Рис. 12. Макет многослойного ферритового Y -циркулятора LTCC:

a – внешний вид; *б* – поперечное сечение

Далее проводилось измерение параметров макета многослойного ферритового Y -циркулятора LTCC на векторном анализаторе цепей Keysight PNA Network Analyzer N5227A с применением коаксиально-микроволнового подключающего устройства Anritsu 3680 (рис. 13).

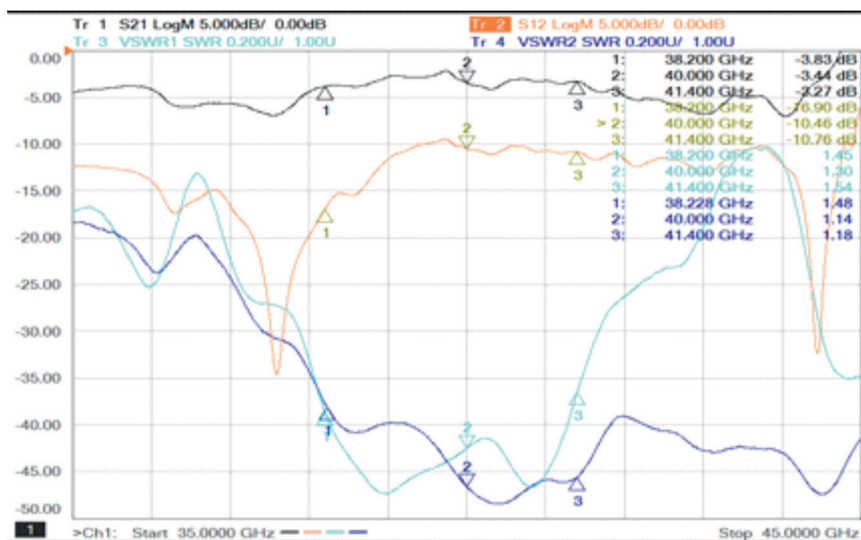


Рис. 13. Измеренные электрические параметры макета многослойного ферритового Y -циркулятора LTCC

Результатом проведённых исследований и разработок стало получение макета многослойного ферритового Y -циркулятора LTCC в диапазоне частот 38...41 ГГц с рабочей полосой 3 ГГц,

прямыми потерями 3,27...3,83 дБ, развязкой 10 дБ, КСВН 1,54. Представленные результаты не соответствуют параметрам электродинамической модели (сравнение параметров – в табл. 3).

Таблица 3

Сравнение измеренных параметров макета Y-циркулятора на плате из многослойного LTCC-феррита с параметрами модели

Параметр, единица измерения	Модель	Макет циркулятора на феррите LTCC
Технология изготовления феррита	–	LTCC
Технология нанесения металлизации	–	Проводящей пастой: ПП-111 – отверстия ПП-121 – печать
Диапазон рабочих частот, ГГц (полоса, ГГц)	36...39 (3)	38...41 (3)
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	-0,7	-3,27...-3,83
Развязка, дБ	-19	-10,5...-16,9
КСВН	< 1,22	< 1,54

5. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ ФЕРРИТОВЫХ СТРУКТУР LTCC

Проанализировав результаты, были выявлены ключевые параметры, влияющие на существенное отклонение характеристик прибора от расчетных в модели (рис. 14):

а) отклонения от требуемых геометрических размеров (при нанесении металлизации / после спекания). Разброс по ширине микрополосковых линий составлял от 154 до 170 мкм при расчетных значениях 197,5 мкм (отклонения в топологии прибора также влекут за собой изменение диапазона рабочих частот, ширины полосы и электрических параметров);

б) образование трещин в металлизации при процессах спекания (отсутствие согласования в коэффициентах усадки металлизации и ферритового материала при спекании приводит к появлению трещин и, как следствие, увеличению вносимых потерь, снижению уровня развязки, увеличению КСВН прибора);

в) вжигание металлизации в феррит (в связи с содержанием в составе металлизационной пасты многокомпонентного боросиликатного стекла, происходит взаимодействие пасты с ферритом с образованием новых фаз и разложением приповерхностного слоя феррита, что приводит к изменениям электромагнитных параметров материала и, как следствие, ухудшению характеристик прибора);

г) дефекты нанесения металлизации через маску – отсутствие металлизации на проводниках в топологии (как следствие, увеличение вносимых потерь, снижение уровня развязки и увеличение КСВН прибора).

По результатам проведенного анализа были скорректированы топологии прибора и изготовлены платы Y-циркуляторов на многослойных ферритовых структурах с разными коэффициентами масштабирования K (рис. 15...17).

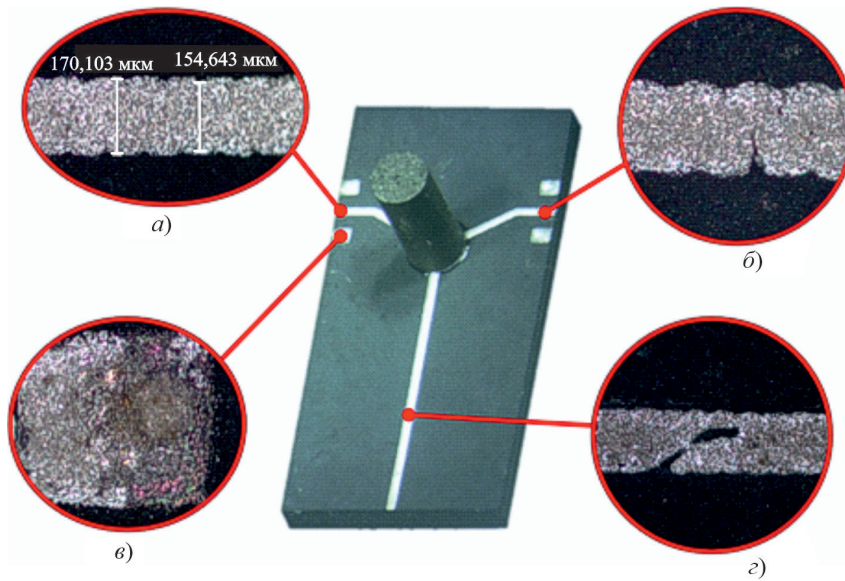


Рис. 14. Основные дефекты в структуре макета микрополоскового прибора Y-типа по LTCC-технологии:

а – отклонения от требуемых геометрических размеров (при нанесении металлизации / после спекания); *б* – образование трещин в металлизации при процессах спекания; *в* – вжигание металлизации в феррит (взаимодействие металлизационной пасты с ферритом); *г* – дефекты нанесения металлизации через маску при формировании топологии (отсутствие металлизации)

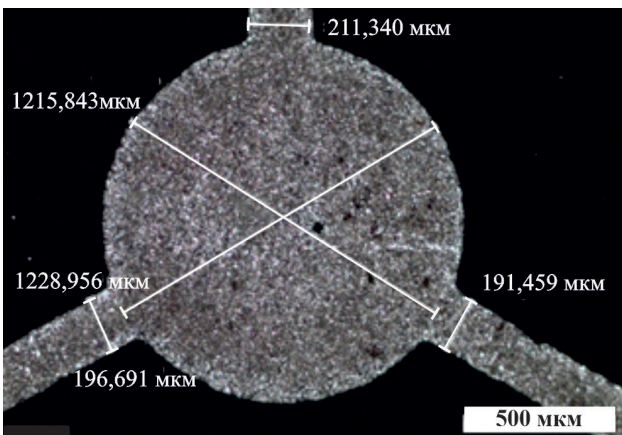
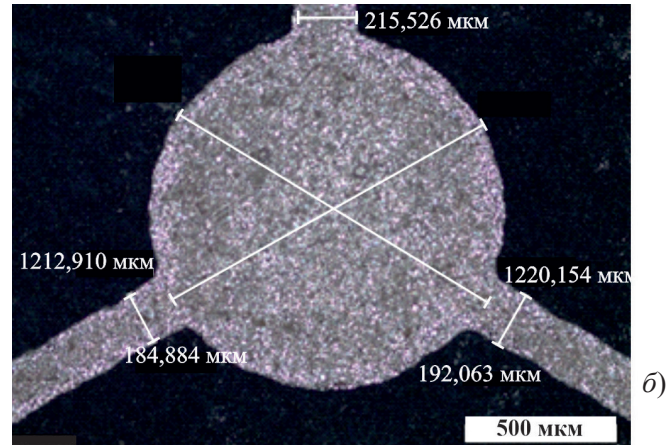
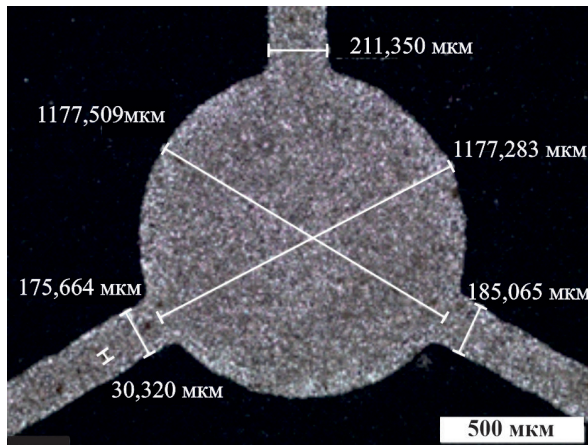


Рис. 15. Фотографии области циркуляции на плате Y-циркулятора на многослойных ферритовых структурах после спекания ($\times 50$):
а – $K = 1,15$; *б* – $K = 1,175$; *в* – $K = 1,2$

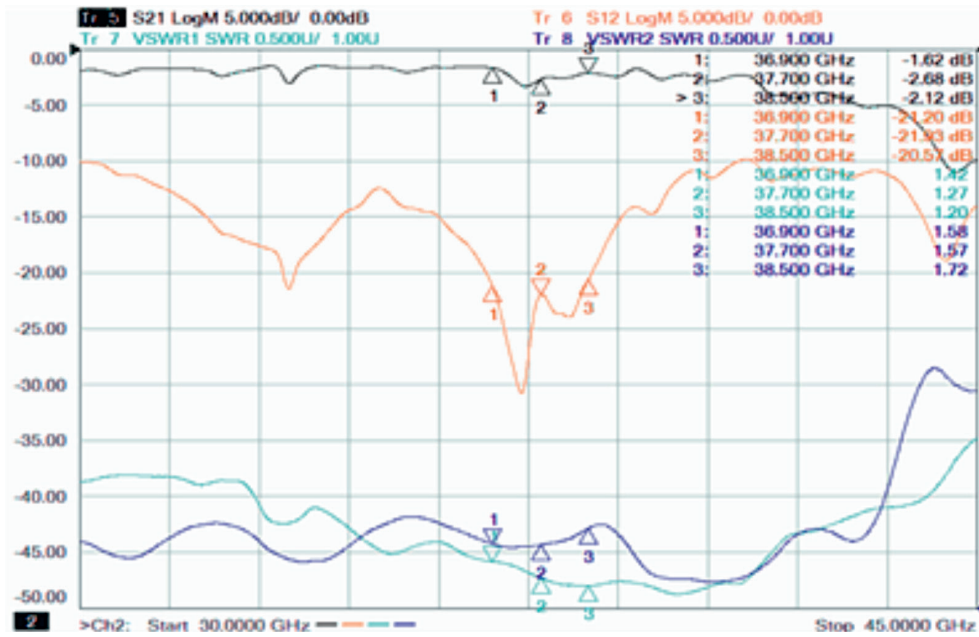


Рис. 16. Измеренные электрические параметры макета изготовленного полностью по LTCC-технологии многослойного ферритового Y-циркулятора со скорректированной топологией ($K = 1,2$)

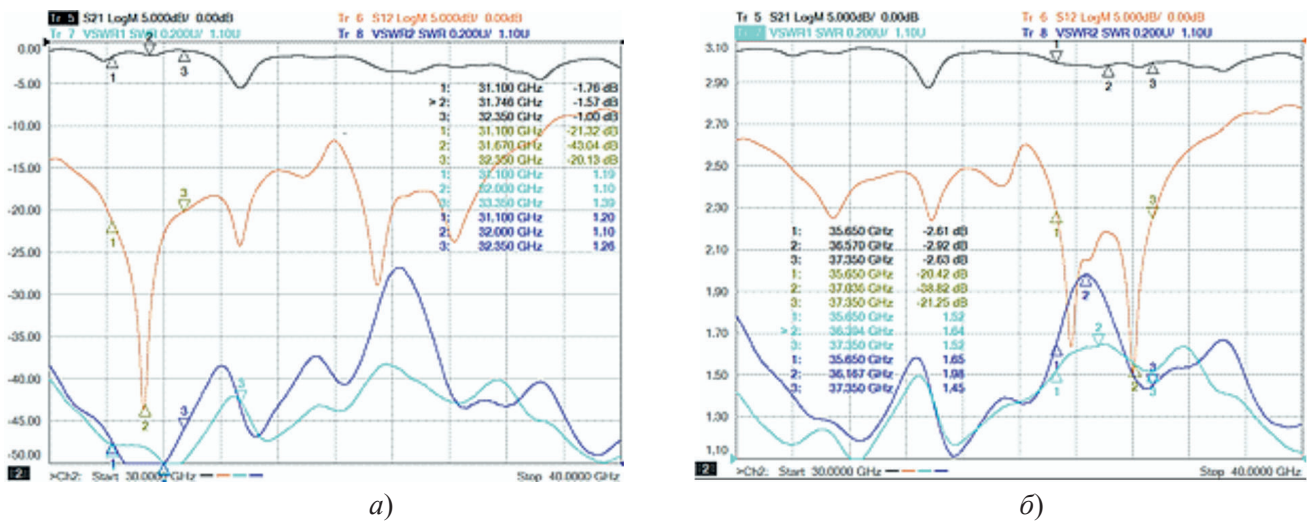


Рис. 17. Измеренные электрические параметры макета изготовленного полностью по LTCC-технологии многослойного ферритового Y-циркулятора со скорректированной топологией ($K = 1,2$) на пасте Ag ПП-17 без стекла

В ходе изготовления макетов плат микрополосковых приборов Y-типа на многослойных ферритовых структурах были отработаны режимы изготовления (спекание при $T = 885^\circ\text{C}$ с выдержкой 2 ч) и определены требуемая топология, коэффициент усадки и коэффициент масштабирования ($K = 1,2$) с параметрами, максимально приближенными к расчетным значениям. Сравнительные значения параметров плат с разными коэффициентами масштабирования приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Сравнение измеренных параметров
макета Y-циркулятора на плате из многослойного LTCC-феррита*
с параметрами модели**

K	Тип линии		Габариты, мм, до обжига			Габариты, мм, после обжига			Коэффициент усадки, %			Ширина прибора, мм
			ширина	длина	толщина	ширина	длина	толщина	по ширине	по длине	по толщине	
1,2	ФРП	Плата	11,12	36,20	0,81	9,50	30,90	0,65	0,146	0,146	0,198	5,13
		Диаметр области циркуляции	1,41			1,23			0,127			
		Ширина линии	0,23			0,19			0,178			
1,175	ФРП	Плата	11,13	35,46	0,84	9,45	30,25	0,65	0,151	0,147	0,230	4,99
		Диаметр области циркуляции	1,38			1,20			0,130			
		Ширина линии	0,22			0,19			0,150			
1,15	ФРП	Плата	11,10	34,67	0,82	9,50	29,70	0,63	0,144	0,143	0,227	4,87
		Диаметр области циркуляции	1,37			1,17			0,146			
		Ширина линии	0,25			0,20			0,220			

*Спекание при $T = 885 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 ч.

Далее осуществлялись сборка прибора, настройка и установка магнитной системы, настройка прибора в целом и проведение измерений параметров макета изготовленного полностью по технологии LTCC многослойного ферритового Y-циркулятора со скорректированными топологией, коэффициентом усадки и коэффициентом масштабирования ($K = 1,2$) на векторном анализаторе цепей Keysight PNA Network Analyzer N5227A с применением коаксиально-микророслового подключающего устройства Anritsu 3680 (см. рис. 16).

Внесение корректировок в топологию прибора и отработка режимов нанесения металлизации и спекания образцов позволили получить образец, согласованный по усадке (на образцах отсутствуют расслоения, минимизированы отклонения по ширине металлизационного полоска, $\pm 5 \text{ мкм}$), и, как следствие, значительно улучшенные электрические параметры (табл. 5) макета прибора, изготовленного полностью по LTCC-технологии.

Y-циркулятор LTCC в диапазоне частот 36,9...38,5 ГГц имеет развязку 20,5 дБ, КСВН составляет до 1,2. Прямые потери в обновленном варианте макета по сравнению с предыдущим исполнением прибора (3,27...3,83 дБ) значительно улучшились и стали составлять 1,62...2,68 дБ, что несомненно является положительным результатом корректировки топологии прибора.

В ходе работ [5, 6] было выявлено негативное влияние стеклофазы в составе керамики и проводящей пасты на структурное состояние ферритового материала и их взаимодействие (см. рис. 10, в), в связи с этим был скорректирован состав проводящей пасты и изготовлена серебряная паста ПП-17 без стекла. Затем были изготовлены макеты приборов с применением проводящей пасты Ag ПП-17 без стекла.

Таблица 5

Сравнение измеренных параметров макета Y-циркулятора на плате из многослойного LTCC-феррита с параметрами модели

Параметр, единица измерения	Модель	Макет циркулятора на феррите LTCC
Технология изготовления феррита	–	LTCC
Технология нанесения металлизации	–	Проводящей пастой: ПП-111 – отверстия ПП-121 – печать
Диапазон рабочих частот, ГГц (полоса, ГГц)	36...39 (3)	36,9...38,5 (1,6)
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	-0,7	-1,62...-2,68
Развязка, дБ	-19	-20,5
КСВН	< 1,22	1,2...1,7

Применение пасты Ag ПП-17 без стекла позволило существенно снизить (по сравнению с предыдущим исполнением прибора) прямые потери прибора, которые в диапазоне 31,1...32,35 ГГц составили 1,0...1,7 дБ, что видно из рис. 17. Значения параметров разработанного макета прибора приведены в табл. 6. В данном исполнении прибора можно выделить два диапазона функционирования: 31,1...32,35 и 35,65...37,35 ГГц.

Таблица 6

Сравнение измеренных параметров макета Y-циркулятора на плате из многослойного LTCC-феррита с параметрами модели

Параметр, единица измерения	Макет циркулятора на феррите LTCC
Технология изготовления феррита	LTCC
Технология нанесения металлизации	Проводящей пастой Ag ПП-17 без стекла
Диапазон рабочих частот, ГГц (полоса, ГГц)	31,1...32,35 (1,15)
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	-1,00...-1,76
Развязка, дБ	-20,1
КСВН	1,1...1,39

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы были разработаны, изготовлены и исследованы макеты ферритовых развязывающих устройств – Y-циркуляторов на основе ферритового материала LTCC ЛЦ-380 + 3% Bi_2O_3 . Результаты измерения параметров макетов представлены в табл. 7.

1. С применением классических методов формирования требуемого качества поверхности (шлифовка/полировка) LTCC ферритовых заготовок, нанесением металлизации методом вакуумного резистивного напыления и последующей настройкой прибора результатом проведённых исследований и разработок стало получение макета Y-циркулятора с платой

из многослойного LTCC-феррита в диапазоне частот 35...40 ГГц, с рабочей полосой 5 ГГц, прямыми потерями 0,24...0,77 дБ, развязкой 20 дБ, КСВН 1,04...1,32. Представленные результаты соответствуют параметрам электродинамической модели.

Таблица 7

Сравнение параметров полученных макетов ферритовых LTCC-приборов с параметрами модели

Параметр, единица измерения	Модель HFSS	Макет №1	Макет № 2	Макет № 3	Макет №4
Технология изготовления феррита	–	LTCC	LTCC	LTCC	LTCC
Технология нанесения металлизации	–	Вакуумное напыление	Проводящей пастой: ПП-111– отверстия ПП-121– печать	Проводящей пастой: ПП-111– отверстия ПП-121– печать	Проводящей пастой Ag ПП-17 без стекла
Диапазон рабочих частот, ГГц (полоса, ГГц)	36...39 (3)	35...40 (5)	38...41 (3)	36,9...38,5 (1,6)	31,1...32,35 (1,15)
Вносимые потери в прямом направлении, дБ	-0,7	-0,24... -0,77	-3,27...-3,83	-1,62...- 2,68	-1,00...-1,76
Развязка, дБ	-19	-20,7... -23,5	-10,5...-16,9	-20,5	-20,1
КСВН	< 1,22	< 1,04...1,32	< 1,54	1,2...1,7	1,1...1,39

2. С применением всех технологических операций для изготовления прибора методом LTCC (литье ферритовой ленты, формирование межслойных переходов и отверстий, нанесение металлизации, уплотнение заготовки, спекание ферритовой платы, настройка ферритового прибора) Y-циркулятор LTCC в диапазоне частот 31,1...32,35 ГГц имеет развязку 20,1 дБ, КСВН – 1,1...1,39. Прямые потери составляют -1,00...-1,76 дБ.

Полученные результаты открывают широкие перспективы для конструирования ферритовых развязывающих структур, интегрированных в LTCC-модули. Дальнейшие перспективы развития этого направления связаны с корректировкой составов металлизационных паст на LTCC-ферриты, разработкой рядов ферритовых материалов LTCC различных кристаллических структур (шпинель, гранат, гексаферрит) для СВЧ частотных диапазонов и проектированием изделий на них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоизбирательный малогабаритный СВЧ-модуль в керамике LTCC с применением монтажа «flip-chip» / А. П. Гусев, А. В. Павлов, С. Г. Павлова [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 45 – 55.
2. Circulator integrated in LTCC with screen printed co-firing ferrite for space application / S. Yang, W. Shi, H. Bai and T. Zhang // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) – 2018. – P. 1 – 3. – DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563702.
3. Налогин, А. Г. Некоторые особенности изготовления СВЧ микрополосковых ферритовых приборов на подложках из литиевой шпинели / А. Г. Налогин, Н. Д. Урсуляк, Л. К. Першина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 63 – 69.

4. Семенов, А. С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными характеристиками: диссертация на соискание учёной степени кандидата техн. наук / Семенов А. С.; АО «НПП «Исток» им. Шокина». – Фрязино, 2020. – 156 с.
5. Разработка микро- и нанодисперсных ферритовых композиционных материалов и технологий их производства для ленточных носителей ЛТСС-подложек и исследование их свойств для создания функциональных ферритовых элементов, встраиваемых в объемные многослойные СВЧ-структуры, в обеспечение НИР «Лента ЛТСС»: отчет о НИР / АО «НПП «Исток» им. Шокина»: А. Н. Пашков, А. Г. Налогин, В. В. Демшевский и др. – Фрязино, 2021. – 539 с. – № 13-93264.
6. Некоторые особенности производства ферритового материала по технологии ЛТСС для изготовления многослойных структур и СВЧ-развязывающих устройств на их основе / А. Н. Пашков, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2024. – Вып. 1 (561). – С. 13 – 23.
7. Разработка микрополосковых вентилях Ka-диапазона частот для приемопреобразующих модулей «Заря-Ф» в обеспечение ОКР «Заря-Ф-9»: отчет о НИР / АО «НПП «Исток» им. Шокина»: А. Г. Налогин, А. С. Семенов и др. – Фрязино, 2020. – 62 с. – № 14-93251.
8. Семенов, А. С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры Ka-диапазона частот / А. С. Семенов, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 12 – 21.

Статья поступила 7 ноября 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ДАНСМОР, Д. П. Настольная книга инженера. Измерение параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. – 2-е изд. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 944 с.

Во втором издании книги автор ещё более расширил и без того глубокое и оригинальное изложение основополагающих концепций измерений параметров СВЧ-устройств, добавив новый и важный материал по вопросам измерений с использованием модулированных сигналов и применения модульных приборов.

УДК 621.385.69

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МИШЕНИ И МОЩНОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ НА ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ КАТОДОВ

Г. А. Жабин, О. В. Пелипец, Н. А. Шарапов, В. В. Федотов

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

Исследуется влияние мощности распыления карбонатной мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных микрокатодов, применяемых в циклотронных защитных устройствах. Показано, что микрокатоды с эмиссионным покрытием, осажденным в процессе распыления мишени с повышенной температурой и мощностью разряда, обладают высокой эмиссионной способностью на различных металлических ядрах.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), работа выхода, оксидно-карбонатная мишень, недокальные характеристики, долговечность, растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ)

THE EFFECT OF TARGET TEMPERATURE AND SPUTTERING POWER ON THE EMISSION PROPERTIES OF MOLECULAR SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODES

G. A. Zhabin, O. V. Pelipets, N. A. Sharapov, V. V. Fedotov

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

The paper investigates the effect of the temperature and sputtering power of a carbonate target $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ on the emission properties of molecular sputter-deposited oxide microcathodes used in cyclotron protective devices. It is shown that microcathodes with an emission coating deposited during the sputtering of a target with an increased temperature and discharge power have a high emission capacity on various metal cores.

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, work function, oxide-carbonate target, emission characteristics, durability, scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM)

1. ВВЕДЕНИЕ

Оксидные термоэмиссионные катоды применяются в качестве эффективных источников электронов во многих современных вакуумных электронных СВЧ-приборах. Они должны обеспечивать плотность тока в постоянном режиме до 1 А/см^2 , устойчивость к пробоям, низкую скорость испарения активных веществ, стабильность эмиссионных параметров, быстрое восстановление работоспособности после отравления остаточными газами [1].

Авторы работы [2] провели исследование эмиссионных свойств оксидного катода на пленочных ядрах. Подложка катода из тонкой фольги ВР-27 покрывалась пленкой платины толщиной $0,3 \text{ мкм}$. Оксидное покрытие на ядро наносилось из молекулярного пучка в вакууме. Катоды с пленочным платиновым ядром показали долговечность более 3000 ч при температуре $900 \dots 920 \text{ К}$ и плотности тока 100 мА/см^2 .

В работе [3] исследована долговечность молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК)

на пассивных и активных (с присадкой кальция и бария) никелевых кернах в зависимости от толщины покрытия, температуры катода и плотности отбираемого тока. Долговечность увеличивалась пропорционально квадрату толщины покрытия и уменьшалась при увеличении температуры катода. Влияния на долговечность примеси активатора в керне и плотности отбираемого тока в диапазоне $0,1 \dots 1,0$ А/см² обнаружено не было.

Ленточные МНОК, применяемые в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ), относятся к полупроводниковым оксидным катодам и являются наиболее эффективными по потреблению мощности. Они имеют сложную тонкопленочную технологию ионно-плазменного осаждения молекулярно-напыленных эмиссионных покрытий (МНОП), отличную от стандартных оксидных катодов. Эта технология, позволяющая создавать долговечные термоэмиссионные микрокатоды с плотностью тока $1,5 \dots 2$ А/см², описана в статьях [4–9]. Однако вопросы совершенствования работы и оценки качества МНОК требуют дальнейшего изучения.

В [6, 7] рассмотрено влияние отжига пленки иридия на эмиссионные характеристики и долговечность МНОК. Показано, что введение повторного отжига керна с пленкой иридия понижает работу выхода, улучшает эмиссионную активность катодов и позволяет снизить их рабочую температуру.

Исследовано влияние давления газа на морфологию, структуру и эмиссионные свойства катодов. Показано, что снижение давления напыления с $0,13$ до $0,1$ Па позволяет увеличить скорость напыления и плотность эмиссионного покрытия МНОК. Положительно сказывается на эмиссионной активности напыление в атмосфере ксенона вместо аргона [8].

Проводилось исследование влияния способа изготовления карбонатной мишени на эмиссионные свойства и работоспособность МНОК. Изготовленные из плазменно-напыленных мишеней микрокатоды показали хорошие характеристики в макетах ЦЗУ: быстрое время активирования ($15 \dots 30$ мин), повышенную эмиссионную активность, низкую рабочую температуру (менее 600 °С) и срок службы более 4000 ч [9].

В вышеперечисленных работах [4–9] при стандартных параметрах напыления покрытия на микрокатоды температура оксидно-карбонатной мишени составляла $760 \dots 780$ °С, отрицательное напряжение на мишени – $790 \dots 800$ В, ток разряда – 200 мА, потенциал подложки равен 0 , давление газа – $0,13 \dots 0,11$ Па.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния повышения температуры мишени и мощности распыления эмиссионного покрытия, а также процессов вакуумной откачки приборов на характеристики МНОК с различными металлическими кернами.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время стандартным способом изготовления оксидно-карбонатной мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ для последующего ионно-плазменного напыления МНОК является метод пульверизации [9]. Соотношение активных элементов щелочно-земельных металлов в ней составляет $47:45:8$. Толщина карбонатного покрытия мишеней равна $127 \dots 130$ мкм.

В работе исследовались катоды из проволоки диаметром 50 мкм с кернами из вольфрам-рениевого сплава WRe-20, прошедшие однократный отжиг в водороде, и кернами WRe-20/Иг с пленкой иридия толщиной $0,25$ мкм, прошедшие повторный отжиг после нанесения пленки. Эмиссионная площадь поверхности стандартных МНОК составляет $(1,4 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$ см².

Напыление эмиссионного покрытия толщиной $0,7 \dots 0,8$ мкм на керны WRe проводилось в ат-

мосфере $\text{Xe}+\text{CO}_2$ при повышенной мощности (напряжение – 800 В, ток разряда – 220 мА, накал мишени – 25,8 мА). Давление газа составляло 0,13 Па. Время напыления – 2,5 ч. Время разложения карбонатов мишени – 75 мин.

Далее проводились вакуумная откачка макетов с катодами и последующий отбор тока эмиттера. После работы в течение 4000 ч один из макетов с катодом на вольфрамрениевом керне вскрыли, допустив таким образом реакцию воздуха с эмиссионной поверхностью. В этой же электронной пушке катод установили в новый аналогичный макет для проверки работоспособности и степени отравления МНОК, произвели вакуумную откачку до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. по стандартной технологии и получили ток катода с анализом недокальных характеристик и продолжительности работы.

Также проводились исследования влияния температуры выдержки при откачке на эмиссионные свойства МНОК с пленкой иридия. Выдержка всех макетов с катодами составляла 4 ч. Температура выдержки менялась для разных партий катодов. Исследовались три технологические схемы температурной выдержки: пониженная (400 °С), средняя (415 °С) и повышенная (450 °С). После установления оптимальной технологической температуры выдержки при откачке макетов (415 °С) проведено исследование влияния мощности при напылении покрытия МНОК на эмиссионную способность двух партий катодов с контрольными образцами кремния. Эмиссионная активность МНОК проверялась после отпаивания прибора с откачного поста по току катода при накале 220 мА, потенциал на управляющем электроде – 5 В, на аноде – 22 В. Расстояние катод – управляющий электрод составляло 0,03 мм, расстояние анод – катод было 0,12 мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При осаждении эмиссионного покрытия на МНОК в смеси газов $\text{Ar}(\text{Xe})+\text{CO}_2$ реактивный газ диоксид углерода реагирует с поверхностью горячей карбонатной мишени и распыленными атомами как во время движения частиц, так и на поверхности подложки (керна катода). Свойства получаемых пленок зависят от их состава и структуры, которыми можно управлять в процессе распыления мишени.

Важную роль играет плотность оксидно-карбонатной мишени и шероховатость ее поверхности. Из-за взаимодействия поверхности покрытия мишени с ионами реактивного газа может образоваться слой диэлектрика. При бомбардировке покрытия положительно заряженными ионами плазмы на поверхности диэлектрического слоя скапливается положительный заряд, притягивающий электроны из мишени. На поверхности образуется сильное электрическое поле. Поэтому важно не допускать охлаждения мишени и добиваться полного разложения карбонатов, а давление остаточных газов перед напуском реактивного газа должно быть не более $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

В процессе напыления на поверхности мишени могут происходить микропробои, имеющие размеры в диаметре 0,03...0,1 мм, в глубину микропробои могут достигать поверхности керна мишени. Они не нарушают процесса распыления, однако впоследствии МНОК будут малоактивны из-за роста концентрации материала керна мишени – никеля. Микропробои могут перерасти в дуговые разряды между мишенью и плазмой или заземленной подложкой. Длительность дуги составляет 8...30 мс, энергия пробоя – 50...200 Дж, достаточная для плавления карбонатов мишени [10]. В этом случае на поверхности мишени образуются участки, на которых испаряется и сгорает покрытие (рис. 1, а), и короткое замыкание источника питания. Совершенствование технологии изготовления мишени, повышение плотности мишени до 2,4...2,8 г/см³ в процессе изготовления существенно сократили количество пробоев.

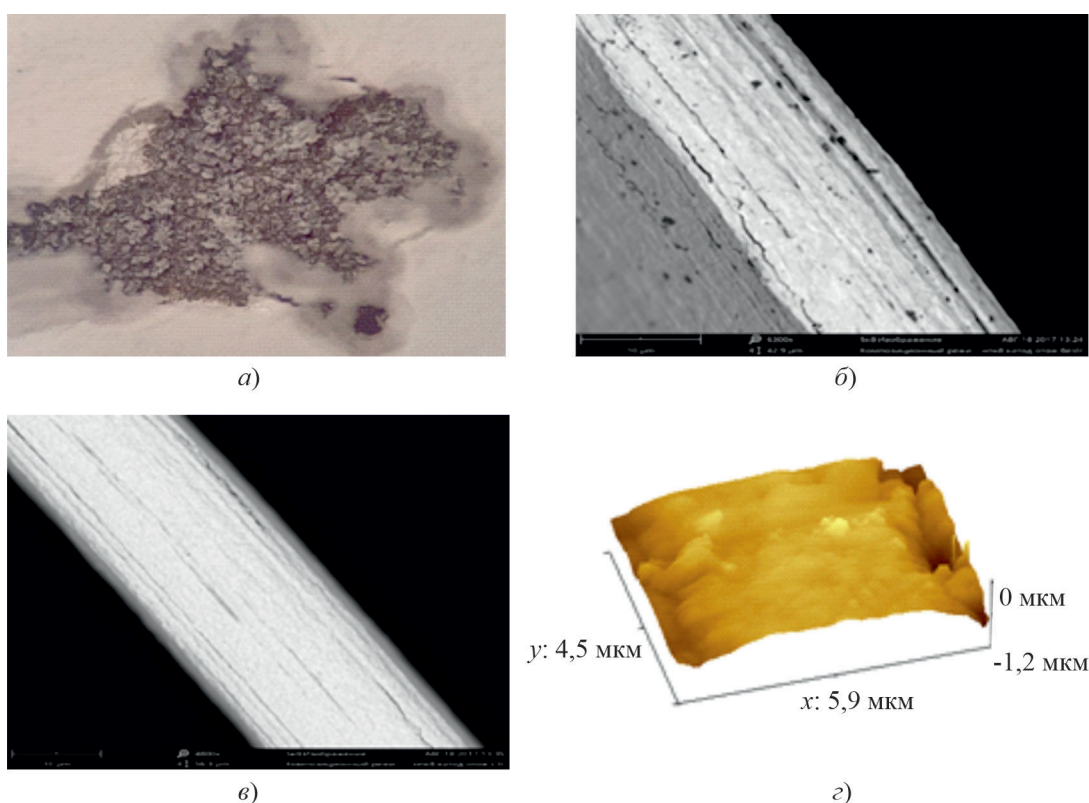


Рис. 1. Изображение поверхности после пробоя (а), kern микрокатада WRe-20 после отжига (б), kern микрокатада после нанесения пленки иридия и повторного отжига (в), АСМ-изображение поверхности МНОК после нанесения эмиссионного покрытия (г)

На эмиссионные свойства МНОК оказывают влияние много технологических факторов: плотность и толщина оксидно-карбонатной мишени, способ ее изготовления; вакуумные условия и температура во время разложения карбонатов мишени и осаждения покрытия; шероховатость и чистота обработки керна мишени и катодов; состав газовой смеси при осаждении покрытия; температура мишени, подложки и мощность распыления; толщина эмиссионного покрытия. При откачке вакуумного прибора на откачном посту, важное значение придается безмасляным насосам, уровню вакуума, времени и температуре выдержки.

Большое значение для эмиссионных свойств МНОК имеет качественная очистка узлов и деталей ЦЗУ. Наличие окисных пленок, влаги и различных примесей влияет на состояние поверхности деталей и электродов внутри вакуумного прибора и оказывает воздействие на электрофизические параметры (нестабильность эмиссионных характеристик, шумы) [11].

На рис. 1, б, в показаны изображения передней поверхности кернов ленточных микрокатодов. Видны продольные складки (поры) вдоль всей поверхности. Они появляются в результате пластической деформации при операции плющения вольфрамрениевой проволоки. Длина пор – 0,7...0,8 мм, глубина – 0,2...0,8 мкм, ширина – 0,2...0,5 мкм. Размеры и расположение пор отличаются для разных катодов. После нанесения пленки иридия размер пор уменьшается.

Наличие продольных пор на поверхности матрицы катода повышает адгезию наносимого ионно-плазменным методом эмиссионного покрытия. Вольфрам является активатором катода. Иридиевая пленка служит для уменьшения активности и повышения срока службы МНОК.

Процесс покрытия микрокатодов пленкой иридия толщиной 0,25...0,3 мкм является сложной технологической операцией, осуществляемой за два цикла, что приводит к окислению поверхности керна и введению дополнительных микропримесей. Поэтому требуется последующий отжиг катодов в водороде с высокой точкой росы. Сложная микропористая структура поверхности матрицы вольфрамениевского микроэлектрода способствует эмиссионной неоднородности и локальным эффектам усиления поля, которые могут отрицательно влиять на распределение электронов по скоростям и шумы СВЧ-прибора. После осаждения эмиссионного покрытия толщиной 0,7...0,8 мкм на керна поверхностная пористость катода уменьшается. На рис. 1, 2 показано АСМ-изображение реальной поверхности микроэлектрода на керне WRe-20/Ir с неотформованным оксидным покрытием. Слева показана продольная пора. С правой стороны – незакрытые точечные поры глубиной 0,8 мкм. Глубина продольных пор не превышает 0,8 мкм. После формовки катода путем термического разложения карбонатов в вакууме на откачном посту эмиссионное покрытие уплотняется и становится гладким. Таким образом, для обеспечения максвелловского распределения электронов по скоростям толщина эмиссионного покрытия МНОК на кернах со складками не должна быть менее 0,5 мкм. Представляется, что для обеспечения лучшей адгезии и долговечности верхний предел толщины эмиссионного покрытия не должен превышать 1,2...1,4 мкм.

Работа выхода образцов металлических Ва, Sr, Са равна соответственно 2,7; 2,59; 2,87 эВ. Работа выхода поликристаллических образцов W, Re, Ir, согласно [12], равна 4,55; 4,96; 5,27 эВ соответственно. В то же время в зависимости от направления кристаллографических граней работа выхода может отличаться. Так, у вольфрама она варьируется от 4,18 (113) до 5,25 эВ (110), а рений может иметь работу выхода 5,75 эВ (1011). Работа выхода иридия имеет значения: от 5,00 эВ (210) до 5,76 эВ (111). На поликристаллическом образце керна она «усредняется».

На рис. 2, а представлены кривые долговечности трех катодов: два катода на керне без пленки иридия и один – с иридием. Можно заметить, что катод на керне WRe/Ir имеет небольшой разброс значений по току, т. е. работает стабильнее. На рис. 2, б показаны эмиссионные характеристики МНОК с пленкой иридия. Сравнение эмиссионных характеристик катодов с пленкой и без пленки иридия (рис. 3) показывает, что последние имеют большее значение тока в низкотемпературной области при накале 220 мА.

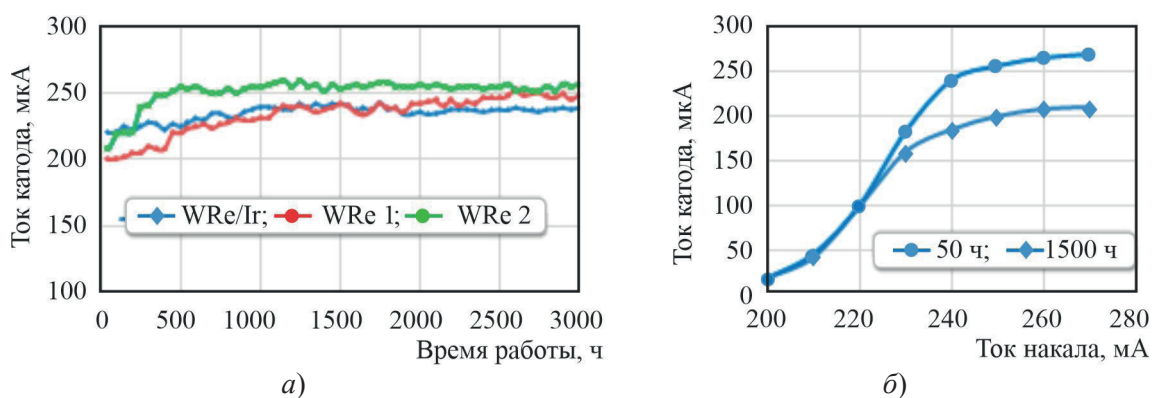


Рис. 2. Время работы МНОК на кернах WRe и WRe/Ir (а) и недокальные характеристики катода с пленкой иридия (б)

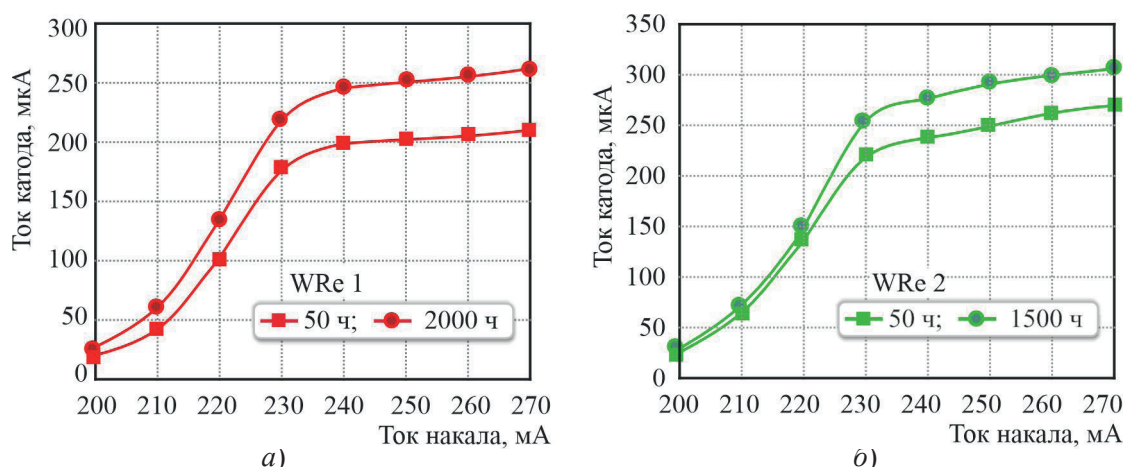


Рис. 3. Недокальные характеристики катодов без пленки иридия

При работе оксидного покрытия происходит испарение окислов бария с горячего катода и осаждение их на аноде и других электродах электронных ламп. Рост тока МНОК в области ограничения пространственным зарядом при сроке службы 1500 и 2000 ч, вероятно, связан с изменением контактной разности потенциалов на аноде пушки в процессе работы из-за напыления монослойной пленки бария [13, 14].

В работе [15] представлена модель неоднородной термоэлектронной эмиссии, которая включает в себя эффекты пространственного заряда, поля и понижения барьера Шоттки. Эта модель показывает, что гладкость кривой недокальных характеристик является следствием неоднородной термоэлектронной эмиссии. Эффекты пространственного заряда и поля оказывают влияние на сглаживание переходного участка недокальной характеристики. Форма перегиба недокальных характеристик является показателем оценки качества термоэмиссионных катодов. Переход между областью температурного ограничения и областью пространственного заряда характеристик может быть резким или плавным, что связано с изменением работы выхода катода, напряжением анод – катод и расстоянием анод – катод.

МНОК без пленки иридия (см. рис. 3) имеют большую крутизну недокальных характеристик, что свидетельствует о более однородной температуре и эмиссии покрытия по сравнению с катодом на рис. 2, б. Характеристическая точка эмиссионной кривой катода с пленкой иридия составила 250 мА ($T_{\text{раб}} \approx 580^\circ\text{C}$), без пленки иридия – 240...245 мА ($T_{\text{раб}} \approx 560^\circ\text{C}$). Срок службы катода WRe 2 составил более 6000 ч. Применение катодов с WRe-кернами обеспечивает низкое отравление эмиссионной поверхности кислородом во время их работы [16].

На рис. 4 показаны эмиссионные характеристики и срок службы катода WRe 1, отработавшего в вакуумном приборе 4000 ч и вновь установленного в новый макет с откачкой высокого вакуума $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Анализ характеристик показал, что после нахождения на атмосфере и адсорбционных процессов отравления и гидратации на поверхности МНОК произошло существенное ухудшение его работы в новом макете ЦЗУ. Взаимодействие с кислородом оказало дезактивирующее действие. Из-за влияния процессов анодного отравления эмиссия уменьшилась. Одновременно с уменьшением эмиссии при отравлении уменьшается электропроводность покрытия МНОК. Поэтому работа выхода катода увеличилась, вследствие этого рабочая точка характеристики сместилась на 20 мА выше, чем это наблюдалось на рис. 3, а. Ток катода при на-

кале 220 мА равен 21...28 мкА. После 500 ч работы катода произошло падение тока в низкотемпературной области эмиссионной характеристики. В рабочей точке характеристики (при накале 260 мА), соответствующей температуре катода 620 °С, снижение тока катода произошло после 1000 ч работы.

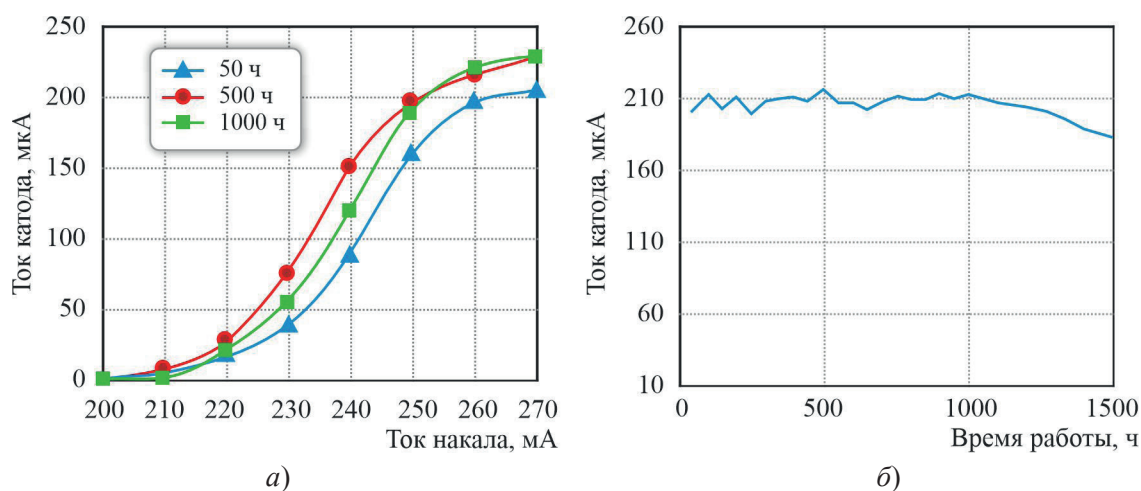


Рис. 4. Недокальные характеристики (а) и время работы катода WRe 1 в новом макете (б)

На рис. 5, а показаны данные по трем партиям МНОК на кернах WRe/Ir в зависимости от температуры выдержки приборов на откачных постах. Данные по току эмиссии собраны при накале катодов 220 мА. Наибольшие токи имеют катоды с выдержкой 415 °С. Осаждение эмиссионного покрытия в установке ионно-плазменного напыления на все катоды трех партий проводилось при обычном режиме напыления по единой технологической схеме в смеси газов Ar + CO₂.

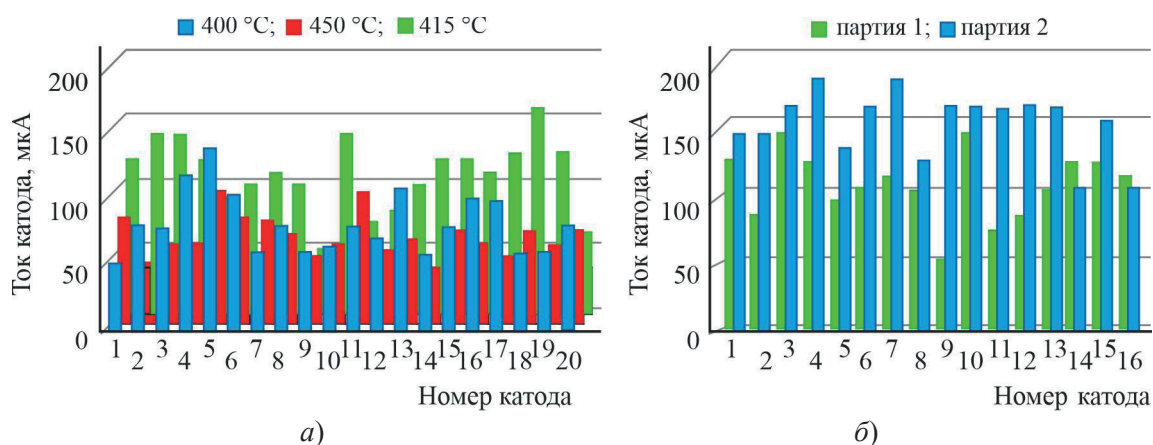


Рис. 5. Влияние на отбор тока температуры выдержки при откачке (а) и мощности распыления горячей мишени (б)

На рис. 5, б приведены результаты по двум партиям МНОК на кернах WRe/Ir. Данные по партии № 1 взяты из рис. 6, а (415 °С) при стандартных значениях мощности осаждения покрытия. На МНОК партии № 2 покрытие осаждалось при повышенной температуре мишени (780...800 °С) и мощности распыления (напряжение – 800...805 В, ток разряда – 220 мА). Температура выдержки

МНОК партии № 2 на откачном посту также равнялась 415 °С. Анализ результатов показал, что новый режим напыления оказал существенное влияние на повышение тока. Девять катодов из шестнадцати в низкотемпературной области при накале 220 мА имели ток выше 150 мкА. Вид двух эмиссионных характеристик, измеренных на 50 ч работы катодов МНОК 1 и МНОК 2, принадлежащих партиям № 1 и 2 соответственно, представлен на рис. 6.

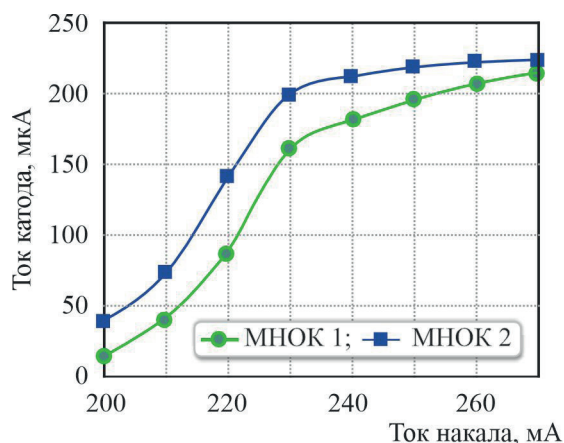


Рис. 6. Недокальные характеристики МНОК партий № 1 и 2

С применением методов Оже-спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа (РФМА) были исследованы поверхности образцов кремния (111) с осажденным покрытием при стандартных (1) и повышенных температуре и мощности напыления (2). Результаты приведены в табл. 1...3.

Таблица 1

**Концентрация элементов на поверхности образцов, % (масс.)
(метод Оже-спектроскопии)**

Номер образца	O	C	Ca	Sr	Ba	Ni	Na	Cu	Ar
1	4,93	2,43	3,54	17,9	67,4	0,1	0,06	0,19	0,12
2	7,25	5,75	3,80	14,78	66,2	2,02	–	–	0,18

Таблица 2

**Концентрация элементов на поверхности образца № 1
(РФМА)**

Элемент	Концентрация, % (масс.)	Погрешность, %
Ca	3,94	0,4
Ba	77,6	0,6
Sr	18,46	0,47
Ni	–	–

Таблица 3

Концентрация элементов на поверхности образца № 2 (РФМА)

Элемент	Концентрация, % (масс.)	Погрешность, %
Ca	4,03	0,41
Ba	77,44	0,61
Sr	17,79	0,48
Ni	0,74	0,52

В табл. 1 указаны значения концентраций элементов на поверхности образцов партий № 1 и 2, полученные при исследовании методом Оже-спектроскопии. Из табл. 1 следует, что во втором образце соотношение концентраций Ba/Sr составляет 4,47. В первом образце – 3,97.

В табл. 2 приведены значения концентраций, полученные методом РФМА, для первого образца, в табл. 3 – для второго. Соотношение концентраций Ba/Sr для первого образца составило 4,20. Соотношение Ba/Sr для второго образца – 4,35.

Катод № 2 по сравнению с № 1 имеет меньший разброс значений по току в области ограничения пространственного заряда, лучшую однородность эмиссии и меньшую работу выхода.

Анализ табл. 1...3 показал, что на поверхности образца партии № 2 соотношение концентраций Ba/Sr больше, чем в образце партии № 1. В объеме образца партии № 2 концентрация атомов Ba выше, чем в № 1, полученном при стандартных значениях мощности и температуры мишени в процессе напыления. Концентрация атомов Ca в образце № 2 также незначительно возросла. В образце № 2 при исследовании двумя методами обнаружена примесь никеля.

При росте отрицательного напряжения мишени возрастают ионизация плазмы, ток разряда и энергия распыляемых на керны катодов частиц. Это обуславливает изменение микроструктуры и плотности пленки, скорости распыления и взаимной растворимости микропримесей кальция, стронция и никеля в оксиде бария. С увеличением концентрации атомов свободного бария в керне и покрытии возрастает его растворение в решетке с образованием донорных центров, влияющих на улучшение эмиссионной способности катода [14]. Микропримеси элементов в оксиде бария (Ca, W, Re, Sr, Ni) формируют на поверхности кристаллитов BaO поверхностные состояния донорного типа. Это изменяет величину и знак поверхностного заряда оксида, направление искривления зон у поверхности и уменьшает работу выхода [17].

Используя значения плотности тока J_e , А/см², при накале 240 мА ($T = 833$ К), из данных графика на рис. 6, была проведена оценка работы выхода ϕ_0 катодов № 1 и № 2 по уравнению Ричардсона-Дэшмана: $J_e = AT^2 \cdot \exp(-\phi_0/kT)$, где A – постоянная, связанная с универсальной постоянной, равной 120,4 А/(см²·К²), k – постоянная Больцмана, эВ/К. Для МНОК 1 $\phi_0 \approx 1,3$ эВ, для МНОК 2 $\phi_0 \approx 1,28$ эВ.

Приведенные экспериментальные и расчетные данные показали, что повышение мощности осаждения эмиссионных покрытий на МНОК в сочетании с оптимизацией режима вакуумной откачки позволило увеличить эмиссионную способность микрокатодов на пассивных и активных ядрах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы эмиссионные свойства МНОК с оксидно-карбонатными покрытиями, полученными методом ионно-плазменного распыления карбонатов мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$. Катод на керне WRe показал длительный срок службы, более 6000 ч. После экспонирования на атмосферу МНОК с временем работы 4000 ч его срок службы в новом макете резко сократился. Применение РЭМ и АСМ показало, что катоды на кернах WRe имеют развитую микропористую поверхность. При испытании на долговечность они имели больший рост тока в первые 500 ч по сравнению с катодами на кернах WRe/Ir. Экспериментально подобранная оптимальная температура выдержки при вакуумной откачке ЦЗУ с МНОК составила 415 °С. В процессе ионно-плазменного напыления пленочных эмиссионных покрытий на микрокатодах с увеличением температуры и мощности распыления карбонатной мишени концентрация атомов Ва и Са в покрытии возросла. Соотношение концентраций Ва/Sr в оксидном покрытии МНОК также увеличилось, что, вероятно, повлияло на взаимную растворимость атомов щелочно-земельных металлов в кристаллитах ВаО и улучшение их эмиссионной способности в вакуумных приборах.

Показано, что допустимо применение молекулярно-напыленных микрокатодов на керне WRe без пленки иридия в макетах вакуумных приборов малой и средней мощности с плотностью тока 1...1,5 А/см² и долговечностью 4...6 тыс. ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюбуа, Б. Ч. Современные эффективные катоды / Б. Ч. Дюбуа, А. Н. Королев; под редакцией д. т. н. А. А. Борисова // Фрязинская школа электроники: сб. статей. – М., 2012. – 624 с.
2. Дружинин, А. В. Пленочный керн оксидного катода / А. В. Дружинин, Ю. А. Кондрашенков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1973. – Вып. 11. – С. 54 – 60.
3. Кондрашенков, Ю. А. Долговечность молекулярно-напыленного оксидного катода / Ю. А. Кондрашенков, З. Н. Галанина, А. В. Дружинин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1974. – Вып. 7. – С. 35 – 47.
4. Патент № 2747505 РФ. Молекулярно-напыленный оксидный катод: заявка № 2020131146 от 21.09.2020 г.: опубл. 06.05.2021 / Ю. А. Будзинский, Н. А. Лябин, Г. А. Жабин [и др.].
5. Жабин, Г. А. Влияние повышенного отбора тока на состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 4 (543). – С. 45 – 49.
6. Жабин, Г. А. Особенности влияния отжига керна на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 100 – 103.
7. Жабин, Г. А. Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (535). – С. 15 – 21.
8. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темиряева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.
9. Жабин, Г. А. Влияние способа изготовления мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ и рабочего газа на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных микрокатодов / Г. А. Жабин, А. В. Коннов // Прикладная физика. – 2023. – № 2. – С. 73 – 79.

10. **Берлин, Е. В.** Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.
11. **Луфт, Б. Д.** Очистка деталей электронных приборов / Б. Д. Луфт, А. Л. Шустина. – М.: Энергия, 1968. – 320 с.
12. **Michaelson, H. B.** The work function of the elements and its periodicity / H. B. Michaelson // J. Appl. Phys. – 1977. – Vol. 48, No 11. – P. 4729.
13. **Царев, Б. М.** Расчет и конструирование электронных ламп / Б. М. Царев. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 672 с.
14. **Мойжес, Б. Я.** Физические процессы в оксидном катоде / Б. Я. Мойжес. – М.: Издательство наука, 1968. – 480 с.
15. Impact of nonuniform thermionic emission on the transition behavior between temperature and space charge limited emission / D. Chen, R. Jacobs, D. Morgan and J. Booske // IEEE Trans. Electron Devices. – 2021. – Vol. 68, No 7. – P. 3576 – 3581.
16. **Raju, R. S.** Studies on W–Re mixed-matrix cathodes / R. S. Raju // IEEE Trans. Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, No 5. – P. 786 – 793.
17. Влияние микропримесей *d*-элементов на электронную структуру кристаллитов ВаО в катодах СВЧ-приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, А. В. Шуманов, С. О. Москаленко, Р. Р. Залялиев, Н. Е. Кожевникова // XXVI Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Судак, 16 – 21 сентября 2019 г. – С. 278 – 282.

Статья поступила 7 ноября 2023 г.

НОВЫЕ КНИГИ

БЕЛОУС, А. И. Материалы и устройства наноэлектроники. Электроника после Мура. – М.: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 564 с. : ил., табл.

Приведены теоретические основы наноэлектроники, магноники, спинтроники, стрейнтроники. Рассмотрены метаматериалы и области их применения, основные типы искусственных нейронных сетей, физические основы квантовых точек, спиновые эффекты, магنونные технологии для обработки радиочастотных сигналов.

УДК 621.385.032

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ТЕРМОКАТОДА НА ЭЛЕКТРОДЫ ЭВП СВЧ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Т. М. Крачковская¹, Д. А. Комаров², В. И. Шестеркин¹

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²АО «НПП «Торий», г. Москва

Представлена модель испарения активного вещества со сферической поверхности термоэмиссионного катода и его напыления на высоковольтные электроды электронной пушки. В основе модели лежит метод статистических испытаний для равномерной функции плотности вероятности случайной величины угла вылета молекулы бария. Исходя из опыта эксплуатации клистрона, дана оценка величины критической массы (толщины) напыленного активного вещества на управляющий электрод, приводящей к высоковольтным пробоям. Разработанная модель позволяет на этапе проектирования электронно-оптических систем проводить анализ времени устойчивой (без пробоев) работы импульсных СВЧ-усилителей О-типа.

КС: термокатод, напыление активного вещества, метод статистических испытаний

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF SPRAYING THE ACTIVE SUBSTANCE OF A THERMOCATHODE ONTO THE ELECTRODES OF MICROWAVE VACUUM DEVICES BY STATISTICAL TESTING METHOD

T. M. Krachkovskaya¹, D. A. Komarov², V. I. Shesterkin¹

¹JSC «RPE «Almaz», Saratov

²JSC «NPP «Toriy», Moscow

A model of an active substance evaporation from a spherical surface of a thermoemissive cathode and its spraying on high voltage electrodes of an electron gun is presented. The model is based on statistical testing method for the uniform function of the probability density of a random variable of the barium molecule escape angle. Based on the experience of klystron operation the value of the critical mass (thickness) of the sprayed active substance on the control electrode, leading to high voltage breakdowns, is estimated. The developed model allows to analyze the time of stable (without breakdowns) operation of O-type pulsed microwave amplifiers at the stage of designing electron-optical systems.

Keywords: thermocathode, spraying of active substance, statistical testing method

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований при эксплуатации ЭВП СВЧ является уменьшение количества и мощности высоковольтных пробоев в электронной пушке. Как правило, под пробоем понимают режим резкого возрастания тока резонаторного блока или замедляющей системы, приводящий к срабатыванию устройства блокировки и отключению питающих напряжений.

Известно, что в ЭВП СВЧ через определенное время наработки резко возрастает количество пробоев. Они могут быть инициированы термо- и автоэлектронной эмиссией с управляющего

электрода, на который адсорбированы атомы и молекулы активного вещества катода [1]. Вопросы адсорбции активного вещества с поверхности термокатода на электроды пушки исследованы в работах [2–6]. Однако остается неясным вопрос о критической массе, или толщине, адсорбированной пленки активного вещества на поверхности управляющего электрода, приводящей к интенсивным пробоям.

В данной работе представлены результаты численного моделирования процесса напыления активного вещества металлопористого катода (МПК) М-типа на электроды, основанные на методе статистических испытаний, проведена оценка критической массы на основании данных эксплуатации мощного многолучевого клистрона с рабочей температурой катода 1120 °С (ярк.).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

На рис. 1 представлена геометрия электронной пушки с управляющим электродом и сферическим МПК, формирующей один из лучей многолучевого клистрона. С учетом азимутальной симметрии рассмотрим плоскую задачу испарения активного вещества с поверхности катода. В качестве модельного приближения будем считать испарившееся вещество идеальным газом, т. е. пренебрежем соударениями вышедших с поверхности молекул друг с другом, а также рассеянием на молекулах остаточного газа, принимая, что длина свободного пробега молекул много больше расстояния между катодом и управляющим электродом. Последнее ограничение не принципиально и может быть исключено (или учтено при достаточной для столкновения концентрации испарившихся молекул) путем введения параметра эффективного сечения рассеяния. В работе рассмотрены процессы испарения атомов и молекул активного вещества с поверхности, ограниченной радиусами сферы и цилиндрической части катода.

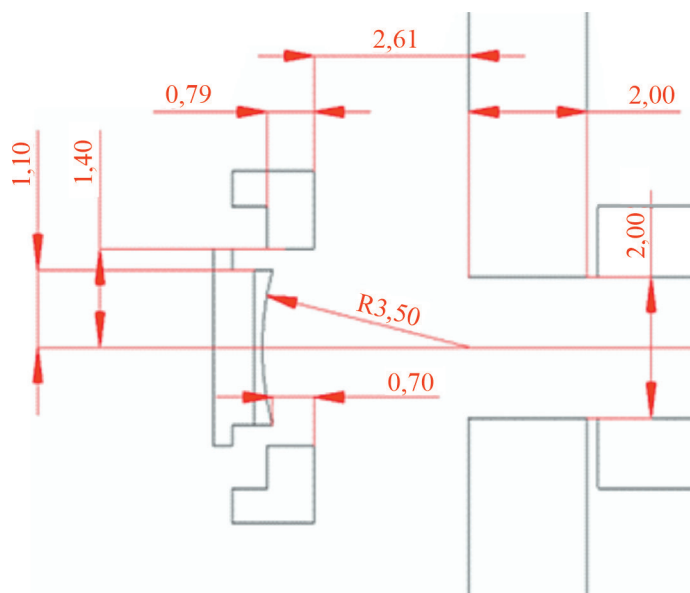


Рис. 1. Схема электронной пушки

Удобно, в данном случае, измерять угол траектории испарившейся молекулы по отношению к нормали в данной точке поверхности катода (рис. 2).

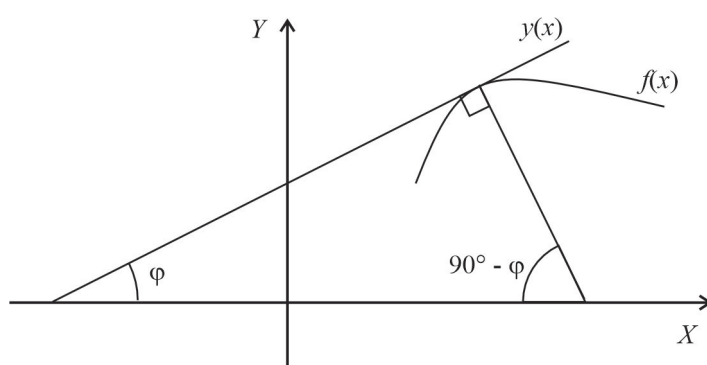


Рис. 2. Пояснение к методике расчета

Уравнение сферы катода в сечении имеет вид:

$$(x - R)^2 + y^2 = R^2, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны катода. Координаты границы сферы определяются следующим образом:

$$y_0 = b,$$

$$x_0 = R - \sqrt{R^2 - b^2}.$$

Здесь b – радиус цилиндрической части катода.

Уравнение нормали в точке с координатами (x_k, y_k) к поверхности катода:

$$y_n(x) = -\frac{1}{y'(x_k)}(x - x_k) + y_k, \quad (2)$$

где производная

$$y'(x_k) = \frac{R - x_k}{y_k}.$$

Следуя методу статистических испытаний [7], распределение угла испарения для одиночного процесса равновероятно, т. е. плотность вероятности постоянна в заданном диапазоне изменения случайной величины. В качестве случайной величины выбран косинус некоторого преимущественного угла испарения с постоянной плотностью вероятности, что приводит к интервалу плотности вероятности $[-1, 1]$. Розыгрыш случайной величины в соответствии с методом статистических испытаний определяется уравнением:

$$\int_0^\varepsilon p(x) dx = \gamma, \quad (3)$$

где γ – случайные числа с нормальным распределением; ε – случайная величина; $p(x)$ – плотность вероятности.

Разбивая поверхность сферы на N точек (точки «стрельбы»), определим координаты точек в виде:

$$x_i = ih_x, \quad (4)$$

$$y_i = \sqrt{R^2 - (x_i - R)^2}, \quad (5)$$

где для шага по оси абсцисс справедливо выражение:

$$h_x = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{N - 1}.$$

Формула для разыгрывания случайной величины угла в случае равномерного закона распределения плотности вероятности из соотношения (3) будет иметь вид:

$$\varphi_j = \arccos(2\gamma_j - 1), \quad (6)$$

где индекс j – номер статистического испытания. При этом случайный угол будет отсчитываться от нормали к точке поверхности сферы.

Проводя из каждой точки катода прямую линию под случайным разыгранным углом, определим координату в плоскости мишени:

$$y_i^m = \operatorname{tg}(\varphi_j) \cdot (x - x_i) + y_i.$$

Розыгрыш углов повторялся M раз, после чего производилось усреднение числа точек, достигших управляющего электрода за все испытания. Отношение полученного среднестатистического числа точек на мишени к общему числу точек разбиения сферы определяет значение перехвата поверхностью доли испарившегося активного вещества.

Алгоритм реализован в среде FORTRAN 90. Число точек разбиения поверхности катода варьировалось от 100 до 1000, число статистических испытаний менялось от 1000 до 40000. Численный анализ показал, что при числе испытаний более 10000 среднестатистическое значение точек перехвата при 1000 точек стрельбы изменяется в пределах ± 3 единицы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

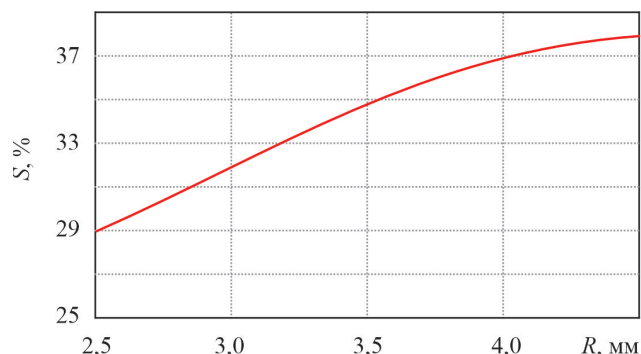
В качестве примера использования данной методики рассмотрим электронную пушку многолучевого клистрона (см. рис. 1).

При расчетах не учитываются шероховатость поверхности и эффект перепыления с управляющего электрода. Данный клистрон имеет модуляцию «ноль – минус», т. е. в режиме импульса выходного сигнала потенциалы катода и управляющего электрода равны, а в режиме паузы потенциал управляющего электрода меньше потенциала катода. Время гарантийной наработки составляло 1500 ч. Из данных эксплуатации клистрона известно, что при средней наработке 600...700 ч в приборе регистрировались пробой катод – управляющий электрод. Интенсивность не превышала пяти пробоев в час. В результате пробоев происходила десорбция атомов активного вещества с поверхности управляющего электрода, клистрон восстанавливал электрическую прочность и работал без пробоев в течение примерно такого же промежутка времени до гарантийной наработки.

Результаты моделирования показали, что для приведенных на рис. 1 размеров пушки коэффициент перехвата активного вещества с поверхности катода на кольцевую часть управляющего электрода, находящуюся в зоне потока, составил $\sim 35\%$. При равномерном напылении активного вещества монослоями на поверхность управляющего электрода легко оценить, что за время 600 ч при данном коэффициенте перехвата и скорости испарения с катода $0,5 \cdot 10^{-7}$ кг/м²·с критическая масса адсорбированного вещества, например бария, на поверхности управляющего электрода составит $1,63 \cdot 10^{-10}$ кг. Если принять диаметр молекулы бария равным $3,0 \cdot 10^{-10}$ м [8], то толщина адсорбированной пленки составит $\sim 3,5$ мкм.

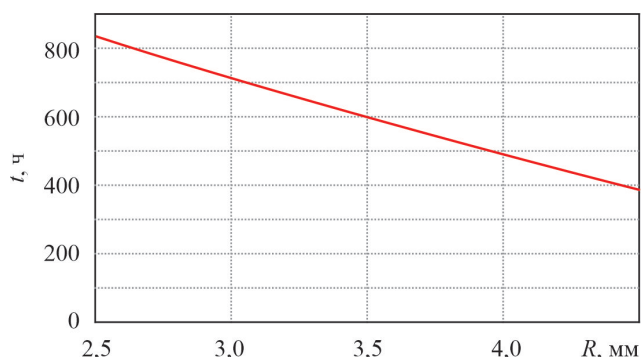
На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости коэффициента перехвата активного вещества управляющим электродом S от радиуса кривизны сферы R при постоянной скорости испарения. Безусловно, что данный параметр определяется требованиями электронной оптики, однако его изменения в минимальном диапазоне вполне возможны без нарушения требований к положению кроссовера электронного потока.

Рис. 3. Зависимость коэффициента перехвата S от радиуса кривизны катода R



Принимая оценку критической массы, можно вычислить изменения времени ее достижения при разном значении радиуса кривизны сферы (рис. 4). Из результатов расчета следует, что, варьируя даже один параметр – радиус кривизны катода R , можно увеличить время t достижения критической массы более чем на 200 ч.

Рис. 4. Зависимость времени достижения критической массы t от радиуса кривизны катода R



С использованием модели случайного осаждения в работе [9] показано, что при данном числе монослоев на поверхности электрода шероховатость возростала в 1,2 раза с появлением ярко выраженных микроострий, которые и являлись инициаторами пробоя (рис. 5).

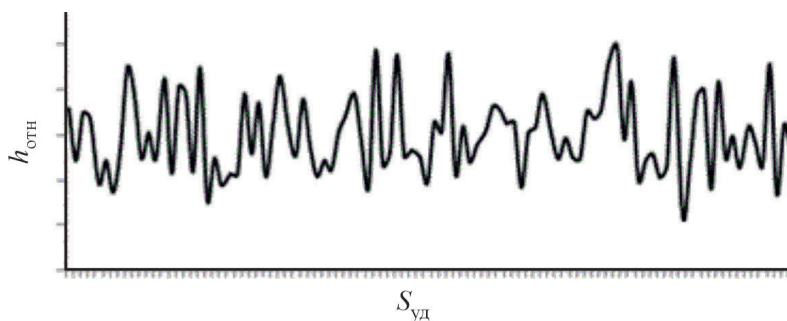


Рис. 5. Структура поверхности после напыления бария (модель случайного осаждения; $h_{\text{отн}}$ – относительная высота микроострий; $S_{\text{уд}}$ – удельная площадь поверхности)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена модель испарения активного вещества катода со сферической поверхности и напыления его на высоковольтные электроды. В основе модели лежит метод статистических испытаний для равномерной функции плотности вероятности случайной величины угла вылета молекулы бария. Исходя из опыта эксплуатации клистронов, дана оценка критической массы (толщины) напыленного активного вещества на управляющий электрод. Разработанная модель позволяет на этапе проектирования электронно-оптических систем проводить анализ времени устойчивой (без пробоев) работы импульсных СВЧ-усилителей О-типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гилмор, А. С., мл.** Лампы с бегущей волной / под ред. Н. А. Бушуева; перевод А. Г. Кудряшов. – М.: Техносфера, 2013. – 616 с.
2. **Gardiner, T. M.** Long life gridded guns / Intern. Conf. on Microwave Tubes in Syst.: Problems & Prospects, London. Oct. 22 – 24, 1984. – P. 47 – 49.
3. Anti-emission characteristics of the grid coated with hafnium film / J. Jiang, B. Jiang, C. Ren [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2005. – Vol. 23 (3). – P. 506 – 511. – DOI: 10.1116/1.1894726.
4. Study on the composition and phase change of BaO/Hf/Mo under high temperature / L. J. Zhuge, X. M. Wu, F. J. Qu [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2006. – Vol. 67. – P. 1394 – 1398. – DOI: 10.1016/j.jpss.2005.12.012.
5. **Комаров, Д. А.** Влияние скорости испарения активного вещества термокатодов на электропрочность электронных пушек мощных клистронов (математическая модель) / Д. А. Комаров, С. П. Морев // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сборник статей VIII Всероссийской конференции. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – С. 73 – 74.
6. Физико-химический анализ миграции активного вещества металлопористого катода на электроды катодно-сеточного узла импульсной ЛБВ / Т. М. Крачковская, Р. Ю. Богачев, А. С. Емельянов [и др.] // Тезисы докладов юб. науч.-техн. конф. АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника 2023», г. Фрязино. – 2023. – С. 65.
7. **Соболь, Н. М.** Метод Монте-Карло / Популярные лекции по математике. – 1978. – Вып. 46. – 3-е изд., доп. – 63 с.
8. **Тягунов, Г. А.** Электровакуумные приборы. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1949. – 340 с.
9. **Булавин, Л. А.** Компьютерное моделирование физических систем: учебное пособие / Л. А. Булавин, Н. В. Выгорницкий, Н. И. Лебовка. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 352 с.

*Статья поступила 26 декабря 2023 г.,
после переработки – 10 января 2024 г.*

УДК 621.372.832.8

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ

(на основании обзора отечественных и зарубежных публикаций)

В. В. Федоров

АО «НИИ «Феррит-Домен», г. Санкт-Петербург

Проведен обзор ключевых направлений развития ферритовых развязывающих приборов, предназначенных для применения в наиболее востребованных областях современной радиоэлектронной аппаратуры. Рассмотрены различные предлагаемые технологические решения при конструировании перспективной радиоэлектронной аппаратуры.

КС: Ka-диапазон, циркулятор, развязывающий прибор, феррит

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF FERRITE DECOUPLING DEVICES

(based on a review of domestic and foreign publications)

V. V. Fedorov

JSC «Ferrite-Domen», Saint Petersburg

A review of the key trends for development of the ferrite decoupling devices intended for use in the most popular applications of modern electronic equipment is presented. Various proposed technological solutions were considered when designing promising radioelectronic equipment.

Keywords: Ka frequency range, circulator, decoupling device, ferrite

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях бурно развивающейся аппаратуры для радиолокации, навигации, телекоммуникации и др. применений циркулятор продолжает оставаться одним из важнейших элементов в приемопередающих модулях, работающих в режиме одновременного приема-передачи (*simultaneous transmit and receive mode*). В этом режиме работы использование циркулятора обеспечивает возможность отправлять и получать сигналы одновременно через единственную апертуру антенны. В упрощенном виде структурный состав используемой обычно схемы приемопередающего модуля приведен на рис. 1 [1].

В современных условиях, помимо традиционного использования таких устройств в аппаратуре военного назначения, быстро развиваются направления коммерческого применения для авиационных радаров, радаров предупреждения погодных аномалий, океанографических спутниковых радаров, автомобильных радаров предупреждения столкновений, обеспечения каналов спутниковой связи и обмена информацией. Для решения перечисленных задач прослеживается заметно увеличивающееся внимание к коротковолновой части сантиметрового диапазона и миллиметровому диапазону длин волн.

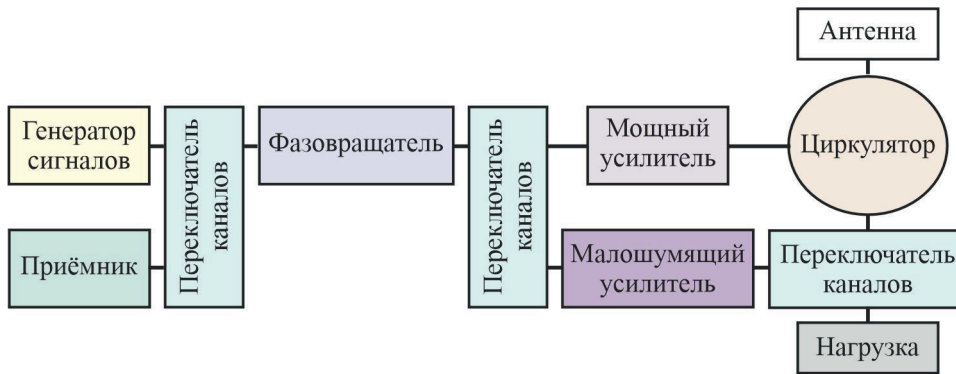


Рис.1. Упрощенная схема приемопередающего модуля [1]

Особое внимание уделяется стремительно развивающемуся направлению радиосвязи, где, в свою очередь, наибольшее значение приобретают планы развития сетей мобильной радиосвязи поколения 5G (*5th generation mobile network*). В развитии сетей заявлена цель – возможность передачи неограниченного объема данных применительно к потребности потребителя (*unlimited data capacity*) [2]. Планируемые в настоящее время перспективы развития мобильной радиосвязи показаны на рис. 2.

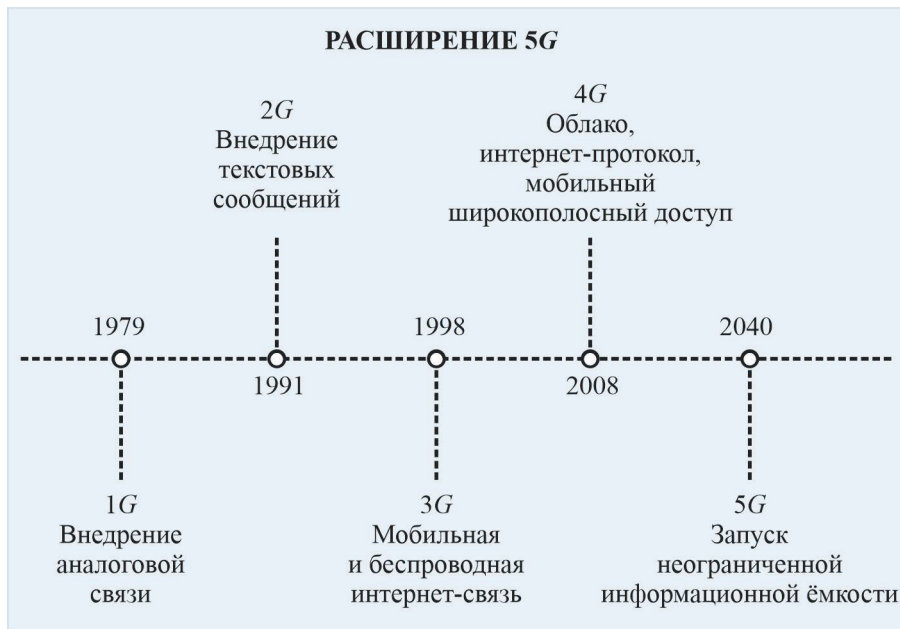


Рис. 2. Перспективы развития сетей мобильной радиосвязи [2]

Для развития системы радиодоступа нового поколения сети 5G NR (*new radio*) предусмотрено использование частотных диапазонов, условно называемых FR1 и FR2, показанных в табл.1.

Для обеспечения заявленных задач 5G NR использование диапазонов FR1 будет недостаточно. В настоящее время в качестве новой парадигмы построения полномасштабной сети мобильной радиосвязи рассматривается использование диапазонов вблизи 28 ГГц и 39 ГГц [2].

В этой связи в последнее время наблюдается рост количества публикаций, рассматривающих различные аспекты решения задачи обеспечения перспективной радиоэлектронной аппаратуры различного назначения ферритовыми развязывающими приборами миллиметрового диапазона.

Таблица 1

Частотные диапазоны FR1 и FR2 системы радиодоступа 5G NR [2]

Название частотного диапазона	Диапазон, ГГц	Ширина полосы (max), МГц	Расстояние поднесущей, кГц	Область применения
FR1	<2	50/100	15	Охват внутри помещения
	2 – 6	50/100/200	15/30/60	Для поддержания баланса между пропускной способностью и охватом
FR2	>6	200/400	60/120/240/480	Для обеспечения высокой скорости передачи данных

По сравнению с уже наработанными технологическими решениями изготовления модулей аппаратуры в менее высокочастотных диапазонах, аппаратура миллиметрового диапазона будет иметь свою технологическую специфику, связанную с возросшей интеграцией элементов по причине уменьшения длины волны. В этой связи, наряду с вариантами изготовления вентиля и циркуляторов в **традиционном конструктивно-технологическом исполнении**, значительное внимание уделяется рассмотрению возможной технологической интеграции ферритовых развязывающих приборов в модули радиоэлектронной аппаратуры, изготовленные с использованием различных современных конструктивно-технологических решений:

- на основе интегрированного в подложку волновода (*substrate integrated waveguide, SIW*);
- на основе копланарной линии (*coplanar waveguide, CPW*);
- изготовленных в едином технологическом цикле по технологии спекания низкотемпературной керамики (*low temperature co-fired ceramic, LTCC*).

Особое внимание уделяется рассмотрению возможности создания циркуляторов **на основе гексаферритов без использования навесной магнитной системы (*self-biased*)**.

2. МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЦИРКУЛЯТОРЫ ТРАДИЦИОННОГО КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ

2.1. В статье [3] приводятся результаты проведенных работ по разработке Y-циркулятора и вентиля Ka-диапазона частот. Сообщается, что выработан общий подход к разработке микрополосковых ферритовых развязывающих приборов Ka-диапазона частот, разработаны методы проектирования, рассмотрены основные технологические процессы изготовления, изготовлены макеты микрополоскового вентиля (рис. 3) и циркулятора с представленными в табл. 2 характеристиками.

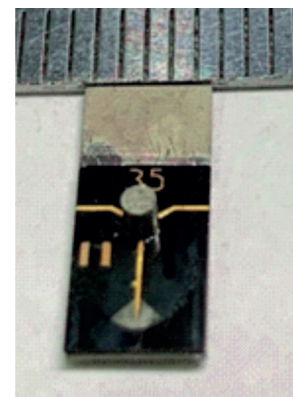


Рис. 3. Внешний вид макета микрополоскового вентиля мм-диапазона [3]

Таблица 2

Наименование параметра, единица измерения	У-циркулятор	Вентиль
Диапазон рабочих частот Δf , ГГц	36 – 39	33 – 37
Прямые потери $\alpha_{\text{п}}$, дБ	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$
Развязка (обратные потери) $\alpha_{\text{обр}}$, дБ	≥ 22	≥ 20
КСВН (вх./вых.) K	$\leq 1,3$	$\leq 1,4$
Входная непрерывная мощность $P_{\text{вх.ср}}$, Вт	0,1	2

2.2. Внешний вид серийно изготавливаемых микрополосковых циркуляторов иностранного производства показан в [1]. Конструкции приборов очень близки.

Параметры изделий из каталога продукции [4] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон частот, ГГц	Номер модели	Прямые потери (max), дБ	Развязка (min), дБ	КСВН (max)	Мощность прямой волны, Вт	Полезная выходная мощность, Вт	Диапазон рабочих температур, °С
28,00 – 30,00	4ИММ29-6	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
30,00 – 32,00	4ИММ31-5	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
31,50 – 33,50	4ИММ32-3	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
33,50 – 36,50	4ИММ35-8	1	18	1,35	2	1	-30...+70
34,00 – 36,00	4ИММ35-1А	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
35,00 – 37,00	4ИММ36-3	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
36,00 – 38,00	4ИММ37-1	0,9	20	1,3	2	1	-30...+70
37,00 – 40,00	4ИММ39-2	0,9	20	1,35	2	1	-30...+70

Микрополосковая технология исполнения модуля аппаратуры, в состав которого включен ферритовый циркулятор, является давно используемой, дешевой, хорошо отработанной, но имеет ряд присущих ей недостатков, влияние которых возрастает с увеличением рабочей частоты, что в миллиметровом диапазоне уже приводит к значительным трудностям.

В различных публикациях эти недостатки описываются следующим образом:

– появление паразитных взаимосвязей по реактивному полю внутри СВЧ-модулей, что требовало вести поиск решений по устранению паразитных резонансов [5];

– высокий уровень диэлектрических потерь, резонансы различных типов волн, приводящие к нежелательному излучению [6];

– повышенное нежелательное излучение микрополосковых линий в миллиметровом диапазоне [7].

Кроме этого, отмечается конструктивная особенность микрополосковых циркуляторов и вентилях мм-диапазона, наглядно заметная на рис. 3 и 4, состоящая в том, что специфическая форма внешнего магнита (*aspect ratio*), существенно необходимая для достижения требуемых электродинамических параметров изделия, является причиной значительных трудностей при создании компактной технологичной конструкции модуля, содержащего ферритовый элемент [1]. Не-

удобство состоит в том, что в рассматриваемом частотном диапазоне при использовании традиционно применяемых ферритовых материалов высота внешнего магнита становится сопоставимой и даже превышающей поперечные размеры этого магнита, что создает определенные конструктивные трудности при проектировании компактных устройств.

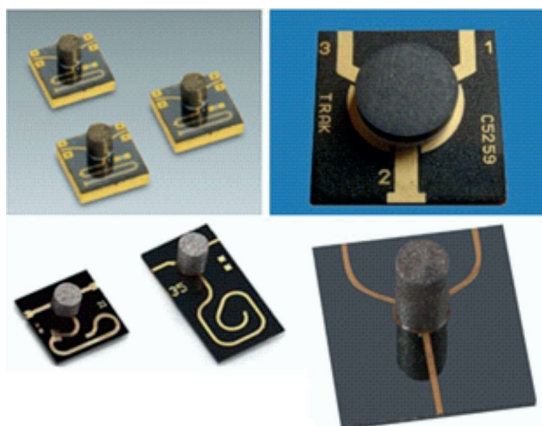


Рис. 4. Внешний вид микрополосковых вентилей и циркуляторов иностранного производства [1]

Метод выбора внешнего магнита и определение его оптимальной формы для достижения требуемых параметров ферритового развязывающего прибора подробно описаны в [3].

Перечисленные обстоятельства побуждают многие исследовательские коллективы из различных стран в целях решения обозначенных проблем проводить исследования по созданию ферритовых развязывающих приборов на других линиях передачи, с использованием других базовых технологических процессов и других ферритовых материалов (в том числе гексаферритов, ферритов с пониженной температурой обжига и др.).

3. ФЕРРИТОВЫЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДА

3.1. В [5] представлен ферритовый вентиль на основе интегрированного в подложку волновода. Описаны методика проектирования, методика выбора ферритового материала, методика выбора величины оптимального внешнего магнитного поля и размеров внешнего магнита. Изготовлен макет вентилей *Ka*-диапазона. Габаритные размеры: $8 \times 12 \times 2,8$ мм. В рабочей полосе частот 31,5...33 ГГц вентиль имеет параметры: прямые потери – не более 1,6 дБ, обратные потери – не менее 20 дБ, КСВН (вх./вых.) – не более 2.

3.2. В [8] рассматривается возможность использования таких преимуществ SIW-устройств, как низкие потери, низкая стоимость, относительно высокая электропрочность, возможность высокоплотной интеграции компонентов схемы. Предлагается оптимизированная конструкция циркулятора. В *Ka*-диапазоне в 10,7%-ной рабочей полосе достигнут уровень согласования с КСВН менее 1,25.

3.3. В [9] продолжается обсуждение преимуществ использования SIW-устройств, технологии их изготовления. Описываются методы снижения вносимых потерь, сообщается о создании циркулятора в *Ka*-диапазоне с рабочей полосой 2 ГГц, КСВН менее 1,1 и вносимыми потерями менее 0,42 дБ.

4. ФЕРРИТОВЫЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ НА КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ

Возможности создания развязывающих приборов на копланарной линии также уделяется значительное внимание. Конструкция таких приборов простая, технологичная, компактная. Но сообщения, содержащие сведения о реально изготовленных образцах, пока ограничиваются только *Ku*-диапазоном.

4.1. В [10] исследуются пути уменьшения вносимых потерь ферритовых развязывающих приборов без внешней магнитной системы. Один из недостатков такого типа приборов – высокий уровень вносимых потерь. Для решения этой проблемы рассматривается специальный состав гексаферритового материала на основе La–Co. Сообщается, что применение этого материала позволяет уменьшить вносимые потери микрополосковых и копланарных циркуляторов в *Ku*-диапазоне до уровня менее 0,6 дБ при сохранении высокого уровня развязок в 5%-ной полосе рабочих частот.

4.2. В [11] сообщается о продолжающемся рассмотрении циркулятора на копланарной линии без внешней магнитной системы. Для обеспечения требуемых невзаимных свойств использован гексаферрит с высокой остаточной намагниченностью и сильным внутренним полем анизотропии, изготовленный на основе нового La–Co-состава.

Изготовленный образец циркулятора имеет следующие параметры в *Ku*-диапазоне: вносимые потери – менее 0,5 дБ, развязка – более 20 дБ в 3%-ной рабочей полосе.

На рис. 5 приведены схематическое изображение и фотография изготовленного образца. Размеры образца: 4,78×4,4×0,41 мм.

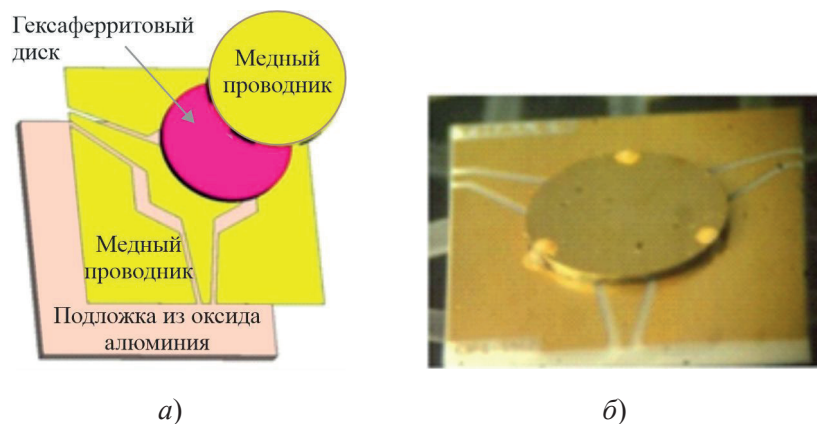


Рис. 5. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) образца циркулятора на основе гексаферрита на копланарной линии передачи [11]

4.3. В [12] приведены расчетные характеристики циркуляторов на копланарных линиях на основе пленки бариевого феррита толщиной 10 мкм для *Ka*-диапазона. Расчет производился при помощи симулятора высокочастотных структур HFSS. Проведено расчетное сравнение циркулятора на копланарной линии (CWP) и копланарной линии с дополнительным заземлением (CWPG). Исследовано влияние ширины зазора копланарной линии и ширины линии ферромагнитного резонанса на параметры прибора. Показана расчетная возможность достижения вносимых потерь 0,13 дБ, развязок 22,89 дБ вблизи рабочей частоты 36,9 ГГц.

5. ФЕРРИТОВЫЕ РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ СПЕКАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ

5.1. В [13] рассматривается 3-плечий циркулятор, изготовленный по ЛТСС-технологии. Циркулятор был спроектирован, изготовлен и экспериментально исследован для использования в малогабаритных приемопередающих модулях полезной нагрузки спутников. Для изготовления циркулятора использован феррит ESL 40012 с пониженной температурой обжига, специально разработанный для возможности спекания по ЛТСС совместимой технологии [14]. Шихта ESL 40012 была разведена в спирте и нанесена методом трафаретной печати на стандартную ленту для ЛТСС типа А6МЕ производства компании Ferro. Изготовленный циркулятор работает в Ku -диапазоне, имеет вносимые потери около 1,5 дБ и развязку выше чем 15 дБ. Изготовленный методом трафаретной печати феррит относительно тонкий и имеет малые размеры, это снижает напряжения, возникающие при спекании материалов с различной структурой. Описаны процесс проектирования, инновационный технологический процесс изготовления и экспериментального исследования. Описанный технологический процесс полностью совместим со стандартной ЛТСС-технологией.

5.2. В [15] описан новый подход к проектированию и изготовлению малогабаритных микрополосковых циркуляторов с составе ЛТСС-модулей для Ku и Ka спутниковой связи. Прецизионно изготовленные механическим способом ферритовые элементы встраивались в ЛТСС-плату как отдельные, заранее спеченные объемные керамические элементы для проведения последующего процесса по усовершенствованной технологии спекания ЛТСС. Прецизионное изготовление ферритовых элементов, точный учет усадки керамики при спекании и детальный электродинамический расчет, учитывающий особенности технологии, в своей комбинации позволили создать циркуляторы с хорошими функциональными параметрами и хорошей технологической стабильностью характеристик. Представлены результаты моделирования, находящиеся в хорошем соответствии с измеренными характеристиками для устройств Ku - и Ka -диапазонов.

5.3. В [16] рассматривается способ получения двух новых марок ферритового материала, созданных на основе феррошпинели и феррограната, с пониженной температурой обжига (950 °С), специально разработанных с целью совместимости технологического процесса обжига ферритов со стандартной технологией ЛТСС.

Ферриты на основе железиттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ и никель-цинковой шпинели $NiZnFeO$ с добавлением в состав висмута и меди преобразованы в составы, спекаемые при температуре 950 °С.

В табл. 4 представлены параметры полученных новых ферритовых марок.

Таблица 4

Материал	ϵ	$tg\delta$	$4\pi M_s$, Гс	ΔH , Э
Гранат 1900	21	$3 \cdot 10^{-3}$	1900	100
Шпинель 3800	13	$1 \cdot 10^{-3}$	3800	100

На рис. 6 схематически показан предлагаемый технологический процесс совместного спекания низкотемпературного феррита и керамической платы ЛТСС.

На рис. 7 и 8 приведены экспериментальные результаты для изготовленных образцов в сравнении с результатами предварительного моделирования.

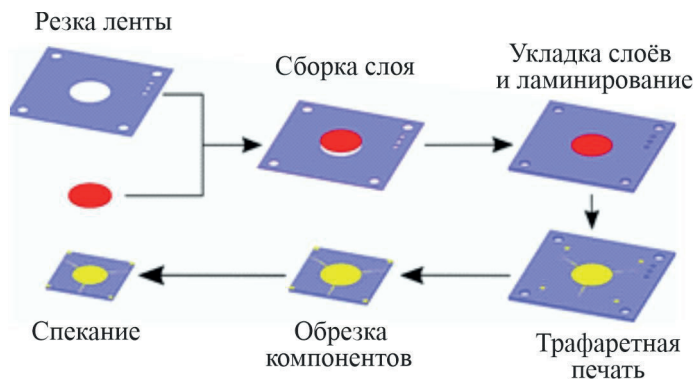


Рис. 6. Пошаговые стадии технологического процесса

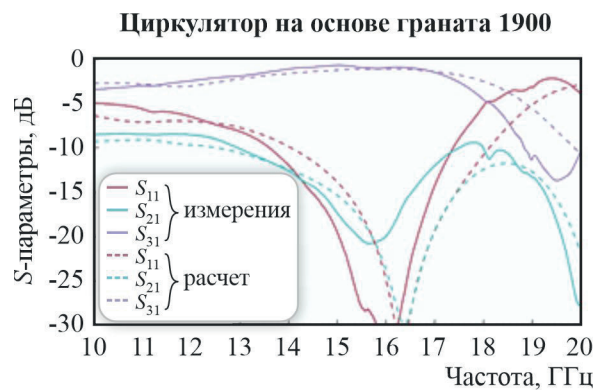


Рис. 7. Экспериментальные результаты в сравнении с расчетными для модифицированного феррограната



Рис. 8. Экспериментальные результаты в сравнении с расчетными для модифицированной феррошпинели

Для модифицированного феррограната при развязке, превышающей 15 дБ, ширина рабочей полосы составляет 1,87 ГГц, уровень вносимых потерь – не более 1,05 дБ.

Для модифицированной феррошпинели при развязке, превышающей 15 дБ, ширина рабочей полосы составляет 3,91 ГГц, уровень вносимых потерь – не более 0,86 дБ.

Предполагается, что рассматриваемая конструкция имеет хорошие перспективы применения для создания циркуляторов, технологически совместимых с технологией LTCC при низкой стоимости изготовления.

5.4. В [17] рассматривается возможность совмещения преимуществ циркуляторов без внешней магнитной системы с преимуществами LTCC-технологии. Рассматриваются различные технологические варианты решения поставленной задачи. Как возможный вариант рассматривается помещение отдельно изготовленного гексаферритового цилиндра радиусом около 1 мм и толщиной около 0,3 мм, изготовленного на основе состава La/Co с добавлением Sr, в прецизионно вырезанную при помощи лазера полость в спекаемых керамических слоях. В целях недопущения деформации при спекании полость имеет допуск на усадку при спекании. Для прецизионного позиционирования ферритового цилиндра в полости, использованы кольца из углеродной ленты, прецизионно вырезаемые лазером. Во время процесса спекания они обеспечивают точное центрирование ферритового цилиндра во время технологического процесса, при этом за время технологического процесса спекания сами они полностью уничтожаются. Для удаления газов из полости, образующихся во время спекания, в LTCC-слое предусмотрены каналы деаэрации.

Схематически технологический процесс представлен на рис. 9.

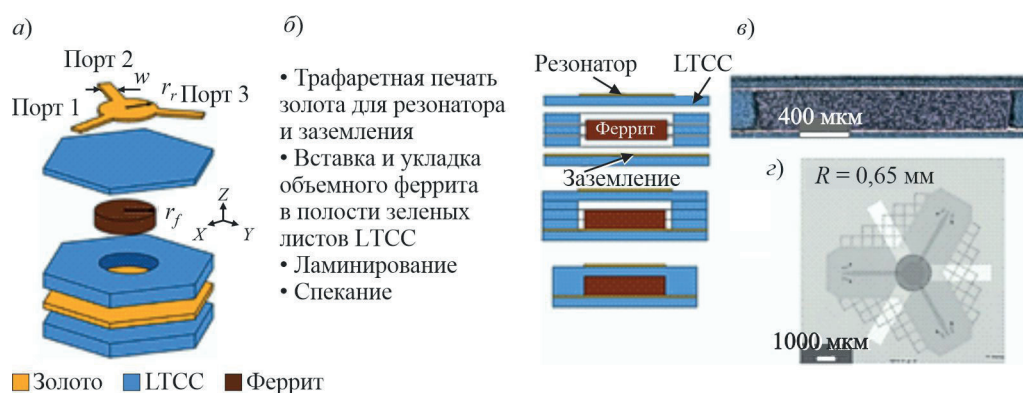


Рис. 9. Вид составных частей циркулятора (а); схема технологического маршрута изготовления циркулятора (б); микрофотография поперечного сечения спекенного циркулятора со встроенным гексаферритом (в); компьютерная томография полученного образца – вид сверху, показывающий структуру из золотых полосок, встроенный феррит, каналы деаэрации (г)

По результатам измерения параметров показан достигнутый уровень невзаимности 15 дБ в рабочей полосе 3 ГГц вокруг средней частоты 40,8 ГГц.

Полученные результаты показывают перспективность использования рассматриваемой технологии в *Ka*-диапазоне.

6. ПРИМЕРЫ ДРУГИХ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

6.1. В [18] рассматривается новый подход к созданию гексаферритового *Y*-циркулятора, спроектированного и изготовленного по технологии, совместимой со стандартной CMOS (*complementary-metal-oxide-semiconductor*) технологией (КМОП-технологией). При изготовлении покрытия используется метод центрифугирования, где фоторезист смешивается с наногексаферритовой пуд-

рой для образования тонкой магнитной пленки в устройстве. Новый циркулятор сочетает преимущества малых размеров и легкой интеграции в КМОП-технологии при сохранении требуемых невзаимных свойств. Была использована стандартная 180-нм КМОП-технология. *S*-параметры, измеренные на циркуляторе, демонстрируют, что прибор имеет развязку 20 дБ в рабочей полосе 520 МГц с центральной частотой 26,2 ГГц. Минимальные вносимые потери – 1,81 дБ. Предлагаемый циркулятор имеет перспективы для применения в системах связи 5G.

В статье описана технология получения ферромагнитного образца в форме плоской цилиндрической таблетки методом фотолитографического процесса в центрифуге. Используются негативный фоторезист марки SU-8 и нанопудра бариевого гексаферрита $BaFe_{12}O_{19}$, которые перемешиваются в весовом соотношении 5:3 в течение 10 мин. Затем полученная смесь распыляется на подложку через цилиндрическое отверстие путем стандартного фотолитографического процесса. Одновременно перпендикулярно подложке прикладывается внешнее магнитное поле около 5000 Э во время центрифугирования и спекания, что обеспечивает упорядоченную ориентацию наночастиц. Таким образом, после удаления излишков фоторезиста образуется ферромагнитный цилиндр толщиной 100 мкм с намагниченностью вдоль оси *Z*, поддерживаемой кристаллической структурой. При этом температура спекания напыленной пленки составляет 120 °С и совместима со стандартной КМОП-технологией. Она намного меньше температуры обжига нанопудры бариевого гексаферрита, которая составляет 1200 °С. На рис. 10 и 11 показана упрощенная модель циркулятора, изготовленного по КМОП-технологии.

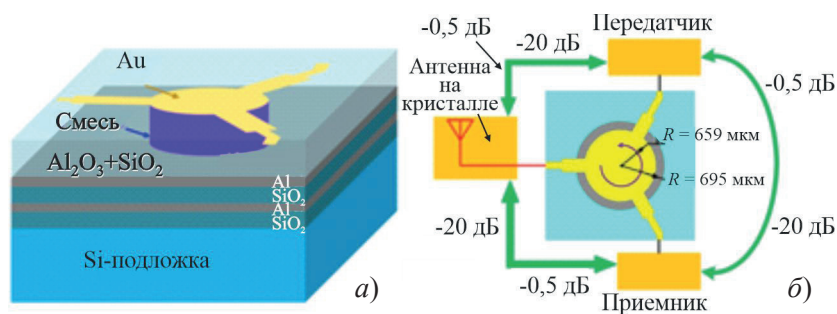


Рис. 10. Схематическое изображение циркулятора (а) и схема направлений передачи сигналов в составе устройства (б)

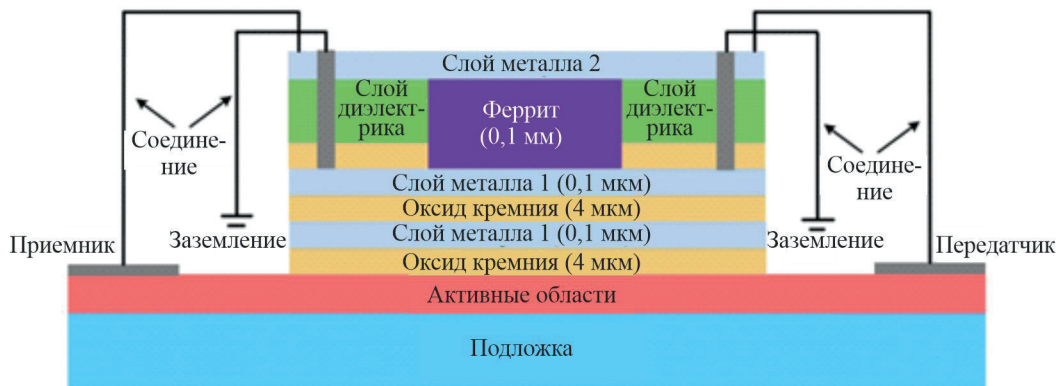


Рис. 11. Схематическое изображение поперечного сечения циркулятора

Подробно описаны основные геометрические характеристики, мкм, предлагаемого циркулятора:

Радиус циркулятора.....	695
Толщина смеси гексаферрита и фоторезиста h	100
Длина микрополосковой линии L	757
Ширина микрополосковой линии W	359
Длина четвертьволнового трансформатора l	888
Ширина четвертьволнового трансформатора w	158
Радиус отверстия заземления r	133

На рис. 12 показаны расчетные и экспериментально измеренные характеристики циркулятора.

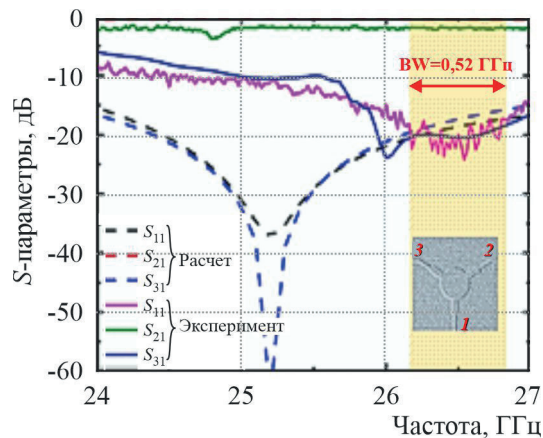


Рис. 12. Расчетные и экспериментально измеренные характеристики циркулятора

6.2. В [7] рассматривается новый модифицированный вариант ферритового Y -циркулятора Ka -диапазона на основе интегрированного в подложку волновода совместно с периодической структурой (*substrate integrated gap waveguide, SIGW*). Введение периодической структуры осуществляется с целью расширения полосы рабочих частот циркулятора.

В качестве базовой выбрана конструкция, подобная конструкции циркулятора на Π -образном волноводе, но выполненного в виде волновода, встроенного в подложку из материала Rogers 5880 LZ. Для формирования периодической структуры и конфигурации ребра Π -образного волновода использована вторая подложка из материала Rogers 3003, имеющая периодическую прошивку между заземляющими плоскостями. На стороне, примыкающей к первой подложке, сформированы поверхность ребра Π -образного волновода Y -циркулятора и периодическая структура металлических «грибков» внутри диэлектрического материала. Схематическое устройство и поперечное сечение циркулятора показаны на рис.13 и 14.

В качестве ферритового материала выбрана никель-цинковая шпинель марки С-48 производства «Countis Industries» с параметрами: $\epsilon_r = 13,5$; $4\pi M_s = 5300$ Гс; диаметром 1,74 мм и высотой 0,22 мм. На изготовленном образце экспериментально получены следующие параметры: рабочая полоса частот – 29...38 ГГц, прямые потери – 1,7 дБ, развязка – не менее 16,5 дБ, отражение – 13,5 дБ.

Предполагаемое назначение циркулятора – для спутниковой и радиолокационной аппаратуры Ka -диапазона.

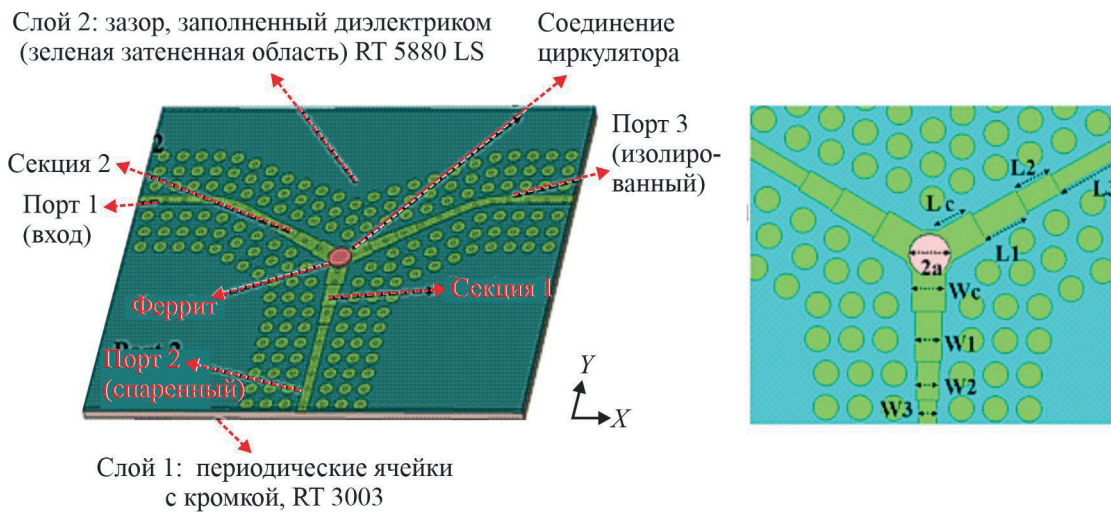


Рис. 13. Схематическое изображение циркулятора

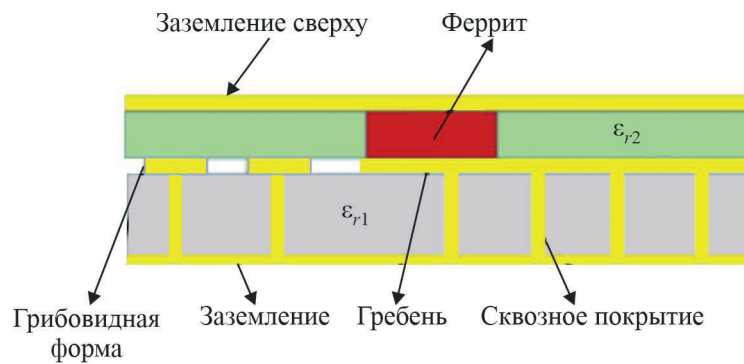


Рис. 14. Схематическое изображение поперечного сечения циркулятора

7. МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЦИРКУЛЯТОРЫ БЕЗ ВНЕШНЕЙ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТОВ

7.1. В [19] рассматривается возможность разработки и изготовления малогабаритных циркуляторов без магнитной памяти Q -диапазона (36...46 ГГц) на основе подложки из модифицированного стронциевого гексаферрита. Состав обычного стронциевого гексаферрита был специальным образом модифицирован с целью достижения специальных свойств, необходимых для создания требуемого циркулятора.

Приведены результаты измерений при различных рабочих температурах. Были достигнуты характеристики, показывающие малое значение вносимых потерь, около 0,45 дБ, в сочетании с высоким уровнем развязки. Более того, изделие продемонстрировало высокую термостабильность. Наблюдался незначительный сдвиг между расчетными и экспериментальными данными. Результаты компьютерного анализа показывают сильную зависимость электрических параметров от точности выполнения геометрических размеров металлизированного полоска, заключающуюся в том, что небольшая погрешность при изготовлении приводит к значительному отклонению электрических параметров. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования на

технологическую точность процесса металлизации. На рис. 15 представлены полученные экспериментальные результаты и внешний вид циркулятора.

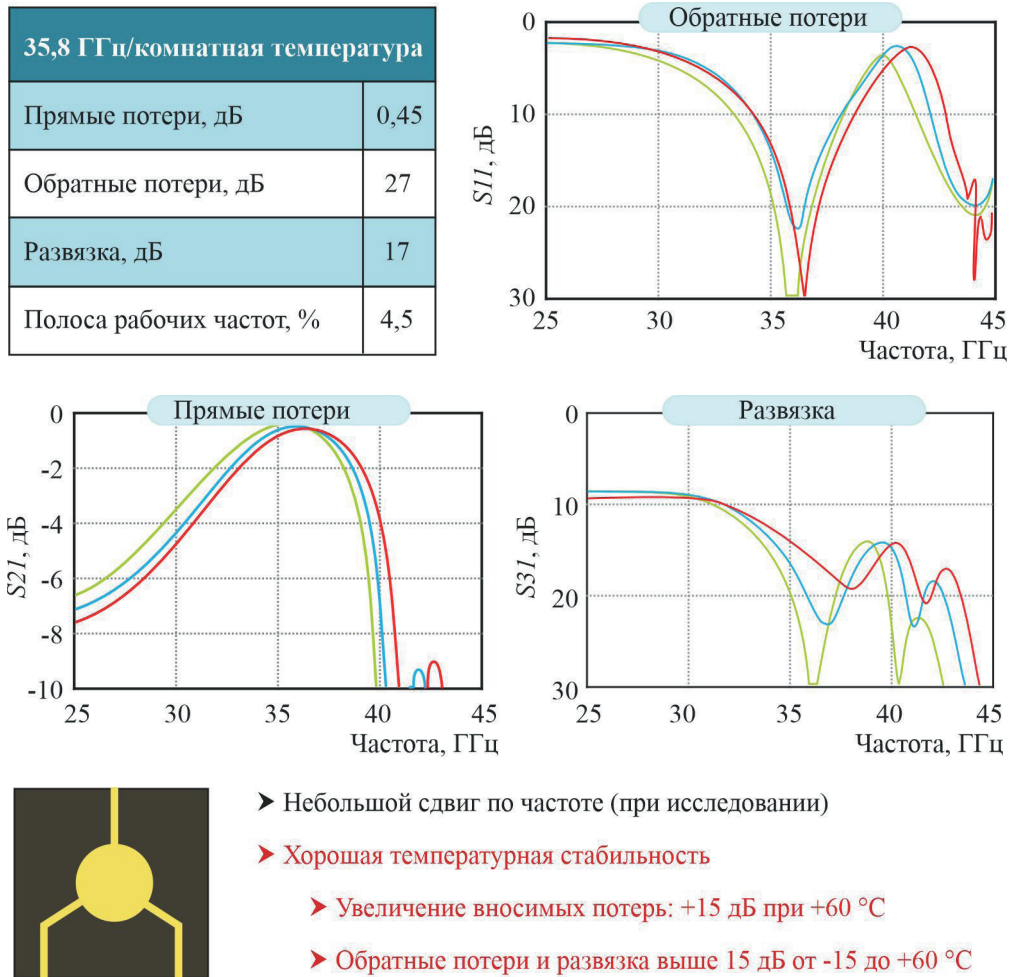


Рис. 15. Экспериментальные результаты и внешний вид циркулятора

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ материалов, содержащихся в приведенных публикациях, показывает сохраняющееся важное значение ферритовых развязывающих приборов для обеспечения необходимых свойств создаваемой и перспективной радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. Замены ферритовым развязывающим приборам, особенно, в коротковолновой части см-диапазона и мм-диапазоне в обозримой перспективе не просматривается даже теоретически.

При этом современные тенденции в развитии радиоэлектронной аппаратуры, как военного назначения, так и быстро развивающихся секторов коммерческого применения, особенно в области спутниковой и мобильной связи, показывают возрастающий интерес к высокочастотным диапазонам – коротковолновой части см-диапазона и мм-диапазону. Вместе с этим приобретает возрастающее значение рассмотрение таких вопросов, как миниатюризация габаритов, технологическая совместимость процесса изготовления ферритового развязывающего прибора с технологией изготовления модуля, в который встраивается этот прибор, минимизация внеэтрактового излучения.

По этой причине в последнее время наблюдается значительный рост количества публикаций, касающихся применения в изготовлении ферритовых развязывающих приборов современных технологических процессов, таких, как ЛТСС-технология, КМОП-технология и др. Рассматривается возможность использования различных линий передачи СВЧ-сигнала: кроме обычной микрополосковой рассматриваются копланарная линия, волновод, интегрированный в подложку, и др.

Кроме того, возрастающий интерес приобретает использование новых типов ферромагнитных материалов, особенно с большими значениями внутреннего поля анизотропии, что позволяет рассматривать возможность создания ферритовых развязывающих приборов без внешней магнитной системы, создающей значительные неудобства при проектировании компактных модулей радиоаппаратуры, особенно применительно к аппаратуре высокочастотных диапазонов.

Имеющаяся в настоящее время информация содержит сведения о серийном промышленном производстве только ферритовых развязывающих приборов, изготовленных по традиционной технологии с применением традиционных ферритовых материалов.

Относительно всех других многочисленных рассматриваемых вариантов в настоящее время представлены только экспериментальные исследования на уровне лабораторных разработок. Но наглядно просматривается тенденция, показывающая быстрое приближение достигнутых электрических параметров лабораторных образцов, изготовленных по инновационным технологиям и с применением инновационных материалов, к параметрам изделий, изготовленных по традиционной технологии.

На этом основании можно сделать предположение о скором появлении, даже в ближнесрочной перспективе, изготовленной промышленным способом серийной аппаратуры, содержащей ферритовые развязывающие приборы, изготовленные с применением каких-либо из рассмотренных инновационных технических и технологических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harris, Vincent G.** The self-biased circulator: ferrite materials design and process considerations / Vincent G. Harris, Alexander S. Sokolov // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2019.
2. RF circuits for 5G applications: designing with mm wave circuitry / Sangeeta Singh Rajeev, Kumar Arya, B. C. Saha and Ajay Kumar Vyas. – CRC Press, 2023.
3. **Семенов, А. С.** Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ-аппаратуры *Ka*-диапазона частот / А. С. Семенов, А. Г. Налогин, А. А. Алексеев // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2020. – Вып. 2 (545). – С. 12 – 21.
4. Dorado International // Каталог продукции «Microstrip drop – in devices».
5. Ферритовый вентиль на основе интегрированного в подложку волновода для устройств, работающих в *Ka*-диапазоне частот / В. В. Демшевский, А. Н. Пашков, А. С. Семенов [и др.] // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2021. – Вып. 2 (545). – С. 38 – 45.
6. Systematic design procedure for Y-junction circulator based on ridge gap waveguide technology / Shoukry I. Shams, Syed M. Sifat, Mahmoud Elsaadany [et al.] // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* Issue. – 2021. – Vol. 4, April.
7. **Sifat, Syed M.** Millimeter-wave ferrite circulator integrated on gap waveguide technology / Syed M. Sifat, Shoukry I. Shams and Ahmed A. Kishk // *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*. – May 2023.
8. **Shi, Zhongli.** Design of *Ka*-band substrate integrated waveguide circulator / Zhongli Shi, Zhenhai Shao // *International Conference on Computational Problem Solving*. 3–5 December 2010.

9. **Chen Huang**. Design of *Ka*-band high-performance circulator / Chen Huang, Xiaoguang Wang, Longjiang Deng // 2014 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. 18 – 20 June 2014.
10. Low-loss hexaferrite self-biased microstrip and CPW circulators / S. Joseph, R. Lebourgeois, Y. Huang [et al.] // 2019 Thirteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). 16 – 21 September 2019.
11. Self-biased CPW circulator with low insertion loss / Sumin David Joseph, Yi Huang, Alex Schuchinsky [et al.] // 2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). 29 – 31 July 2020.
12. CPW circulators with barium ferrite thin films / Yuan Wang, Bin Peng, Wan-Li Zhang and Ke Tan // Journal of Electronic Science and Technology. – December 2010. – Vol. 8, No 4.
13. **Wei Shi**. Circulator integrated in LTCC with screen printed co-firing ferrite for space application shicheng yang / Wei Shi, Hao Bai, Ting Zhang // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 7 – 11 May 2018.
14. Modeling and characterization of frequency and temperature variation of complex permeability of ferrite LTCC material / N. Blaz, A. Maric, G. Radosavljevic [et al.] // Progress in Electromagnetics Research. – 2010. – Vol. B 23. – P. 131 – 146.
15. Broadband *Ku*- and *Ka*-band circulators in LTCC using sintered bulk ferrites / Carsten Weil, Tim Hauck, Johannes Schur, Jens Mülle // 2021 51st European Microwave Conference (EuMC). 04 – 06 April 2022.
16. *Ku*-band microstrip junction circulators manufactured using low temperature co-fired ceramics technology / Norbert Parker, Nicolas Ryon, Lilia Quassym [et al.] // 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). 29 November – 02 December 2022.
17. Fabrication of self-biased circulators with integrated hexagonal microwave ferrites using LTCC technology / M. Heidenreich, J. Schur, J. Muller [et al.] // CFI, Ceramic Forum International/Berichte der DKG (Deutsche Keramische Gesellschaft). – 2023. – No 2.
18. **Guangjun Zhang**. A novel CMOS hexaferrite circulator with 25 GHz operating frequency / Guangjun Zhang, Yanfeng Jiang // AIP Advances Published Online. 14 April 2021.
19. Compact self-biased *Q*-band circulators / N. Parker-Soues, N. Noutehou, C. Patris [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – April 2021. – Vol. 57, issue 4.

Статья поступила 31 октября 2023 г.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Н. А. Алексеева¹, А. Д. Калачев¹, Д. И. Кириченко¹, И. П. Медведков¹,
В. И. Роговин^{1,2}, И. А. Чистяков^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²Саратовский государственный национальный исследовательский университет
им. Н. Г. Чернышевского

Проведено проектирование лампы бегущей волны X-диапазона с высоким КПД для спутниковых систем связи и сопоставление результатов расчёта с экспериментальными данными. Представлены результаты проектирования электронно-оптической системы по 2D-3D-программам, многоступенчатого коллектора и пространства взаимодействия, основанного на нелинейном взаимодействии электронного потока с полем замедленной электромагнитной волны.

КС: лампа бегущей волны, X-диапазон, замедляющая система, электронно-оптическая система, многоступенчатый коллектор, экспериментальные характеристики

DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF X-BAND TWT FOR SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

N. A. Alekseeva¹, A. D. Kalachev¹, D. I. Kirichenko¹, I. P. Medvedkov¹,
V. I. Rogovin^{1,2}, I. A. Chistyakov^{1,2}

¹JSC «RPE «Almaz», Saratov

²Saratov State National Research University named after N.G. Chernyshevsky

The design of X-band traveling wave tube for satellite communication systems with high efficiency is carried out and the calculation results are compared with experimental data. The results of designing electron-optical system by 2D-3D programs, multistage collector and interaction space based on nonlinear interaction of electron beam with the field of delayed electromagnetic wave are presented.

Keywords: traveling wave tube, X-band, slow-wave structure, electron gun, multi-stage collector, experimental characteristics

1. ВВЕДЕНИЕ

Тенденция к расширению круга задач, решаемых в космическом пространстве с помощью космических аппаратов (КА), неизбежно сводится к требованиям по минимизации потребляемой КА мощности $P_{\text{потр}}$ при заданной выходной $P_{\text{вых}}$ [1], что в свою очередь влечет предъявление

таких требований и к лампам бегущей волны (ЛБВ), которые широко применяются в ретрансляторах спутников связи.

В работе [2] представлены выходные характеристики французской ЛБВ 86160HAR фирмы L3-ETI для спутниковых систем связи X-диапазона, спроектированной с использованием программных пакетов CHRISTINE 3D и MICHELLE, однако отсутствует информация о сопоставлении расчетов с экспериментальной реализацией. Также следует отметить, что не описана методология и подходы, используемые в проектировании. В других источниках, например в [3], представлены только выходные характеристики ЛБВ.

Целью данной работы является попытка авторов определить методологию и подходы к проектированию ЛБВ для спутниковых систем связи X-диапазона с выходной мощностью 160 Вт и техническим КПД не ниже 65 %.

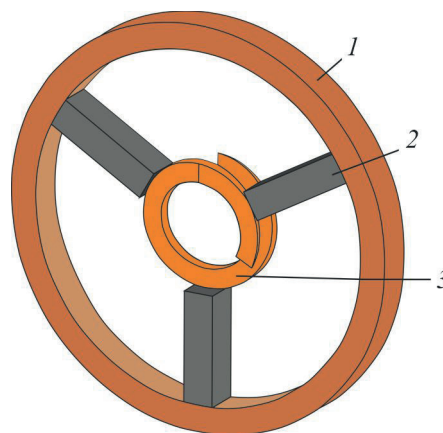
При проектировании и расчёте размеров основных узлов ЛБВ, определяющих выходные характеристики приборов, таких, как электронная пушка, магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), пространство взаимодействия (ПВ) электромагнитной волны с электронным потоком и многоступенчатый коллектор, использовался модернизированный программный комплекс предприятия [4]. Электродинамические характеристики (ЭДХ) замедляющей системы (ЗС) рассчитывались с помощью программного продукта ANSYS HFSS [5].

2. КОНСТРУКЦИЯ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

На первом этапе проектирования приближенно определены основные размеры спиральной ЗС (СЗС). Конфигурация СЗС выбрана, исходя из соотношения, связывающего обобщенный параметр спирали $\gamma_e a = 0,78$ со средним радиусом пролётного канала, а отношение диаметра D_s медного экрана l (рис. 1) к диаметру пролетного канала D_k составило 3,8. Это обеспечило получение эффективного взаимодействия за счет повышения сопротивления связи при возможности создания необходимого поля для фокусировки пучка с заполнением, равным 0,6.

Рис.1. Один период спиральной ЗС:

1 – экран; 2 – стержень (ВеО);
3 – спираль



С использованием программного пакета ANSYS HFSS была проведена серия расчётов, по результатам которых определена конструкция ВЧ-пакета ЛБВ с неоднородным законом распределения шага СЗС. Спираль 3 (см. рис. 1) с проводимостью $\sigma = 150\,000\text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ изготавливалась из плющеной микроленты (сплав МАГТ-0,2: на 99,8 % состоит из меди, а оставшиеся 0,2 % приходятся на алюминий, гафний и титан), закреплена тремя диэлектрическими стержнями 2 из оксида бериллия ВеО (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 6,5$; тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 4\cdot 10^{-4}$).

Анализ влияния конфигурации опорных диэлектрических стержней на электродинамические характеристики показал [6], что в данном частотном диапазоне прирост сопротивления связи и уменьшение распределенных потерь невелики при использовании стержней сложной трапецеидальной или Т-образной формы. Однако из-за сложности процесса изготовления стержней такой формы были выбраны стержни прямоугольного сечения.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЗКОПОЛОСНОЙ ЛБВ X-ДИАПАЗОНА

Получение выходной мощности на уровне 160 Вт и минимальных ВЧ-потерь при проектировании ПВ (рис. 2) было обеспечено за счет оптимизации закона изменения шага спирали [7].

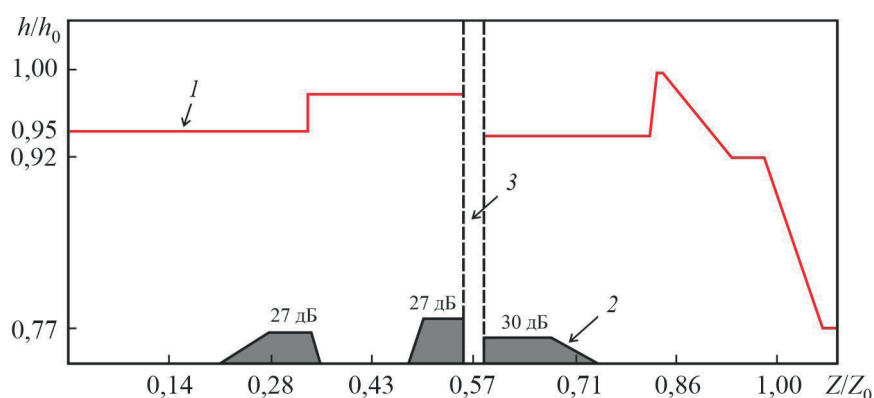


Рис. 2. Схема пространства взаимодействия:

1 – закон изменения шага спирали; 2 – локальные поглотители СВЧ-энергии; 3 – разрыв спирали

Существенное увеличение электронного КПД было получено за счет уменьшения шага спирали на выходном участке СЗС, обеспечивающего синхронизм скорости электронного потока и электромагнитной волны. Однако из-за увеличения отношения ширины плющеной микрорентки СЗС к её шагу происходило возрастание ВЧ-потерь, а следовательно, увеличение потребляемой мощности.

Найден компромисс между увеличением электронного КПД и незначительным приростом ВЧ-потерь, заключающийся в нахождении закона изменения шага спирали, при котором градиент нарастания электронного КПД меньше градиента нарастания ВЧ-потерь. Критерием получения максимального КПД коллектора с рекуперацией при анализе спектра скоростей электронов на выходе из пространства взаимодействия являлось получение наибольшей величины минимальной скорости электронов при максимуме электронного КПД.

В таблице представлены выходные характеристики спиральной ЛБВ X-диапазона на крайних частотах рабочего диапазона, рассчитанные по программе, основанной на одномерной нелинейной модели взаимодействия [7]. Относительная рабочая полоса усиливаемых частот составила 2 %.

Частота	$P_{\text{вх}}$, мВт	P_2/P_1 , дБ	η , %	G , дБ	$P_{\text{вых}}$, Вт
$f_{\text{нижн}}$	0,53	-20,4	35,3	55,2	176,3
$f_{\text{верхн}}$	0,69	-20,8	35,4	54,1	176,8

Примечание. P_2/P_1 – уровень мощности второй гармоники относительно первой.

Проведенные расчеты позволили определить требования к электронному пучку в ПВ (его диаметр и первеанс).

4. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В соответствии с представленными расчетами и требованиями эксплуатации, в рассматриваемой ЛБВ выбрана конструкция двуханодной пушки. Для получения первоначальной приблизительной конфигурации электродов пушки использовался метод синтеза [8]. Выбранный диаметр катода обеспечил получение необходимого тока, с плотностью токоотбора $1,1 \text{ А/см}^2$, что, в свою очередь, гарантировало долговечность.

Криволинейная форма электродов, полученная методом синтеза, аппроксимирована цилиндрическими поверхностями для удобства дальнейшего изготовления. С помощью модернизированной программы анализа [9] осуществлен расчет двуханодной электронно-оптической системы (ЭОС) формирования и транспортировки электронного потока с учетом влияния поперечных тепловых скоростей электронов. Фокусирующий электрод, расположение которого, согласно теории Пирса, должно совпадать с нулевой эквипотенциалью и проходить под углом $67,5$ град к границе электронного потока, также аппроксимирован цилиндрическими поверхностями для более точного изготовления и выставления относительно катода.

На рис. 3, а представлены конструкция двуханодной электронной пушки, распределение магнитного поля и траектория электронов с учетом теплового ухода катода [10] относительно фокусирующего электрода и поперечных скоростей электронов с катода за счет его нагрева.

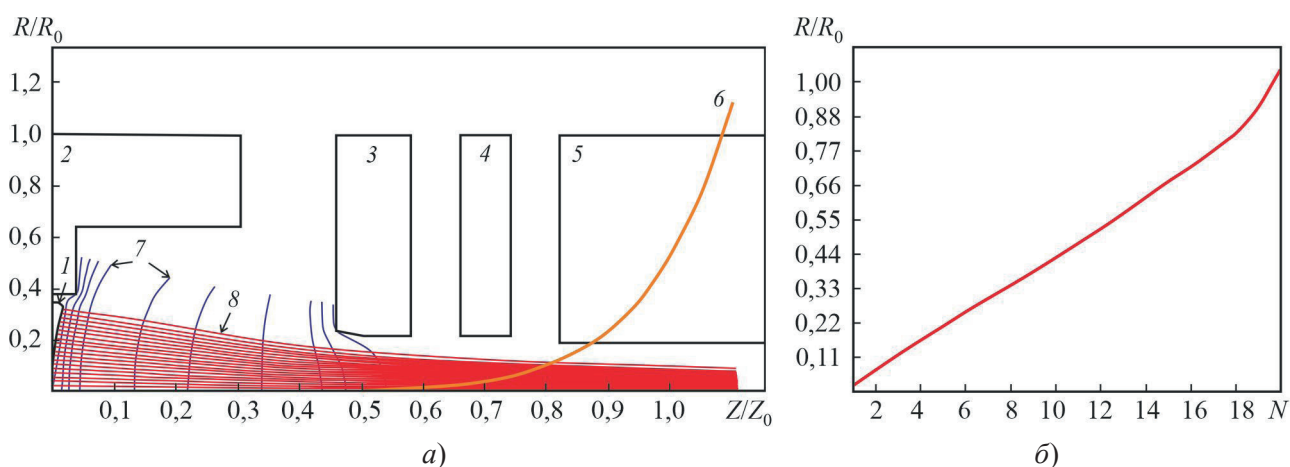


Рис. 3. Распределение потенциала, магнитного поля и электронные траектории в области формирования (а), а также зависимость радиальной координаты траектории от номера частицы при $Z/Z_0 = 1,1$ (б):

1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 и 4 – аноды; 5 – пролетный канал; 6 – распределение магнитного поля; 7 – эквипотенциали; 8 – поток электронов, стартующих по нормали к катоду

Следует отметить, что изменение формы фокусирующего электрода практически не нарушает макроламинарности электронного потока. Для подтверждения этого был проведен расчет зависимости радиальной координаты основной электронной траектории, испускаемой по нормали с катода, от номера частицы при $Z/Z_0 = 1,1$ (рис. 3, б), нормировка осуществлена на произвольную

координату по длине ЭОС. Расчет ЭОС показал, что получена необходимая для последующего согласования с магнитным полем конфигурация электронного потока с током порядка 100 мА, а также обеспечена макроламинарность электронного потока.

Включение прибора и регулировка величины тока катода осуществлены изменением потенциала первого анода. При уменьшении эмиссионного тока, связанном с увеличением срока службы катода [11], величина потенциала первого анода может быть изменена так, чтобы величина тока увеличилась до необходимой. В этом случае распределение магнитного поля в конструкции МПФС может оставаться неизменным. Потенциал второго анода необходимо выбирать на 50...150 В выше потенциала СЗС для образования ионной ловушки, препятствующей отравлению катода ионами [2]. Интервал превышения потенциала второго анода связан с изменением потенциала СЗС в каждой конкретной ЛБВ из-за изменения замедления электромагнитной волны, обусловленного наличием допусков на её изготовление. Выбор величины потенциала СЗС обусловлен обеспечением синхронизма с электромагнитной волной и получением необходимой выходной мощности.

Транспортировка электронного потока через СЗС на коллектор производилась с помощью спроектированной МПФС, которая обеспечила заполнение пучком пролетного канала, равное 0,6 в статическом режиме. После оптимизации конструкции МПФС параметр магнитного поля α составил 0,17, что уменьшило амплитуду волнистости и динамическую расфокусировку. На рис. 4 изображены огибающие электронного потока в пролетном канале СЗС, содержащие заданный процент общего тока. Согласование электронного потока с магнитным полем осуществлено величиной амплитуды индукции магнитного поля в ячейках первых двух магнитов МПФС, значение амплитуды магнитного поля в которых составляет 0,51 и 0,77 от амплитудного значения магнитной индукции в регулярной области МПФС.

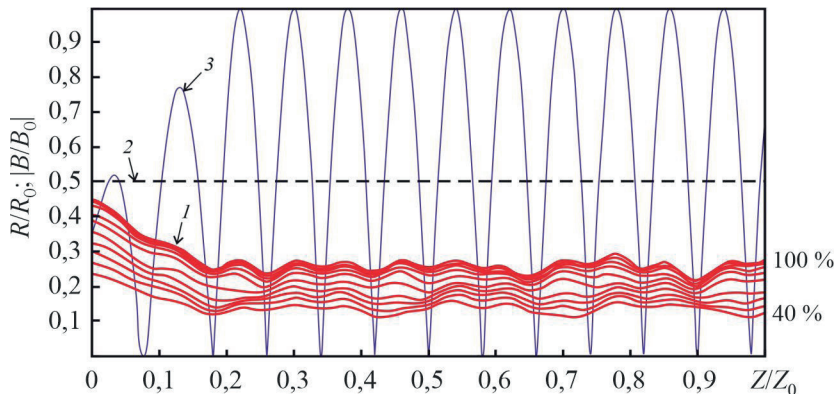


Рис. 4. Транспортировка электронного потока в пролетном канале:
 $|B/B_0|$, R/R_0 , Z/Z_0 – модуль нормированной амплитуды МПФС, нормированная поперечная координата и нормированная продольная координата соответственно; 1 – трубки тока, содержащие заданный процент общего тока (от 40 до 100 %); 2 – пролетный канал; 3 – распределение магнитного поля

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 4, показал, что пульсации электронного потока не превышали 12 % относительно среднего радиуса. Волнистость границы электронного потока связана с периодичностью магнитного поля.

5. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ КОЛЛЕКТОР С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

Характеристики электронного потока на входе в коллектор были получены из расчетов ПВ по двумерной программе [12]. В статическом режиме, без входного сигнала (рис. 5), электронный пучок транспортировался с заполнением пролетного канала, равным 0,6.

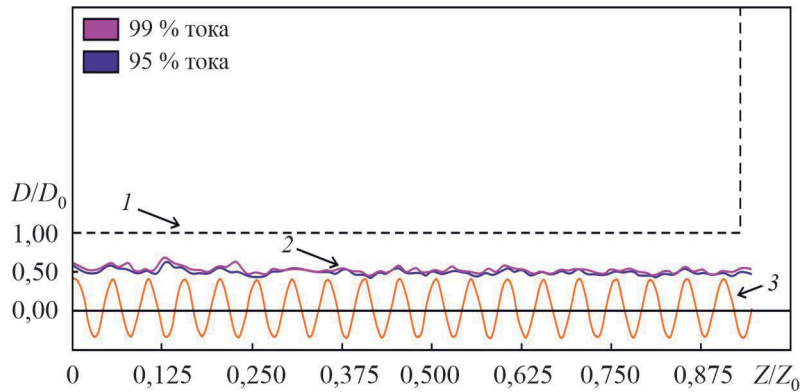


Рис. 5. Результат расчета по 2D-программе в статическом режиме:
1 – граница пролетного канала; 2 – электронный поток; 3 – распределение магнитного поля по длине прибора

В динамическом режиме, при входном сигнале, соответствующем насыщению на средней частоте, заполнение увеличивается практически до 1,0 (рис. 6).

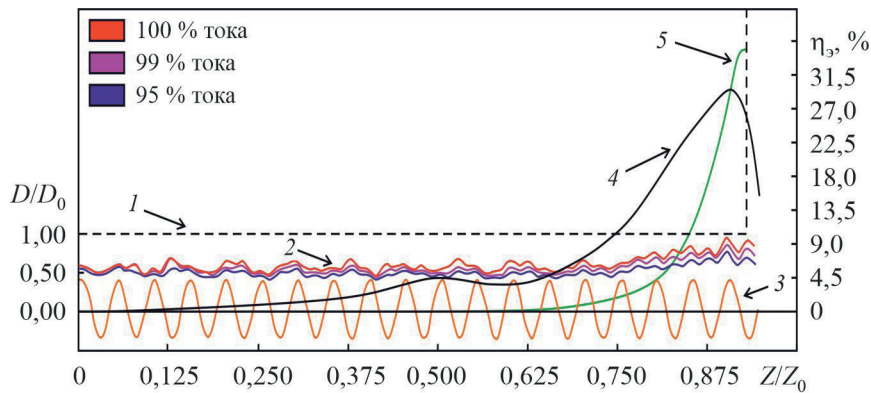


Рис. 6. 2D-транспортировка электронного потока в динамическом режиме насыщения выходной мощности:
1 – граница пролетного канала; 2 – электронный поток; 3 – распределение магнитного поля по длине прибора; 4 – гармоника ВЧ-тока; 5 – электронный КПД

Первая гармоника тока увеличивалась при группировке до 1,6, что свидетельствовало о хорошо сформированном сгустке, и уменьшалась до 0,8 после взаимодействия. Выходная мощность составила ~176 Вт при усилении ~55 дБ. Эффективность взаимодействия подтверждена электронным КПД на уровне 32...35 % в полосе частот.

Анализ результатов расчетов по [13] с использованием спектра скоростей электронов на выходе из ПВ показал:

– использование четырехступенчатого коллектора относительно трехступенчатого может увеличить КПД на 2 % (абсолютных);

– использование пятиступенчатого коллектора показало прирост по КПД менее чем на 0,5 %.

В качестве варианта для изготовления прибора выбрана конструкция четырехступенчатого коллектора, электроды которого изготовлены из меди и образованы деталями конической и цилиндрической формы. В качестве изоляторов использованы стержни из BeO , сошлифованные со стороны, прилегающей к электродам, цилиндрическая поверхность которых также сошлифована для их плотного прилегания. Коллектор экранирован от продольного магнитного поля МПФС.

Обратный поток вторичных электронов из первых трех электродов незначителен, так как вылетающие вторичные электроны находятся в тормозящем поле последующих электродов. Вторичные электроны, вылетающие с четвертого электрода, могут ускориться и попасть на предыдущие электроды и СЗС, что приведет к увеличению потребляемой мощности и возможному разрушению СЗС. Для устранения этого нежелательного эффекта использовано поперечное магнитное поле в четвертом электроде. Расчетное значение потенциалов электродов коллектора составило 0,7; 0,5; 0,3 и 0,1 от потенциала СЗС. Вид четырехступенчатого коллектора представлен на рис. 7.

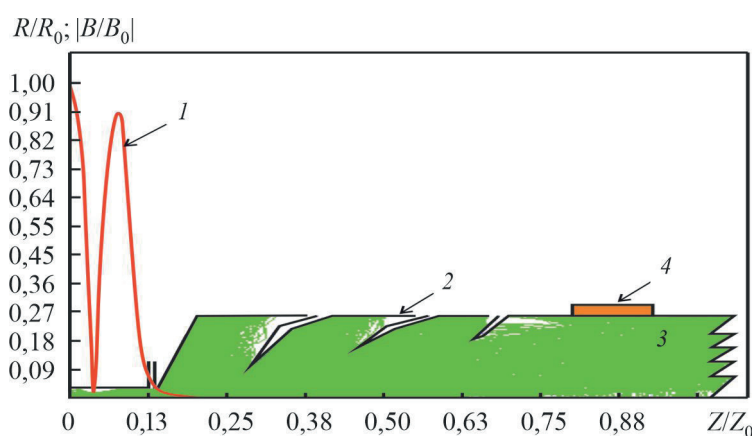


Рис. 7. Четырехступенчатый коллектор:

- 1 – распределение магнитного поля; 2 – граница электродов коллектора; 3 – распределение электронных траекторий с учетом вторичной эмиссии в динамическом режиме в теле коллектора; 4 – магнитная плитка, формирующая поперечное магнитное поле

6. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

Реализация описанных выше проектных решений на основе расчетов электронной пушки, МПФС, ВЧ-пакета и многоступенчатого коллектора по имеющимся на АО «НПП «Алмаз» конструкторским и технологическим возможностям позволила создать ЛБВ X-диапазона, отвечающую техническим требованиям, предъявляемым к приборам, используемым в спутниковой связи.

Получены необходимые выходные параметры: СВЧ-мощность – 150...160 Вт, электронный КПД ~ 33...35 %, технический КПД ~ 65...68 %, что обеспечило необходимую потребляемую мощность ~ 230...235 Вт при коэффициенте усиления не менее 50 дБ. На рис. 8. представлены для сравнения расчетные и экспериментальные частотные зависимости технического КПД (а) и выходной мощности (б).

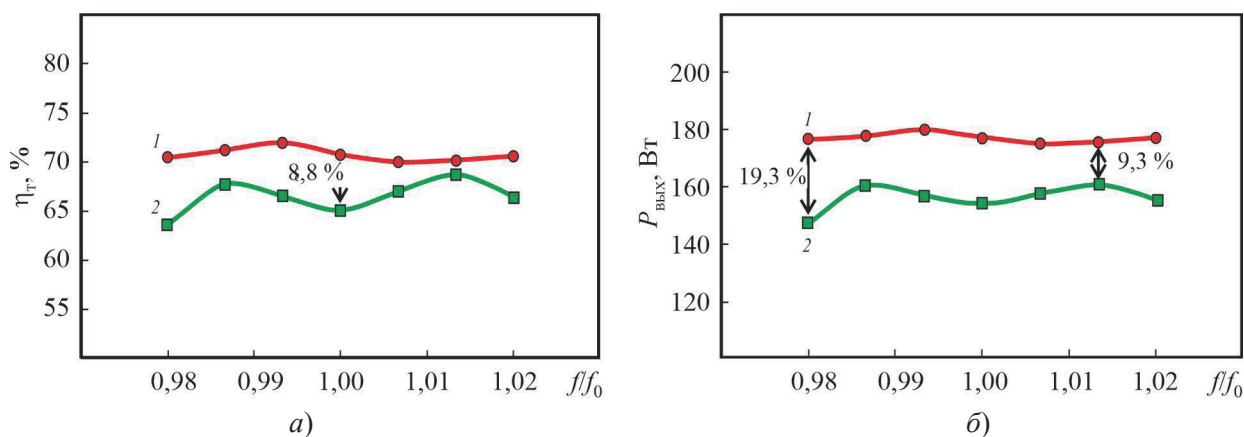


Рис. 8. Частотные зависимости технического КПД (а) и выходной мощности (б):

1 – расчет; 2 – экспериментальные данные

На рис. 9 представлены частотные зависимости коэффициента усиления.

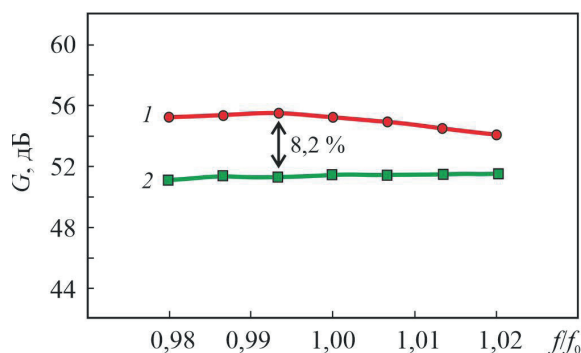


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента усиления:

1 – расчет; 2 – экспериментальные данные

Следует отметить, что при расчетах не учитывались такие факторы, как коэффициент стоячей волны на входе и выходе, а также различные допуски на изготовление основных узлов и деталей, отвечающих за выходные параметры.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена методология проектирования, заключающаяся в представленной последовательности расчетов основных функциональных узлов ЛБВ и определении критериев достижения минимальной потребляемой мощности с заданной выходной мощностью.

Спроектирована и оптимизирована конструкция СЗС и получен закон изменения шага спирали, на выходном участке которой использовалось уменьшение фазовой скорости с целью обеспечения синхронизма электронного потока с электромагнитной волной, что позволило существенно увеличить электронный КПД. Представлены результаты 2D-расчета ПВ с учетом влияния динамической расфокусировки. Спроектирована электронно-оптическая система с ионной ловушкой между электронной пушкой и ПВ, включающая в себя двуханодную пушку с током 100 мА и МПФС с параметром магнитного поля α , равным 0,17, которая обеспечила заполнение пучком пролетного канала, равное 0,6 в статическом режиме, и амплитудой пульсаций не более 12 % относительно среднего радиуса. Спроектированное пространство скоростей позволило сформировать опти-

мальный сгусток, анализ спектра скоростей электронов которого на выходе из ПВ показал незначительный прирост КПД (менее чем на 0,5 %) пятиступенчатого коллектора относительно выбранного четырехступенчатого.

Получены необходимые параметры: выходная мощность в режиме насыщения составляет 150...160 Вт, электронный КПД ~ 33...35 %, технический КПД ~ 65...68 %, что обеспечило необходимую потребляемую мощность ~ 230...235 Вт при коэффициенте усиления не менее 50 дБ. Относительная погрешность расчета по техническому КПД составила 8,8 %, а коэффициент усиления отличается не более чем на 8,2 %.

Проведенное исследование показало, что модернизированное и использованное программное обеспечение [4, 7–9, 12–13] обладает достаточной точностью для проведения проектирования, а полученная конструкция ЛБВ позволила получить требуемые выходные параметры ЛБВ для спутниковых систем связи на современном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гущин В. Н.** Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
2. Space-qualified, 160-Watt radiation-cooled, X-band helix TWT / R. H. Martin [et al.] // 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2013. – P. 1, 2.
3. Design and development of an X-band pulsed helix TWT for space application / Chanakya T. [et al.] // 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC). – IEEE, 2020. – P. 131, 132.
4. Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения / В. Д. Журавлева, Е. М. Ильина, Ю. Ф. Конторин [и др.] // Достижения ученых России в области СВЧ-электроники. Вып. 3. Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 56 – 59.
5. ANSYS Electronics. Веб-сайт официального представителя ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ansys.com/products/electronics, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
6. **Чистяков, И. А.** Оптимизация конструкции спиральной замедляющей системы для ЛБВ в X-, Ku- и K-диапазонах частот / И. А. Чистяков, В. И. Роговин // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – С. 244 – 248.
7. **Ильина, Е. М.** Усовершенствованные одномерная нелинейная модель и программа расчета выходных характеристик ЛБВ / Е. М. Ильина, В. А. Филатов, Ю. Ф. Конторин // Материалы XII Зимней школы-семинара по СВЧ-электронике и радиофизике. – Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002. – С. 40 – 43.
8. **Петросян, А. И.** Программа синтеза электронных пушек О-типа / А. И. Петросян, З. П. Иванова, В. В. Пензяков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1976. – Т. 1. – С. 109 – 110.
9. Расчет влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка, формируемого электронной пушкой / А. И. Петросян, Н. А. Алексеева, В. И. Роговин, И. А. Чистяков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2022. – Вып. 4 (555). – С. 43 – 50.
10. **Петросян, А. И.** Расчет величины продольного смещения термокатода в результате его нагрева в СВЧ-приборе / А. И. Петросян, В. И. Роговин // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 88 – 91.
11. **Гилмор, А. С., мл.** Лампы с бегущей волной / А. С. Гилмор, мл. – М.: Техносфера, 2013. – 616 с.
12. **Конторин, Ю. Ф.** Расчет характеристик интенсивного электронного пучка в лампах бегущей волны / Ю. Ф. Конторин, В. И. Роговин, И. В. Роговин // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 77 – 81.
13. **Журавлева, В. Д.** Оптимизация многоступенчатых коллекторов произвольной конфигурации с рекуперацией для приборов О-типа / В. Д. Журавлева, В. И. Роговин, И. В. Роговин // Прикладная физика. – 2008. – № 5. – С. 89 – 93.

Статья поступила 22 ноября 2023 г.,
после переработки – 16 января 2024 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.371.334

ДАЛЬНЕЙШЕЕ УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ СВЧ- И КВЧ-ДИАПАЗОНОВ

А. А. Борисов, В. А. Иовдальский, С. Б. Ключев

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

Исследована предложенная авторами новая конструкция линии передачи – симметричной щелевой линии (СЩЛ) сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов с металлическими пластинами на краях щели, увеличивающими толщину металлических экранов, и с полным заполнением щели диэлектрической композицией. Приводятся результаты расчетов, показывающие улучшение электрических характеристик, а именно: увеличение коэффициента прохождения сигнала по напряжению и расширение рабочего диапазона частот, по отношению к классической базовой конструкции СЩЛ и СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком. Сравнение результатов вариантов линий было выбрано на уровне величины $-0,2$ дБ коэффициента передачи сигнала по напряжению, как соответствующей достаточно высокому уровню прохождения сигнала. Увеличение коэффициента прохождения сигнала по напряжению в рассматриваемой СЩЛ составило $6,6$ %. Расширение частотного диапазона – $10,7$ %.

КС: симметричная щелевая линия, математическое моделирование, метод конечных элементов, коэффициент прохождения по напряжению, диапазон рабочих частот, полоса рабочих частот, тонкопленочная технология, толстопленочная технология

FURTHER IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A SYMMETRICAL SLOT LINE IN MICROWAVE AND EHF RANGES

A. A. Borisov, V. A. Iovdalskiy, S. B. Klyuev

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

A new design of the transmission line proposed by the authors – a symmetric slot line (SSL) of a signal in microwave and EHF ranges with metal plates at the edges of the slot, increasing the thickness of metal screens and with complete filling of the slot with dielectric composition – was investigated. The results of calculations are presented that show an improvement in electrical characteristics, namely, the voltage signal transmission coefficient and the expansion of the operating frequency range in relation to the classical basic design of SSL and SSL with complete filling of the slot with dielectric. Comparison of the results of the line options was chosen at the level of -0.2 dB voltage signal transmission coefficient as corresponding to sufficiently high level of signal transmission. The increase in the voltage signal transmission coefficient in the considered SSL was 6.6 %. The frequency band expansion was 10.7 %.

Keywords: symmetric slot line, mathematical simulation, finite element method, voltage signal transmission coefficient, operating frequency range, operating frequency band, thin-film technology, thick-film technology

1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований к возможностям изделий радиоэлектроники (ИРЭ) СВЧ- и КВЧ-диапазонов специального и народно-хозяйственного назначения, обусловленное требованиями настоящего времени, вызывает проблему конкуренции возможностей отечественных и зарубежных разработчиков [1–5]. Улучшение электрических характеристик различных составных частей ИРЭ, в том числе и линий передачи сигнала различных типов, становится особенно востребованным [6–8]. Особенно актуальным становится это направление в связи с повышением рабочей частоты создаваемых устройств [9–13].

2. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

Линии передачи сигнала являются одними из основных составных элементов конструкции устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов. При передаче сигнала к ним предъявляются специфические требования по ширине рабочего диапазона частот и минимизации вносимых потерь мощности. Одной из перспективных базовых щелевых линий передачи является симметричная щелевая линия (СЩЛ), представляющая собой открытую волноведущую структуру и позволяющая обеспечить её совместимость и использование с другими линиями передачи, например с микрополосковой линией (МПЛ), для создания других СВЧ-устройств: делителей мощности [12], смесителей, широкополосных объёмно-модульных полосково-щелевых переходов [9–14] и т. д.

Параметры линии будут определяться особенностями конструкции каждой из СЩЛ, поэтому особый интерес представляет возможность дальнейшего улучшения электрических характеристик СЩЛ путём совершенствования конструкции.

Классическая (базовая) конструкция СЩЛ [6] представляет собой (рис. 1) узкую щель 3, выполненную между металлическими экранами 2 и расположенную на одной из сторон плоскопараллельного магнетодиэлектрического слоя определённой толщины, образующего подложку 1. При условии, что диэлектрическая проницаемость подложки больше единицы, а линии магнитного поля имеют вид эллипсов, переходящих в кривые типа «седло», в этой щели образуется основная волна СЩЛ. В такой структуре распределение тока в металлическом слое экспоненциальное. При этом на поверхности металлических полуплоскостей ток занимает относительно большую область, поэтому потери у СЩЛ имеют, например, относительно несимметричной полосковой линии малую величину.

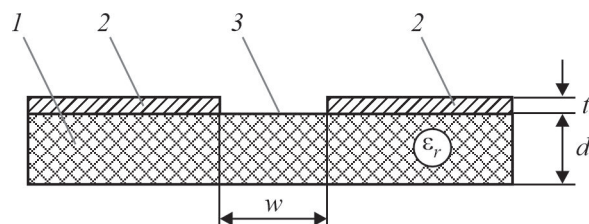


Рис. 1. Поперечное сечение классической (базовой) СЩЛ:

- 1 – диэлектрическая подложка толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ_r ;
2 – металлические экраны толщиной t ; 3 – щель шириной w

Следующим шагом на пути улучшения электрических характеристик за счёт совершенствования конструкции СЩЛ является полное заполнение щели 3 диэлектриком с ϵ_{r1} (рис. 2), причем $\epsilon_{r1} > \epsilon_r$ [10].

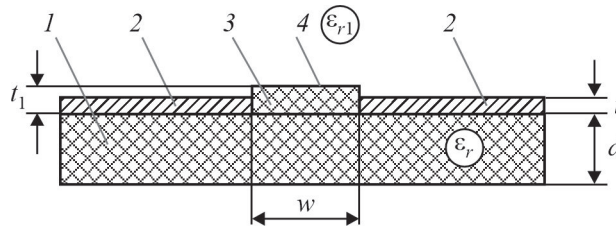


Рис. 2. Поперечное сечение СЩЛ с диэлектриком, заполняющим щель:

1 – диэлектрическая подложка толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ_r ; 2 – металлические экраны толщиной t ; 3 – щель шириной w ; 4 – диэлектрик, полностью заполняющий щель, с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} и толщиной, превышающей толщину металлических экранов ($t_1 > t$)

Конструкция СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком, также как и СЩЛ с заполнением щели воздухом (см. рис. 1), представляет собой открытую волноведущую структуру, которая содержит щель 3 шириной w . Щель заполнена диэлектриком 4 с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} и выполнена в металлических экранах 2 толщиной t , расположенных на одной стороне плоскопараллельной диэлектрической подложки 1 с ϵ_r и толщиной d . Изготовление СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком предусматривает ее реализацию по тонкопленочной технологии.

Заполнение щели в СЩЛ полностью диэлектриком ограничивает возможность возникновения поверхностных волн и образование вытекающих волн [8], а значит, препятствует распространению этих видов волн в данной волноведущей структуре. Это позволяет сосредоточить электромагнитное поле внутри щели, в диэлектрике, и тем самым улучшить значения коэффициента прохождения по напряжению.

Представляет интерес конструкция СЩЛ с металлическими пластинами на краях щели, увеличивающими толщину металлических экранов, и с полным заполнением щели диэлектрической композицией (рис. 3). Диэлектрик 4 с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} , размещенный в щели СЩЛ, полностью заполняет ее. В качестве диэлектрика используется композиция на основе отвердевающих соединений с диэлектрическим наполнителем, обладающая высокой степенью адгезии к диэлектрической подложке 1 и металлическим экранам 2, образующим щель. Содержание диэлектрического наполнителя в композиции, заполняющей щель, составляет от 30 до 80 %. Толщина металлических пластин 5 равна от 0,005 до 0,2 мм.

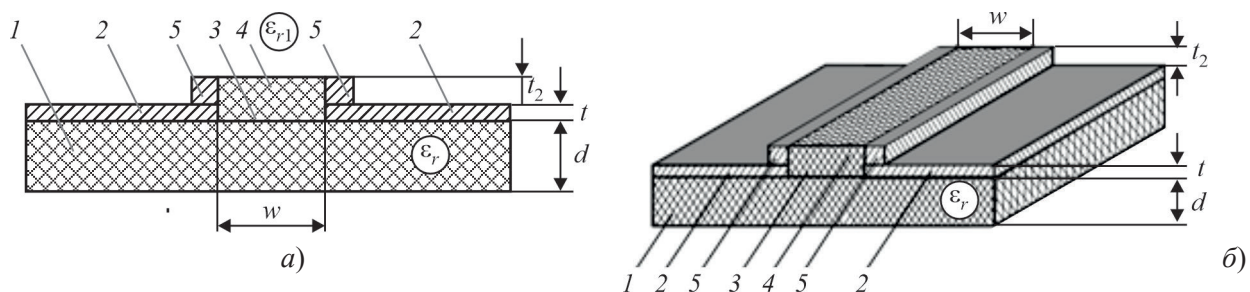


Рис. 3. Поперечное сечение (а) и физическая модель (б) СЩЛ с металлическими пластинами на краях щели и с полным заполнением щели диэлектрической композицией:

1 – диэлектрическая подложка толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ_r ; 2 – металлические экраны толщиной t ; 3 – щель шириной w ; 4 – диэлектрик, заполняющий щель, с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} ; 5 – металлические пластины, установленные на краях щели, толщиной t_2

Сущность такого технического решения состоит в следующем. Локальное увеличение толщины проводящего покрытия в области, прилегающей к щели, в результате закрепления на краях металлических экранов 2 металлических пластин и электрического соединения с ними, позволило сосредоточить электрическое поле в щели и уменьшить рассеивание энергии в окружающее пространство. За счёт этого удалось уменьшить потери проходящего сигнала и расширить частотный диапазон, тем самым улучшить электрические характеристики [11, 14].

Ограничение толщины металлических пластин 5 снизу значением не менее 0,005 мм определяется малым ее влиянием на электрические характеристики, а сверху не более 0,2 мм – отсутствием заметного влияния на электрические характеристики при ухудшении массогабаритных характеристик.

Использование в качестве диэлектрика 4, заполняющего щель 3, композиции на основе отвердевающих соединений с диэлектрическим наполнителем позволяет исключить наличие воздушной прослойки в щели 3, упрощает выбор материалов наполнителя, отвердевающих соединений и их соотношения для получения требуемых электрофизических параметров диэлектрика СЦЛ.

Минимальное содержание диэлектрического наполнителя в композиции (30 %) определяется возможностью влияния на электрофизические свойства (диэлектрическую проницаемость) материала композиции, а максимальное (80 %) – возможностью смачивания поверхности частиц диэлектрического наполнителя и сохранения склеивающих свойств композиции для соединения с диэлектрической подложкой и проводящим покрытием щели [11].

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СЦЛ

Математическое моделирование представляет собой инструмент, который дает наиболее полную, исчерпывающую информацию о характеристиках сложной волноводной структуры и характере распространения волн в ней. Математическое моделирование является неотъемлемой частью процесса исследования, а с развитием вычислительной техники возрастает возможность учитывать все больше особенностей конструкций устройств.

Разработка и исследование новых конструкций линий передачи, представляющих собой открытые сложные волноведущие структуры, прямыми, а также вариационными методами связаны с определенными трудностями, например с невозможностью построения тензора Грина в замкнутой форме [15] или с невозможностью получить выражения в замкнутой форме для длины волны и волнового сопротивления [16]. Поэтому прямые и вариационные методы преимущественно применимы для узкого класса задач с простейшей геометрией.

Для решения электродинамической задачи, учитывающей сложность как геометрических параметров, так и физических явлений, происходящих в открытых волноведущих структурах, применяются численные методы математического моделирования. В работе был использован метод конечных элементов (МКЭ) – метод численного решения физических и электродинамических задач. МКЭ имеет ряд преимуществ, которые важны при расчете щелевых линий: исследуемый объект может иметь любую геометрическую форму и электромагнитную среду; можно моделировать любые граничные условия; вычислительный алгоритм удобен для реализации с помощью средств вычислительной техники.

Для оценки улучшения электрических характеристик выбрана конструкция СЦЛ с металлическими пластинами на краях щели, увеличивающими толщину металлических экранов, и с полным заполнением щели диэлектрической композицией (см. рис. 3). Основой этой линии является ди-

электрическая подложка из керамического материала Rogers (Ro3006, $\epsilon_r = 6,15$ и $\text{tg}\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$) толщиной $d = 0,5$ мм, на которой расположены металлические экраны толщиной $t = 10$ мкм и металлические пластины толщиной $t_2 = 20$ мкм, образующие щель шириной $w = 0,5$ мм (при $w/d = 1$). В качестве диэлектрика, заполняющего щель, образованную металлическими экранами с прикрепленными металлическими пластинами, применяется материал с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r1} = 16$ (см. рис. 3). Суммарная толщина металлических экранов и металлических пластин составляет: $t_\Sigma = t + t_2 = 0,03$ мм.

Расчет характеристик всех вариантов СЩЛ проводился в частотном диапазоне 10...60 ГГц.

Результаты расчетов показывают, что коэффициент передачи по напряжению СЩЛ с металлическими пластинами на краях щели и с полным заполнением щели диэлектрической композицией составил -0,155 дБ, а ее рабочий диапазон на уровне коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ равен 20,75...41,48 ГГц.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Математическое моделирование рассматриваемого в работе варианта СЩЛ с металлическими экранами, прикрепленными металлическими пластинами на краях щели и с полным заполнением щели диэлектрической композицией осуществлялось для тех же параметров линии передачи, что и в работе [10]. В работе [10] было проведено исследование двух вариантов СЩЛ: варианта с воздушным заполнением щели (вариант 1) и варианта с полным заполнением щели диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, превышающей диэлектрическую проницаемость материала подложки (вариант 2). Также в [10] было проведено сравнение характеристик линий передачи и установлено, что СЩЛ с заполнением щели воздухом имеет меньшую величину коэффициента передачи по напряжению ($S_{21} = -0,185$ дБ), а ее рабочий диапазон частот на уровне коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ равен 25,86...37,17 ГГц (т. е. ширина диапазона составляет 11,31 ГГц). Величина коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ выбрана как соответствующая достаточно высокому уровню прохождения сигнала для расчета ширины диапазона частот. Для варианта СЩЛ с полным заполнением щели диэлектриком (вариант 2) коэффициент передачи по напряжению $S_{21} = -0,166$ дБ, то есть увеличивается на -0,019 дБ (или на 11 %) по отношению к варианту 1, а рабочий диапазон частот этой СЩЛ на уровне коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ равен 21,51...40,23 ГГц (ширина диапазона составляет 18,72 ГГц), то есть увеличивается на 65,5 % по отношению к варианту 1.

Для варианта СЩЛ с металлическими пластинами на краях щели, увеличивающими толщину металлических экранов, и с полным заполнением щели диэлектрической композицией (вариант 3) при суммарной толщине металлических экранов и металлических пластин $t_\Sigma = t + t_2 = 0,03$ мм коэффициент передачи по напряжению равен $S_{21} = -0,155$ дБ, то есть на -0,011 дБ (или на 6,6 %) больше по отношению к варианту 2, а рабочий диапазон частот линии на уровне коэффициента передачи по напряжению -0,2 дБ равен 20,75...41,48 ГГц (ширина диапазона составляет 20,73 ГГц), то есть увеличивается на 10,7 % по отношению к варианту 2.

Таким образом, анализ полученных результатов исследования показывает, что вариант 3 (см. рис. 3) СЩЛ с прикрепленными на краях экранов металлическими пластинами и полным заполнением щели диэлектрической композицией обеспечивает лучшие электрические характеристики по сравнению с рассмотренным в работе [10] вариантом 2 СЩЛ.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ СЩЛ

Примером практической реализации такой (см. рис. 3) конструкции [11] является СЩЛ, содержащая щель шириной 0,5 мм и длиной 10 мм в проводящем покрытии, расположенном на одной стороне плоскопараллельной диэлектрической подложки из диэлектрика Rodgers (Ro3006, диэлектрическая проницаемость – 6,15) толщиной 0,5 мм. Проводящее покрытие выполнено по тонкоплёночной технологии и имеет структуру: Cr (напыленный, 100 Ом/мм²) – Cu (напыленный, 1 мкм) – Cu (гальванический, 6 мкм) – Ni (гальванический, 0,6...0,8 мкм) – Au (гальванический, 3 мкм), суммарная толщина – примерно 10 мкм [17].

Металлические пластины толщиной 0,19 мм, шириной 4 мм и длиной 10 мм изготовлены из сплава МД-50 (50 % меди и 50 % молибдена), имеют гальваническое покрытие никелем толщиной 1 мкм и золотом 3 мкм. Пластины установлены на краях щели, припаяны припоем ПОС-61 к металлическим экранам, в которых выполнена щель. Диэлектрик, заполняющий щель, содержит в своём составе эпоксидный клей МС-1 (ТУ 2252-004-07622667-98) и 64 % наполнителя из мелкодисперсного порошка керамики Ва₃Та₂МgО₉, с размером частиц 7-8 мкм (диэлектрическая проницаемость – 25) [11, 18]. Таким образом, диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего щель, составляет примерно 16.

Другим примером практической реализации является конструкция СЩЛ [11], содержащая щель шириной 0,5 мм и длиной 10 мм, выполненную в проводящем покрытии, расположенном на одной стороне плоскопараллельной подложки из диэлектрика. В качестве диэлектрика используется стеклокерамический материал (ТУ6366-001-07622667-2008) толщиной 0,25 мм с диэлектрической проницаемостью 7,2, представляющий собой слой металлизации толщиной 30 мкм из пасты золото-палладий-серебро (ТУ6365-023-59839838-2012, изготовитель ООО «Дельта-Пасты»), выполненной по толстоплёночной технологии [11, 19].

На краях проводящего покрытия, образующего щель, закреплены металлические пластины толщиной 0,17 мм, шириной 4 мм, длиной 10 мм, выполненные из сплава МД-50 и имеющие гальваническое покрытие никелем (1 мкм) и золотом (3 мкм). Пластины припаяны припоем ПОС-61 к проводящему покрытию, в котором выполнена щель, заполненная диэлектриком. Диэлектрик – на основе эпоксидного клея МС-1 (ТУ2252-004-07622667-98) с 72 % наполнителя Ва₃Та₂МgО₉, (диэлектрическая проницаемость – 25) из мелкодисперсного порошка керамики с размером частиц 7-8 мкм. При этом диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего щель, составляет примерно 18.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показывают, что разработанная конструкция СЩЛ с металлическими пластинами на краях щели, увеличивающими толщину металлических экранов, и с полным заполнением щели диэлектрической композицией позволяет дополнительно повысить коэффициент передачи сигнала по напряжению на 6,6 % и расширить рабочий частотный диапазон на 10,7 %.

Данная конструкция СЩЛ, учитывая техническую возможность ее реализации, может быть рекомендована для использования в серийном производстве изделий электронной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гвоздев, В. И.** Объёмные интегральные схемы СВЧ / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефёдов. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
2. **Maeda, S.** Full wave analysis of propagation on characteristics of a through hole using the finit-domain metod / S. Maeda, I. Kashiwa, I. Fukai // IEEE MTT-S Digest. – 1991. – P. 1003 – 1006.
3. **Нефёдов, Е. И.** Полосковые линии передачи: электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ / Е. И. Нефёдов, А. Т. Фиалковский. – М.: Наука, 1980. – 312 с.
4. **Wusheng Ji.** Simulation on vertical via interconnection using matrix-penciled moment method in microwave and multi-chip module // The 5th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Apr. 19 – 33. 2007. Guilin. China. – P. 273 – 278.
5. **Банков, Е. Е.** Анализ и оптимизация трёхмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / Е. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 207 с.
6. **Нефёдов, Е. И.** Электромагнитные поля и волны / Е. И. Нефёдов. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 368 с.
7. **Zhang, C. W.** A novel W-band waveguide-to-microstrip antipodal finline transition / C. W. Zhang // 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. China. October 25 – 27. 2013. – P.166 – 168. – DOI:10.1109/asemd.2013.6780735.
8. **Klyuev, S. B.** Symmetrical slot line with a dielectric insert in the slot / S. B. Klyuev, E. I. Nefyodov and A. A. Potapov // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2019. – No 1348. – P. 12 – 15. – DOI:10.1088/1742-6596/1348/1/012015.
9. **Патент № 2776955 С1 РФ, СПК Н 01 Р 3/08.** Симметричная щелевая линия передачи сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов: приоритет 07.09.2021, опубликовано 29.07.2022, бюл. № 22 / С. Б. Ключев, В. А. Иовдальский, А. Г. Налогин, А. Н. Пашков.
10. **Иовдальский, В. А.** Улучшение электрических характеристик симметричной щелевой линии / В. А. Иовдальский, С. Б. Ключев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2023. – Вып. 4 (560). – С. 38 – 47.
11. **Патент № 2789795 С1 РФ, МПК Н 01 Р 3/08.** Симметричная щелевая линия передачи сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов: приоритет 31.08.2022, опубликовано 10.02.2023, бюл. № 4 / С. Б. Ключев, В. А. Иовдальский, А. Г. Налогин, А. Н. Пашков.
12. Линии передачи и базовые элементы плоскостных и объёмных интегральных схем СВЧ и КВЧ / С. Б. Ключев, Е. И. Нефёдов, Т. Ю. Черникова, У. Цзи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – Vol.10. – P. 43 – 58.
13. **Патент № 175331 U1 РФ, МПК Н 01 Р 5/10.** Широкополосный объёмный полосково-щелевой переход: приоритет 05.09.2017, опубликовано 30.11.2017, бюл. № 34 / Н. В. Дударев.
14. **Klyuev, S. B.** The screen thickness effect on characteristics and parameters of a symmetrical slot line / S. B. Klyuev, V. A. Iovdalskiy // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE Catalog Number: CFP22521-POD. 22 – 23 September 2022. – P.123 – 124. – DOI: 10.1109/APEDE53724.2022.9912783.
15. **Никольский, В. В.** Вариационные методы для внутренних задач электродинамики / В. В. Никольский. – Изд. «Наука». Главн. ред. физ.-мат. лит, 1967. – 460 с.
16. **Гупта, К.** Машинное проектирование СВЧ-устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха; пер с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
17. **Иовдальский, В. А.** Конструкция и технология микрополосковых плат ГИС СВЧ-диапазона: учебное пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2018. – 175 с.
18. **Акимов, А. И.** Керамические диэлектрики для высокочастотной техники / А. И. Акимов // Актуальные проблемы физики твёрдого тела (ФТТ-2005): сборник докладов Международной научной конференции, 26 – 28 октября. Минск.– Минск: Изд. Центр БГУ, 2005. – Т. 1. – С. 17 – 19.
19. **Ляпин, Л. В.** Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе LTCC: учебное пособие / Л. В. Ляпин, В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2020. – 192 с.

Статья поступила 16 января 2024 г.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 61

ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ВОДНЫХ СРЕДАХ

И. Г. Полников, С. В. Титов, А. С. Титов, К. Д. Казаринов

ФирЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Представлен теоретический анализ экспериментальных данных по изучению поглощения КВЧ-излучения в водных средах. Проанализированы также данные из недавно опубликованных научных статей о регистрации конвекции цитозоля в клетках животных с помощью новых прецизионных флуоресцентных методов. На основании полученных теоретических оценок и собственных экспериментальных результатов предложена гипотеза коррекции движения внутриклеточной жидкости с помощью низкоинтенсивного микроволнового излучения.

КС: поглощение КВЧ-излучения водой, гидродинамическая неустойчивость, внутриклеточное движение, прецизионный флуоресцентный метод

FEATURES OF ABSORBING LOW INTENSITY EHF-RADIATION IN AQUATIC ENVIRONMENTS

I. G. Polnikov, S. V. Titov, A. S. Titov, K. D. Kazarinov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

A theoretical analysis of experimental data on the study of absorbing EHF-radiation in aquatic environments is presented. Data from recently published scientific articles on recording cytosolic convection in animal cells using new precision fluorescent methods were also analyzed. Based on the obtained theoretical estimates and our own experimental results a hypothesis is proposed for correcting the movement of intracellular fluid using low-intensity microwave radiation.

Keywords: absorption of EHF-radiation by water, hydrodynamic instability, intracellular movement, precision fluorescent method

1. ВВЕДЕНИЕ

Данные, опубликованные в последние годы, и их анализ подтвердили способность микроволнового излучения вызывать окислительный стресс в организме человека за счет увеличения продукции активных форм кислорода [1, 2]. При этом необходимо отметить, что биологические эффекты также наблюдались при уровнях электромагнитного воздействия ниже нормативных пределов, что вызывает правомерные сомнения научной общественности в безопасности применяемых стандартов [3, 4]. Данные о вредном воздействии низкоинтенсивного микроволнового излучения на биологические объекты постепенно накапливаются. И хотя эти данные еще носят харак-

тер предварительных результатов (иногда противоречивых), они все яснее указывают на наличие многоуровневых взаимодействий между излучением и биологическими системами [5]. Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований, направленных на изучение чувствительности биологических объектов к микроволновому излучению низкой интенсивности, продемонстрировал отсутствие устойчивой связи между интенсивностью, частотой излучения, продолжительностью воздействия и обнаруженными эффектами [6]. Вследствие сложности вопроса оценки и интерпретации экспериментальных данных по изучению биологической чувствительности к микроволнам, полученных различными авторами, становится все более актуальной задача изучения первичных механизмов воздействия электромагнитного излучения на биообъекты. Такие исследования, несмотря на сложность общей картины взаимодействия микроволн с живыми организмами, помогут на клеточном уровне определить первичные звенья, ответственные за восприятие излучения биологической системой.

Актуальность исследования чувствительности биологических объектов к микроволновому излучению определяется необходимостью изучения безопасности для здоровья людей современных промышленных и технических излучений [7], а также известных терапевтических применений микроволнового излучения [8]. Хотя стандартизованные характеристики микроволновых электромагнитных полей (ЭМП), применяемых в промышленности и медицине, а также в компьютерных и коммуникационных технологиях, не должны превышать допустимых нормативных пределов, реальное воздействие на здоровье людей излучений, обусловленных современными промышленными и технологическими процессами, до сих пор является предметом активного обсуждения в научной литературе [9]. Выяснение природы биологических эффектов, вызванных электромагнитным излучением, подразумевает ответ на ряд вопросов: каковы особенности поглощения излучения в биологическом объекте; какие первичные физико-химические процессы в клетках вызываются этим поглощением; какие биохимические и физиологические реакции отвечают за отклик живой системы на воздействие электромагнитным полем? Данная работа имеет целью внести свой вклад в ответ на первый из этих вопросов.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Экспериментальные данные о перемещении водных слоев при КВЧ-облучении

До недавнего времени конвекция не считалась важной движущей силой перемещения внутриклеточной жидкости. Однако современные исследования внутриклеточных градиентов температуры, ставшие возможными во многом благодаря значительному техническому и методическому прогрессу [10], привели к переоценке роли этого механизма. Было установлено, что в клетке существуют области локального нагрева, которые создают условия для образования градиента плотности в цитоплазме, а следовательно, и возможность конвективной циркуляции [11]. Результаты измерения внутриклеточной температуры с высоким разрешением показали, что ядро клетки и специфические органеллы представляют собой локальные источники тепла, запускающие процесс изменений температуры цитоплазмы [12]. В ядре репликация ДНК, транскрипция и процессинг РНК могут вносить вклад в локальный термогенез. В митохондриях локальное тепловыделение, вероятно, является результатом активного энергетического метаболизма [12]. Предполагается также участие митоза, гидролиза АТФ или фосфорилирования центросомных белков, способных вызвать локальное повышение температуры в центросоме. Представленные дан-

ные значительных температурных различий между цитоплазмой, ядром и митохондриями свидетельствуют о необходимости теоретических исследований внутриклеточного транспорта, обусловленного конвективным механизмом.

При экспериментальном исследовании биологического действия КВЧ-облучения на модельные мембранные системы, нами был установлен конвективный механизм обнаруженных эффектов ускорения мембранного транспорта [13]. Было показано, что КВЧ-излучение способно стимулировать ионную проницаемость бимолекулярных липидных мембран (БЛМ) в том случае, если узким местом процесса переноса становится стадия проводимости в примембранных неперемешиваемых слоях. Эффект КВЧ-облучения проявлялся только в случае модифицированных БЛМ, у которых ионная проводимость была увеличена введением селективных индукторов ионного транспорта (валиномицина или 2,4-динитрофенола). Включение КВЧ-облучения обратимо снижало сопротивление БЛМ, и этот эффект возрастал при увеличении разности потенциалов, приложенной к мембране.

Явление вынужденной конвекции было обнаружено нами при исследовании ряда мембранных модельных и нативных систем в водных средах в условиях КВЧ-облучения: процессов перекисного окисления липидов, транспорта ионов кожей лягушки, лизиса дрожжевых клеток и др. [13].

В наших экспериментах было обнаружено, что КВЧ-излучение низкой интенсивности увеличивает выход из клеток в среду продуктов нуклеопротеидной природы с максимумом поглощения 260 нм. Дозовая зависимость показывает проявление эффекта при интенсивности облучения порядка 1 мВт/см² и отсутствие зависимости от мощности излучения при интенсивности 10 мВт/см². Возможно, в данном случае ускорение лизиса при фотохимическом процессе связано с ускорением процесса переноса продуктов реакции в водной фазе под действием КВЧ-излучения. В пользу такого предположения свидетельствуют данные о таком же увеличении лизиса дрожжевых клеток при механическом перемешивании суспензии, а также сведения о важности гидродинамических эффектов при фотолизе везикулярных структур [14].

С учетом вышеизложенного можно попытаться объяснить эффекты КВЧ-излучения в экспериментах с участием химических реакций в мембранах, учитывая возможность доставки реагентов к месту реакции. Например, скорость накопления продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в суспензии липосом [15]. В результате окисления фосфолипидов увеличивается проницаемость мембран для ионов и др. важных биологических веществ (один из механизмов патологии клетки). Независимо от способа инициирования окисления липидов модельных мембран и метода физико-химического контроля эффекта, КВЧ-излучение приводило к ускорению процессов ПОЛ и дозовая зависимость имела пороговый характер от значений ниже 1 мВт/см². Предполагается, что данный эффект связан с увеличением скорости доставки кислорода к месту реакции ПОЛ.

Экспериментальные методы наблюдения позволили нам обнаружить перемещение слоев воды вблизи поверхности, на которую падает микроволновое излучение. Визуально наблюдалось под микроскопом движение взвешенных в воде частиц, например эритроцитов в физиологическом растворе в тонкой кварцевой кювете, находящихся под воздействием микроволнового излучения. Была также обнаружена конвекция в воде, стимулированная КВЧ-излучением, вблизи плоской вертикальной стенки кварцевой кюветы. Вода была помечена следами от капель туши.

Наиболее интересные результаты по обнаружению конвекции нами были получены при изучении кинетических особенностей реакций обратимой фотодимеризации акридина [16]. Микроволновое излучение интенсивностью 20 мВт/см² усиливало распад димеров, а дальнейшее по-

вышение интенсивности облучения до 50 мВт/см² приводило к качественно новому явлению: возникали затухающие колебания интенсивности люминесценции с периодом в несколько минут. Наблюдаемые явления предположительно связаны с изменением режима вынужденной конвекции водного раствора в измерительной ячейке.

2.2. Теоретические оценки воздействия КВЧ-излучения на режим конвекции в водной среде

Указанные факты значительных температурных различий между цитоплазмой, ядром и митохондриями свидетельствуют о необходимости теоретических исследований внутриклеточного транспорта, обусловленного конвективным механизмом. Представим теоретическую оценку возможности влияния микроволнового излучения низкой интенсивности на конвекцию в водном растворе. Для этого решим задачу о плотности энергии теплового источника при поглощении водной средой энергии микроволнового излучения в КВЧ-диапазоне. Пусть электромагнитная волна падает из области $x < 0$ нормально к поверхности раздела $x = 0$ (x, y, z – лабораторная система координат). Падающая волна считается линейно поляризованной с векторами \vec{E} (направлен параллельно оси z) и \vec{H} (направлен параллельно оси x). Область пространства $x < 0$ (воздух) считается непоглощающей.

Запишем уравнения для распространяющейся плоской электромагнитной волны, которые в системе СГС имеют вид [17]:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где σ – электропроводность; ε – диэлектрическая постоянная; c – скорость света. При этом граничные условия задаются как

$$\begin{cases} \sigma \\ \varepsilon \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad x < 0; \quad \begin{cases} \sigma \\ \varepsilon \end{cases} = \begin{cases} \sigma \\ \varepsilon_2 \end{cases}, \quad 0 < x < L. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1) и (2) будет представлять собой комплексные монохроматические волны. При этом на границе раздела ($x = 0$) должны выполняться условия непрерывности тангенциальных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} . В первой (индекс 1) области, $x < 0$, решение уравнения (2) описывает две встречные волны, бегущие вдоль оси x , а именно

$$E_1 = \hat{E}_{10} e^{i\omega(t+(x/c))} + E_{02} e^{i\omega(t-(x/c))}. \quad (4)$$

Во второй (индекс 2) области, $0 < x < L$, решение уравнения (2) описывает одну волну, а именно

$$E_2 = \hat{E}_{20} e^{i(\omega t - \hat{k}_2 x)}, \quad (5)$$

где комплексное волновое число \hat{k}_2 задается выражением

$$\hat{k}_2 = \hat{k}'_2 - i\hat{k}''_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2 - i \frac{4\pi\sigma}{\omega}}. \quad (6)$$

Выделяя в уравнении (6) действительную \hat{k}'_2 и мнимую \hat{k}''_2 части, получим следующие выражения:

$$k'_2 = \frac{\omega}{c} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_2^2}{4} + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2} + \frac{\epsilon_2}{2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$$k''_2 = \frac{\omega}{c} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_2^2}{4} + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \frac{\epsilon_2}{2} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Из граничных условий на границе двух сред при $x = 0$ следуют равенства для амплитуд волн

$$\hat{E}_{10} + E_{0z} = \hat{E}_{20} \quad (9)$$

и для амплитуд производных по координате

$$\frac{\omega}{c} (E_{0z} - \hat{E}_{10}) = \hat{k}'_2 \hat{E}_{20}. \quad (10)$$

Решая систему уравнений (9) и (10), получим выражение для амплитуды волны во второй области через амплитуду падающей волны

$$\hat{E}_{20} = \hat{z} E_{0z}, \quad (11)$$

где \hat{z} – комплексный коэффициент прохождения волны по амплитуде. Модуль и фаза коэффициента $\hat{z} = |\hat{z}| e^{i\varphi}$ задаются как

$$|\hat{z}| = 2 \left[\left(1 + \frac{ck'_2}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{ck''_2}{\omega} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (12)$$

$$\varphi = -\arctg \left[\frac{ck''_2}{\omega + ck'_2} \right]. \quad (13)$$

Протекание тока в среде (область $0 < x < L$) вызывает выделение джоулевого тепла с плотностью $W = \sigma(\text{Re}E_z)^2$. Подставляя в это выражение уравнение (5), получим

$$\begin{aligned} W &= W_0 e^{-2k'_2 x} \cos^2(\omega t - k'_2 x + \varphi) = \\ &= \frac{W_0 e^{-2k'_2 x}}{2} [1 + \cos 2(\omega t - k'_2 x + \varphi)] = W_1 + W_2, \end{aligned} \quad (14)$$

где $W_0 = \sigma |z|^2 E_{0z}^2$. Из уравнения (14) видно, что плотность W имеет постоянную $W_1 = W_0 e^{-2k'_2 x} / 2$ и переменную $W_2 = W_0 e^{-2k'_2 x} \cos 2(\omega t - k'_2 x + \varphi) / 2$ составляющие. Другими словами, W колеблется около своего среднего значения W_1 с удвоенной частотой 2ω , при этом величина W_1 определяет поглощение энергии КВЧ-поля, которое происходит в слое толщиной $D = (2k''_2)^{-1}$. Подставляя в это выражение уравнение (8), получим оценочное выражение для глубины проникновения поля в среду

$$D = (2k_2'')^{-1} = \frac{c}{\omega\sqrt{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_2'^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \varepsilon_2' \right)^{-1/2}. \quad (15)$$

Численные оценки для излучения с длиной волны $\lambda = 8,5$ мм дают значение $D = 0,3$ мм. При этом параметры $\varepsilon_2' = 25$, $\varepsilon_2'' = 33$ и $\sigma = 6 \cdot 10^{11}$ рассчитывались по формулам

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_D)^2} + \varepsilon_\infty, \quad (16)$$

$$\varepsilon_2'' = \frac{\omega\tau_D (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau_D)^2}, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\omega\varepsilon_2''}{4\pi}. \quad (18)$$

В расчетах были использованы следующие значения параметров, соответствующие температуре $T = 30$ °С: статическая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_s = 76,8$, высокочастотная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_\infty = 4,2$ и характерное время дебаевской релаксации $\tau_D = 7,2 \cdot 10^{-12}$ с.

В эксперименте использовалась кювета высотой $d = 0,6$ мм, что сравнимо с глубиной проникновения поля D . Таким образом, можно считать, что источник тепла распределен в жидкости и существованием тепловых волн можно пренебречь.

2.3. Оценка скорости конвекции

Поскольку в условии нашего эксперимента при КВЧ-облучении можно считать, что энергия электромагнитного поля равномерно поглощается по всей толщине кюветы, то внутренний разогрев жидкости приведет к конвективному движению. Макроскопические движения жидкости описываются общей системой уравнений гидродинамики. Эта система включает в себя уравнения Навье-Стокса, уравнение переноса тепла и уравнение неразрывности, выражающее закон сохранения массы. Наиболее популярной моделью для описания конвекции в жидкостях, основанной на этих трех уравнениях, является приближение Буссинэска. Для несжимаемой жидкости, находящейся в поле тяжести, уравнение Навье-Стокса в приближении Буссинэска имеет вид

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla P + \eta \Delta \vec{v} + \rho(T) \vec{g}. \quad (19)$$

Здесь \vec{v} – скорость течения; T – абсолютная температура; P – давление; η – динамическая вязкость; \vec{g} – ускорение свободного падения; ∇ и Δ – операторы набла и Лапласа соответственно. Часто для зависимости плотности $\rho(T)$ от температуры применяется линейная аппроксимация $\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta T')$, где β – коэффициент теплового расширения; $T' = T - T_0$ – отклонение температуры от равновесного состояния; ρ_0 – плотность жидкости при некоторой равновесной температуре T_0 . Поскольку коэффициент теплового расширения и отклонение температуры обычно относительно невелики, то линейное приближение обладает приемлемой точностью в большинстве исследуемых задач.

Подстановка линейной зависимости плотности и перенормировка давления позволяют исключить слагаемое $\rho_0 \vec{g}$. Окончательно уравнение (19) принимает вид

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \Delta \vec{v} - \beta T' \vec{g}, \quad (20)$$

где $\nu = \eta/\rho_0$ – коэффициент кинематической вязкости.

Уравнение переноса тепла в случае несжимаемой жидкости при пренебрежении выделяющимся в жидкости теплом (вследствие внутреннего трения) имеет вид [18]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T = \chi \Delta T + F, \quad (21)$$

где $\chi = \kappa/(\rho_0 c_p)$ – коэффициент температуропроводности; κ – коэффициент теплопроводности; c_p – удельная теплоемкость; F – слагаемое, обусловленное наличием источника тепла (КВЧ-излучение) с мощностью W (Вт/см²), так что $F = W/(2\rho_0 c_p l)$ [19].

Уравнение неразрывности при этом имеет вид [19, 20]

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0. \quad (22)$$

Рассмотрим конвективное движение жидкости в плоском вертикальном слое.

При плоскопараллельном движении отлична от нуля лишь вертикальная составляющая скорости v_z . Из уравнения неразрывности следует, что $v_z = v_0(x)$. Предполагая, что температура также будет зависеть от поперечной координаты $T' = T'(x)$, получим из уравнений (20) и (21) уравнения для давления, температуры и скорости. При стационарном движении имеем:

$$\chi \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + F = 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial x} = 0, \quad \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + g\beta T' = C. \quad (24)$$

Здесь C – постоянная разделения переменных. Граничные условия для температуры имеют следующий вид: при $x = 0$ граница термостатирована

$$T'(0) = T'_1, \quad (25)$$

а при $x = l$ граница теплоизолирована

$$\left. \frac{\partial T'}{\partial x} \right|_{x=l} = 0. \quad (26)$$

Решая уравнение (23) с данными граничными условиями, находим распределение температуры

$$T' = -\frac{F}{2\chi} x^2 + \frac{Fl}{\chi} x + T'_1. \quad (27)$$

Из уравнения (24) с учетом решения (27) и граничных условий $v_0(\pm l) = 0$ находим распределение скорости течения:

$$v_0 \sim \frac{g\beta Fl^4}{\chi\nu} \left(1 - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right) f \left(\frac{x}{l} \right). \quad (28)$$

Из (28) находим оценку для скорости:

$$v_0 \sim \frac{g\beta Fl^4}{\chi\nu} \sim 10^{-6} \text{ (м/с)}. \quad (29)$$

Значения параметров, используемых при оценке скорости, приведены в таблице.

g , м/с ²	ρ_0 , кг/м ³	c_p , Дж/(кг·К)	χ , Вт/(К·м)	ν , м ² /с	β , 1/К
10	10 ³	4,2·10 ³	0,6	10 ⁻⁶	0,2·10 ⁻⁶

Таким образом, для скорости конвекции в воде, поверхность которой облучается мм-волнами, получена оценка 1 мкм/с, что соизмеримо с размерами клеток организма.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной работе результаты исследований показывают возможность использования КВЧ-облучения низкой интенсивности для регулирования скорости потоков водных растворов в модельных биологических объектах. В то же время современные данные об экспериментально обнаруженных эффектах движения внутриклеточной цитоплазматической жидкости при наличии градиентов температуры, создаваемых внутриклеточными источниками тепла, подтверждают такую возможность в клетках млекопитающих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of 900 MHz electromagnetic radiation on the induction of ROS in human peripheral blood mononuclear cells / E. Kazemi, S. M. Mortazavi, A. Ali-Ghanbari [et al.] // Journal of Biomedical Physics & Engineering. – 2015. – Vol. 5, No 3. – P. 105 – 114.
2. Microwave radiation (2,45 GHz)-induced oxidative stress: whole-body exposure effect on histopathology of wistar rats / P. Chauhan, H. N. Verma, R. Sisodia, K. K. Kesari // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 36, No 16. – P. 20 – 30.
3. **Starkey, S. J.** Inaccurate official assessment of radiofrequency safety by the advisory group on non-ionising radiation / S. J. Starkey // Reviews on Environmental Health. – 2016. – Vol. 31, No 4. – P. 493 – 503.
4. **Redmayne, M.** International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) / M. Redmayne // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2016. – Vol. 35, No 2. – P. 176 – 185.
5. **Ciaula, Di.** 5G communication systems: are there health implications? / Di Ciaula, A. Towards // International Journal of Hygiene and Environmental Health. – 2018. – Vol. 221, No 3. – P. 367 – 375.
6. **Simko, M.** 5G wireless communication and health effects – a pragmatic review base on available studies regarding 6 to 100 GHz / M. Simko, M.-O. Mattsson // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – Vol. 16, No 18. – P. 3406.
7. Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits / D. Urbinello, W. Joseph, A. Huss [et al.] // Environment International. – 2014. – Vol. 68. – P. 49 – 54.
8. **Ордынская, Т. А.** Волновая терапия / Т. А. Ордынская, П. В. Поручиков, В. Ф. Ордынский. – М.: Эксмо, 2008.
9. Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: a systematic literature review / S. Sagar, S. Dongus, A. Schoeni [et al.] // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. – 2017.

10. Intracellular thermometry with fluorescent sensors for thermal biology / K. Okabe, R. Sakaguchi, B. Shi, S. Kiyonaka // Pflugers Arch. – 2018. – Vol. 470, No 5. – P. 717 – 7312.
11. **Shimmen, T.** Cytoplasmic streaming in plants / T. Shimmen, E. Yokota // Curr. Opin. Cell. Biol. – 2004. – Vol. 16, No 1. – P. 68 – 72.
12. Dynamics associated with spontaneous differentiation of ovarian stem cells in vitro / S. Parte [et al.] // J. Ovarian Res. – 2014. – No 7. – P. 25.
13. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2 (537). – С. 62 – 75.
14. **Kazarinov, K. D.** Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation / K. D. Kazarinov, A. V. Putvinsky, V. S. Malinin // Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Plenum publishing corporation. N.Y. 1999. – P. 441 – 444.
15. **Казаринов, К. Д.** Воздействие электромагнитные полей микроволнового диапазона модифицирует сверхслабое свечение продуктов жизнедеятельности клеток / К. Д. Казаринов, А. В. Чеканов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 3. – С. 1 – 29.
16. Изучение действия микроволнового излучения на фотохимические процессы биомолекул в водных растворах / Е. С. Дремина, В. С. Шаров, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 3. – С. 57 – 63.
17. **Виноградова, М. Б.** Теория волн / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. В. Сухоруков. – М.: Наука, 1990. – 432 с.
18. **Гершуни, Г. З.** Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. – М.: Наука, 1972. – 393 с.
19. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
20. **Левич, В. Г.** Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – С. 378 – 388.

Статья поступила 30 января 2024 г.

ИСТОРИЯ

УДК 9

«ИСТОК» УКАЗАЛ НАМ ДОРОГУ ПО ЖИЗНИ

Часть 2

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

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

«ISTOK» SHOWED US THE ROAD OF LIFE

Part 2

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

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

Основополагающая деятельность министра электронной промышленности СССР Александра Ивановича Шокина, академика Николая Дмитриевича Девяткова, членов дирекции, а также кадровых и информационных служб превратила научно-исследовательский институт № 160 («почтовый ящик № 17») в известнейшее НПП «Исток» в городе Фрязино Московской области. Сюда на работу из различных вузов страны приезжали ежегодно до четырехсот молодых специалистов.

Подавляющее их число навсегда связали свою жизнь со славным «Истоком».

ЭЛЬЗА ВАСИЛЬЕВНА ПОГОРЕЛОВА

Э. В. Погорелова родилась 19 сентября 1938 года в семье второго секретаря Челябинского областного комитета КПСС. Учеба в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова (МГУ) свела ее со многими выдающимися учеными страны, и прежде всего с академиком АН СССР, ректором МГУ Р. В. Хохловым. Большая и ответственная общественная работа на посту секретаря комитета комсомола физического факультета МГУ укрепила ее активную жизненную позицию.

В 1956 году Эльза Васильевна возглавила первый студенческий отряд МГУ, выезжавший в Казахстан на поднятие целины.

Научные работы Э. В. Погореловой были связаны с квантовой электроникой и явились продолжением ее дипломной работы в МГУ, которую она выполняла под руководством доктора физико-математических наук, про-



Э. В. Погорелова

фессора А. Ахманова. Успешное завершение ряда первоклассных работ по теории и экспериментальному исследованию лазеров позволило Эльзе Васильевне с блеском защитить диссертацию. После распределения на «Исток» она стала первой и единственной женщиной на предприятии с ученой степенью кандидата физико-математических наук.

С глубоким багажом знаний и умений Эльза Васильевна пришла работать в теоретический отдел, в лабораторию профессора А. С. Тагера, и внесла не гаснущий на протяжении нескольких десятилетий энергетический импульс в жизнь отделения 10. Она много лет возглавляла партийное бюро теоретического отделения. Не было жизненного вопроса, на который Эльза Васильевна не знала бы ответа, причем ответа высококвалифицированного, со знанием дела и, главное, с огромной сердечной заинтересованностью. Она была всегда готова помочь любому сотруднику в трудной ситуации. Во многих вопросах жизни и деятельности отделения 10 его руководители – доктор технических наук В. П. Сазонов, а затем и кандидат физико-математических наук А. В. Галдецкий – всегда прислушивались к ее мнению.

В научном плане Э. В. Погореловой с Е. И. Голантом был предложен удобный экспрессный метод расчета лавинно-пролетных диодов (ЛПД), нашедший широкое применение в нашей стране. Ими же был создан комплекс программ для ЭВМ, позволивший получить ряд уникальных результатов и открывший новые возможности для генерации и усиления колебаний СВЧ; а также изучен эффект «всплеска» дрейфовой скорости электронов и его влияние на характеристики арсенидгаллиевых ЛПД и диодов Ганна. Э. В. Погореловой совместно с Я. Б. Мартыновым исследовано влияние качества подложки и лавинно-инжекционной неустойчивости на характеристики арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ), на основе этого были созданы методики и способы автоматизации отбраковки полевых транзисторов.

Эльза Васильевна глубоко разбиралась в сути тонких теоретических проблем, поэтому ее научные доклады всегда с интересом воспринимались на конференциях и симпозиумах.

В 1985 году круг научно-общественных обязанностей Э. В. Погореловой значительно расширился после ее избрания ученым секретарем диссертационного совета при «Источе». Работая в тесном контакте с руководителями предприятия С. И. Ребровым, А. Н. Королевым, А. А. Борисовым и академиком Н. Д. Девятковым, Эльза Васильевна всеми силами способствовала зарождению новых научных кадров – кандидатов и докторов технических наук на предприятии и во всей отрасли. Она всячески опекала диссертантов и помогала им при всех их трудностях.

В течение четырех лет Э. В. Погорелова работала освобожденным первым заместителем председателя Фрязинского городского Совета народных депутатов.

Эльза Васильевна Погорелова ушла из жизни 26 февраля 2016 года.

Для нас она всегда будет являться ярким примером трудолюбия, честности и принципиальности, широты интересов и глубины кругозора, душевной теплоты и женского обаяния.

НАУМ ПИНХАСОВИЧ СОЩИН

Н. П. Социн был талантливым и многогранно одаренным человеком: кандидат химических наук, лауреат Государственной премии СССР; изобретатель, автор более 200 патентов, пропагандирующий изобретательскую деятельность в газетах и журналах страны; журналист, регулярно публиковавший свои статьи в газетах.

Н. П. Социн родился 6 августа 1938 года в г. Винница. Неизгладимые впечатления оставили на Наума годы тяжелейшего испытания – войны с немецко-фашистскими захватчиками. 21 июня

1941 года трехлетний Наум с мамой поехали в Киев к дяде. Ночью поезд подвергся жесточайшей вражеской бомбежке. Чудом они остались тогда живы. Отец Наума погиб на фронте в 1942 г. В школу мальчик пошел в Харькове в 1945 г. В 1951 г. в связи с изменившимися семейными обстоятельствами мать с сыном переехали в Киргизию, в г. Фрунзе, где в 1955 г. Наум с отличием окончил среднюю школу. Поступил в Московский химико-технологический институт имени Д. И. Менделеева (МХТИ) на только что открытый там новый факультет «Химия и технология электровакуумных и полупроводниковых производств».

Во Фрязино Н. П. Социн приехал после окончания МХТИ в 1960 г. и устроился работать на бурно развивающееся предприятие НИИ-160, в отдел 130, занимавшийся электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ). Руководители отдела сразу отметили в одаренном студенте неумное стремление к знаниям и научному поиску.

При решении задач ЭЛТ молодой специалист всегда предлагал свои варианты и обязательно доискивался, было ли то уже кем-то предложено. Радовался, если его предложение было новым.

В 1966 г. в связи с созданием на базе отдела 130 предприятия НИИЭП, в настоящее время АО «НИИ «Платан» с заводом при НИИ», большая группа специалистов, в том числе и Н. П. Социн, была переведена на это предприятие. Для Наума Пинхасовича начался новый этап в его научной жизни. Интерес к новому и неизведанному не покидал его всю жизнь. Именно этот интерес привел его в ряды ученых и изобретателей. Широко известны его работы по пигментированным катодолминофорам, которые получили широкое внедрение на производствах во многих городах страны; плоским монокристаллическим экранам для приборов ночного видения; многоцветным экранам с большой скоростью вывода информации; экранам большой площади и многие другие. За свою долгую жизнь он написал 100 оригинальных статей и 50 научно-технических отчетов, получил более 200 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Подготовил и с блеском защитил кандидатскую диссертацию. В 1982 году в составе авторского коллектива Наум Пинхасович был удостоен Государственной премии СССР за новаторские работы по многоцветной индикации для различных классов индикаторных и бортовых приборов. Биография Н. П. Социна помещена в энциклопедии «Отечественная радиолокация». Работы Н. П. Социна широко известны и используются не только в России, но и в США, Китае, Тайване, Южной Корее, Японии. В зарубежных странах он был уважаемым российским ученым, прославлявшим отечественную науку.

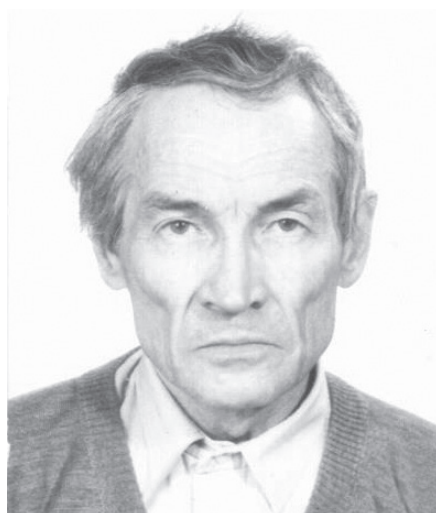
Н. П. Социн обладал редким для крупного ученого талантом преподавателя. С 1965 года на протяжении многих лет он работал по совместительству во втузе «Истока», где преподавал студентам не только азы химии и технологии, но и с восхищением рассказывал о новых удивительных результатах своих коллег: ученых, технологов, разработчиков, изобретателей. Другое привлекательное качество Наума Пинхасовича – доступно рассказывать о новых идеях и методах в изобретательстве молодым ученым, студентам, школьникам. Это качество способствовало тому, что на протяжении 40 лет он активно сотрудничал с газетами и популярными журналами. Его статьи об уникальных работах академика С. И. Вавилова, создателя универсальной ЭВМ БЭСМ-6 С. А. Лебедева, первом директоре НИИ «Платан» В. П. Куклеве, выдающихся ученых г. Фрязино М. В. Григорьеве, З. Г. Петренко, В. Г. Герусе, В. А. Астрине, С. В. Виневиче, Н. П. Кибардине и других могут служить примером тонкого понимания психологии крупных советских и российских ученых, научных работников и изобретателей, посвятивших себя служению отечеству.



Н. П. Социн

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

ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ ОЛИХОВ



И. М. Олихов

И. М. Олихов пришел работать на «Исток» в 1962 году после окончания Таганрогского радиотехнического института по специальности инженер-электроник. Игорь Михайлович относился к той когорте людей, у которых все дела спорились. За что бы он не брался, все делал качественно, с душой. Удивляет и восхищает широта и глубина его таланта. За прошедшие десятилетия он проявил себя как человек незаурядный, изобретательный, с не увядающим с годами интересом к научной и исследовательской деятельности, умеющий просто и доступно рассказать студентам о сложных процессах в СВЧ-приборах. Уже в молодости он проявил большие способности ученого и руководителя, которые с годами лишь укреплялись. В конце 50-х годов комсомольская организация «Истока» насчитывала более полутора тысяч комсомольцев, причем высокий процент среди них составляли дипломированные инженеры и молодые ученые. Для организации работы среди этой молодежи в октябре 1959 года был образован Совет молодых специалистов (СМС), а первым председателем была избрана Н. Г. Отмахова. Дальнейшие значительные изменения в деятельности СМС были связаны с Постановлением ЦК ВЛКСМ, Госкомитета по науке и технике, Президиума АН СССР и Министерства высшего и среднего специального образования СССР от 12 мая 1967 г. «О работе с научной молодежью», утвердившим статус Совета молодых исследователей и специалистов (СМИС). Понятие научной молодежи расширилось, к ним стали относить всех дипломированных инженеров и техников в возрасте до 34 лет.

На первой отчетно-выборной конференции СМИС председателем Совета был избран И. М. Олихов. Игорь Михайлович понимал, что, для того чтобы проявить себя, молодому ученому нужны новые «поля» деятельности. В мае 1968 года на «Истоке» была проведена научно-техническая конференция молодых специалистов, на которой было заслушано 65 докладов. По инициативе И. М. Олихова для участия в конференции были также приглашены молодые специалисты из Москвы, Ленинграда, Киева, Горького и других городов. По итогам конференции был издан сборник докладов, а авторы лучших докладов были повышены в окладе.

Одним из нововведений в работе СМИС стало проведение регулярных конкурсов научных работ. В начале 1969 года такой конкурс был проведен, по его результатам работы К. Симонова, В. Леймана и С. Зимина были представлены на соискание премии Ленинского комсомола. В этом же году на ВДНХ прошла Центральная выставка научно-технического творчества молодежи, на которой К. Симонов и Е. Покровский были удостоены серебряных медалей ВДНХ. В последующие годы СМИС под руководством И. М. Олихова существенно расширил выдвижение работ молодых

сотрудников на различные премии и выставки. Работы молодых «истоковцев» были отмечены премиями и медалями ВДНХ.

Общественная работа не только не ослабила научную деятельность И. М. Олихова, но и придала ему большую уверенность в своих силах и возможностях. Он защитил кандидатскую диссертацию и стал одним из самых молодых кандидатов наук в истории «Истока». В крупном подразделении «Истока», НПК-2, его назначили руководителем сектора по разработке радиоэлектронных устройств СВЧ.

Последующий период оказался одним из самых плодотворных в жизни Игоря Михайловича. Ежегодно он публиковал в научно-технических журналах по 4-5 оригинальных работ и подавал по 3-4 заявки на изобретения. Идеи, высказанные И. М. Олиховым, в большей своей части были неожиданны, оригинальны и практически широко востребованы. Стремление к новому не покидало его и тогда, когда директор НИИ «Платан» с заводом при НИИ А. Г. Михальченков пригласил его стать своим заместителем по научной работе и одновременно возглавить лабораторию. Основные направления личной научно-исследовательской деятельности Игоря Михайловича – разработки в области СВЧ-приборов и радиоэлектронных систем на их основе. В это время он уже был автором более 80 научных публикаций и 25 авторских свидетельств и патентов. Замечательно, что 9 патентов, полученных в течение 1995 – 2000 гг., отмечены золотыми и серебряными медалями и дипломами Всемирных салонов инноваций и изобретений в Брюсселе и Женеве, в том числе золотой медалью на салоне «Брюссель – Эврика 2000». Изобретательскую и новаторскую деятельность Игорь Михайлович не прекращал до конца жизни.

Приход Игоря Михайловича в филиал МИРЭА при «Истоке» положительно сказался как на уровне преподавания, так и на повышении требовательности к студентам. Сам он преподавал одну из самых сложных дисциплин «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», которой практически завершается шестилетний период учебы в институте. Чтобы овладеть этой дисциплиной и успешно сдать Игорю Михайловичу экзамены, необходимо было владеть знаниями, полученными в филиале МИРЭА в области проектирования и конструирования устройств СВЧ и технологии их изготовления. В отношении базового курсового проекта по этой дисциплине И. М. Олихов проявил свойственную ему изобретательность – проект являлся фактически прообразом будущего дипломного проекта. Не у всех студентов получалось защитить ему курсовой с первого захода. Но за все годы его преподавания никто и никогда не слышал, чтобы студенты обижались на преподавателя, поскольку все вопросы Игоря Михайловича «были по делу и били в самую точку». Более того, обладая удивительной широтой и глубиной знаний, он быстро вникал в суть проблемы и сам старался прояснить студенту избранную им тему для дипломного проекта. Время показало, что такой путь подготовки проектов оказался наиболее эффективным.

Помимо чисто преподавательской работы, Игорь Михайлович в филиале МИРЭА являлся заместителем заведующего кафедрой профессора С. И. Реброва и позднее профессора А. Н. Королева. На И. М. Олихова и руководителя специальности К. И. Алмазова-Долженко ложилась ответственная задача по определению и утверждению тем дипломных проектов и руководителей проектов для каждого выпускника филиала МИРЭА. Игорь Михайлович чрезвычайно дружелюбно, как говорили студенты, по-человечески относился к их судьбам. Студенты и преподаватели всегда с большим уважением относились к И. М. Олихову, считая его одним из столпов в подготовке кадров филиала МИРЭА при «Истоке».

И. М. Олихов скончался в 2007 году.

Статья поступила 3 октября 2023 г.

**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 публикации (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), должность, ученую степень, послевузовское специальное образование (аспирант, соискатель, докторант, студент, магистрант), место работы, город, страна, домашний и электронный адрес, телефон;

• информацию о финансировании статьи (грантовая поддержка).

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

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

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

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDraw;
- 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 Р 7.0.100–2018 и дается общим списком в конце статьи.

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

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2024 г. (4 вып. в год). Цена подписки – 9600 руб., цена 1 номера – 2400 руб., включая НДС (20 %).

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

Для оформления подписки необходимо оформить заказ, произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», отдел сбыта; тел.: 8(495)465-88-67. Отчетные документы высылаются с каждым номером сборника.

ЗАКАЗ

Прошу принять заказ на подписку научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2024 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Дата выхода в свет: 15.03.2024 г.	Усл. п. л. 12,5	Формат 60×88 ^{1/8}
Отпечатано: Печатная компания ООО «ТипоГрафф», 111397, г. Москва вн. тер. г. муницип. округ Перово, ул. Новогиреевская, д. 26, с. 3.	Уч.-изд. л. 13,0	Тираж 500
	Индекс 36292	10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина». Адрес редакции и издателя: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2024, вып.1(561), с. 1-102

Подписной индекс 36292

