ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

۲

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (529)

2016

۲

۲

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

 $(\blacklozenge$

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск	2(529)
	· · ·

2016

Издается с 1950 г.

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

Редакционная коллегия:

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

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

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2016 г.

۲

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

 $(\mathbf{0})$

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 2(529) 2016 Founded in 1950	г.
---	----

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

Editorial staff:

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

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

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

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

۲

۲

СОДЕРЖАНИЕ

۲

Электровакуумные приборы

Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В. – Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой	8
Вашин С.А., Корепин Г.Ф., Климова Н.Н. – Проблемы поиска сложных течей отпаян- ных ЭВП.	13
Васильев В.И. – Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи по мощности с помощью моделирования	22
Баранов А.В., Козиков А.Л., Привер Э.Л. – Комбинированные СВЧ-фильтры с полосно- пропускающими и режекторными свойствами	32
Семенин С.Н., Скобелев Д.Н., Бушкин С.С., Немирич Д.М. – Волноводно-микрополос- ковый переход Х-диапазона	40

Твердотельная электроника

Темнов А.М., Дудинов К.В., Трофимов А.А., Епифанцев А.А., Киселева Е.В. – Иссле-	
дование мощных усилительных ГМИС Х-диапазона на транзисторах из нитрида	
галлия	45

Катоды и материалы

Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В. – Методика определения параметров эмисси-	
онной неоднородности катодных материалов	54
Алехина В.И., Королев Д.С., Королев С.В. – Низкотемпературные крупногабаритные	
катодно-подогревательные узлы	69

Технология и материаловедение

Мухтаров З.Э., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е. – Влияние низкоэнергетической им-	
плантации ионов Ba^+ на состав и эмиссионные свойства W и WO_2	81

Медицинская электроника

<i>Казаринов К.Д.</i> – Терагерцовое излучение – инструмент XXI века (использование	
в медико-биологических исследованиях)	86

۲

۲

Краткие сообщения

Кяргинский Б.Е. – Узкополосный перестраиваемый шумовой генератор	
Балыко А.К. – Плотности распределения вероятности модуля радиус-вектора со случайными координатами в пространствах различной размерности	106
Экономика	
Чекаданова М.В. – Модель инновационного развития радиоэлектронного кластера	

в особой экономической зоне.....

۲

112

۲

۲

CONTENTS

۲

Electrovacuum devices

Kalina V.G., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V. – Cyclotron protective device. Load coupling calculation.	8
<i>Vashin S.A., Korepin G.F., Klimova N.N.</i> – The problems of detecting complicated leakages of sealed-off electrovacuum devices.	13
<i>Vasilyev V.I.</i> – Magnetron type resonator: investigation of module asymmetry of transmission coefficient on power using simulation.	22
Baranov A.V., Kozikov A.L., Priver E.L. – Microwave combined filters with band-pass and rejecting properties	32
Semenin S.N., Skobelev D.N., Bushkin S.S., Nemirich D.M. – X-band waveguide-to-microstrip transition.	40
Solid-state electronics	

Cathodes and materials

<i>Kapustin V.I., Li I.P., Shumanov A.V.</i> – The methodology for determining parameters of emission nonuniformity of cathode materials	54
Alekhina V.I., Korolev D.S., Korolev S.V. – Low-temperature large-size cathode heating units	69

Technology and material science

Mukhtarov Z.E., Isakhanov	v Z.A., Umirzakov B.E. –	The influence of Ba ⁺ ior	1 low-energy
implantation on composi-	ition and emission propert	ies of W and WO ₂	

Medical electronics

Kazarinov K.D. – Terahertz radiation - the XXI-st century instrument (application in medical-	
biological investigations)	86

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲

News in brief

Kyarginsky B.E. – A narrowband tunable noise oscillator	102
<i>Balyko A.K.</i> – The density of probability distribution of radius-vector module with acci- dental coordinates in different dimensionality space	106
Economics	
<i>Chekadanova M.V.</i> – Model of the radio-electronic cluster innovative development in the special economic zone.	112

۲

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

 $(\blacklozenge$

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО. РАСЧЁТ СВЯЗИ С НАГРУЗКОЙ

В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский

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

Изложен простой расчёт нагрузки ламелей циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) внешним трактом. Сопротивление нагрузки определяется в ходе расчёта электромагнитной 3*D*-модели. Приведен пример расчёта.

КС: защита СВЧ приёмных устройств, циклотронный резонанс, характеристическое сопротивление, электромагнитная 3D-модель, компьютерное моделирование

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICE. LOAD COUPLING CALCULATION

V. G. Kalina, U. A. Budzinsky, S. V. Bykovsky

JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino

A simple method of calculating lamels load of cyclotron protective device (CPD) by external path has been shown. The load resistance is determined during the calculation of electromagnetic 3D-model. The example of calculation is given.

Keywords: <u>microwave receiving device protection</u>, <u>cyclotron resonance</u>, <u>characteristic impedance</u>, <u>elec-</u> <u>tromagnetic 3D-model</u>, <u>computer simulation</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Основные параметры циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) – ширина полосы частот и потери сигнала – определяются тремя основными условиями: сопротивлением нагрузки ламелей внешним трактом, сопротивлением циклотронных колебаний пучка электронов и характеристическим сопротивлением объёмного резонатора. Эти же условия входят в пакет данных, которые определяют конструктивные и электрические параметры ЦЗУ: размеры ламелей, ток и напряжение ускорения электронного пучка.

Ниже представлена простая методика расчёта сопротивления нагрузки, приведенной к ламелям резонатора.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

 $(\blacklozenge$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Резонатор ЦЗУ отличается характерной особенностью – стенки резонатора, несущие противоположные заряды, электрически соединены двумя встречными ламелями (рис.1).



Рис.1. Изображение 3*D*-модели ЦЗУ 3-см диапазона (частота резонанса – 9,2115 ГГц, волновое сопротивление коаксиальной линии *Z*₀ = 50,8 Ом)

Смежные торцы ламелей образуют плоский конденсатор, в котором электрическое поле резонатора взаимодействует с циклотронными колебаниями пучка электронов [1, 2].

Объёмный резонатор ЦЗУ, его внешний тракт и электронная нагрузка ламелей с высокой точностью [2, 3] могут рассматриваться как параллельный и последовательный контуры, сочетание которых образует двухзвенный фильтр с внешней нагрузкой *R*₁ (рис. 2).



Рис. 2. Эквивалентная схема ЦЗУ как двухзвенного фильтра:

 R_L – сопротивление внешней цепи, приведенное к ламелям резонатора; L_v и C_v – индуктивность и ёмкость резонатора; R_c , L_c , C_c – элементы цепи имитации циклотронных колебаний, нагружающих резонатор

Форма частотной характеристики ЦЗУ определяется отношением сопротивлений R_c и R_L , как фактора, который характеризует двухзвенный фильтр по Чебышеву.

Равенство сопротивлений R_c и R_L определяет точное согласование резонатора с внешней цепью на частоте резонанса. Полоса частот ЦЗУ при этом является сравнительно узкой.

Увеличение ширины полосы частот ЦЗУ как двухзвенного фильтра требует превышения вносимого сопротивления R_L по отношению к резонансному сопротивлению циклотронных колебаний R_c , что повседневно используется в практике построения ЦЗУ: $R_L = \sigma_{max} R_c$, где $\sigma_{max} -$ максимальное значение КСВН в пределах полосы пропускания, включая частоту резонанса.

3. РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ РЕЗОНАТОРА R

Ниже приведена простая методика расчёта сопротивления R_L . В ходе компьютерного моделирования ЦЗУ зазор между ламелями резонатора шунтируется резистором R (рис. 3), при котором величина связи резонатора с внешней нагрузкой заведомо превышает критическое значение, т. е. $R > R_L$. Величина R в 1,5...2 раза превышает наибольшее значение сопротивлений, которые характерны для резонансного сопротивления циклотронных колебаний $R_c = 400...1100$ Ом.



Рис. 3. Эквивалентная схема резонатора ЦЗУ:

 R_{L} – сопротивление внешней цепи, пересчитанное на вход резонатора; L_{v} и C_{v} – индуктивность и ёмкость резонатора; R – сопротивление нагрузки резонатора

При 3*D*-расчёте электромагнитной модели ЦЗУ сопротивление *R* представляет собой сосредоточенный резистор, который включён между торцами ламелей, предпочтительно в средней точке торцов.

На частоте резонанса эквивалентную схему рис. З можно рассматривать как сочленение двух нагрузок, шунтирующих ламели: сопротивления R и приведенного к ламелям сопротивления внешнего тракта $R_L = k_{\rm TP} Z_0$, где $k_{\rm TP} > 1$ – коэффициент трансформации сопротивления внешней нагрузки к ламелям резонатора; Z_0 – сопротивление тракта. КСВН этой схемы во внешней цепи при $R > R_I$ определяется отношением нагрузок ламелей:

$$\sigma_R = R / k_{\rm TD} Z_0. \tag{1}$$

Приведенное к ламелям сопротивление внешнего тракта $R_L = k_{TP} Z_0$ и коэффициент трансформации, как параметр цепи связи нагрузки с резонатором, могут быть записаны в виде:

$$R_L = R / \sigma_R, \tag{2}$$

$$k_{\rm rp} = R / \sigma_R Z_0. \tag{3}$$

Таким образом, в ходе компьютерного 3*D*-расчёта модели ЦЗУ определяются частотная характеристика КСВН входной цепи резонатора 6(f) и КСВН при резонансе 6_R (минимальное значение КСВН в пределах характеристики). Сопротивление нагрузки R_L и коэффициент трансформации k_m определяются выражениями (2) и (3).

Определим также условие критической связи – сопротивление шунтирующего ламели сосредоточенного резистора $R_{\rm m}$, при котором на частоте резонанса входная цепь согласована с резонатором. Режим критической связи применяется при расчётах характеристического сопротивления резонатора ЦЗУ.

Условием согласования внешней цепи и резонатора на частоте резонанса является равенство сопротивлений, шунтирующих ламели: сопротивления резистора $R_{\rm m}$ и приведенного к ламелям сопротивления внешней цепи $R_{\rm r}$:

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой

۲

$$R_{\rm m} = R_L, \tag{4}$$

где R_L определено выражением (2).

4. ПРИМЕР РАСЧЁТА СОПРОТИВЛЕНИЯ R_ш

Частотной характеристике $\sigma(f)$ внешней цепи рассматриваемой модели ЦЗУ при нагрузке резонатора сосредоточенным резистором *R* соответствует на частоте резонанса КСВН σ_R . Например, при *R* = 2000 Ом σ_R = 1,6563 (рис. 4).



Рис. 4. Частотная характеристика КСВН внешней цепи резонатора

Сопротивление внешней нагрузки R_L, шунтирующее ламели, определяется соотношением:

$$R_L = R / \sigma_R = 1207,5 \text{ Om.}$$
 (5)

Условием полного согласования входной цепи с резонатором ЦЗУ является равенство $R_{\rm m}$ и R_L . Частотная характеристика КСВН входной цепи резонатора, ламели которого шунтированы сопротивлением $R_{\rm m} = R_L = 1207,3$ Ом, показана на рис. 5.



Рис. 5. Частотная характеристика КСВН внешней цепи модели ЦЗУ (рис. 1) при сопротивлении сосредоточенного резистора *R*_m = 1207,5 Ом

4. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Рассматриваемая модель ЦЗУ, как следует из расчёта, характеризуется повышенным значением коэффициента трансформации сопротивления нагрузки:

$$k_{\rm rp} = R / Z_0 \sigma_R = 23,77. \tag{6}$$

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

11



Высокое сопротивление нагрузки, приведенной к ламелям, и соответственно высокое сопротивление циклотронных колебаний *R*_c определяют пониженное значение ширины полосы частот рассматриваемой модели ЦЗУ.

Зависимость ширины полосы от характеристического сопротивления резонатора при наибольшем значении КСВН в пределах полосы пропускания $\sigma_{max} = 1,2396$ и $R_c = R_{\mu}/\sigma_{max} = 1207,5/1,2396 = 974,1$ Ом, согласно зависимости $\Delta F = f(\rho_v)$ (формула (7) из работы [4]), для рассматриваемой модели приведена на рис. 6.



Рис. 6. Ширина полосы частот модели резонатора при $\sigma_{max} = 1,2396, R_c = 974,1$ Ом

Для рассматриваемой модели ширина полосы частот по уровню КСВН $\sigma = 1,2396$ (коэффициент $\delta = 0,08888$) даже при высоком уровне сопротивления резонатора ($\rho_{u} = 70$) относительно мала:

$$\Delta F = 2\pi (f_0/R_c) \delta \rho_v = 2\pi (9,2115 \cdot 10^9/974,1) \ 0,08888 \cdot 70 = 369,66 \ \text{MGm}.$$
(7)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопротивление нагрузки резонатора ЦЗУ быстро и точно вычисляется в ходе компьютерных расчётов электромагнитной 3*D*-модели ЦЗУ. Расчёт сопротивления нагрузки при этом опирается на готовую базу данных 3*D*-модели ЦЗУ, включая цепь связи с источником сигнала, что определяет простоту и краткость операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Будзинский, Ю. А.** Электростатические усилители / Ю. А. Будзинский, С. П. Кантюк // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 1 (455). – С. 21 – 27.

2. Будзинский, Ю. А. Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 1 (504). – С. 70 – 87.

3. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства с подавлением зеркального канала / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 4 (523). – С. 48 – 62.

4. Калина, В. Г. Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В. Г. Калина,

Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 19 – 38.

Статья поступила 24 февраля 2016 г.

۲

УДК 621.529.1

проблемы поиска сложных течей отпаянных эвп

С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова

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

Рассмотрены процессы течеискания отпаянных ЭВП, основанные на измерении тока встроенного в ЭВП магнитного электроразрядного насоса. Показано, что динамическая чувствительность течеискателя может отличаться от статической чувствительности на 1000 %. Выявлено, что динамическая чувствительность зависит от вакуумной предыстории, особенностей каналов течей, способа подачи пробного газа. На практике обнаружено, что малые течи при повторной откачке ЭВП могут самоустраняться. Рассмотрены причины и места появления сложных течей и влияние их особенностей на динамическую чувствительность течеискания.

КС: <u>отпаянный ЭВП, магнитный электроразрядный насос, сложная течь с балластным объемом,</u> газовыделение ЭВП

THE PROBLEMS OF DETECTING COMPLICATED LEAKAGES OF SEALED-OFF ELECTROVACUUM DEVICES

S. A. Vashin, G. F. Korepin, N. N. Klimova

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

The processes of leakage detecting of sealed-off electrovacuum devices (EVD), based on current measurement of magnetic discharge pump built in EVD have been considered. It is shown that the dynamic leakage detector sensitivity can differ from the static sensitivity by 1000 %. It is found out that the dynamic sensitivity depends on vacuum prehistory, peculiarities of leakage channels, the way of probe gas supplying. In practice it was found out that small leakages can keep oneself aloof at the secondary EVD sealing-off. The reasons and places of complicated leakages appearance and the influence of their peculiarities on the dynamic leakage detecting sensitivity were considered.

Keywords: <u>sealed-off EVD, magnetic discharge pump, complicated leakage with ballast volume, EVD</u> <u>gas release</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск небольших течей отпаянных ЭВП всегда является трудоемким процессом. Обычно при поиске течей используют в качестве контроля давления встроенный в прибор магнитный электроразрядный насос (НЭМ), реже применяют масс-спектрометрический преобразователь [1 – 3]. Основным параметром эффективности поиска течей является чувствительность течеискателя, которая зависит от выбора метода поиска течи, выбора пробного газа и других факторов [4, 5].

Как показали исследования, наилучшая чувствительность была достигнута при использовании в качестве пробного газа гелия, так как гелий легко и быстро проникает через течь и по своим свойствам наиболее сильно отличается от воздуха [1, 5]. Также важным моментом первоначальной оценки является расчет размера течи, что в дальнейшем дает возможность правильного выбора метода её поиска [4].

2(529).indd 13

Как известно, течи имеют различную геометрическую структуру: короткие, линейно распределенные, диффузно распределенные, длинные, условно длинные с балластным объемом и множественные [4]. Особое внимание заслуживают сложные течи – условно длинные с балластным объемом, так как подобные течи могут быть относительно большой величины, но ни один из обычно используемых методов поиска не дает ожидаемого результата. Поэтому исследование и поиск таких сложных течей является весьма актуальной задачей.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕЧЕЙ С БАЛЛАСТНЫМ ОБЪЕМОМ ОТПАЯННЫХ ЭВП

Исследование сложных течей (с балластным объемом) проводилось на натекающих ЭВП среднего и высокого уровня мощности с помощью течеискателя отпаянных ЭВП. В этом течеискателе используется высокостабильный источник постоянного напряжения HIGH VOLTAGE SUPPLY (DC5KV) фирмы FOTON, результаты течеискания и установка режима питания HЭМ отражаются на ПК. Особенностью этого оборудования является то, что имеется возможность измерения токов НЭМ в широком диапазоне: от 0,1 нА до сотен микроампер (меньшие значения тока измерить затруднительно из-за имеющегося уровня шумов источника напряжения).

Первой проблемой при поиске течи отпаянного ЭВП является определение её наличия. Обычно для этих целей используют метод накопления газа в объеме ЭВП, где в качестве преобразователя давления служит встроенный в прибор НЭМ. По изменению броска тока НЭМ определяют изменение давления газа [7], затем на основании проведенных измерений рассчитывают течь.

Величина натекания определяется по формуле [1]

$$Q = V \cdot (\Delta P / \Delta t), \tag{1}$$

где *V* – объем ЭВП, м³; ΔP – изменение давления, Па; Δt – время натекания.

Расчет давления (Па) осуществляют по величине тока НЭМ, пользуясь известной формулой [6]:

$$P = I \cdot h \cdot 10^{-6}, \tag{2}$$

где *I* – ток НЭМ, мкА; *h* – коэффициент чувствительности НЭМ, Па/мкА.

Проблемой такого расчета по результатам измерения изменения давления газа отпаянного ЭВП является то, что эффективное натекание в приборах изменяется, особенно при малых временах выдержки, что может привести к большой ошибке вычислений (рис.1). Под эффективным понимается измеренное натекание методом накопления воздуха в разные моменты выдержки ЭВП от предыдущего до последующего измерения давления в процессе натекания. Из рис. 1 следует, что при выдержке больше 17 ч эффективный уровень натекания в ЭВП уже незначительно изменяется. Как показала практика, погрешность расчетов натекания по результатам измерения изменений давления при малых и более длительных временах выдержки может достигать 1000 %. Это обусловлено индивидуальными особенностями сорбционных и десорбционных процессов газа объема ЭВП и газа, поступающего при натекании, а также вакуумной предысторией и особенностями канала течи. Таким образом, динамическая чувствительность течеискателя резко отличается от статической чувствительности.

Известно, что в отпаянных ЭВП по мере накопления натекающего газа давление будет линейно повышаться во времени [7], что может быть зафиксировано по линейному нарастанию

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Проблемы поиска сложных течей отпаянных ЭВП

۲

бросков тока НЭМ при его включениях. Однако при таких измерениях герметичные приборы, имеющие интенсивное газовыделение, могут быть определены как натекающие, так как в начале исследования при малых временах выдержки давление газа и соответственно броски тока НЭМ нарастают линейно во времени (рис. 2). Затем скорость нарастания тока НЭМ снижается и величины бросков тока НЭМ после достижения максимума значительно уменьшаются. По кривым 2, 3 рис. 2 можно сделать вывод, что приборы имеют газовыделения и причины этих газовыделений одинаковые, так как максимумы проявились в одно и то же время выдержки. Наиболее вероятной причиной хода кривых 2 и 3 является выход газа из пор материала вакуумного объема ЭВП или из дефектов паяных и сварных соединений. По мере истощения запаса газа в дефектах ЭВП начинает уменьшаться и величина бросков тока НЭМ. Другой возможной причиной такого поведения кривых 2 и 3 может быть временное перекрытие течи парами воды [5].







Рис. 2. Газовыделение в отпаянных ЭВП от времени выдержки по току НЭМ:

I – газовыделение от проникшего внутрь прибора герметика, которым закрыта большая течь (5·10⁻⁷ м³·Па/с); *2*, *3* – в приборах, имеющих полости, из которых интенсивно выделяются газы

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲

Канал натекающего прибора может быть перекрыт жидкотекучим герметиком. Это возможно при условии отсутствия проникновения герметика в вакуумный объем ЭВП [8]. Кривая *1* рис. 2 показывает газовыделение герметика, проникшего внутрь вакуумного объема ЭВП (канал течи закрыт герметиком). Газовыделение обусловлено процессом дегазации герметика, который проник из канала течи в вакуумный объем. В процессе выдержки ЭВП происходит частичное удаление жидкой фазы герметика и образование корки на ее поверхности, но полного прекращения испарения жидкой фазы не происходит и в пределах 100 ч.

Прежде чем ставить задачу по поиску течей, необходимо решить вопрос о минимальной величине течи, которую можно найти на течеискателе отпаянных ЭВП. Предварительный расчет величины течи поможет выбрать метод поиска течи.

Показано, что течи от 10⁻¹² до 10⁻¹⁴ м³·Па/с можно найти только методами накопления газа [4]. Расчет показывает, что для ЭВП объемом 1 литр статическая чувствительность течеискателя фирмы FOTON составит 4·10⁻¹² м³·Па/с. Чувствительность течеискателя отпаянных ЭВП фирмы FOTON, измеренная практически, составляет 5·10⁻¹³ м³·Па/с (методы обдува и опрессовки без накопления пробного газа), что на порядок выше чувствительности отечественного течеискателя отпаянных ЭВП и в 10 раз лучше рассчитанной чувствительности. Это объясняется тем, что быстрота откачки НЭМ при низких давлениях меньше, чем измеренная при давлении 10⁻⁴ Па.

Для поиска сложных течей с натеканием 10⁻¹¹ м³•Па/с и меньше в некоторых случаях чувствительность мала. Это полученное практически значение чувствительности можно объяснить тем, что в сложных течах пробный газ либо недостаточно быстро заполняет балластный объем канала течи, либо, попадая в ЭВП, откачивается НЭМ настолько быстро, что изменение давления не может быть зафиксировано.

В ЭВП со сложными видами течей (с балластным объемом канала течи) процесс натекания имеет в начальный момент нелинейный характер (рис. 3, кривые 1 и 2). Расширяющееся пространство в области канала течи существенно превосходит в этом локальном месте дополнительный объем участка квазирегулярного канала. При использовании почти любого из методов течеискания с применением встроенного НЭМ не всегда возможно нахождение места расположения течи, хотя статическая чувствительность, казалось бы, должна позволять это сделать.



Рис.3. Изменение броска тока насоса от времени выдержки между его включениями: 1, 2 – сложная течь, имеющая балластный объем; 3 – течь без балластного объема

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016



Во время откачки натекающего ЭВП со сложной течью иногда возникает нестабильность работы НЭМ (рис. 4). Это связано с тем, что воздух поступает из нескольких балластных объемов канала течи в ЭВП не сразу, а рывками, которые соответствуют пикам тока НЭМ. Другой причиной является действие так называемой аргонной нестабильности [5]. Так как аргонная нестабильность обладает строгой периодичностью, то в исследуемом случае имеет место поступление газа рывками из нескольких объемов канала течи, расположенных цепочкой. Максимумы тока не всегда появляются за один интервал времени, что подтверждает непостоянную скорость поступления газа в ЭВП, следовательно, дополнительно может идти речь о введении понятия эффективной течи прибора, величина которой зависит от времени натекания.





Анализируя быстроту изменения давления отпаянного ЭВП (рис. 5), видим, что кривые *l* и 2, соответствующие каналам сложных течей с балластным объемом, имеют явно выраженные максимумы и минимумы, в линейных течах этого не наблюдается (рис. 5, кривая 3). С увеличением выдержки приборов скорость изменения давления в значительной степени резко не меняется.





ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016



 $(\blacklozenge$

При исследовании натекающего прибора на течеискателе фирмы FOTON методами опрессовки и обдува гелием (рис. 6) обнаружено, что после прекращения обдува ток НЭМ продолжал повышаться незначительное время, что подтверждает наличие в канале течи балластного объема, из которого продолжает поступать газ в ЭВП, повышая давление газа. Характер изменения тока НЭМ свидетельствует о сложной структуре геометрии канала течи.



Рис. 6. Поиск течи:
 – начало подачи пробного газа; ▲ – окончание подачи гелия;
 I – метод опрессовки; *2* – метод обдува

Чувствительность течеискателя для сложных видов течей с балластным объемом при использовании методов обдува или опрессовки (без накопления газа) может отличаться незначительно. Это связанно с тем, что пробный газ вначале заполняет этот балластный объем, а затем проникает внутрь ЭВП.

Сложные течи могут образовываться как в дефектном материале (рис. 6), так и в местах паяных и сварных соединений (рис. 7 и 8). Это обычно связано с различными КЛТР паяемых материалов, а также с применяемыми припоями. На образование балластных объемов канала течи могут влиять условия нагрева и остывания паяных и сварных швов.



Рис. 7. Поиск сложных течей в паяных соединениях:

• – начало подачи пробного газа; ▲ – окончание подачи; *I* – течь в области пайки керамики с металлом после двукратной повторной пайки; *2* – течь в пушке прибора после однократной пайки керамики с металлом

۲





Рис. 8. Поиск сложной течи в сварном соединении:
– начало подачи пробного газа; ▲ – окончание подачи

Появление трещин в сварных швах связано как с некачественными материалами, применяемыми для изготовления деталей ЭВП, так и с применением аргонодуговой сварки (рис. 8). Так как остывание узлов в инертном газе аргоне проходит быстрее, чем при электронно-лучевой сварке в вакууме, то вероятность образования трещин при использовании аргонодуговой сварки больше.

Помимо трудности поиска сложных течей отпаянных ЭВП, герметизация таких течей удается не всегда. Трудности возникают с попаданием и затеканием герметика в балластный объем [8, 9]. Эти трудности связаны с условиями смачиваемости материала герметизируемого канала. Установлено, что для повышения эффективности герметизации следует после нанесения герметика в область течи использовать продув сжатым воздухом, что создает повышенное внешнее давление газа, или прогрев ЭВП при температуре 80...100 °C, что повышает текучесть герметика.

Если не удается найти течь и она по величине натекания меньше 5·10⁻¹²...5·10⁻¹³ м³·Па/с, следует выполнить повторную откачку ЭВП. В случае течи, обусловленной механическими напряжениями, после повторной откачки величина натекания должна увеличиться.

Течь может быть закрыта и без применения герметика. Например, в случае сложной течи натекание прибора после повторной откачки значительно уменьшилось (рис. 9). В дальнейшем после включения подогревателя катода в номинальном режиме и выдержки ЭВП несколько часов выяснилось, что натекание в приборе не наблюдалось. Данный факт свидетельствует о том, что при наличии микротрещин и других дефектов в кристаллических решетках меди и железа после повторной откачки (температура откачки – 500 °C) структура материала на уровне кристаллических решеток изменяется. Температура обезгаживания ЭВП в процессе откачки соответствует температуре рекристаллизации этих материалов. Зарождение новых зерен при рекристаллизации происходит на участках с наибольшей плотностью дислокаций, обычно на границах деформированных зерен. Чем выше температура нагрева, тем больше кристаллизационные зерна [10]. В этом случае течь может уменьшиться в размерах или закрыться (рис. 9), если ее поперечные размеры соответствуют размерам роста зерен в области канала течи.

Поиск сложных течей отпаянных ЭВП с помощью течеискателя фирмы FOTON позволил установить, что динамическая чувствительность его зависит не только от размеров течи, но и от



её сложности, которая определяется наличием одной или нескольких объемных полостей канала течи. Установление факта наличия натекания ЭВП и места течи занимает продолжительное время и может составлять до недели и больше. Применение течеискателя отпаянных ЭВП повышенной чувствительности дало возможность в некоторых случаях находить течи методами обдува и опрессовки, которые находились циклическим методом на течеискателе старого образца. Это позволило сократить значительно время поиска небольших сложных течей отпаянных ЭВП.





Снижение газовыделений в вакуумный объем отпаянного ЭВП малых габаритных размеров в случае проведения электронно-лучевой сварки позволяет исключить появление газовых пузырей в зоне шва, так как образовавшиеся пузыри будут удалены за счет высокого вакуума в рабочем пространстве зоны сварки.

3. ВЫВОДЫ

1. При поиске течей следует разделять течи от газовыделений отпаянных ЭВП, используя для этих целей НЭМ.

2. Погрешность расчетов натекания при малых временах выдержки может достигать 1000 % относительно больших времен.

3. Современный течеискатель отпаянных ЭВП позволяет найти течи на уровне 5·10⁻¹³ м³·Па/с простым обдувом течи потоком гелия.

4. Исследование сложных течей с балластным объемом показало, что чувствительность течеискателя должна позволять найти течь, но не всегда это удается сделать, так как постоянная времени при поиске течи с участием балластного объема канала течи на несколько порядков снижает динамическую чувствительность.

5. Динамическая чувствительность методов обдува и опрессовки при поиске сложных течей с балластным объемом может отличаться незначительно.

6. Сложные течи могут образовываться в местах аргонодуговой сварки, пайки, пайки и перепайки паяного соединения и дефектов материалов ЭВП.

7. Повторный процесс откачки ЭВП позволяет иногда уменьшить значительно размеры малой течи или закрыть ее.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

 (\bullet)

 $(\blacklozenge$

8. Применение электронно-лучевой сварки для ЭВП небольших размеров позволяет уменьшить вероятность появления течей по сравнению с аргонодуговой сваркой.

9. Применение течеискателя повышенной чувствительности фирмы FOTON позволило значительно сократить время поиска небольших сложных течей в отпаянных ЭВП.

10. Дальнейшее, более глубокое изучение течеискания отпаянных ЭВП с примененем встроенного НЭМ возможно лишь при условии измерения токов, меньших 0,1 нА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланис, В. А. Техника вакуумных испытаний / В. А. Ланис, Л. Е. Левина. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1963.

2. Саксаганский, Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы / Г. Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

3. Васильев, Г. Л. Магниторазрядные насосы / Г. Л. Васильев. – М.: Энергия, 1970.

4. **Корепин, Г. Ф.** Классификация течей ЭВП / Г. Ф. Корепин, А. А. Стефаненко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 1 (481). – С. 45 – 51.

5. Левина, Л. Е. Методы и аппаратура контроля герметичности вакуумного оборудования изделий в приборостроении / Л. Е. Левина, В. В. Пименов. – М.: Машиностроение, 1985.

6. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – М.: Высш. школа, 1982.

7. **Корепин, Г. Ф.** Простой способ отбраковки натекающих и газных ЭВП / Г. Ф. Корепин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1999. – Вып. 2. – С. 42 – 43.

8. **Корепин, Г. Ф.** Условия герметизации течей ЭВП СВЧ / Г. Ф. Корепин // Вакуумная наука и техника: материалы научно-технической конференции. – М.: МИЭМ, 2004. – С. 100 – 104.

9. Вашин, С. А. Проблемы течеискания отпаянных ЭВП / С. А. Вашин, Е. П. Жукова, Н. Н. Климова, Г. Ф. Корепин, Н. В. Малькова, В. А. Смирнов, Л. А. Троицкая // 22-я научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника». – 2015. – С. 64 – 67.

10. **Арзамасов, Б. Н.** Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин, Н. М. Рыжов, В. И. Силаева, Н. В. Ульянова. – М.: Машиностроение, 1986.

Статья поступила 2 февраля 2016 г.

 (\bullet)

В. И. Васильев

УДК 621.372.413

РЕЗОНАТОР МАГНЕТРОННОГО ТИПА: ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОСТИ МОДУЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ПО МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. И. Васильев

ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова», г. Нижний Новгород

С помощью компьютерного моделирования исследована структура электромагнитного поля резонатора магнетронного типа в диапазоне от 0 до 1,6 ГГц. Определены виды колебаний. Показано, что вблизи рабочей моды колебаний квази- H_{011} , применяемой в пассивных квантовых водородных стандартах частоты, существуют также моды квази- H_{111} и квази- E_{112} . Показано, что правая либо левосторонняя асимметрия модуля коэффициента передачи по мощности для моды колебаний квази- H_{011} обусловлена присутствием близких мод. Чем ближе соседние моды по частоте, тем больше их влияние.

КС: резонатор магнетронного типа, коэффициент передачи по мощности, моды цилиндрического резонатора, коэффициент асимметрии, пассивный водородный стандарт частоты

MAGNETRON TYPE RESONATOR: INVESTIGATION OF MODULE ASYMMETRY OF TRANSMISSION COEFFICIENT ON POWER USING SIMULATION

V. I. Vasilyev

Institute of Electronic Measurements (IEM) "KVARZ", Nizhny Novgorod

Using numerical simulation the electromagnetic field structure of magnetron type resonator was investigated within 0 to 1.6 GHz range. The oscillation modes were defined. It was shown that there are also quasi- H_{111} and quasi- E_{112} modes near the operating oscillation mode quasi- H_{011} used in passive quantum hydrogen frequency standards. It is shown that either right-hand or left-hand module asymmetry of transmission coefficient on power for quasi- H_{011} oscillation mode is conditioned by availability of nearby modes. The nearer the adjacent modes in frequency the more their influence is.

Keywords: <u>magnetron type resonator, transmission coefficient on power, cylindrical resonator modes, asym-</u> <u>metry ratio, passive hydrogen frequency standard</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонаторы магнетронного типа нашли широкое применение в квантовых пассивных водородных стандартах частоты и времени (ПВСЧ) как наземного, так и космического базирования. Их отличают компактность, жесткость конструкции и обеспечение достаточно однородного поля в центральной области. Основными характеристиками объемного резонатора для выбранной моды колебаний являются собственная частота и добротность. Исследования данных характеристик для резонаторов магнетронного типа широко представлены в научной литературе [1, 2].

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

24.06.2016 16:42:52

Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи

•

В современных ПВСЧ широко используются системы автоматической подстройки частоты резонатора [3]. Работу автоматической подстройки частоты можно характеризовать параметром остаточной отстройки частоты резонатора от частоты используемой спектральной линии атомов водорода $\Delta f_{A\Pi\Psi} = f_p - f_n$, где f_p , f_n , – собственная частота резонатора и частота спектральной линии водорода соответственно. В ПВСЧ резонатор и излучающие атомы водорода образуют пару связанных осцилляторов. При этом смещение частоты выходного сигнала стандарта определяется механизмом затягивания спектральной линии водорода резонатором и пропорционально отношению их добротностей: $\Delta f_{cr} = (Q_p / Q_n) \Delta f_{A\Pi\Psi}$, где Q_p – добротность резонатора; Q_n – добротность спектральной линии водорода.

В работе [3] показано, что для достижения высокой долговременной стабильности частоты выходного сигнала стандарта необходимо добиваться минимизации остаточной отстройки частоты системы автоматической подстройки частоты от собственной частоты резонатора. Остаточная отстройка зависит от степени асимметричности резонансной характеристики резонатора.

Точного электродинамического решения задачи о форме резонансной кривой при возбуждении объемного резонатора, соединенного на проход, не существует. Для инженерных расчетов используют метод эквивалентных схем. С использованием данного подхода было показано [4], что если учесть связь резонатора с внешними линиями передачи (как связанными контурами), то асимметрия резонансной характеристики будет зависеть от величины коэффициентов связи, а также от длины и характеристик линий. Но данный подход имеет очевидные ограничения.

Экспериментальные исследования резонаторов, применяемых в ПВСЧ, показали [5, 6], что асимметрия коэффициента передачи зависит от многих факторов: глубины погружения плунжера подстройки частоты, степени соосности диэлектрической накопительной колбы, расположения петель связи. Стало неожиданностью, что от одной модели ПВСЧ к другой существенно изменяется характер зависимостей. При этом в разных моделях ПВСЧ применяются резонаторы близкой конструкции, но изменяются их основные размеры и модифицируются элементы подстройки.

Анализ литературных источников показал, что очевидную асимметрию характеристик диэлектрических резонаторов связывают с нерезонансным просачиванием сигнала с входа на выход резонатора [7] или с видом используемого диэлектрика [8]. Указывается, что причина несимметричной формы резонансных кривых является результатом нарушения условий симметричности, взаимности и недиссипативности применяемых элементов связи [9].

С другой стороны, известно [10], что любое электромагнитное колебание в резонаторе без потерь может быть представлено в виде разложения по собственным модам. При учете потерь моды теряют свойство ортогональности и становятся связанными. Межмодовая связь приводит к тому, что возбуждение вынужденных колебаний на *n*-й моде сопровождается возбуждением колебаний и на других модах. В таком случае асимметрия резонансной характеристики конкретной моды может быть связана с присутствием других близких мод. В статье исследуется данный аспект проблемы.

2. КРИТЕРИЙ АСИММЕТРИЧНОСТИ РЕЗОНАНСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В настоящее время появился класс измерительных приборов (сканирующие анализаторы спектра, векторные анализаторы цепей, панорамные измерители КСВН и др.), позволяющий

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

получать оцифрованные характеристики резонаторов с несколькими тысячами точек на дискретной частотной сетке. Это дает возможность увеличить точность измерений. Современные пакеты моделирования также предоставляют данные по коэффициентам матрицы рассеяния резонатора на дискретной частотной сетке.

Для количественной оценки степени асимметричности резонансной характеристики (экспериментальной или смоделированной) нет устоявшейся терминологии, используют несколько разных критериев. Например, в работе [11] для оценки предлагается разлагать реальную характеристику на лоренцевскую форму и дополнительные асимметричные члены. В работе [6] рассматривают резонансную характеристику как лоренцевскую кривую, составленную из склонов с разной добротностью, сшитых на собственной частоте резонатора. В работе [9] характеристику аппроксимируют дробно-рациональным выражением. Подходы интересные, но регрессия данных к кривой лоренцевского (или другого) вида является сложной нелинейной задачей, которая требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Вслед за авторами работы [8] под коэффициентом асимметрии будем подразумевать отношение полуширин по уровню 0,5 высокочастотной $\Delta f_{\rm B}$ и низкочастотной $\Delta f_{\rm H}$ частей модуля коэффициента передачи (см. рис.1):

$$K_{\rm ac} = \Delta f_{\rm g} / \Delta f_{\rm H}.$$
 (1)

При $K_{\rm ac} > 1$ наблюдается правосторонняя асимметрия, при $K_{\rm ac} < 1$ – левосторонняя. В работе [5] показано, что при таком определении коэффициента асимметрии оптимальной областью является $|K_{\rm ac} - 1| \le 0.03$.



Рис. 1. Высокочастотная и низкочастотная полуширины по уровню 0,5 модуля коэффициента передачи мощности через резонатор по результатам моделирования

Для нахождения полуширин модельные данные предварительно сглаживались с помощью скользящего среднего. Затем с помощью стандартных вычислительных методов определялась резонансная частота, а также полуширина высокочастотной $\Delta f_{\rm B}$ и низкочастотной $\Delta f_{\rm H}$ частей характеристики. По формуле (1) определялся коэффициент асимметрии.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

2(529).indd 24

۲

3. ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО СВЧ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование резонаторов с помощью трехмерного электродинамического моделирования предоставляет возможность широкого варьирования параметров, изучения структуры получающихся полей, а также многостороннего взгляда на проблему. Еще одним преимуществом моделирования является воспроизводимость результатов.

В качестве исследуемого объекта использовался цилиндрический резонатор магнетронного типа (рис. 2), у которого аксиально-симметричные металлические пластины располагаются на цилин-

дрической координатной поверхности и образуют зазоры, ориентированные поперёк силовых линий электрического поля. Перегородки, крепящие магнетронную структуру к стенкам резонатора, не показаны. Рабочий вид колебаний – квази-Н₀₁₁, резонансная частота - 1420 МГц, добротность резонатора на рабочей моде $Q_{\rm nes} \approx 10^4$. Внутрь магнетронной структуры помещена тонкостенная диэлектрическая колба. Связь с резонатором осуществляется с помощью петель связи, соединённых с коаксиальными линиями передачи. Перестройка собственной частоты резонатора осуществляется с помощью плунжера, расположенного в одной из торцевых крышек. Взаимосвязь собственной частоты и добротности резонатора от конфигурации и расположения элементов конструкции исследовалась в работах [12, 13].



Рис. 2. Резонатор магнетронного типа

Расчет выполнялся с помощью пакета CST Microwave Studio [14]. Основными недостатками программы, реализующей метод конечных элементов, являются большое время счёта и высокие аппаратные требования, поэтому вначале оценена точность вычислений резонансной частоты и добротности CBЧ-резонатора в зависимости от количества узлов сетки. Была определена оптимальная сетка с количеством узлов 107, обеспечивающая приемлемую точность и допустимое время вычислений.

Как известно, резонаторы характеризуются набором резонансных частот – собственных мод, поэтому вначале был определен набор мод для базовых размеров резонатора. Под базовыми приняты размеры резонатора ПВСЧ Ч1-76А [12]. Было обнаружено, что в диапазоне 1380...1520 МГц кроме рабочей моды колебаний квази- H_{011} присутствуют еще три моды. На рис. 3 представлены *S*-параметры резонатора в диапазоне 1350...1600 МГц.

Визуализация структуры полей мод рассматриваемого диапазона позволила идентифицировать их следующим образом. Две нижние, малодобротные моды близки к квазивиду H_{111} колебаний цилиндрического резонатора. Распределения их полей подобны с точностью до поворота на 90°. Наличие петель связи снимает их поляризационное вырождение. Расположение максимума поля задается расположением петель.

Средняя по частоте мода является рабочей с видом колебаний квази- H_{011} . Высшая по частоте мода рассматриваемого диапазона идентифицирована как вид колебаний квази- E_{112} . На рис. 4 представлено распределение магнитной компоненты СВЧ-поля видов колебаний квази- H_{011} и квази- E_{112} .

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

25



Рис. 3. *S*-параметры резонатора магнетронного типа в диапазоне 1350...1600 МГц по результатам моделирования в CST Microwave Studio



Рис. 4. Распределение магнитной компоненты СВЧ-поля: a – вид колебаний квази- H_{011} ; b – вид колебаний квази- E_{112}

Любая трансформация резонатора (изменение базовых размеров, размеров и формы элементов подстройки, петель связи) должна изменять частоту мод. Вначале было проведено исследование, как сдвигается частота при нарушении симметрии – при изменении расстояния Z от магнетронной структуры только до одной торцевой крышки, которая играет роль большого плунжера подстройки частоты. Моделирование производилось в диапазоне от 0 до 1,6 ГГц. На рис. 5 представлены схема изменения расстояния и результаты. Там же отмечено базовое расстояние Z для резонатора ПВСЧ Ч1-76А. Как и ожидалось, исследование показало, что при изменении расстояния Z происходят сдвиги частот мод. Сдвиги частот происходят с разной скоростью и даже разнонаправлено. Частоты мод при этом сближаются, но не наблюдается пересечения кривых.

Далее было рассмотрено, как смещаются частоты мод при изменении расстояния Z от магнетронной структуры до торцевых крышек (рис. 6). При уменьшении расстояния между магнетронной структурой и крышками разнонаправленные сдвиги частот мод становятся все больше, наблюдается эффект сближения мод. Существует критическая область $Z \approx 11$ мм, при которой частоты мод совпадают.

Было изучено, как изменяется взаимное положение мод при изменении радиуса резонатора *R*. Чтобы сохранить частоту рабочей моды, варьировалась величина зазоров магнетронной



структуры. Моделирование показывает наличие критической области $R \approx 124$ мм, при которой моды квази- H_{c} и квази- H_{c} совпалают по настоте (рис. 7)

Рис. 5. Сдвиг частот мод резонатора в зависимости от расстояния между магнетронной структурой и одной торцевой крышкой: *а* – схема изменения расстояния; *б* – результаты моделирования



Рис. 6. Сдвиг частот мод магнетронного резонатора в зависимости от расстояния между магнетронной структурой и обеими торцевыми крышками



Рис. 7. Сдвиг частот мод магнетронного резонатора в зависимости от радиуса резонатора

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ

Для определения коэффициента асимметрии вычисления *S*-параметров резонатора в области рабочей моды производились в полосе частот 10 МГц. Затем с помощью разработанной программы осуществлялась математическая обработка полученных данных.

Чтобы выявить закономерность изменения асимметрии, моделирование производилось в последовательности, описанной ранее. Вначале выяснялось, как изменяется коэффициент асимметрии при приближении плунжера подстройки частоты, расположенного в торцевой крышке, к магнетронной структуре. Данный случай похож на ситуацию, показанную на рис. 5, где одна торцевая крышка играла роль большого плунжера подстройки частоты. Результаты

۲

۲

вычислений $K_{\rm ac}$ для двух диаметров резонатора представлены на рис. 8. При диаметре резонатора 110 мм наблюдается левосторонняя асимметрия, при диаметре резонатора 130 мм – правосторонняя. Ситуацию проясняют рис. 6 и 7. Особое влияние на $K_{\rm ac}$ в обоих случаях оказывает близрасположенная мода квази- H_{111} . Для диаметра резонатора 110 мм она находится выше, а для диаметра резонатора 130 мм – ниже по частоте, поэтому ее влияние в этих случаях противоположно. На рис. 8 также отмечена область, в которой выполняется условие | $K_{\rm ac} - 1$ | $\leq 0,03$. Для $R \approx 130$ мм условие нарушается при Z < 11 мм, для $R \approx 110$ мм – при Z < 13 мм.



Рис. 8. Зависимость коэффициента асимметрии от расстояния между магнетронной структурой и до плунжера подстройки частоты

Далее изучалось, как меняется $K_{\rm ac}$ при изменении расстояния Z от магнетронной структуры до торцевых крышек для диаметра резонатора 130 мм. Результаты вычислений представлены на рис. 9. В соответствии с поведением мод, показанным на рис. 6, при $Z \le 10$ мм в критической области моды сближаются по частоте. Модуль $K_{\rm ac}$ сильно возрастает, график осциллирует, асимметрия из правосторонней переходит в левостороннюю. На рис. 10 приведены S-параметры для случаев Z = 8 и Z = 9,5мм. Рис. 10, *а* показывает ситуацию, когда рабочая мода квази- H_{011} попадает в область между двумя модами квази- H_{111} , у которых снято вырождение. Асимметрия в данном случае левосторонняя. Рис. 10, *б* соответствует случаю сильного приближения магнетронной структуры к торцевым крышкам, когда самыми высокочастотными стали моды квази- H_{111} , а низкочастотной – мода квази- E_{112} . Наблюдается правосторонняя асимметрия. В обоих случаях модуль коэффициента передачи по мощности для моды квази- H_{011} заметным образом искажен. Условие оптимальности | $K_{\rm ac} - 1$ | $\leq 0,03$ нарушается при Z < 18 мм.

Было также рассмотрено, как зависит коэффициент асимметрии от размеров петель связи. Расположение петель подобрано таким образом, чтобы наилучшие условия были для возбуждения рабочей моды квази- H_{011} . На рис. 11 представлен вид получившейся кривой. Как и следовало ожидать, существует зависимость от площади петель связи. Влияние больших петель может быть значительным и даже изменять форму асимметрии коэффициента передачи. Рис. 12 показывает смоделированные сдвиги частоты мод резонатора в зависимости от размера петель. Механизм формирования асимметрии, по-видимому, остается прежним: изменение размеров петель кроме изменения величины модуля коэффициента передачи также сдвигает частоты мод резонатора. При увеличении площади петель рабочая мода удаляется от низкочастотной моды квази- H_{111} и приближается к высокочастотной моде квази- E_{112} .

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи

۲







Рис. 10. *S*-параметры резонатора магнетронного типа в диапазоне 1440...1470 МГц по результатам моделирования: a - Z = 9,5 мм; $\delta - Z = 8$ мм



Рис. 11. Зависимость коэффициента асимметрии от площади петель связи



Рис. 12. Сдвиг частоты мод магнетронного резонатора в зависимости от площади петель связи

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲

 $(\blacklozenge$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время развитие теории СВЧ идет в основном по пути использования методов «вычислительной» электродинамики, поскольку возможности аналитических методов ограничены лишь простыми моделями. Применение вычислительных методов стимулируется доступностью все более мощных компьютеров.

Результаты трехмерного электродинамического моделирования свидетельствуют о том, что межмодовая связь в резонаторе магнетронного типа приводит к интерференции колебаний. Асимметрия резонансной характеристики конкретной моды обусловлена присутствием близких мод, и чем ближе они по частоте, тем их влияние больше. Частоты мод определяются формой и размерами резонатора, а также его элементов связи.

В зависимости от этих факторов асимметрия резонансной характеристики выбранной моды может быть как лево-, так и правосторонней.

Определены оптимальные расстояния Z от магнетронной структуры до плунжера подстройки частоты. Для диаметра резонатора $R \approx 130\,$ мм условие $|K_{ac} - 1| \le 0.03\,$ для моды колебаний квази- H_{011} нарушается при Z < 11 мм, а для $R \approx 110\,$ мм – при Z < 13 мм.

В диапазоне возможных параметров магнетронного резонатора существуют критические области, в которых частоты мод совпадают, асимметрия модуля коэффициента передачи для моды колебаний квази- H_{011} осциллирует и становится трудноконтролируемой. Для базового случая магнетронной структуры при $R \approx 130$ мм это – область для расстояния от магнетронной структуры до торцевых крышек $Z \approx 10$ мм, при Z = 20 мм – область $R \approx 124$ мм.

Исследование позволяет утверждать, что с точки зрения межмодового взаимодействия в резонаторе механизм формирования асимметрии петлями связи остается тем же: изменение площади петель по-разному сдвигает моды резонатора. Способ уменьшения межмодовой связи с помощью выбора места расположения петель специально не исследовался, но в рамках данного подхода ничему не противоречит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988.

2. **Bandi, T.** Experimental and numerical study of the microwave field distribution in a compact magnetrontype microwave cavity / T. Bandi, G. Du, A. Ivanov, A. Horsley // Proc. 26th European Frequency and Time Forum, June 23 – 26, Neuchatel, Switzerland, 2014. – P. 208 – 211.

3. Васильев, В. И. Влияние искажения спектра ФМ-сигнала на работу системы автоматической подстройки частоты резонатора в пассивном водородном стандарте частоты и времени / В. И. Васильев, Н. А. Демидов, С. А. Козлов // Радиоизмерения и электроника. – Н. Новгород: ФГУП «ННИПИ «Кварц». – 2009. – Вып. 15. – С. 56 – 59.

4. Васильев, В. И. Расчет на ПЭВМ искажения резонансной кривой СВЧ-резонатора кабелем связи / В. И. Васильев, А. А. Беляев // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Проблемы радиоизмерительной техники». – Горький, 1989. – С. 32.

5. Васильев, В. И. Об оптимальной точке настройки резонатора в пассивном водородном стандарте частоты / В. И. Васильев // Труды 9-й Научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2005. – С. 210 – 211.

6. Васильев, В. И. Точность настройки резонатора в системе автоматической подстройки частоты пассивного водородного стандарта частоты / В. И. Васильев, Н. А. Демидов, С. А. Козлов, Ю. В. Тимофеев // Измерительная техника. – 2009. – № 10. – С. 36 – 40.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи

۲

7. **Егоров, В. Н**. Характеристики резонаторов СВЧ с нерезонансным просачиванием мощности / В. Н. Егоров // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009. – № 8. – С. 493 – 503.

8. **Бордонский, Б. С.** Отличие электромагнитных свойств льда D₂O и H₂O при измерениях в резонаторах / Б. С. Бордонский, Т. Г. Филиппова // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, вып. 9. – С. 1575 – 1579.

9. Андреев, М. В. Определение резонансной частоты и добротности полудискового диэлектрического резонатора при помощи дробно-рациональной аппроксимации / М. В. Андреев, О. О. Дробахин, Д. Ю. Салтыков // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 362 – 372.

10. Иванов, И. В. Распределенные колебательные системы / И. В. Иванов. – М.: МГУ, 1990. – С. 98.

11. **Krupnov, A. F.** Modern millimeter-wave resonator spectroscopy of broad lines / A. F. Krupnov, A. Yu. Tretuakov e. a. // Journal of molecylar spectroscopy. – 2000. – Vol. 202. – P. 17 – 115.

12. Васильев, В. И. Резервы сохранения добротности СВЧ-резонатора магнетронного типа при его миниатюризации в пассивном водородном стандарте частоты / В. И. Васильев // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии». – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – С. 72.

13. **Васильев, В. И.** Численное моделирование передачи мощности через объемный СВЧ-резонатор, соединенный с коаксиальными линиями передачи / В. И. Васильев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 40 – 47.

14. **Курушин, А. А.** Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio / А. А. Курушин, А. Н. Пластиков. – М.: МЭИ. – 2011. – С. 155.

Статья поступила 15 декабря 2015 г. после переработки 4 февраля 2016 г.

۲

()

УДК 621.372.54

КОМБИНИРОВАННЫЕ СВЧ-ФИЛЬТРЫ С ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИМИ И РЕЖЕКТОРНЫМИ СВОЙСТВАМИ

А. В. Баранов, А. Л. Козиков, Э. Л. Привер

ОАО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород

Исследованы комбинированные СВЧ-фильтры с полосно-пропускающими и режекторными свойствами. Получены выражения для входных импедансов комбинированного СВЧ-фильтра и составляющих его частей. Сформулированы условия оптимальной работы комбинированного фильтра. На основе проведенного анализа продемонстрированы преимущества предложенных фильтров в подавлении «прицельных» помех на близких к полосе пропускания отстройках. Приведены примеры проектирования комбинированных фильтров двух типов.

КС: комбинированный СВЧ-фильтр, полосно-пропускающий СВЧ-фильтр, режекторный СВЧ-фильтр, входной импеданс, «прицельная» помеха

MICROWAVE COMBINED FILTERS WITH BAND-PASS AND REJECTING PROPERTIES

A. V. Baranov, A. L. Kozikov, E. L. Priver

Open Joint-stock Company Scientific and Production Enterprise «SALUT», Nizhny Novgorod

The combined microwave filters with band-pass and rejecting properties are investigated. The input impedances of the combined filter and its parts are obtained. The conditions for optimum operation of the combined filter are determined. Based on analysis the advantages of combined filters are presented. The combined filters have advantages for the rejecting point-type (or frequency) jamming with closely spaced frequencies. The examples of proposed filters designs are demonstrated.

Keywords: combined filter, band-pass filter, rejecting filter, point-type jamming, frequency jamming, input impedance

Разные типы частотно-селективных устройств, в частности полосно-пропускающие и полоснозапирающие фильтры, по отдельности в достаточной степени хорошо изучены и используются на практике [1]. Идеальные модели фильтров традиционно описываются прямоугольной формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В реальных фильтрах из-за невозможности применения бесконечного числа элементов характеристики отличаются от идеального вида. Чтобы приблизить АЧХ к идеальной форме, в теории фильтров обычно используют различные аппроксимирующие функции (полиномы Чебышева, степенная (Баттерворта), эллиптическая (Кауэра) и другие) [2]. При использовании разных функций аппроксимации АЧХ проектирование фильтров является стандартной процедурой и приводит к близким друг к другу результатам. Вместе с тем полученные таким образом фильтры имеют некоторые отличия. Например, эллиптический фильтр имеет более крутой спад АЧХ, а величины пульсации АЧХ задаются в полосе пропускания и затухания независимо друг от друга. Следует отметить, что с точки зрения обеспечения требуемых характеристик пропускания и затухания прямоугольная форма

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

24.06.2016 16:42:53

Комбинированные СВЧ-фильтры с полосно-пропускающими и режекторными свойствами

 $(\blacklozenge$

АЧХ фильтра не всегда является оптимальной [3]. По этой причине можно ожидать, что лучшие частотно-селективные результаты могут быть получены при разработке фильтровых структур, сочетающих в себе одновременно свойства полосовых и режекторных фильтров. Проектированию именно таких комбинированных фильтров и посвящена данная статья, задача которой – продемонстрировать преимущества предлагаемых устройств по сравнению с фильтрами с близкими к прямоугольной амплитудно-частотными характеристиками.

Рассмотрим комбинированный фильтр (рис. 1). Он содержит три каскадно соединенных четырехполюсника, которые отмечены пунктирными линиями и пронумерованы. Режекторные фильтры *I* и *3* образованы параллельными элементами *L1*, *C1* и *L4*, *C4*. Полосовой фильтр представляет собой два параллельных *LC*-контура (*L2*, *C2* и *L3*, *C3*), которые соединены друг с другом при помощи емкости связи *C*.



Рис. 1. Принципиальная схема комбинированного фильтра

Чтобы оценить частотно-селективные возможности рассматриваемого фильтра, рассчитаем для него входной импеданс $Z_{\rm BX}$, а затем с его помощью зависимость затухания (ослабления или потерь) α от рабочей частоты *f*. Для каждого из трех четырехполюсников на рис. 1 запишем их матрицы передачи $[a_1], [a_2]$ и $[a_2]$.

Матрицы передачи режекторных фильтров 1 и 3 имеют похожий вид:

$$\begin{bmatrix} a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\delta_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\delta_4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где
$$\delta_1 = \frac{-j}{\omega L_1} + j\omega C_1$$
, $\delta_4 = \frac{-j}{\omega L_4} + j\omega C_4$, a $\omega = 2\pi f$.

Используя рекомендации учебника [4], получим матрицу передачи полосового фильтра:

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

$$\begin{bmatrix} a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{j\delta_3}{\omega C} & \frac{-j}{\omega C} \\ \delta_2 + \delta_3 - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C} & 1 - \frac{j\delta_2}{\omega C} \end{bmatrix},$$
(3)

где
$$\delta_2 = \frac{-j}{\omega L_2} + j\omega C_2$$
, $\delta_3 = \frac{-j}{\omega L_3} + j\omega C_3$.

Перемножив матрицы (1), (2) и (3), найдем суммарную матрицу передачи всех четырехполюсников (см. рис. 1). Затем, используя элементы суммарной матрицы передачи, получим с помощью [4] входное сопротивление (импеданс) всего устройства:

$$Z_{\rm BX} = \frac{\delta_4 \left(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \frac{j\delta_1\delta_3}{\omega C} - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C}\right) Z_{\rm H} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 - \frac{j\delta_1\delta_4}{\omega C} - \frac{j\delta_2\delta_4}{\omega C} - \frac{j\delta_1\delta_3}{\omega C} - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C}}{\delta_1\delta_4 \left(\delta_2 + \delta_3 - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C}\right) Z_{\rm H} + \delta_1 \left(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4 - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C} - \frac{j\delta_2\delta_4}{\omega C}\right)}, \quad (4)$$

где Z_{μ} – в общем случае комплексное сопротивление нагрузки устройства в целом.

Устройство на рис. 1 работает в качестве фильтра при выполнении системы условий:

$$\begin{array}{l}
\delta_{1} \rightarrow 0 \\
\delta_{2} \rightarrow 0 \\
\delta_{3} \rightarrow 0, \\
\delta_{4} \rightarrow 0 \\
\delta_{5} \rightarrow 0
\end{array}$$
(5)

где

۲

$$\delta_5 = \frac{1}{\delta_1 + \delta_2} - \frac{j}{\omega C},\tag{6}$$

причем в выражении (6) должно выполняться неравенство:

$$\left|\frac{j}{\omega C}\right| > \left|\frac{1}{\delta_1 + \delta_2}\right|. \tag{7}$$

Используя выражение (4) вместе с соответствующими формулами из справочника [2], можно рассчитать, например, коэффициент отражения, КСВН и затухание (ослабление или потери) предлагаемого фильтра. На рис. 2 для него приведена частотная зависимость потерь

$$\alpha(f)$$
, которая рассчитана по формуле $\alpha(f) = -10 \lg \left(1 / \left(1 - \left(\frac{\text{KCBH} - 1}{\text{KCBH} + 1} \right)^2 \right) \right)$. При расчетах

34

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

использованы следующие параметры элементов четырехполюсников: $Z_{\rm H} = 50$ Ом, Cl = 1,38 пФ, C2 = 4,34 пФ, C3 = 5,11 пФ, C4 = 0,94 пФ, C = 0,092 пФ, Ll = 11,8 нГн, L2 = 2,42 нГн, L3 = 2,39 нГн, L = 9 нГн. При таких параметрах неравенство (7) выполняется, так как на центральной частоте сопротивление емкости связи *C* составляет около 1220 Ом, а общее сопротивление контуров L1, C1 и L2, C2 равно приблизительно 690 Ом.



Рис. 2. Частотная зависимость потерь предлагаемого фильтра

Полученная зависимость $\alpha(f)$ имеет вид, который принципиально отличается от прямоугольной (характерной для идеальных фильтров) формы АЧХ, так как содержит ярко выраженные полосу пропускания и две полосы режекции. Результатом этого является значительно большее подавление «прицельных» помех на близких к полосе пропускания отстройках. Очевидно, что в рассмотренном комбинированном фильтре кроме полосы пропускания может существовать всего одна полоса режекции, если элементы режекторных фильтров выбрать одинаковыми: L1 = L4, C1 = C4. При этом полоса режекции может быть расположена как справа, так и слева относительно полосы пропускания, в зависимости от соотношения их центральных частот.

Внешне вид графика $\alpha(f)$ напоминает эллиптическую форму АЧХ фильтров, что позволяет некоторым авторам [3, 5] называть комбинированные фильтры эллиптическими. Вместе с тем зависимость $\alpha(f)$ нельзя аппроксимировать, используя эллиптическую функцию, так как справа или слева от частоты среза в характеристике содержится лишь одна бесконечная пульсация.

Значениями функций частоты δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 в (4) – (7) описывается степень приближения к резонансам проводимостей соответствующих элементов контуров. Чем ближе эти величины к нулю, тем точнее выполняется условие резонанса проводимостей. Малые значения δ_1 , δ_4 можно назвать «ядрами» полюсов, а малые величины δ_2 , δ_3 – «ядрами» нулей коэффициента передачи фильтра. Первая пара – δ_1 , δ_4 – соответствует полюсам режекции и характеризует уровень ослабления сигнала в полосе заграждения. Вторая пара – δ_2 , δ_3 – соответствует нулям коэффициента передачи фильтра и характеризует потери в полосе пропускания.

В отличие от характеристик $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$, при помощи функции частоты δ_5 описывается степень приближения к резонансу сопротивлений двух контуров и емкости связи. Если функции $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и их поведение вполне объяснимы, то физический смысл δ_5 можно установить лишь путем проведения математических операций. Только при выполнении пятого условия ($\delta_5 \rightarrow 0$) входной импеданс $Z_{_{BX}}$ стремится к импедансу нагрузки $Z_{_{H}}$, если реализуются первые четыре соотношения системы (5). Предельное соотношение $Z_{_{BX}} \rightarrow Z_{_{H}}$ является необходимым условием

۲

для нормальной работы любого фильтра. Соотношение $\delta_5 = 1/(\delta_1 + \delta_2) - j/(\omega C) \rightarrow 0$ вместе с неравенством (7) следует из уравнения (4) после раскрытия всех неопределенностей в случае: $\delta_i \rightarrow 0$, i = 1, ..., 4. Для этого поделим числитель и знаменатель уравнения (4) на множитель, стоящий в числителе перед импедансом нагрузки Z_{μ} . Тогда после раскрытия неопределенностей в знаменателе остается единица, а новое второе слагаемое числителя будет стремиться к нулю, если в соотношении $\delta_5 \rightarrow 0$ выполняется неравенство (7). Лишь в этом случае неопределенности типа «1/0» вычитаются друг из друга. Таким образом, физический смысл функции δ_5 заключается в том, что для полного согласования в полосе пропускания фильтра импедансов Z_{μ} и Z_{μ} необходимо, чтобы сопротивление емкости связи *C* находилось в резонансе с суммарным сопротивление мкости обязательно должно быть чуть большим, чем общее сопротивление контуров. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что связь между контурами *L2*, *C2* и *L3*, *C3* должна быть относительно слабой.

Полученные соотношения (4) – (7) описывают работу любого фильтра, построенного по схеме на рис. 1. Хотя из соотношений (6) и (7) определенная взаимосвязь между элементами первого и второго четырехполюсников уже прослеживается, вместе с тем пока не вполне ясно, как взаимодействуют друг с другом каждый из трех четырехполюсников фильтра. Для этого рассмотрим работу каждого из четырехполюсников по отдельности.

Используя в выражениях (1), (2) элементы матриц $[a_1]$, $[a_3]$, для режекторных фильтров I и 3 получим с помощью [4] одинаковые формулы входных импедансов $Z_{\text{вх1}}$ и $Z_{\text{вх3}}$:

$$Z_{\text{BX}1(3)} = Z_{\text{H}1(3)} + \frac{1}{\delta_{1(4)}},\tag{8}$$

где $Z_{_{\rm H1(3)}}$ – комплексное (в общем случае) сопротивление нагрузки режекторного фильтра *1* и *3* соответственно, а индексы в (8) соответствуют номерам четырехполюсников.

Аналогичным образом, используя в выражении (3) элементы матрицы $[a_2]$, отдельно получим формулу для входного импеданса второго четырехполюсника Z_{sx2} :

$$Z_{\text{BX2}} = \frac{\left(1 - \frac{j\delta_3}{\omega C}\right) Z_{\text{H2}} - \frac{j}{\omega C}}{\left(\delta_2 + \delta_3 - \frac{j\delta_2\delta_3}{\omega C}\right) Z_{\text{H2}} + 1 - \frac{j\delta_2}{\omega C}},\tag{9}$$

где Z_{μ_2} – комплексное (в общем случае) сопротивление нагрузки четырехполюсника 2.

В полосе пропускания второго четырехполюсника, когда $\delta_2 \to 0$ и $\delta_3 \to 0$, формула (9) значительно упрощается:

$$Z_{\text{BX2}} = Z_{\text{H2}} - \frac{j}{\omega C}.$$
(10)

Из анализа полученных уравнений (8) – (10) можно сделать следующие выводы.

1. Режекторные фильтры *1* и *3* в большей степени обладают свойствами трансформаторов импедансов. Коэффициенты трансформации $K_{1(3)} = \text{Re}Z_{\text{вх1(3)}} / \text{Re}Z_{\text{н1(3)}}$ в полосе пропускания

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016
могут иметь значительные величины, а при приближении к полосе режекции, где $\delta_{1(4)} \rightarrow 0$, они стремятся к бесконечности.

2. При малой величине связи между контурами *L2*, *C2* и *L3*, *C3* в четырехполюснике 2, что соответствует выполнению условия |−*j*/(ωC)| >>| $Z_{_{\rm H2}}$ |, входной импеданс и, следовательно, коэффициент трансформации отдельного полосового фильтра полностью определяются сопротивлением емкости связи.

Таким образом, с помощью полученных соотношений (7) – (10) становится понятным взаимодействие всех элементов четырехполюсников, входящих в комбинированный фильтр на рис. 1. Трансформация или «сшивание» импедансов трех четырехполюсников между собой производится при более высоких (по сравнению со стандартными значениями) сопротивлениях. Причем, чем ближе по отношению друг к другу расположены полосы пропускания и режекции, тем выше значения трансформируемых в фильтре сопротивлений.

На основе проведенного анализа и полученных рекомендаций спроектируем два варианта комбинированных фильтров, выполненных по схеме на рис. 1. В первом случае используем только сосредоточенные индуктивные и емкостные элементы, а во втором – в качестве контуров *L2*, *C2* и *L3*, *C3* применим коаксиальные керамические резонаторы.

Пример 1. Рассчитаем комбинированный фильтр, который работает на центральной частоте 850 МГц в полосе частот ±50 МГц и обеспечивает подавление «прицельной» помехи на частоте приблизительно 1,2 ГГц. Выберем малые величины $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$, затем с их помощью рассчитаем номиналы элементов всех контуров и величину емкости связи. Например, при величинах δ₂, δ₃ ≈ 0,003...0,004 номиналы элементов полосовых контуров могут быть следующими: L2 = 8,7 нГн, L3 = 8,6 нГн, C2 = C3 = 4,7 пФ. Чтобы полоса режекции была одна и расположена по частоте справа, номиналы элементов режекторных фильтров 1 и 3 сделаем одинаковыми, например: L1 = L4 = 8,2 нГн, C1 = C4 = 2,2 пФ. С помощью соотношений (6) и (7) проконтролируем выполнение неравенства (7). Неравенство (7) удовлетворяется, так как на центральной частоте сопротивление емкости связи C = 1,2 пФ составляет 156 Ом, а общее сопротивление контуров L1, C1 и L2, C2 равно 133 Ом. Рассчитанные таким образом параметры элементов фильтра могут быть использованы в качестве нулевого приближения для проведения последующей оптимизации с помощью любого из доступных средств проектирования СВЧустройств. Результатом проведенной разработки является фильтр с оптимизированной проходной $|S_{21}|$ характеристикой, которая приведена на рис. 3. Полоса данного фильтра составляет 160 МГц по уровню -1 дБ. При этом в полосе режекции 180 МГц фильтр обеспечивает подавление более 40 дБ.

Пример 2. Рассчитаем комбинированный фильтр, который работает на центральной частоте 1,45 ГГц в полосе частот не менее 15 МГц и обеспечивает высокое (более 50 дБ) подавление «прицельной» помехи на частоте около 1,65 ГГц. Для выполнения данной задачи в фильтре на рис. 1 в качестве контуров *L2*, *C2* и *L3*, *C3* применим коаксиальные керамические резонаторы прямоугольного типа (КРП) размерами 6×6 мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 40$. Принципиальная схема на рис. 1 вполне подходит для такой замены, если учесть, что эквивалентная схема керамического резонатора имеет вид параллельной *RCL*-цепи [6]. Поэтому в расчетах параметров данного фильтра мало что меняется по сравнению с примером 1. Полученные значения параметров элементов фильтра на КРП приблизительно соответствуют набору величин, при которых ранее был рассчитан фильтр на рис. 2. Для разработанного ком-

бинированного фильтра на рис. 4 измерены частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|S_{21}|$ (кривая *1*) и отражения от входа $|S_{11}|$ (кривая *2*). Потери в полосе частот около 1 % не превышают 1 дБ при КСВН менее 1,3.



Рис. 3. Оптимизированная проходная характеристика $|S_{21}|$ комбинированного фильтра



Рис. 4. Измеренные частотные зависимости модулей коэффициентов передачи |S₂₁| (кривая *I*) и отражения от входа |S₁₁| (кривая 2) разработанного комбинированного фильтра

Таким образом, в данной работе исследованы комбинированные СВЧ-фильтры с полоснопропускающими и режекторными свойствами. Получены выражения для входных импедансов комбинированного СВЧ-фильтра и составляющих его частей. Сформулированы условия оптимальной работы комбинированного фильтра. На основе проведенного анализа продемонстрированы преимущества предложенных фильтров в подавлении «прицельных» помех на близких к полосе пропускания отстройках. Приведены примеры проектирования комбинированных фильтров двух типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маттей**, Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс; под ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнира. – М.: Связь, 1971. – Т. 2. – 494 с.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲

Комбинированные СВЧ-фильтры с полосно-пропускающими и режекторными свойствами

 $(\blacklozenge$

2. Ред, Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника / Э. Ред; пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 256 с.

3. **Абросимов, А. А.** Эллиптические фильтры с заданными частотами режекции в полосе заграждения: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04 / Абросимов Артем Александрович. – Новосибирск, 2013. – 23 с.

4. **Фельдштейн, А. Л.** Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М.: Связь, 1965. – 352 с.

5. **Пронин, В. А.** Планарный полосовой фильтр на основе связанных резонаторов с перекрестными связями / В. А. Пронин, А. А. Покровская // Материалы XV координационного семинара по СВЧ-технике, п. Хахалы Нижегородской области, (04 – 06).09.2007. – Нижний Новгород, 2007. – С. 68–71.

6. Application note No. 1008 Coaxial resonators for VCO applications [Электронный ресурс] // Skyworks Solutions, Inc. – 2004. – Режим доступа: http: // www.skyworksinc.com.

Статья поступила 29 сентября 2015 г.

🚃 НОВЫЕ КНИГИ 🚞

СЕЧИ Ф., БУДЖАТТИ М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Перевод с англ. О. О. Султанова; под ред. д.т.н. А. А. Борисова. – М.: Техносфера, 2016. – 416 с.: ил.

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении CBЧустройств. С. Н. Семенин, Д. Н. Скобелев, С. С. Бушкин, Д. М. Немирич

 $(\mathbf{0})$

УДК 621.372, 621.372.22

ВОЛНОВОДНО-МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ПЕРЕХОД *Х*-ДИАПАЗОНА

С. Н. Семенин, Д. Н. Скобелев

ООО «НИИ радиолокации и связи», г. Москва, Зеленоград

С. С. Бушкин

АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», г. Жуковский

Д. М. Немирич

«ЛГ Электроникс Инк.», г. Санкт-Петербург

Рассматривается волноводно-микрополосковый переход, предназначенный для работы в диапазоне частот 9,1...9,8 ГГц. В конструкции используется стандартная микрополосковая техника в сочетании со ступенчатой конструкцией волновода, что позволяет осуществить переход от микрополосковой линии к волноводу 18,5×5 мм. При этом переход имеет небольшие геометрические размеры. Моделирование перехода выполнено посредством программы HFSS. Интегральный коэффициент стоячей волны перехода, полученный экспериментальным путем, составил 1,4.

КС: волноводно-микрополосковый переход, микрополосковая линия

X-BAND WAVEGUIDE-TO-MICROSTRIP TRANSITION

S. N. Semenin, D. N. Skobelev

JSC "RI of radiolocation and communications", Moscow, Zelenograd

S. S. Bushkin

JSC "RI of instrument engineering named after Tikhomirov", Zhukovsky

D. M. Nemirich

"LG Electronics Inc.", St.Petersburg

In this paper the design of waveguide-to-microstrip transition for 9.1-9.8 GHz frequency band is considered. The design is made using standard printed-circuit technique and stepped construction of waveguide that allows a direct connection of 18.5×5 mm waveguide to microstrip. Transition has very compact geometry. Design and optimization of this novel transition has been performed using 3-D element method based software HFSS (High Frequency Structure Simulator). The voltage standing-wave ratio, VSWR, of the transition confirmed by the experimental measurements is 1.4 in all frequency bands.

Keywords: <u>waveguide-to-microstrip transition, microstrip line</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных радиосистемах для решения разного типа задач используются устройства, реализованные на тех или иных линиях связи. В свою очередь, для соединения устройств друг с другом требуется не только использование хорошо согласованного перехода, но и возможность его быстрой замены. В данной работе решаются задачи обеспечения быстрой стыковки-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

•

расстыковки перехода от волновода к микрополосковой линии, его согласования и минимизации габаритных размеров.

Как известно, волноводно-микрополосковый переход (ВМП) может быть выполнен двумя принципиально разными способами: поперечным соединением за счет введения зонда в волновод (рис. 1, a) или продольным соединением (рис. 1, δ).



Рис. 1. Схемы волноводно-микрополосковых переходов

Переход с поперечным сечением менее удобен при требовании быстрой стыковки-расстыковки. К тому же настройка такого перехода с целью обеспечения согласования в заданной полосе частот имеет ряд трудностей, связанных с необходимостью введения подвижного короткозамыкающего поршня. По этой причине был выбран переход с продольным соединением.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕХОДА

Одним из известных вариантов реализации такого перехода является предварительный переход с регулярного волновода на П-образный и затем к полосковой линии (рис. 1, δ). В такой конструкции перехода обеспечивается широкополосное согласование прямоугольного волновода с полосковой линией передачи и устраняется паразитное излучение из открытого конца волновода [1, 2].

Переход с прямоугольного волновода на П-образный может быть как плавным, так и ступенчатым. Так как одним из требований к переходу является минимизация его габаритных размеров, то предпочтительным является выбор ступенчатого перехода, имеющего меньшую длину, чем плавный.

Отличительной особенностью рассматриваемого перехода является то, что ступеньки в данном переходе имеют разные толщины. Сделано это с целью улучшения согласования с полосковой

линией в широкой полосе частот. Ввиду того что полоса частот работы ВМП была выбрана в области нижней частоты *X*-диапазона, данная конструктивная особенность позволила получить оптимальное согласование, несмотря на близость к частоте отсечки волновода 18,5×5 мм.

Объемная модель ВМП показана на рис. 2, а характерные размеры приведены на рис. 3.

Волноводно-полосковый переход состоит из двух частей: П-образного волновода и съемной части,



Рис. 2. Модель ВМП

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

представляющей из себя левый (входной) ВМП, центральную часть, на которой может располагаться 50-омная микрополосковая линия, соединяющая входную и выходную части установки, и правый (выходной) ВМП. Съемная часть ВМП показана на рис. 4.



Рис. 3. Схематический чертеж ВМП



Рис. 4. Съемная часть ВМП

Такая конструкция обеспечивает возможность соединения ВМП с волноводными трактами измерительной установки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты компьютерного моделирования КСВН показаны на рис. 5. При этом использовался подход к решению задачи, изложенный в работе [3]. Из рисунка видно, что значение КСВН в диапазоне частот 9,1...9,8 ГГц имеет значение менее 1,2.

Экспериментальное измерение уровня КСВН для волноводно-полоскового перехода представляет собой достаточно сложную задачу. Действительно, необходимо создать установку, в которую должны быть включены волноводные тракты, исследуемый ВМП и еще один переход из микрополоска в волновод. При этом в каждом элементе измерительной установки будут возникать отражения, создающие некий суммарный эффект при проведении измерений в частотной области с использованием анализатора цепей.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016



Эти недостатки в значительной степени преодолеваются при использовании импульсного метода измерения КСВН во временной области. Функциональная схема рабочего места для импульсного измерения КСВН представлена на рис. 6.



В состав рабочего места входят следующие элементы: коаксиально-волноводный переход *1* на стандартный волновод 23×10 мм, волноводные переходы *2*, *4* с размеров 23×10 мм на размеры 18,5×5 мм, оснастка *3* для установки исследуемого ВМП, волноводно-коаксиальный переход *5*, векторный измеритель цепей *6*.

Центральная часть оснастки для измерения КСВН показана на рис. 7. Общий вид рабочего места для измерения КСВН показан на рис. 8.



Рис. 7. Центральная часть оснастки для измерения КСВН

На рис. 9 показана временная диаграмма, возникающая на экране векторного измерителя цепей при проведении измерения КСВН во временной области. Здесь маркер 1 показывает значение КСВН 1,408 на переходе из волноводного тракта на исследуемый волноводно-полосковый переход.

Рис. 9. Временная диаграмма на экране векторного измерителя цепей



Рис. 8. Рабочее место для импульсного измерения КСВН с использованием векторного измерителя цепей



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы проанализированы различные варианты конструктивного исполнения ВМП. Оптимальный вариант был согласован в заданной полосе частот с учетом минимизации размеров перехода и возможности его быстрой стыковки-расстыковки с линиями передачи. Последнее обстоятельство создает условия для получения не слишком надежных омических контактов между частями ВМП.

Компьютерное моделирование в диапазоне частот 9,1...9,8 ГГц показывает изменение значений КСВН в пределах от 1,09 до 1,18. Эти очень низкие значения отражают реакцию идеализированного ВМП на воздействие гармонического сигнала. При импульсных измерениях получено значение КСВН порядка 1,4, что характеризует реальное качество конструкции макета ВМП, а также то, что величина КСВН при импульсных измерениях определяется интегральным эффектом в диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сазонов,** Д. М. Устройства СВЧ: учебн. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин; под ред. Д. М. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1981. – 294 с.

2. **Григорьев**, Л. Д. Электродинамика и техника СВЧ: учебник для вузов по специальности "Электронные приборы и устройства"/ Л. Д. Григорьев. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

3. Банков, С. Е. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2009. – 256 с.

Статья поступила 11 сентября 2015 г.

۲

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

•

УДК 621.3.049.774

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ГМИС *Х*-ДИАПАЗОНА НА ТРАНЗИСТОРАХ ИЗ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

А. М. Темнов, К. В. Дудинов, А. А. Трофимов, А. А. Епифанцев, Е. В. Киселева

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

Часть 2

Исследованы однокаскадные миниатюрные усилительные ГМИС Х-диапазона на GaN-транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5. Показано, что на металлизированном основании из синтетического поликристаллического алмаза размерами 3,5×3 мм и толщиной 0,2 мм получена выходная мощность 5, 10 и 17 Вт соответственно при напряжении питания 30 В. Исследован миниатюрный двухкаскадный усилительный ГМИС предварительного усиления мощности с последовательным питанием транзисторов на GaAs и GaN при напряжении питания 30 В. Показано, что этот усилитель целесообразно использовать для возбуждения выходных однокаскадных усилительных ГМИС на транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5.

КС: однокаскадные и двухкаскадный миниатюрные усилительные ГМИС, Х-диапазон, транзистор на GaAs, транзистор на GaN

THE INVESTIGATION OF X-RANGE HIGH-POWER AMPLIFYING HMICS ON GaN TRANSISTORS

A. M. Temnov, K. V. Dudinov, A. A. Trofimov, A. A. Epifantsev, E. V. Kiseleva

JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino

Part 2

X-range one-stage miniature amplifying HMICs on GaN transistors TGF2023-1, TGF2023-2 and TGF2023-5 have been investigated. It was shown that on metalized base made of synthetic polycrystalline diamond 3.5×3 mm in size and 0.2 mm in thick the output power of 5, 10 and 17 W was obtained at supplying voltage 30 V accordingly. A miniature two-stage amplifying HMIC of power preamplification with series feed of GaAs and GaN transistors with supplying voltage 30 V has been investigated. It was shown that it's appropriate to use this amplifier for activating output one-stage amplifying HMICs on TGF2023-1, TGF2023-2 and TGF2023-5 transistors.

Keywords: one-stage and two-stage miniature amplifying HMICs, X-range, GaAs transistor, GaN transistor

1. ВВЕДЕНИЕ

Конструкция ГМИС СВЧ была разработана в 1981 г. для первого гибридно-монолитного двухкаскадного малошумящего усилителя *X*-диапазона на полевых арсенидгаллиевых (GaAs)

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

транзисторах (рис. 1). Усилитель имеет коэффициент усиления более 15 дБ, коэффициент шума 2,5 дБ и выпускается до настоящего времени.



Рис. 1. Первый гибридно-монолитный двухкаскадный малошумящий усилитель *X*-диапазона M421156: *a* – без крышки; *б* – с крышкой

Усилитель содержит четыре основных компонента: золоченое металлическое основание $(7,5\times12\times0,8 \text{ мм})$, служащее теплоотводом; рамку с микрополосковыми выводами входа и выхода с волновым сопротивлением 50 Ом, контактными площадками для подачи питания и управления $(7,5\times6\times0,5 \text{ мм})$ и окном $(4,5\times3 \text{ мм})$; плату с элементами *R*, *L*, *C*, расположенную в окне; крышку для герметизации.

В 1990 – 2000 годы на полевых GaAs-транзисторах разработан ряд ГМИС СВЧ малой и средней мощности в диапазоне 0,4...18 ГГц [1]. Это – малошумящие усилители, широкополосные усилители, смесители частоты, преобразователи частоты, умножители частоты, делители частоты, генераторы.

В первой части статьи [2] были исследованы мощные одно- и двухкаскадные ГМИС-усилители см-диапазона на GaN-транзисторах TGF2023-1 и TGF2023-5 фирмы TriQuint с выходной мощностью 5 и 12 Вт.

Создание мощных одно- и двухкаскадных усилителей *Х*-диапазона показало, что в традиционном исполнении возможно изготовление полного функционального ряда ГМИС СВЧ на полевых GaAs- и GaN-транзисторах.

В мощных ГМИС СВЧ транзисторы и платы устанавливаются в окне рамки непосредственно на поверхность металлического основания. На платах расположены все пассивные элементы схемы: блокировочные и развязывающие конденсаторы, согласующие и трансформирующие элементы, а также цепи питания затвора и стока транзисторов. Рамка с окном в конструкции необходима, с одной стороны, для измерения параметров ГМИС СВЧ с помощью известного контактного устройства с переходом коаксиал-микрополосок, а с другой – для герметизации, защиты схемы от воздействия пыли и грязи.

Необходимо отметить, что в ГМИС СВЧ в одном корпусе могут быть использованы одновременно кристаллы как СВЧ-компонентов (диоды, транзисторы и МИС), так и аналоговых и цифровых НЧ- и ВЧ-компонентов. Такие конструкции за рубежом называют мозаичными, так как они содержат несколько кристаллов (чипов), помещенных в один корпус и объединенных между собой проволочными выводами.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Исследование мощных усилительных ГМИС Х-диапазона на транзисторах из нитрида галлия

Корпусирование всего модуля в целом позволяет выиграть в массе и габаритных размерах и снизить трудоемкость изготовления, стоимость и надежность модуля. На сегодняшний день ГМИС СВЧ полностью удовлетворяют этим требованиям и потребность в них непрерывно растет.

Вместе с тем мировая тенденция миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры требует миниатюризации ГМИС СВЧ.

2. МИНИАТЮРИЗАЦИЯ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ГМИС Х-ДИАПАЗОНА

На пути миниатюризации ГМИС СВЧ мы использовали опыт разработки и измерения параметров МИС СВЧ. Анализ конструкции ГМИС СВЧ показал, что для уменьшения их массы и габаритных размеров необходимо:

1) исключить из конструкции ГМИС СВЧ рамку с отверстием, при этом занимаемая площадь сократится до размеров окна рамки 4,5×3 мм;

2) использовать для измерения параметров ГМИС СВЧ такие же зонды, как и для измерения параметров МИС СВЧ;

3) традиционное металлическое основание выполнить из синтетического поликристаллического алмаза, чтобы уменьшить массу (масса алмаза в 2,5 раза меньше, чем у меди) и улучшить теплоотвод (теплопроводность алмаза в 4 раза выше, чем у меди).

Первая конструкция миниатюрной ГМИС СВЧ – это двухкаскадный предварительный усилитель мощности (ПУМ) на частоту 10 ГГц с коэффициентом усиления 15 дБ и выходной мощностью 0,7 Вт.

Усилитель мощности содержит два усилительных каскада на полевых GaAs-транзисторах и платы согласования и развязки. Все платы изготавливаются из полуизолирующего GaAs толщиной 100 мкм по технологии МИС СВЧ. Для подачи питания и смещения используется специальная сервисная плата. Усилитель мощности размещен на алмазном металлизированном основании 3,5×3 мм, толщиной 0,2 мм. Для измерения параметров миниатюрного ГМИС-усилителя мощности СВЧ используются зонды СВЧ, ВЧ и НЧ [3, 4], как и для измерения параметров МИС СВЧ. На рис. 2 приведена фотография миниатюрного ГМИС-усилителя мощности с зондами для измерения параметров.

Из рисунка видно, что все компоненты усилителя размещены на едином алмазном основании размерами 3,5×3 мм, толщиной 0,2 мм. Копланарные СВЧ-зонды расположены соосно и контактируют с входом и выходом усилителя мощности СВЧ, а многоконтактный зонд ВЧ и НЧ контактирует одновременно к 10 площадкам размерами 0,12×0,25 мм сервисной платы.

Рис. 2. Двухкаскадный миниатюрный усилитель мощности на частоту 10 ГГц с коэффициентом усиления 15 дБ и выходной мощностью 0,7 Вт



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ МИНИАТЮРНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ГМИС СВЧ НА Gan-транзисторах

Конструкция миниатюрной ГМИС СВЧ была использована для создания мощных усилителей на GaN-транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5.

Исследованы мощные миниатюрные однокаскадные усилители *X*-диапазона на GaNтранзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5 с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт соответственно. Конструктивно усилители изготовлены в миниатюрном гибридно-монолитном исполнении на распределенных и сосредоточенных элементах. На рис. 3 приведена электрическая схема однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1.



Рис. 3. Электрическая схема	
однокаскадного усилителя Х-диапазона	

Входная согласующая цепь состоит из индуктивности линии L_{c1} , индуктивности проволочек L_n , емкости C_{c1} и входной емкости транзистора TGF2023-1. Подача отрицательного напряжения питания на затвор транзистора осуществляется через индуктивность дросселя $L_{дp}$. Параллельно отрицательному источнику питания включен блокировочный конденсатор C_{6n} . Для развязки входа по постоянному току включен развязывающий конденсатор C_p .

Выходная согласующая цепь состоит из выходной емкости транзистора TGF2023-1, индуктивности проволочек L_n , индуктивности линии L_{c2} , индуктивности линии L_{c3} и емкости C_{c2} . Подача положительного напряжения питания осуществляется через индуктивность L_{c2} . Параллельно источнику питания включен блокировочный конденсатор C_{6n} . Для развязки выхода по постоянному току включен развязывающий конденсатор C_n .

Ниже (рис. 4) приведен внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-1 с рабочей частотой 8...10 ГГц.



Рис. 4. Конструкция однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-1 с выходной мощностью 5 Вт, частотой 8...10 ГГц

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Исследование мощных усилительных ГМИС Х-диапазона на транзисторах из нитрида галлия

۲

Все компоненты усилителя мощности, как и на рис. 2, размещены на алмазном металлизированном основании 3,5×3 мм, толщиной 0,2 мм. Отдельные компоненты соединены между собой золотой проволокой диаметром 20 мкм.

Все пассивные элементы усилителя, включая согласующие цепи (L, C) на сосредоточенных и распределенных элементах, блокировочные и развязывающие конденсаторы выполнены на двух отдельных платах полуизолирующего GaAs толщиной 100 мкм (входной и выходной) по технологии МИС СВЧ.

Для подачи питания на затвор и сток используется 10-контактная сервисная плата, на которой также расположен резистивный делитель для цепи затвора.

Усилитель мощности работает в режиме большого сигнала.

Измерения всех параметров усилителя проводятся в импульсном режиме. Питание усилителя осуществлялось от двух независимых источников питания: стоковая цепь – от импульсного источника положительной полярности напряжением 30 В, с длительностью импульса 10 мкс и скважностью 10; затворная цепь – от постоянного источника отрицательной полярности напряжением -3,6 В.

Питание подавалось через 10-контактные зонды на контактные площадки сервисной платы усилителя. Измеренные параметры однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1 при входной мощности 500 мВт приведены на рис. 5.



Рис. 5. Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления (*a*), а также выходной мощности и КПД (б) однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-1 в диапазоне частот

На рис. 6 приведен внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-2 на рабочую частоту 8,5...10 ГГц.

Конструкция однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-2 аналогична вышеописанной конструкции усилителя на транзисторе TGF2023-1. На рис. 7 приведены измеренные параметры однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-2 при входной мощности 1 Вт.

На рис. 8 приведен внешний вид однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-5 на рабочую частоту 8...10 ГГц.

Конструкция однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-5 аналогична вышеописанной конструкции усилителя на транзисторе TGF2023-1. На рис. 9 приведены измеренные параметры однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-5 при входной мощности 2 Вт.

۲

۲





Рис. 6. Конструкция однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-2 с выходной мощностью 10 Вт, частотой 8,5...10 ГГц







Рис. 8. Конструкция однокаскадного усилителя мощности на транзисторе TGF2023-5 с выходной мощностью 17 Вт, частотой 8...10 ГГц

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲





Рис. 9. Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления (*a*), а также выходной мощности и КПД (*б*) однокаскадного усилителя на транзисторе TGF2023-5 в диапазоне частот

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ГМИС СВЧ НА ТРАНЗИСТОРАХ GaN И GaAs

Для возбуждения однокаскадных миниатюрных усилительных ГМИС СВЧ на GaN-транзисторах TGF2023-1, TGF2023-2 и TGF2023-5 с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт требуется мощность 0,5, 1 и 2 Вт соответственно. В измерительном стенде мощность возбуждения подавалась от встроенного в стенд усилителя мощности. При использовании их в аппаратуре необходим предварительный усилитель. Питание исследованных однокаскадных миниатюрных усилительных ГМИС СВЧ осуществляется от источника 30 В, поэтому питание предварительных усилителей должно осуществляться также от источника 30 В.

В настоящее время TGF2023-1 – самый маломощный транзистор, имеет выходную мощностью 5 Вт. Простое решение – это построить предварительный усилитель на GaAs-транзисторах. Однако напряжение питания GaAs-транзисторов составляет 8 В, а напряжение питания GaN-транзисторов равно 30 В. Поэтому целесообразно строить предварительный усилитель на обоих типах транзисторов, GaAs и GaN. Ниже представлена схема двухкаскадного усилителя, где первый каскад – на транзисторе GaAs, а второй – на транзисторе GaN.

Рис. 10. Электрическая схема двухкаскадного усилителя на частоту 10 ГГц



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

А. М. Темнов, К. В. Дудинов, А. А. Трофимов, А. А. Епифанцев, Е. В. Киселева

۲

Из рис. 10 видно, что транзисторы T_1 и T_2 включены последовательно. Питание на сток транзистора T_1 подается с истока транзистора T_2 . Рабочая точка транзистора T_2 обеспечивается при напряжении затвор-исток -3,5 В. Для задания напряжения питания первого транзистора служит делитель напряжения на резисторах R_3 и R_4 . В данной схеме делитель делит напряжение на истоке транзистора T_2 пополам и обеспечивает напряжение питания 7 В на стоке транзистора T_1 . Напряжение на затвор транзистора T_2 подается через дроссель $L_{\rm др}$. Питание на затвор транзистора T_1 подается через резистивный делитель на резисторах R_1 и R_2 . Согласующие цепи по входу, межкаскадные и выходные рассчитаны на распределенных и сосредоточенных элементах на подложке из арсенида галлия толщиной 100 мкм. На рис. 11 представлена конструкция миниатюрной ГМИС СВЧ – двухкаскадного предварительного усилителя мощности.



Конструктивно согласующие цепи выполнены на отдельных платах: входная, межкаскадная и выходная – на полуизолирующей подложке GaAs толщиной 100 мкм. При этом входная и межкаскадная цепи объединены на одной плате. Все компоненты расположены на плоскости золоченого алмазного основания размерами $3,5\times3$ мм, толщиной 0,2 мм. Единственный компонент – транзистор T_2 установлен на поверхности блокировочного конденсатора C_{6n} . Соединение всех компонентов между собой осуществляется с помощью золотой проволоки диаметром 20 мкм. Измеренные параметры двухкаскадного усилителя мощности на транзисторах GaAs и GaN при входной мощности 30 мВт приведены на рис. 12.



Рис. 12. Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления (*a*), а также выходной мощности и КПД (б) двухкаскадного предварительного усилителя мощности на транзисторах GaAs и GaN в диапазоне частот

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

•

На рис. 13 представлена зависимость коэффициента усиления транзистора TGF2023-1 от питающего напряжения сток-исток.



Анализ параметров ПУМ показывает, что КПД усилителя невысокий. Причиной тому – последовательное питание транзисторов T_1 и T_2 . При последовательном питании уменьшается питающее напряжение сток-исток транзистора TGF2023-1 и соответственно падают коэффициент усиления и КПД.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование миниатюрных однокаскадных усилителей см-диапазона с выходной мощностью 5, 10 и 17 Вт показало, что возможно изготовление мощных ГМИС СВЧ на полевых транзисторах из GaN с напряжением питания 30 В в миниатюрном исполнении.

Исследование двухкаскадного предварительного усилителя мощности показало, что при последовательном питании транзисторов можно использовать в одной схеме оба типа транзисторов, GaAs и GaN, при напряжении питания 30 В.

Все ГМИС СВЧ предназначены для использования в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, росы, агрессивных газов.

Использование миниатюрных ГМИС СВЧ в составе герметичных модулей СВЧ позволит уменьшить габаритные размеры и массу модулей.

Исследование продолжается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гибридно-монолитные интегральные схемы на полевых СВЧ-транзисторах *S*- и *X*-диапазона длин волн // История отечественной электроники. Т. 1. – М.: Издательский дом Столичная энциклопедия. – С. 318 – 320.

2. **Темнов, А. М.** Исследование мощных усилительных ГМИС *Х*-диапазона длин волн на транзисторах нитрида галлия / А. М. Темнов, К. В. Дудинов и др. // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2 (525).– С. 4 – 20.

3. **Пат. 2285930 РФ.** Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, К. В. Дудинов. – Приоритет 11.04.2005.

4. **Пат. 2293339 РФ.** Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / А. М. Темнов, Н. В. Шульга, К. В. Дудинов. – Приоритет 25.07.2005.

Статья поступила 10 декабря 2015 г.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

КАТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

 $(\blacklozenge$

УДК 537.533

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМИССИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КАТОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Капустин

МИРЭА, г. Москва

И. П. Ли, А. В. Шуманов

ОАО «Плутон», г. Москва

Предложена новая методика, позволяющая по результатам обработки вольт-амперных характеристик термоэмиссии с катодного материала при нескольких значениях температуры материала определять средний размер центров термоэмиссии и среднее расстояние между ними, а также параметры активирования центров термоэмиссии неоднородного катодного материала. Методика апробирована на примере стандартного металлопористого катода.

КС: термоэлектронная эмиссия, катодные материалы, центры термоэмиссии, вольт-амперные характеристики, уравнение Ричардсона, закон степени 3/2, эффект Шотки, кислородные вакансии в оксиде, работа выхода материала

THE METHODOLOGY FOR DETERMINING PARAMETERS OF EMISSION NONUNI-FORMITY OF CATHODE MATERIALS

V. I. Kapustin

MIREA, Moscow

I. P. Li, A. V. Shumanov

JSC "Pluton", Moscow

A new methodology has been suggested. It allows to determine medium size of thermionic emission centers and average distance between them as well as parameters of activating thermionic emission centers of nonuniform cathode material by using the results of processing volt-ampere characteristics of thermionic emission from cathode material at several values of the material temperature. The methodology was tested on a standard dispenser cathode.

Keywords: <u>thermionic emission, cathode materials, thermionic emission centers, volt-ampere characteris-</u> <u>tics, Dushman-Richardson equation, 3/2 degree law, Schottky effect, oxygen vacancies in oxide,</u> <u>material work function</u>

І. ВВЕДЕНИЕ

Основными параметрами катодного материала, важными для разработчиков электровакуумных СВЧ-приборов, являются плотность тока термоэмиссии при рабочей температуре катода в импульсном режиме и изменение плотности тока термоэмиссии во времени. При этом

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

универсальными характеристиками катодного материала служат величина работы выхода, а также температурный коэффициент работы выхода материала. В связи с этим измерения термоэмиссионных параметров катодных материалов обычно проводят в импульсном режиме при длительности импульсов 0,3...3 мкс, скважности 500...1000, величине амплитуды импульсов до 2...6 кВ [1]. Однако при обработке результатов измерений часто вызывает затруднение выделение перехода вольт-амперных характеристик в область насыщения, в которой и определяются величина работы выхода материала, отклонение вольт-амперной характеристики в данной области от закона Шотки, а также отклонение вольт-амперной характеристики от закона степени 3/2 в области ограничения тока пространственным зарядом. Все это затрудняет определение величины работы выхода материала и температурного коэффициента работы выхода [1].

Известно, что все типы эффективных катодов, в частности металлопористые катоды, являются эмиссионно-неоднородными, при этом требуется проведение этапа активирования катода, который включает прогрев катода в вакууме при повышенной температуре, в том числе с отбором тока термоэмиссии [2]. Известно также, что после изготовления металлопористого катода, процесс которого включает пропитку вольфрамовой матрицы алюминатами бариякальция при температуре 1850 °C, оксидная фаза катода представляет собой набор сложных оксидов бария-кальция-алюминия-вольфрама [3]. При этом этап активирования катодного материала с физико-химической точки зрения заключается в формировании кристаллитов оксида бария, содержащего определенную концентрацию кислородных вакансий, с последующим «доведением» этой концентрации до оптимального значения. На первом этапе активирования катода выделение кристаллитов оксида бария из алюминатов бария с термодинамической точки зрения возможно исключительно вследствие взаимодействия алюминатов с вольфрамом с образованием триоксида вольфрама, летучего при температуре выше 500 °C, например, по реакции

$$3BaO \bullet Al_2O_3 + W \to BaO \bullet Al_2O_3 + WO_3^{\uparrow} + BaO_{(l-x)}.$$
 (1)

Отметим, что именно высокая летучесть триоксида вольфрама сдвигает реакцию (1) вправо и обеспечивает выделение на границе вольфрама и алюмината кристаллитов оксида бария, содержащего кислородные вакансии, необходимые для эффективной термоэмиссии из оксида бария.

На втором этапе активирования катода происходит дальнейшее взаимодействие нестехиометричного оксида бария с вольфрамом с увеличением параметра *x* до оптимального значения. В случае отбора тока при повышенной температуре катода возможно увеличение данного параметра и за счет испарения ионов кислорода с поверхности оксида бария.

Таким образом, структуру неоднородного металлопористого катодного материала можно в сечении, перпендикулярном поверхности катода, представить в виде, показанном на рис. 1, где *1* – зерна оксидной фазы (алюминатов); *2* – зерна вольфрама; *3* – зерна оксида бария; *4* – поры; *a* – средний размер части зерен оксида бария, с кото-



Рис. 1. Структура неоднородного металлопористого катодного материала

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

рых при данной температуре имеет место максимум термоэмиссии; D – среднее расстояние между зернами оксида бария. При этом принципиально важно, что распределение концентрации кислородных вакансий в зерне оксида бария будет неоднородным, уменьшаясь от границы контакта зерна оксида бария с зерном вольфрама в сторону поверхности кристаллита оксида бария и зерна алюмината бария.

Данная работа посвящена разработке методики, позволяющей путем обработки вольтамперных характеристик термоэмиссии с катодного материала при нескольких значениях температуры определять средний размер центров термоэмиссии и среднее расстояние между этими центрами, а также оценить параметры активирования центров термоэмиссии неоднородного катодного материала. Данная информация важна для разработчиков катодных материалов и технологов и позволяет оптимизировать состав и структуру катодных материалов, методику их активирования и внедрить методику контроля качества катодов и прогнозирования их долговечности.

2. УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭМИССИИ МАТЕРИАЛОВ

Установка для исследования параметров термоэмиссии катодных материалов собрана на базе универсального откачного поста УСУ-4 и показана на рис. 2, а на рис. 3 показан пульт управления и регистрации результатов измерения термоэмиссионных свойств катодных материалов.



Рис. 2. Внешний вид установки для исследования термоэмиссионных свойств катодных материалов

Образец исследуемого материала в виде таблетки диаметром 6,6 мм и толщиной 2 мм закрепляется в держателе, снабженном нагревателем и хромель-алюмелевой термопарой. На манипуляторе установки может быть одновременно установлено три держателя с образцами исследуемых материалов.

Температура образца регулируется микропроцессорным терморегулятором в интервале 100...1200 °С с точностью 0,2 °С и шагом 1 °С. Возможны режим стабилизации и режим развертки температуры с постоянной скоростью нагрева образца. Расстояние от образца до анодного блока с помощью микрометрических головок может устанавливаться с точностью 0,05 мм.





Рис. 3. Пульт управления и регистрации результатов измерения термоэмиссионных свойств катодных материалов

Анодный блок выполнен в виде металлокерамической конструкции с плоским молибденовым анодом, покрытым слоем никеля толщиной 3 мкм. Анод имеет измерительное отверстие диаметром 1 мм, за которым расположены антидинатронная диафрагма и коллектор в виде цилиндра Фарадея. Потенциал антидинатронной диафрагмы может устанавливаться с пульта управления в интервале –100...+100 В с шагом 1 В.

Ускоряющее напряжение отрицательной полярности подается на образец и может регулироваться программно (постоянный потенциал или развертка с постоянной скоростью) с пульта управления в диапазоне 0...600 В с шагом, устанавливаемым на пульте управления в интервале 0,1...5 В. Источник ускоряющего напряжения имеет максимальный выходной ток до 30 мА, что обеспечивает прецизионное измерение параметров термоэмиссии с плотностью тока с катодного материала до 120 мА/см².

Система регистрации тока цилиндра Фарадея обеспечивает регистрацию тока в интервале 2·10⁻³... 2·10⁻¹¹ А, что в целом позволяет проводить прецизионные измерения термоэмиссионных параметров катодных материалов вплоть до очень низких значений температуры материалов, что важно при изучении начальных этапов термоэмиссионного активирования материалов. Для повышения точности измерений система автоматически проводит от двух до десяти (устанавливается на пульте управления) накоплений с усреднением результатов измерений.

Созданная измерительная система позволяет программно регистрировать зависимости тока термоэмиссии с катодного материала от ускоряющего напряжения, температуры и времени с визуализацией процесса в реальном времени на экране пульта управления и формированием XL-файла для последующей обработки результатов измерений.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Средний размер кристаллитов оксида бария

Термоэлектронная эмиссия с поверхности катода определяется электронной эмиссией с поверхности кристаллитов оксида бария, поэтому для области насыщения тока термоэмиссии величину регистрируемого тока можно приближенно представить в виде [4]

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

$$I = S \frac{a^2}{D^2} A_0 T^2 \exp\left[-\frac{\varphi - e\left(\frac{e(\varepsilon + 1)K_1}{4\pi\varepsilon_0(\varepsilon - 1)}\right)^{1/2} E^{1/2}}{kT}\right],$$
(2)

где S – площадь катода, с которой измеряется ток термоэмиссии; a – средний размер части кристаллитов оксида бария, с которой при данной температуре имеет место максимум термоэмиссии с учетом неоднородности распределения кислородных вакансий в кристаллите оксида бария; D – среднее расстояние между эмитирующими частями кристаллитов оксида бария; k – постоянная Больцмана; T – температура; e – заряд электрона; φ – величина работы выхода материала «по полному току»; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – высокочастотная диэлектрическая порницаемость оксида бария; E – напряженность поля в зазоре катод – анод без учета усиления поля у поверхности кристаллитов оксида бария; K_1 – константа, характеризующая усиление электрического поля у поверхности кристаллитов оксида бария; A_0 – постоянная Ричардсона.

Так как кристаллиты оксида бария в соответствии с реакцией (1) выделяются вдоль границы зерен вольфрама и алюмината, то форму кристаллита оксида бария можно представить в виде вытянутого вдоль этой границы образования, а форму эмитирующей части этого кристаллита при конкретной температуре – в виде цилиндрика, параллельного границе зерен вольфрама и алюмината. Для такой формы эмитирующей части кристаллита оксида бария истинная напряженность поля у поверхности кристаллитов E^* определяется константой K_1 и приложенным напряжением U[4]:

$$E^* = \frac{2U}{a\ln\left(\frac{2d}{a}\right)} = \frac{2d}{a\ln\left(\frac{2d}{a}\right)} \frac{U}{d} = K_1 E,$$
(3)

где d – расстояние катод – анод, причем эффективно эмитирующие при данной температуре образца части кристаллитов оксида бария для простоты рассматриваются как цилиндры с радиусом r = a/2. В этом случае задаваемая от источника питания напряженность электрического поля у поверхности кристаллитов E = U/d, а константа $K_1 = 2d / a \ln(2d / a)$.

Если прологарифмировать соотношение (2), то в области насыщения тока термоэмиссии экспериментальная вольт-амперная характеристика при фиксированной температуре будет иметь вид

$$\ln I = \ln \left(S \frac{a^2}{D^2} A_0 T^2 \right) - \frac{\varphi}{kT} + \left[\frac{e}{kT} \left(\frac{e(\varepsilon + 1)K_1}{4\pi\varepsilon_0(\varepsilon - 1)} \right)^{1/2} \right] E^{1/2}.$$
 (4)

В соотношении (4) константа K_1 сильно зависит от величины размера кристаллитов оксида бария *a*, при этом первое слагаемое в правой части соотношения (4) зависит от величины *a* логарифмически, то есть слабо. Поэтому тангенс угла наклона линейной части вольт-амперной характеристики будет равен выражению в квадратных скобках в правой части соотношения (4), из которого легко может быть найден коэффициент усиления поля K_1 , по которому из соотношения (3) легко определить и средний размер части кристаллитов оксида бария, с которой при данной температуре имеет место максимум термоэмиссии.

Методика определения параметров эмиссионной неоднородности катодных материалов

۲

Значения величины *a*, определенные при разных значениях температуры катода для однородно активированного катода, должны быть равны. Однако с учетом механизма образования кристаллитов оксида бария по реакции (1) и дальнейшего взаимодействия вольфрама с кристаллитами оксида бария, о чем речь пойдет ниже, концентрация вакансий может уменьшаться в сторону, противоположную от границы контакта вольфрама и алюмината. Поэтому, в общем случае, измеряемая величина *a* может зависеть от температуры измерений, при этом данная температурная зависимость и характеризует степень однородности активирования кристаллитов оксида бария.

Среднее расстояние между кристаллитами оксида бария

Для области ограничения тока пространственным зарядом вольт-амперная характеристика зазора катод – анод описывается так называемым законом степени 3/2. На рис. 4 показана схема, иллюстрирующая изменение характера вольт-амперной характеристики в данной области напряжений. Здесь x_m – это расстояние от катода до минимума потенциала U_m в зазоре катод – анод. При этом с увеличение напряжения U от нуля до $U_{\rm B}$ плоскость максимума потенциала сдвигается влево, в сторону катода, и на вольт-амперной характеристике можно ожидать появления «излома», обусловленного изменением характера распределения плотности тока в зазоре – от однородной эмиссии, усредненной по поверхности катода, до суммы эмиссии с отдельных кристаллитов оксида бария.



Рис. 4. Схема, иллюстрирующая изменение характера вольт-амперной характеристики зазора катод – анод

Если расстояние x_m будет больше или равно среднему расстоянию между эмитирующими частями кристаллитов оксида бария D, то термоэмиссия с катода будет регистрироваться, как с квазиоднородного катода в режиме «плоского диода». В этом случае вольт-амперная характеристика в интервале напряжений будет иметь вид [4]

$$I = K_2 \frac{(U - U_m)^{3/2}}{(d - x_m)^2},$$
(5)

где K_2 – константа.

Если расстояние x_m будет меньше среднего расстояния между эмитирующими частями кристаллитов оксида бария *D*, то термоэмиссия с катода будет регистрироваться, как с набора независимых кристаллитов, каждый из которых работает в режиме «цилиндрического диода». В этом случае вольт-амперная характеристика в интервале напряжений будет иметь вид [4]

59

۲

В. И. Капустин, И. П. Ли, А. В. Шуманов

۲

$$I = K_3 \frac{(U - U_m)^{3/2}}{d\beta^2 (d/a)},$$
(6)

где K_3 – константа; β – функция отношения среднего размера эмитирующей части кристаллитов *a* и расстояния катод – анод *d*.

С учетом соотношений (5) и (6) на вольт-амперной характеристике в области ограничения тока пространственным зарядом появится излом, положение которого на шкале напряжения катод – анод позволяет определить среднее расстояние между кристаллитами оксида бария.

В соответствии с [4], в общем случае для плоского диода зависимость потенциала U от координаты x может быть выражена в виде универсальной функции $\eta(\xi)$ с безразмерными переменными η и ξ :

$$\eta = \frac{e}{kT} (U - U_m), \tag{7}$$

$$\xi = C(x - x_m),\tag{8}$$

где С – постоянная;

$$C = 4 \left(\frac{\pi}{2k}\right)^{3/4} m^{1/4} e^{1/2} T^{-3/4} j^{1/2}.$$
 (9)

В соотношении (9) e – заряд электрона; m – масса электрона; j = I/S – плотность тока насыщения термоэмиссии. При этом в режиме работы «плоского диода» площадь S равна общей площади эмитирующей поверхности катода.

Величина 1/С имеет размерность длины. Для электронов, если плотность тока выражена в А/см², согласно [4],

$$C = 9,174 \cdot 10^5 T^{-3/4} j^{1/2}, \text{ cm}^{-1}.$$
 (10)

Для нахождения среднего расстояния между кристаллитами оксида бария, по сути, необходимо найти величину x_m в точке излома вольт-амперной характеристики в области ограничения тока пространственным зарядом. Практически для фиксированной температуры катода необходимо определить величину I_s – тока насыщения при данной температуре катода и величину I_2 – ток катода при напряжении, при котором наблюдается излом в области ограничения тока пространственным зарядом. Используя данные значения, находим величину максимума потенциала в зазоре катод – анод

$$U_m = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_2} \right) \tag{11}$$

и значение параметра η

$$\eta = \frac{eU_m}{kT} = \ln\left(\frac{I_s}{I_2}\right). \tag{12}$$

По найденному значению η , используя табулированную зависимость $\eta(\xi)$, приведенную в работе [5], можно определить величину ξ , а по соотношениям (8) и (9) и величину $x_m \approx -D$.

В первом приближении значения величины *D* для однородно активированного катода, определенные в фиксированный момент времени, но при разных значениях температуры катода,

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

должны быть равны. Однако в реальности возможен случай, когда имеется определенный разброс степени активирования различных кристаллитов, что может привести к температурной зависимости расстояния между кристаллитами. В этом случае величина *D* будет равна среднему расстоянию между частями кристаллитов оксида бария, с которых при данной температуре катода имеет место максимум термоэмиссии.

Степень активирования эмиссионных центров

В работах [6, 7] была получена система уравнений, описывающая термоэмиссию оксидов. Для не слишком низких значений температуры и концентрации кислородных вакансий величину работы выхода можно представить в виде аналитического выражения

$$\varphi = \Delta E_{g} + \chi - 2(E_{4} - E_{1}) + kT \ln \left[\frac{e^{*2} N_{SO}^{2} \left(1 + \frac{bN_{\Pi}}{N_{SO}} \exp\left(-\frac{E_{2} - E_{4}}{kT} \right) \right)^{2}}{\epsilon \epsilon_{0} kT N_{\Pi}} \right].$$
(13)

В выражении (13) *b* – параметр кристаллической решетки оксида; ε – диэлектрическая проницаемость оксида; ε_0 – диэлектрическая постоянная; *e*^{*} – величина эффективного заряда кислородной вакансии; $N_{\rm d}$ – объемная концентрация кислородных вакансий; ΔE_g – «глубина» уровня кислородных вакансий относительно дна зоны проводимости оксида; $N_{\rm so}$ – поверхностная плотность атомов кислорода в оксиде; χ – величина электронного сродства оксида. Параметры E_1, E_2 и E_4 являются энергиями активации переходов атома кислорода соответственно из верхнего монослоя в кислородную вакансию в объеме оксида, из состояния в объеме оксида в осседнюю кислородную вакансию в объеме оксида и из верхнего монослоя в адсорбированное состояние. Из соотношения (13) следует, что работа выхода оксида имеет минимальное значение при концентрации кислородных вакансий и температуре, связанных соотношением

$$N_{\rm Jmin} = \frac{N_{\rm SO}}{b} \exp\left(-\frac{E_4 - E_2}{kT}\right). \tag{14}$$

Тогда с учетом соотношения (2) для тока насыщения катода можно записать в явном виде его зависимость от концентрации кислородных вакансий

$$I_{S} = \left(S\frac{a^{2}}{D^{2}}A_{0}T^{2}\right)\frac{\varepsilon\varepsilon_{0}kTN_{\Lambda}}{e^{*2}N_{SO}^{2}\left(1+\frac{N_{\Lambda}}{N_{\Lambda\min}}\right)^{2}}\exp\left(-\frac{\Delta E_{g}+\chi-2(E_{4}-E_{1})}{kT}\right).$$
(15)

Соотношение (15) можно переписать в более удобном виде

$$\frac{I_s}{ST^3} = A_1 \frac{N_{\perp}}{\left(1 + \frac{N_{\perp}}{N_{\perp \min}}\right)^2} \exp\left(-\frac{\varphi^*}{kT}\right),\tag{16}$$

где ф* – аналог ричардсоновской работы выхода,

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

$$\varphi^* = \Delta E_g + \chi - 2(E_4 - E_2), \tag{17}$$

а константа A_1 определяется соотношением

$$A_{1} = \frac{a^{2}}{D^{2}} A_{0} \frac{\varepsilon \varepsilon_{0} k}{e^{*2} N_{SO}^{2}}.$$
 (18)

Если экспериментальные зависимости тока насыщения катода от температуры катода в соответствии с уравнением (16) построить в координатах

$$\lg\left(\frac{I_s}{ST^3}\right) \div \frac{5040}{T},\tag{19}$$

то получим прямую линию, тангенс угла которой равен величине ϕ^* в соответствии с выражением (17), а экстраполяция которой влево к значению $T \rightarrow \infty$ позволяет найти величину

$$\lg\left(\frac{I_{S}(T \to \infty)}{ST^{3}}\right) = \lg\left\{A_{1}\frac{N_{\Pi}}{\left(1 + \frac{N_{\Pi}}{N_{\Pi\min}}\right)^{2}}\right\}.$$
(20)

Величина ϕ^* в первом приближении в оксиде бария остается постоянной и не зависит от температуры катода и концентрации кислородных вакансий. Однако в многокомпонентных катодных материалах при внедрении других элементов (кальция, алюминия, скандия, вольфрама и т. д.) в объем решетки оксида бария и в верхний монослой оксида бария ее «объемное» $\Delta \phi^*_{nos}$ и «поверхностное» $\Delta \phi^*_{nos}$ изменения составят соответственно

$$\Delta \varphi_{_{06}}^* = \Delta(\Delta E_g), \qquad \Delta \varphi_{_{\Pi OB}}^* = \Delta\{\chi - 2(E_4 - E_2)\}.$$
⁽²¹⁾

Величина «объемного» изменения работы выхода ϕ^* при легировании оксида бария может быть определена, например, методом оптического поглощения. В этом случае величина «поверхностного» изменения работы выхода будет служить критерием обогащения поверхности оксида атомами легирующих компонентов.

Анализ и оптимизация технологии активирования катодного материала и оценка долговечности катода могут быть проведены путем регистрации зависимости тока насыщения катода по времени и обработки результатов в соответствии с выражением (20), из которого вытекает, что

$$\frac{I_{S}(t,T \to \infty)}{ST^{3}} = A_{1} \frac{N_{\Pi}(t)}{\left(1 + \frac{N_{\Pi}(t)}{N_{\Pi\min}}\right)^{2}}.$$
(22)

Из соотношения (20) видно, что на начальном этапе активирования катода (при малой концентрации кислородных вакансий) кинетика изменения тока насыщения прямо пропорциональна кинетике изменения концентрации кислородных вакансий. В свою очередь, кинетика изменения концентрации кислородных вакансий определяется следующими процессами:

Методика определения параметров эмиссионной неоднородности катодных материалов

۲

- неконгруэнтным испарением компонентов оксида (кислорода и бария);
- переносом кислорода и бария по порам катодного материала;
- диффузионным переносом кислорода и бария по поверхности зерен материала катода;
- обменом кислородом и барием с другими фазами катодного материала.

Указанные процессы в принципе могут быть выделены при соответствующей обработке экспериментальных результатов.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотренная выше методика была апробирована на примере стандартного металлопористого катода, полученного пропиткой вольфрамовой губки алюминатом состава 2,5BaO·0,4CaO·Al₂O₃. Измерения проведены в интервале температур 760...840 °C, при этом катод был прогрет при температуре 1150 °C в течение 1 ч без отбора тока термоэмиссии, то есть был недостаточно активирован. Данное – плохо активированное – состояние катодного материала для апробации предложенной методики было выбрано из тех соображений, что в нем заведомо будет иметь место неоднородное распределение концентрации кислородных вакансий в кристаллитах оксида бария, то есть может наглядно проявиться зависимость параметров *a* и *D* от температуры. При этом верхнее значение интервала температур измерений было ограничено максимальной регистрируемой измерительной системой плотностью тока термоэмиссии (не более 120 мA/см²). На рис. 3 в окне регистрации в качестве примера показана одна из вольт-амперных характеристик катода в интервале напряжений 0...130 В.

На рис. 5 приведен участок вольт-амперной характеристики катода для области тока насыщения термоэмиссии катода при температуре 780 °C, а на рис. 6 – участок вольт-амперной характеристики для области ограничения тока пространственным зарядом при той же температуре. Экстраполяция кривой рис. 5 позволяет найти плотность тока насыщения при данной температуре, то есть величину работы выхода «по полному току» и средний размер частей кристаллитов оксида бария, с которых имеет место максимум тока при данной температуре, а величина напряжения, при котором имеет место излом на зависимости рис. 6, – среднее расстояние между эмитирующими





частями кристаллитов оксида бария. На рис. 7 приведена температурная зависимость работы выхода плохо активированного металлопористого катода в интервале температур 760...840 °C. Отметим, что перед прогревом катода при температуре 1150 °C температурный коэффициент работы выхода составлял 16·10⁻⁴ эВ/град, а после прогрева он снизился до 5·10⁻⁴ эВ/град. В таблице – сводка параметров термоэмиссии катода, генерируемая программой обработки результатов измерений. На рис. 8 приведена температурная зависимость среднего размера частей кристаллитов оксида бария, с которых имеет место максимум термоэмиссии при данной тем-

۲

пературе, а	на рис.	9 – температур	эная зависим	ость среднего	расстояния м	между	максимально
эмитирующ	ими пр	и данной темпе	ратуре частя	ми кристаллит	ов оксида бар	рия.	

П	2015 05 20 14 22 22
Дата и время	2015-05-20, 14-32-23
Диафрагма, В	0
$T_{\rm K}$, ^o C	780
<i>d</i> , мм	0,93
ф, ЭВ	2,07
K_1	234
<i>a</i> , mm	7,95E-03
η	1,6525
بح	-1,9048
$D = x_m, \text{ MM}$	3,15E-02
U_{s} , B	28,8
<i>j_s</i> , А/см ²	1,54E-02
<i>I_s</i> , A	1,21E-04
<i>I</i> ₂ , A	2,32E-05
<i>U</i> ₂ , B	9,21









۲

۲





Рис. 8. Температурная зависимость среднего размера частей кристаллитов оксида бария, с которых имеет место максимум термоэмиссии при данной температуре





5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 10 приведены расчетные зависимости работы выхода оксида бария от концентрации кислородных вакансий при различных значениях температуры, а на рис. 11 – расчетные зависимости работы выхода оксида бария от температуры при различных значениях концентрации кислородных вакансий, взятые из работы [7].



Рис. 10. Расчетные зависимости работы выхода оксида бария от концентрации кислородных вакансий при различных значениях температуры

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

۲



В. И. Капустин, И. П. Ли, А. В. Шуманов

Рис. 11. Расчетные зависимости работы выхода оксида бария от температуры при различных значениях концентрации кислородных вакансий

При измерении работы выхода катодного материала на основе оксида бария при каждом значении температуры, вследствие экспоненциальной зависимости тока термоэмиссии от величины работы выхода, реально регистрируется ток с участков кристаллитов оксида бария, в которых концентрация кислородных вакансий соответствует минимуму на соответствующей температурной зависимости рис. 10. При этом концентрация кислородных вакансий на данных участках кристаллитов оксида бария также соответствует минимуму данной температурной зависимости.

При увеличении температуры материала регистрируется ток термоэмиссии с соседних участков кристаллитов оксида бария, расположенных ближе к зернам вольфрама, в которых концентрация кислородных вакансий выше, чем в предыдущем случае, так как минимумы на кривых рис. 10 с ростом температуры сдвигаются вправо, в сторону увеличения концентрации кислородных вакансий. В результате цикла измерений термоэмиссии при возрастающих значениях температуры осуществляется, по сути, «зондирование» участков кристаллитов оксида бария по параметру возрастания концентрации кислородных вакансий от периферийной части кристаллита до области генерации кислородных вакансий на границе «зерно вольфрама - кристаллит оксида бария». Это дает основание представить модифицированную модель структуры металлопористого катода (вид катода сверху), показанную на рис. 12. Эта модель является детализацией рис. 1 (вид катода в разрезе) и отражает факт формирования кристаллитов оксида бария именно вокруг зерен вольфрама, которые в общем случае могут состоять из нескольких кристаллитов вольфрама, как и показано на рисунке. Данная модель согласуется с результатами, приведенными на рис. 8 и 9. На рис. 12, как и на рис. 1, 1 – зерно алюмината; 2 – кристаллит вольфрама; 3 – кристаллит оксида бария, образовавшийся по реакции (1); 4 – пора; 5 – область кристаллита оксида со сравнительно невысокой концентрацией кислородных вакансий, которая увеличивается при переходе к области 6 и затем к области 7. При этом дополнительная генерация кислородных вакансий в кристаллитах оксида бария, образовавшихся по реакции (1) и уже содержащих некоторую исходную концентрацию кислородных

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲





Рис. 12. Модифицированная модель структуры металлопористого катода

вакансий *x*, происходит в результате дальнейшего взаимодействия кристаллитов оксида бария с зернами вольфрама по реакции

$$\operatorname{BaO}_{(1-x)} + (x_1 - x) / 3 \cdot W \to (x_1 - x) / 3 \cdot WO_3 \uparrow + \operatorname{BaO}_{(1-x_1)},$$
(23)

где $x_1 > x$, причем вновь образовавшиеся вакансии диффундируют из области 7 (см. рис. 12) в сторону области 5. Соответственно с ростом температуры средний размер активных центров регистрируется в последовательности $a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_3$, а среднее растояние между активными центрами – в последовательности $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow D_3$. То есть с ростом температуры измерений происходит, как отмечалось выше, последовательное «зондирование» участков кристаллитов оксида бария со все более возрастающей концентрацией кислородных вакансий. При этом сами кристаллиты оксида бария, очевидно, остаются «на своем месте».

Кристаллиты бария, первоначально образующиеся по реакции (1), могут диффундировать, в соответствии с рис. 12, на поверхность зерен *1* алюмината и (в общем случае) на поверхность зерен *2* вольфрама. При этом в той части кристаллитов, которые продиффундировали на поверхность зерен *2*, более интенсивно будет протекать и реакция (23), сопровождающаяся увеличением концентрации кислородных вакансий. Поэтому верхним пределом величины *D* будет ($L_1 + L_2$), где L_1 – средний размер зерен вольфрама, L_2 – средний размер зерен алюмината, а нижним пределом – величина несколько меньше L_1 . В то же время для плохо активированного катода верхним пределом величины *a* будет величина L_2 , а нижним пределом – величина $L_1/2$.

Приведенные на рис. 11 температурные зависимости иллюстрируют существенное изменение температурного коэффициента работы выхода с изменение концентрации кислородных вакансий именно в области умеренных значений температуры катода, что и было использовано нами при апробации методики контроля термоэмиссионной неоднородности катодных материалов. Данное обстоятельство может быть также использовано для контроля степени активирования оксидной фазы катода – оксида бария при высокой температуре непосредственно при измерении температурного коэффициента работы выхода материала.

Ð

6. ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и аппаратура, позволяющие определять геометрические параметры активных центров термоэмиссии на поверхности катодных материалов: средние размеры активных центров термоэмиссии и средние расстояния между активными центрами.

2. Разработана методика прецизионных измерений работы выхода и температурного коэффициента работы выхода катодных материалов в наиболее информативном интервале температур катодного материала, которая позволяет регистрировать степень активирования активных центров термоэмиссии.

3. Разработанные методики могут быть использованы при разработке новых катодных материалов, технологий их изготовления и активирования, а также при серийном производстве катодов для их выборочного технологического контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gartner, G. Emission properties of top-layer scandate cathodes prepared by LAD / G. Gartner, P. Geintter, A. Ritz // Appl. Surf. Sci. – 1997. – No 111. – P. 11 – 17.

2. Козлов, В. И. Технология и свойства металлопористых катодов для СВЧ-приборов / В. И. Козлов // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1980. – Вып. 6 (709). – 66 с.

3. Schoenbeck, L. Investigation of reactions between barium compounds and tungsten in a simulated reservoir hollow cathode environment / L. Schoenbeck // In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Materials Science and Engineering. Georgia Institute of Technology. – February 2005. – 118 p.

4. Добрецов, Л. Н. Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М.: Наука, 1966. – 564 с.

5. Царев, Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп / Б. М. Царев. – М.: Энергоиздат, 1961. – 235 с.

6. **Капустин, В. И.** Расчет температурной зависимости работы выхода окиси бария / В. И. Капустин // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1991. – Т. 55, № 12. – С. 2455 – 2458.

7. **Капустин, В. И.** Физико-химические основы создания многокомпонентных оксидсодержащих катодных материалов / В. И. Капустин // Перспективные материалы. – 2000. – № 2. – С. 5 – 17.

Статья поступила 24 августа 2015 г., после переработки – 17 ноября 2015 г.

Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы

۲

УДК 621.385.73

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КРУПНОГАБАРИТНЫЕ КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УЗЛЫ

В. И. Алехина, Д. С. Королев, С. В. Королев

Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина, г. Москва

Рассмотрены принципы создания крупногабаритных катодно-подогревательных узлов с площадью эмитирующей поверхности в несколько сотен квадратных сантиметров

КС: низкотемпературный катодно-подогревательный узел, площадь эмитирующей поверхности

LOW-TEMPERATURE LARGE-SIZE CATHODE HEATING UNITS

V. I. Alekhina, D. S. Korolev, S. V. Korolev

All-Russian Electrotechnical Institute named after V.I. Lenin, Moscow

The principles of creating large-size cathode heating units with the emitting surface area equal to several hundreds of square centimeters have been considered.

Keywords: low-temperature cathode-heating unit, emitting surface area

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективность применения электронных пучков для генерации мощных электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона, транспортировки энергии и т. д. стимулирует разработку высоковольтных сильноточных инжекторов электронов. Применяемые в высоковольтных инжекторах электронов электронно-оптические системы (ЭОС) на основе оптики Пирса характеризуются низким удельным первеансом, ограниченным электрической прочностью. Предельная плотность токоотбора в таких инжекторах не превышает 10 А/см². Поэтому достижение величин токов в пучке на уровне тысяч ампер возможно либо путем применения многолучевых систем, либо за счет развития площади эмиттера до сотен и тысяч квадратных сантиметров.

2. КПУ-400-БНР

В данной работе для формирования мощного релятивистского пучка электронов предложено использовать инжектор с кольцевым термоэлектронным эмиттером. Результаты расчета ЭОС инжектора показали, что при токах в пучке 500 и 1000 А и энергии 500 кэВ форма эмитирующей поверхности должна представлять собой поверхность усеченного конуса с диаметром 400 мм, длиной образующей 30 мм и углом при вершине 120°.

Инжектор должен обеспечить компрессию электронного пучка более 50. Необходимость

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

формирования остросфокусированного пучка предъявляет жесткие требования к формоустойчивости и шероховатости эмитирующей поверхности. В работах [1, 2] рассмотрено влияние шероховатости поверхности эмиттера на радиус релятивистского электронного пучка (табл.1).

	-1
таолина	
	-

Шероховатость, мм	1,0	0,3	0,1	0,03	0,01
Радиус пучка, мм	36,4	16,3	7,8	3,5	1,64

То есть шероховатость не должна превышать 10...20 мкм.

Там же показано – увеличение площади эмиттера выдвигает жесткие требования к его формоустойчивости и допуску на его осевое и радиальное смещения (табл. 2).

T	-
Гаолина	
таолица	-

Тип катода	Диаметр, мм	Допуск на осевое смещение ΔL , мм	Относительный допуск
КУ-7-МСР	7	±0,05	±0,71
КУ-75-ГЦ	75	±0,30	$\pm 0,40$
КУ-150-ГЦ	150	±0,50	±0,33
КУ-400-БНР	400	±0,05	±0,12

Требование на формоустойчивость должно лежать в тех же пределах, что и допуск на осевое смещение, и иметь аналогичную зависимость от диаметра. Аналогично допуск на точность изготовления и формоустойчивость эмиттера не должны превышать $\pm 0,5$ мм и погрешность его установки относительно оси инжектора не должна превышать $0,1^{\circ}$.

Предусматривалось, что при разработке инжектора его испытания должны проводиться не в составе вакуумного прибора, а на стенде. При отработке конструкции КПУ приходилось заменять отдельные элементы КПУ и ЭОС. Поэтому, учитывая сложность конструкции КПУ и единичный характер изготовления, рациональным решением было изготовить его разборным.

Конструкция катода и технология его изготовления должны обеспечить:

возможность эксплуатации в разборных вакуумных системах при давлении (1...5)·10⁻⁵ Торр;
 возможность создания КПУ с площадью эмитирующей поверхности в несколько сотен квадратных сантиметров;

3) возможность многократного экспонирования на воздухе;

4) высокую формоустойчивость эмиттера;

5) высокую точность изготовления элементов КПУ и его сборки;

6) отсутствие осевого смещения эмиттера относительно элементов ЭОС;

7) возможность замены как всего катода, так и отдельных его частей: эмиттера, подогревателя, прикатодных электродов.

Учет данных особенностей должен осуществляться как при разработке конструкции КПУ и технологии его изготовления, так и при проведении анализа тепловых полей, термомеханических деформаций, перемещений и напряжений в элементах КПУ и ЭОС под действием тепловых потоков от подогревателя.

В технической литературе отсутствуют сведения о КПУ с площадью эмитирующей поверхности более 20 см². Катодные же узлы отпаянных СВЧ-приборов, таких, как клистроны и

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы

и магнетроны, не удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. Поэтому работа носила пионерский характер и потребовала решения ряда инженерных и научных проблем, связанных с преодолением технических и технологический трудностей.

Внешний вид КПУ-400-БНР представлен на рис. 1. КПУ выполнен разборным и состоит из охлаждаемого водой корпуса, узла подогревателя, узла эмиттера и прикатодных электродов.

Радиационный подогреватель, выполненный в виде многозаходной спирали Архимеда, смонтирован на основании из стали марки X18H10T. Десять непокрытых спиралей подогревателя изготовлены из сплава ВА и закреплены в керамических изоляторах из алунда.

Между спиралями подогревателя и корпусом расположены два ряда экранов. Концы спиралей расположены в вершинах равностороннего десятиугольника и приварены к корпусу керна. Внешний вид подогревателя представлен на рис. 2

Конструкция подогревателя обеспечивала высокую степень изотермичности поверхности эмиттера. Неизотермичность составляла менее 10 °C.

Величина магнитного поля, создаваемого подогревателем при рабочих температурах, равна: азимутальная менее 5 Э, радиальная 20 Э, вертикальная (осевая) 10 Э. В случае противоположной намотки соседних спиралей при рабочих температурах величина магнитного поля составляла: азимутальная составляющая 10 Э, радиальная составляющая 10 Э и осевая 5 Э.

Максимум всех полей – в середине катода. При удалении от поверхности на 10 мм убывание поля – менее 30 %.

Узел эмиттера состоит из двух колец, к которым с помощью восьмидесяти плоских танталовых пружин крепится эмиттер (рис. 3). По форме эмиттер представляет собой усеченный конус с углом при вершине 120° и длиной образующей 30 мм. Площадь эмиттера – 36000 мм². Геометрические размеры и форма эмиттера определены из результатов анализа ЭОС.

Керн эмиттера изготавливался из ленты сплава HB-3В толщиной 1 мм. Из-за отсутствия номенклатуры никеля необходимых размеров, керн изготавливался в виде сварного полого цилиндра с последующим выдавливанием керна нужного размера и профиля. Данная технология позволяет изготавливать керны



Рис. 1. Внешний вид КПУ-400-БНР



Рис. 2. Внешний вид подогревателя



Рис. 3. Крепление эмиттера

практически неограниченных размеров. Эмиссионное покрытие осуществлялось по технологии [3]. Внешний вид эмиттера представлен на рис. 4.

Прикатодные электроды выполнены из стали XI8H10T. Геометрические размеры и форма электродов были определены в результате анализа и синтеза ЭОС.

В. И. Алехина, Д. С. Королев, С. В. Королев



Рис. 4. Эмиттер КПУ-400-БНР

С целью уменьшения влияния деформаций в результате нагрева, был применен ряд технологических мер, направленных на минимизацию изменения формы элементов КПУ в процессе эксплуатации. Для этого все заготовки отжигались в течение 30 мин в вакууме при температуре 1300 К и проходили повторный отжиг после черновой и чистовой обработки при температуре 1300 К в течение 30 мин.

3. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ С УЧАСТИЕМ КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

В инжекторах электронов с крупногабаритными КПУ из-за значительных, достигающих десятков киловатт тепловых потоков, идущих с КПУ, эмитирующая поверхность, являющаяся частью ЭОС, и система формирования электронного потока испытывают значительные термоупругие деформации и перемещения, приводящие к нарушению условий формирования электронного потока. Поэтому на этапе проектирования ЭОС СВЧ-прибора необходимо проведение комплексного анализа, заключающегося в определении:

- характеристик тепловых полей элементов КПУ и ЭОС в условиях сложного теплообмена;

- характеристик полей термоупругих перемещений, деформаций и напряжений;
- влияние термоупругих перемещений на формирование электронного потока.

Результаты такого анализа должны служить фундаментом для обоснованного выбора материалов элементов КПУ и ЭОС и проведения, в случае необходимости, корректировки геометрических размеров и формы элементов ЭОС. Отдельным вопросам проведения такого анализа посвящен ряд работ [4, 5], в которых рассмотрены аналитические методы определения тепловых полей и термоупругих деформаций элементов ЭОС СВЧ-приборов. Однако, несмотря на очевидные преимущества аналитических методов, связанных в первую очередь с устойчивостью решения, поиск аналитических решений для КПУ и ЭОС сложной конфигурации не всегда оправдан, так как приводит к трудноразрешимым, громоздким уравнениям. Не случайно лишь для незначительного числа конструкций СВЧ-устройств (КПУ торцевого типа, подогреватели, аноды и оболочки приборов) получены аналитические решения, позволяющие всесторонне анализировать их функционирование.

Для КПУ и ЭОС сложной конфигурации, состоящих из разнородных по теплофизическим и термоупругим свойствам материалов, наиболее приемлемыми методами расчета тепловых полей, термоупругих перемещений, деформаций и напряжений являются численные методы, и в частности метод конечных элементов [6], получивший развитие в работах [7, 8].

Отличительная особенность полученного ниже решения связана с рассмотрением случая нестационарной задачи термоупругости с учетом зависимости теплофизических и прочностных свойств материалов элементов КПУ и ЭОС от температуры, времени, величины деформаций и напряжений [9]. Используемые нелинейные граничные условия позволяют учитывать тепловыделения в элементах при протекании тока, конвективный и лучистый теплообмен в многосвязных аксиально-симметричных элементах.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016
Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы

۲

Можно показать, что с приемлемой для практики точностью анализ термоупругих деформаций может быть выполнен в предположении пренебрежительно малого влияния деформации на температурные поля. В этом случае анализ тепловых полей, проводимый независимо от термоупругих перемещений, представляет сопряженную задачу нестационарной теплопроводности неоднородного тела, состоящего из *n* элементов сложной формы, выполненных из разнородных материалов. Следуя методу Ротэ, нестационарная задача теплопроводности может быть сведена к стационарной, сопряженной задаче теплопроводности.

Можно показать, что в вариационной формулировке задача определения тепловых полей в условиях сложного теплообмена при нелинейных граничных условиях связана с минимизацией функционала вида:

$$\bar{j} = \int_{V} \left\{ \lambda(T,M) \cdot \operatorname{grad}^{2} T(M) / 2 - \int_{T_{0}}^{T(M)} q_{v}(M,T) \right\} dv + \int_{F} \left\{ \int_{T_{0}}^{T(P)} f(P,T) dT \right\} dF, \quad (1)$$

где $\lambda(T, M)$ – коэффициент теплопроводности; T(M) – распределение температуры; $q_{\nu}(M, T)$ – мощность внутреннего энерговыделения; f(P, T) – функция, характеризующая условия теплообмена на границе.

При выполнении условий

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \overline{q_{v,k}}[M_n, T_{n,k}^*(M_n)]}{\partial T_{n,k}} \leq 0, \\ \frac{\partial \overline{f_{n,k}}[P_n, T_{n,k}^*(P_n)]}{\partial T_{n,k}} \geq 0, \\ \frac{\partial f_{n,s,k}[P_n, T_{n,k}^*(P_n)]}{\partial T_{n,s,k}} \geq 0 \end{bmatrix}$$

$$\int_{F} \left\{ \int_{T_0}^{T(M)} f(P,T) dT \right\} dS_n = \int_{S_n} \left\{ \int_{T_0}^{T(P)} f_n(P,T) dT \right\} dF + \int_{S_s} \left\{ \int_{T_0}^{\Delta T(P)} f_s(P,\Delta T) dT \right\} dS_s$$

с граничными условиями $\lambda_n(P_n) \cdot \operatorname{grad}[T_{n,k}(M_n)] \cdot n_n(P_n) + f_{n,k}[P_n, T_{n,k}(P_n)] = 0$, условиями сопряжения $\lambda_n(P_s) \cdot \operatorname{grad}[T_{n,k}(P_s)] + \overline{f}_{n,s,k}[P_s, \Delta T_{n,s,k}(P_s)] = 0$, начальными условиями для момента времени k $T_{n,k}(P_s) = f'(P_s, t_{n,k}) = f'(P_s)$, гле

$$\overline{q_{v,k}}[M_n, T_{n,k}(M_n)] = q_{v,k}[M_n, T_{n,k}(M_n)] - C_n[M_n, T_{n,k}(M_n)] \cdot \frac{T_{n,k}(M_n) - T_{n,k-1}(M_n)}{\Delta t_k}$$
$$\overline{f_{n,k}}[M_n, T_{n,k}(P_n)] = f_{n,k}[P_n, T_{n,k}(P_n)] - C_n[P_n, T_{n,k}(P_n)] \cdot \frac{T_{n,k}(P_n) - T_{n,k-1}(P_n)}{\Delta t_k}.$$

В случае конвективно-лучистого теплообмена, характерного для систем с катодно-подогревательными узлами:

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

73

$$\begin{split} f_{n,k}\big[P_n,T_{n,k}(P_n)\big] &= \alpha\big[P_n,T_{n,k}(P_n)\big] \cdot \big[T_{n,k}(P_n) - T_c(P_n)\big] + \varepsilon_n \cdot \sigma_0 \cdot T_{nk}^4(P_n) - \\ &-\varepsilon_n \cdot \sum_{j=1}^m \int_{S'} q_{0,j} dF_{k-j} - \varepsilon_n \sigma_0 \cdot \sum_{j=m+1}^{N_1} \int_{S'} \varepsilon_j \cdot T_{nk}^4(P_n) dF_{k-j} \,, \end{split}$$

где $\alpha[P_n, T_{n,k}, (P_n) - коэффициент теплоотдачи; <math>T_c(P_n)$ – температура среды; ε_n – коэффициент теплового излучения поверхности; $q_{0,j}$ – эффективные потоки излучения; $F_{k,j}$ – угловые потоки излучения; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; N_1 – число поверхностей, между которыми происходит теплообмен излучением; m – число поверхностей с диффузным отражением; $N_1 - m - 1$ – число поверхностей с зеркальным отражением.

Эффективные потоки определяются из систем уравнений вида: для диффузно отражающих поверхностей

$$\begin{cases} q_{0,k} = (1 - \varepsilon_k) \sum_{j=1}^m \int_{S'} q_{0,j} dF_{n-j} + \varepsilon_k \sigma_0 T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) \sigma_0 \sum_{j=m+1}^{N_1} \varepsilon_j T_j^4 d F_{k-j'}, \\ q_{0,k} = \sum_{j=1}^m \int_{S'} q_{0,j} dF_{n-j} + q_k + (1 - \varepsilon_k) \sigma_0 \sum_{j=m+1}^{N_1} \int_{S''} \varepsilon_j T_j^4 d F_{k-j'}, \end{cases}$$

для зеркально отражающих поверхностей

$$\begin{cases} q_{j,k} = \sum_{j=1}^{m} \int_{S'} q_{0,j} dF_{n-j} + \sigma_0 \sum_{j=m+1}^{N_1} \varepsilon_j T_j^4 dF_{k-j}, \\ \sigma_0 T_k^4 = \frac{q_k}{\varepsilon_k} + \sum_{j=1}^{m} \int_{S'} q_{0,j} dF_{n-j} + \sigma_0 \sum_{j=m+1}^{N_1} \int_{S''} \varepsilon_j T_j^4 dF_{k-j}. \end{cases}$$

Совокупность уравнений для всех частей КПУ и ЭОС в сочетании с граничными и начальными условиями составляют математическую формулировку сопряженной задачи теплообмена.

В стационарной точке функционал достигает минимума на распределении температур $T^*_{n,k}(M_n)$ и $T^*_{s,k}(P_n)$, удовлетворяющих помимо уравнения граничным условиям, при выполнении совокупности неравенств для всех возможных значений температур. Это распределение единственное, а минимум функционала является абсолютным.

При численной минимизации функционала, следуя методу конечных элементов, распределение температур в элементах КПУ и ЭОС определяется в конечном числе узлов *m* при предположении линейной связи между температурой в любой точке замкнутой области и температурой узлов, лежащих на границе этой области.

Тепловые поля, рассчитанные путем минимизации функционала (1), служат исходной информацией для определения полей термоупругих напряжений, деформаций и перемещений элементов КПУ и ЭОС СВЧ-устройств.

Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы

 $(\blacklozenge$

В свою очередь, можно показать [10], что определение термоупругих напряжений связано с минимизацией потенциальной энергии термоупругой деформации – из всех возможных напряжений, деформаций и перемещений реализуются те, при которых потенциальная энергия термонапряженного состояния минимальна. В аксиально-симметричном случае функционал, определяющий потенциальную энергию, имеет вид:

$$\Pi = \left\{ \iint_{F} \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{1+\nu}{1-\nu} \left(\frac{du}{dr} + \frac{d\omega}{dz} + \frac{u}{r} - 3\alpha T \right)^{2} + \left(\frac{d\omega}{dz} - \frac{du}{dr} \right)^{2} + \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right)^{2} + \left(\frac{du}{dr} - \frac{d\omega}{dz} \right)^{2} + \frac{3}{2} \left(\frac{du}{dz} + \frac{d\omega}{dr} \right)^{2} \right] r dr dz \right\}$$
(2)

с учётом ограничений на величину термоупругих напряжений

$$\sigma_{\gamma\gamma} \leq \sigma_{\gamma} don,$$

 $\sigma_{ZZ} \leq \sigma_{Z} don,$
 $\sigma_{\phi\phi} \leq \sigma_{\phi} don,$

где v – коэффициент Пуассона; F – площадь поперечного сечения тела вращения; E – модуль упругости Юнга; ω – осевые перемещение; u – радиальные перемещения; α – коэффициент термического расширения; T – температура; σ_{rr} , σ_{zz} , $\sigma_{\phi\phi}$ – радиальные, осевые и азимутальные угловые напряжения; $\sigma_{r_{\perp}Aon}$, $\sigma_{c_{\perp}Aon}$ – радиальные, осевые и азимутальные угловые напряжения.

Вариация функционала (2) позволяет определить термонапряженное состояние, а величина функционала может служить критерием оптимальности конструкции, т. е. при сравнении термонагруженного состояния альтернативных вариантов КПУ предпочтение в большинстве случаев следует отдавать конструкции, обладающей наименьшим значением потенциальной энергии термоупругой деформации, что обеспечивает выбор конструкции максимальной жесткости и формоустойчивости.

Минимизация функционалов (1), (2) осуществлена методом конечных элементов [9].

Разработанный пакет программ использован для расчета тепловых полей и термонапряженного анализа влияния термоупругих перемещений на формирование релятивистского электронного пучка в ЭОС с центробежной фокусировкой мощного ЭЛП. Расчет температурного поля КПУ выполнен при температуре эмиттера 1400 К.

Зависимости температуры отдельных элементов КПУ (см. цифры в кружках на рис. 5) от мощности накала приведены на рис. 5. Там же показаны результаты экспериментальных исследований.

Анализ результатов свидетельствует о следующем:

 – благодаря охлаждению корпуса водой температуры всех элементов КПУ лежат ниже температур, допускающих длительную эксплуатацию выбранных конструкционных материалов, и не должны влиять на эмиссионные параметры эмитирующего покрытия;

конструкция подогревателя и способ его крепления обеспечивают высокую изотермичность эмиттера (максимальное различие температуры по эмиттеру составляет 10 К);

– максимальный градиент температуры лежит в области крепления эмиттера и керна подогревателя к корпусу катода, поэтому с целью снижения термоупругих напряжений необхо-

۲

2(529).indd 75



димо обеспечить независимое перемещение кернов эмиттера и подогревателя относительно корпуса КПУ (в конструкции КПУ данное требование реализовано за счет крепления эмиттера к корпусу с помощью плоских танталовых пружин и наличия термокомпенсирующих зазоров между корпусом КПУ и керном подогревателя).



Рис. 5. Конструкция КПУ-400-БНР и распределение теплового поля: *I* – корпус; *2* – токоподвод; *3*, *8* – прикатодный электрод; *4* – кольцо; *5* – корпус подогревателя; *6* – подогреватель; *7* – защитный электрод; *9* – эмиттер; *10* – стопор; *11* – экран; *12* – кольцо

Результаты эксперимента указывают на высокую степень достоверности результатов расчета и возможность использования разработанной методики.

Данные расчета тепловых полей использованы для определения термоупругих перемещений, деформаций и напряжений в элементах КПУ и ЭОС. На рис. 6 приведены результаты расчета зависимости перемещений элементов КПУ от мощности накала, которые свидетельствуют о значительных перемещениях эмиттера относительно прикатодных электродов, что должно сказаться на формировании электронного потока в ЭОС. Сравнение результатов расчета и измерения перемещений, выполненных теневым методом [12], показывает их удовлетворительное совпадение. Расхождение составляет для радиальных перемещений 2...3 %, а для осевых – 20 %, что связано, по-видимому, с низкой точностью измерения малых перемещений.

Для изучения влияния термоупругих перемещений элементов КПУ и ЭОС на радиус электронного пучка в ЭОС с центробежной фокусировкой была использована программа ЭРА [12]. Результат представлен на рис. 7. Из рисунка видно, что в КПУ с эмиттером на никелевом керне возможно пятикратное увеличение радиуса потока, обусловленное тепловыми деформациями. Для эмиттера на молибденовом керне это увеличение составляет 1,5...2 раза [9].

Однако расчеты показали, что композиция «эмиссионное покрытие – молибденовый керн» не оптимальна, так как из-за различия КТР керна и покрытия термоупругие напряжения, возникающие в эмиттере, должны приводить к разрушению эмиссионного покрытия. На практике наблюдалось отслоение эмиссионного покрытия от керна либо растрескивание структуры. На рис. 8 приведен вид БН-покрытия на молибденовом керне.

Оптимизация структуры «эмиссионное покрытие – молибденовый керн», выполненная по методу, описанному выше, показала, что минимумом напряжений обладает трехслойная

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы

•

структура: БН эмиссионное покрытие, молибденовый керн, демпфирующая никелевая губчатая структура с обратной стороны керна. Толщина эмиссионного покрытия и демпфирующего слоя должна составлять половину толщины керна. Дальнейшего снижения напряжений можно достичь, вводя в никелевую губку и демпфирующий слой рений в количестве до 30 %.



Рис. 6. Зависимости радиальных (*a*) и осевых (*б*) перемещений от мощности подогревателя: — Ni-керн; --- Мо-керн



Рис. 7. Зависимость нормированного радиуса пучка от мощности накала КПУ с никелевым (1) и молибденовым (2) кернами



Рис. 8. Обратная сторона Ni-губки. Обезогажена в вакууме. В работе не была. Трещины возникли при обезгаживании (разложение карбонатов). Гладкие серые участки – место спечения контакта Ni-подслоя и Mo-керна. x120

۲

 $(\blacklozenge$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КПУ

КПУ прошел испытания на стендах лаборатории и в составе инжектора на стенде ЛЭП. Результаты испытаний представлены в протоколах и отчетах. Программа испытаний включала эмиссионные испытания, испытания на надежность при сроке службы, на влияние хранения в условиях технического вакуума, на влияние разгерметизации КПУ на эмиссионные параметры.

Эмиссионные испытания проходили при T = 1200...1250 К на стенде в диодном режиме. Давление в испытательном стенде было $1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Испытания проводились в импульсном режиме при длительности импульсов 40...200 мкс и частоте следования импульсов 0,1...1,0 Гц. Схема генератора приведена на рис. 9.

На рис. 10 представлены зависимости плотности тока эмиссии от напряжения для ряда температур при зазоре анод-катод 5 мм. На том же рисунке приведена зависимость токоотбора от напряжения, рассчитанная по закону Ленгмюра-Чайльда. Необходимо отметить отличие реализованного токоотбора от закона степени 3/2, что связано с неравномерностью тока эмиссии по поверхности катода (рис.11). Максимальная величина токоотбора 1000 А при температуре 1200 К была ограничена пробоями промежутка анод-катод.



Рис. 9. Схема генератора импульсов

Рис. 10. Эмиссионные характеристики

Катод КПУ-400-БНР многократно экспонировался на воздухе, в отдельных случаях более 1000 ч, и после прогрева при температуре 1200...1250 К восстанавливал свои эмиссионные свойства.

Эксплуатация КПУ-400-БНР в составе инжектора и анализ причин нестабильной работы узла показали, что нестабильность эмиссии была обусловлена, прежде всего, загрязнениями вакуумной системы парами масла. Определенные проблемы возникли и из-за высокого напряжения накала – более 70 В. Потребовалась разработка источника питания постоянного напряжения мощностью 10 кВ с минимальной величиной пульсации амплитуды.

Токоотбор КПУ-400-БНР в составе инжектора при напряжении 300 кВ был на уровне 200 А при длительности импульса 200 мкс. Данный результат на 20 % ниже расчетного и связан с эмиссионной неоднородностью, причиной, не учитывавшейся при проектировании ЭОС.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Низкотемпературные крупногабаритные катодно-подогревательные узлы



Рис. 10. Эмиссионное изображение и гистограммы распределения яркости эмиссионной картины

5. ВЫВОДЫ

1. Показана перспективность применения барий-никелевого прессованного эмиссионного материала при изготовлении крупногабаритного КПУ с площадью эмитирующей поверхности в несколько сотен квадратных сантиметров.

2. Предложено применение в крупногабаритных КПУ многозаходных спиралей Архимеда.

3. Показана возможность изготовления кернов крупногабаритных КПУ из ленты, сваривая ее в цилиндр и в дальнейшем развальцовывая его до нужной формы и размеров.

4. Разработанная методика расчета тепловых полей, термоупругих деформаций, напряжений и перемещений элементов КПУ и ЭОС произвольной конфигурации применима для общего случая теплообмена в аксиально-симметричных конструкциях. Свойства материалов и граничные условия могут зависеть от температуры. Результаты эксперимента показали достоверность результатов расчета.

Используя разработанную методику, можно оптимизировать конструкции на этапе проектирования КПУ и ЭОС с целью минимизации тепловых потерь и термоупругих напряжений, а также корректировать размеры элементов ЭОС для оптимизации условий формирования электронных пучков.

5. При проектировании подогревателя необходимо стремиться к снижению напряжения накала. Если нет каких-либо ограничений, желательно, чтобы напряжение накала не превосходило 36...48 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование возможности создания ускорителей с квазинепрерывными пучками электронов с предельно возможной плотностью тока: отчет / ВЭИ. – М., 1982. – Арх. № 3461-1102.

2. Теоретические и экспериментальные исследования вакуумного ускорителя с плазменным катодом и электростатической компрессией электронного пучка: отчет / ВЭИ. – М., 1982. – Арх. № 5985-1600.

3. Алехина, В. И. Исследование технологии изготовления, эмиссионных и вакуумных свойств губчатого прессованного оксидного катода / В. И. Алехина, Л. А. Ашкинази, С. В. Королев, А. Б. Киселев, Л. В. Логинов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 4 (340). – С. 48 – 50.

4. **Подстригач, Я. С.** Температурные поля и напряжения в элементах электровакуумных приборов / Я. С. Подстригач. – Киев: Наукова думка, 1981. – 342 с.

5. **Кошелев, В. С.** Теплофизические процессы в элементах СВЧ-приборов / В. С. Кошелев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1981.

6. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

7. **Блейвас, И. М.** Программа расчета температурного поля процесса разогрева узла электронного прибора методом конечных элементов / И. М. Блейвас, А. И. Жбанов, В. С. Кошелев, В. Н. Шевцов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 3 (363). – С. 67.

8. **Якунин, А. Н.** Программа анализа напряженно-деформированного состояния узлов электронных приборов / А. Н. Якунин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 3 (363). – С. 67.

9. Королев, С. В. Влияние термических деформаций катодно-подогревательных узлов и элементов электроннооптических систем электронно-лучевых приборов на формирование мощных релятивистских пучков / С. В. Королев, В. Н. Лазарев // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 5 (399). – С. 36 – 39.

10. **Партон, В. З.** Математические методы теории упругости / В. З. Партон, Д. И. Перлин. – М.: Наука, 1981. – 688 с.

11. Васильев, Д. А. Теневые методы / Д. А. Васильев. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

12. **Горбенко, Н. И.** Пакет программ ЭРА для автоматизации электронно-оптических расчетов / Н. И. Горбенко, В. Ц. Ильин, Г. С. Попов, В. М. Свешников // Численные методы решения задач электронной оптики. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979. – С. 34 – 60.

Статья поступила 24 апреля 2015 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 537.533.7.8

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ва⁺ НА СОСТАВ И ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА W И WO,

3. Э. Мухтаров¹, **3.** А. Исаханов¹, Б. Е. Умирзаков²

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан; ²Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан

Исследованы механизмы изменения эмиссионных свойств поверхности W и WO₂ при имплантации ионов Ba+. Получены зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов до и после имплантации ионами Ba⁺ с $E_0 = 1$ кэВ при $D \approx 8 \cdot 10^{17}$ см⁻². Обнаружено уменьшение работы выхода с поверхности W при образовании на поверхности монослойного покрытия из атомов Ba, а в случае WO₂ – монослойного покрытия из окиси Ba. При имплантации ионов Ba⁺ в WO₂ в приповерхностном слое (толщина 50...60 Å) наряду с оксидами WO₂ образуются соединения типа Ba–O, W–Ba–O.

КС: ионная имплантация, электронная структура, эмиссия вторичных электронов, фотоэлектронная спектроскопия, работа выхода, монослойные покрытия, атомная плотность, деформация, травление, ширина запрещенной зоны, оксиды

THE INFLUENCE OF Ba⁺ ION LOW-ENERGY IMPLANTATION ON COMPOSITION AND EMISSION PROPERTIES OF W AND WO,

Z. E. Mukhtarov¹, Z. A. Isakhanov¹, B. E. Umirzakov²

¹Institute of ion-plasma and laser technologies RUz AS, Tashkent, Uzbekistan; ²Tashkent state engineering university, Uzbekistan

The mechanisms of changing the emission properties of W and WO₂ surfaces at Ba+ ion implantation have been investigated. The dependencies of the secondary electron emission ratio versus the energy of primary electrons before and after Ba+ ion implantation with $E_0 = 1$ keV at $D \approx 8 \cdot 10^{17}$ cm⁻² were obtained. The decrease of work function from W surface was found out at the formation of Ba atoms monolayer coating on the surface, and in case of WO₂ – Ba oxide monolayer coating. When implanting Ba⁺ ions into WO₂, compositions of the type Ba–O, W–Ba–O are formed in subsurface layer (50...60 A thickness) alongside with WO_n oxides.

Keywords: ion implantation, electronic structure, secondary electron emission, photoelectron spectroscopy, work function, monolayer coatings, atomic density, deformation, etching, energy-gap width, oxides

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при низкоэнергетической ионной имплантации происходит резкое изменение элементного и химического состава, кристаллической и электронной структуры поверхности и приповерхностных слоев материалов, что связано с разупорядочением этих слоев и образова-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

3. Э. Мухтаров, З. А. Исаханов, Б. Е. Умирзаков

۲

нием в них различных нанокластерных фаз легирующего элемента, компонентов матрицы и их соединений [1-3]. Следовательно, ионно-легированные слои материала обладают новыми физическими свойствами. В частности, низкоэнергетическая ($E_0 = 1...3$ кэВ) высокодозная ($D \ge 5 \cdot 10^{16}$ см⁻²) ионная имплантация активных металлов (Ba⁺, Na⁺, Cs⁺) приводит к существенному росту коэффициента вторичной электронной эмиссий (КВЭЭ), квантового выхода фотоэлектронов и уменьшению удельного сопротивления поверхностных слоев материалов различной природы. Эти изменения объясняются как уменьшением работы выхода (еф) поверхности, так и увеличением эмиссионной эффективности ионно-легированных слоев. Однако не были оценены относительные роли каждого из этих факторов в изменении эмиссионных свойств исследуемых материалов. Кроме того, малоизученным является влияние низкоэнергетической ионной имплантации на состав и свойства чистых и окисленных поверхностей тугоплавких металлов.

В данной работе мы попытались выяснить механизмы изменения эмиссионных свойств поверхности W и WO₂ при имплантации ионов Ba⁺.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ионная имплантация и все исследования проводились при вакууме не хуже 10^{-6} Па. Для получения ионов Ва⁺ использовалась конструкция пушки, основанная на принципе поверхностной ионизации. Источником ионов Ва⁺ служили таблетки титаната бария. Энергия ионов E_0 варьировалась в пределах 0,5...5 кэВ, а доза ионов $D = 5 \cdot 10^{14} \dots 10^{17}$ см⁻². Исследования проводились с использованием комплекса методов: электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС) и снятия энергетической зависимости КВЭЭ. Профили распределения атомов Ва по глубине исследуемых образцов изучались методом ЭОС в сочетании с травлением поверхности ионами Ar⁺. Методика эксперимента подробно описана в [1]. Глубина зоны выхода истинно вторичных электронов (ИВЭ) исследуемых образцов определялась расчетным путем, по формулам, предложенным в [4].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами установлено [1], что для получения высокого значения КВЭЭ независимо от типа материала мишени оптимальной является энергия ионов $E_0 \approx 1$ кэВ, а доза ионов $D \approx D_{\text{нас}} \approx (6...10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, где $D_{\text{нас}} -$ доза насыщения. Поэтому в данной работе приводятся в основном результаты, полученные при $E_0 \approx 1$ кэВ и $D \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1 приведены зависимости КВЭЭ σ от энергии первичных электронов E_p для W и WO₂ до и после имплантации ионов Ba⁺ с $E_0 = 1$ кэВ при $D \approx 8 \cdot 10^{17}$ см⁻². Видно, что после ионной имплантации значения σ для образцов W и WO₂ существенно увеличиваются во всей исследуемой области E_p и происходит некоторое смещение положения максимума кривой $\sigma(E_p)$. Эти изменения могут быть связаны с уменьшением $e\phi$, изменением состава и структуры ионнолегированных слоев. Уменьшение $e\phi$ в случае W обусловлено образованием на поверхности монослойного покрытия из атомов Ba, а в случае WO₂ – монослойного покрытия из окиси Ba. В таблице приведены значения работы выхода $e\phi$, глубина зоны выхода ИВЭ λ (расчет по формулам из [4]), энергия E_{pmax} , соответствующая максимальному значению КВЭЭ σ_{max} для чистых и ионно-легированных образцов W и WO₂. Там же для сравнения приведены значения указан-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

ных параметров для W с монослойной пленкой Ва и для WO₂ с монослойной пленкой BaO, полученные методом напыления.



Рис.1. Зависимости
 с (E_p) для чистых (кривые l,2)и имплантированных и
онами Ва+ (кривые l',2')образцов W (l,l')и WO
2 $(2,2'). E_0$ = 1,0 кэВ; D = 8·1016 см-2

Вторично-эмиссионные	параметры	чистых	и ионно-легированных
	образцов W	и WO ₂	

Объект	<i>е</i> ф, эВ	λ, Å	E_{pmax} , эВ	$\sigma_{_{max}}$	$\sigma_{max}'/\sigma_{max}^*$
W	4,3	20	550 - 600	1,4	—
Ba⁺→W	2,3	15	500 - 550	2,9	2,1
W+1 монослой Ва	2,2	20	550 - 600	2,2	1,55
WO,	3,8	100	850 - 900	2,35	
$Ba^+ \rightarrow WO_2$	2,1	100	900 - 950	4,8	2,05
WO ₂ +1 монослой ВаО	2,0	100	850 - 900	4,6	2

*σ_{max} – до ионной имплантации (напыления); σ_{max} / – после ионной имплантации (напыления).

Из таблицы видно, что в случае W значение σ_{max} ионно-легированного образца значительно больше, чем для W с монослойным покрытием Ba. В данном случае изменение состава приповерхностного слоя дает определенный вклад в увеличении КВЭЭ. Если учесть, что эмиссионная эффективность Ba (для чистого Ba $\sigma_{max} \approx 0.9$) намного меньше, чем W, то простое перемешивание атомов W и Ba должно было привести к уменьшению σ_{max} . Поэтому мы предполагаем, что при ионной бомбардировке внедренные атомы Ba приводят к увеличению атомной плотности приповерхностных слоев W. Об этом также свидетельствуют некоторые смещения σ_{max} в сторону меньших энергий и уменьшение λ . При этом, как и в случае ионно-имплантированного Mo [5], образование интерметаллических соединений между атомами Ba и W нами не наблюдалось.

Как видно из рис. 2, на спектрах фотоэлектронов, снятых при hv = 10,8 эВ, ионно-легированного образца наблюдаются особенности, характерные как для чистого W, так и для Ва. Положения пиков в спектре системы Ba+W несколько отличаются от аналогичных пиков у чистого W и Ba. Это, вероятно, связано с некоторым перераспределением валентных электронов, вследствие разупорядочения приповерхностного слоя W, и деформацией решетки вновь образованного



()

твердого раствора. Для выяснения увеличения КВЭЭ при увеличении атомной плотности приповерхностных слоев нами проведены имплантации ионов Мо⁺ в поликристаллический W. При этом работа выхода поверхности практически не меняется. На рис. 3 приведены энергетические спектры ИВЭ, полученные при энергии первичных электронов $E_p = 100$ эВ, чистого W и W, имплантированного ионами Мо⁺ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 8 \cdot 10^{16}$ см⁻². Из рисунка видно, что после ионной имплантации площадь под кривой существенно увеличивается, максимум спектра смещается в сторону меньших энергий приблизительно на 0,5...1 эВ и происходит сужение его ширины. Этот эффект, по-видимому, в основном связан с увеличением атомной плотности поверхностных слоев W и некоторым уменьшением глубины зоны выхода ИВЭ.





I – чистый W; 2 – W, имплантированный ионами Ba⁺ ($E_0 = 1$ кэB; $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻²)

Рис. 3. Распределение ИВЭ по энергиям для чистого W (кривая *I*) и для W,, легированного ионами Mo (кривая *2*) с $E_0 = 0,5$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻². Энергия первичных электронов $E_p = 100$ эВ

В случае ионно-легированного WO₂ увеличение σ в основном обусловлено уменьшением е φ , а изменение состава приповерхностного слоя заметно не увеличивает значение КВЭЭ (см. таблицу). Результаты ЭОС, полученные в сочетании с послойным травлением, показали, что в случае имплантации ионов Ba⁺ в WO₂ в приповерхностном слое (толщина 50...60 Å) наряду с оксидами WO_n образуются соединения типа Ba–O, W–Ba–O. Нами предварительно методом УФЭС определены ширины запрещенной зоны WO₂ и BaO: для WO₂ $E_g = 2,8$ эB, а для BaO $E_g = 3,95$ эB. Расчеты показали, что глубина зоны выхода ИВЭ λ для BaO составляет 180...200 Å, что значительно больше, чем для WO₂. Из этих данных следует, что наличие BaO в ионно-легированном WO₂ должно приводить к существенному росту σ_{max} . По-видимому, образование различного рода оксидных соединений и наличие в них различных дефектов не приводит к существенному увеличению эмиссионной эффективности и глубины зоны выхода ИВЭ WO₂.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Влияние низкоэнергетической имплантации ионов Ва⁺ на состав и эмиссионные свойства W и WO₂

۲

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что в случае W значительное увеличение КВЭЭ при имплантации ионов Ba^+ объясняется резким уменьшением *е* ϕ и увеличением плотности приповерхностных слоев, а в случае WO_2 – в основном уменьшением работы выхода поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нормурадов, М. Т.** Энергетические спектры поверхности твердых тел, имплантированных ионами низких энергий / М. Т. Нормурадов, Б. Е. Умирзаков. – Ташкент: изд-во «Фан», 1989. – 178 с.

2. Ташьухамедова, Д. А. Формирование наноразмерных фаз в эпитаксиальных пленках кремния и изучение их физико-химических свойств / Д. А. Ташьухамедова, Б. Е. Умирзаков, Э. У. Балтаев // Поверхность, рентг., синхрот. и нейтр. исследования. – 2003. – № 8. – С. 101 – 104.

3. Умирзаков, Б. Е. Модификация поверхности Pd и Pd–Ва ионной бомбардировкой / Б. Е. Умирзаков, С. Б. Донаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 65 – 72.

4. **Бронштейн, И. М.** Вторичная электронная эмиссия / И. М. Бронштейн, Б. С. Фрайман – М.: Наука, 1969, 407 с.

5. **Нормурадов, М. Т.** Вторично-электронная и ионно-электронная эмиссия ионно-легированных образцов Мо, Pd и сплава PdBa / М. Т. Нормурадов, Г. И. Сергеев, Х. Д. Джуракулов, Б. Е. Умирзаков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1985. – Вып. 1. – С. 49 – 54.

Статья поступила 30 декабря 2015 г., после переработки 12 января 2016 г.

۲

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

 $(\blacklozenge$

УДК 621.385.6.029.64:61

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – ИНСТРУМЕНТ XXI ВЕКА (использование в медико-биологических исследованиях)

К. Д. Казаринов

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Предлагается обзор результатов экспериментальных и теоретических работ по применению терагерцового излучения в медико-биологических исследованиях за последние 10 лет – время стремительного развития данного направления, связанного с появлением на рынке технологичных источников в широком диапазоне ТГц-излучения, а также волноведущих устройств и приемников данного вида излучения.

КС: <u>терагерцовое излучение, содержание воды в биологических тканях, кожа человека, инвазивная и</u> <u>неинвазивная диагностика, механизмы биологического действия ТГц-излучения, водные биологи-</u> <u>ческие среды, мембранные клеточные структуры, окислительный стресс клетки</u>

TERAHERTZ RADIATION – THE XXI-ST CENTURY INSTRUMENT (application in medical-biological investigations)

K. D. Kazarinov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS

A review concerning the results of theoretical and experimental work on application of terahertz radiation in medical-biological investigations during the recent 10 years – the time of rapid development of this trend, connected with the appearance on the market of high-tech sources in a wide range of THz-radiation as well as waveguide devices and receivers of such kind of radiation has been proposed.

Keywords: <u>terahertz radiation, water content in biological tissues, human skin, invasive and non-invasive</u> <u>diagnostics, mechanisms of biological effect of THz radiation, aqueous biological media, memb-</u> <u>rane cellular structures, oxidative cell stress</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние 20 лет обнаружился значительный потенциал использования ТГц-излучения для спектроскопического исследования и неразрушающего контроля диэлектрических материалов, что нашло широкое применение этого вида излучения для интравидения с высоким разрешением, томографии и ТГц-локации отчасти также из-за особенностей проникновения ТГц-излучения сквозь одежду, дым, туман, бумагу, дерево, пластмассу, керамику и другие материалы [1]. Непрерывно развиваются новые подходы к автоматической классификации больших наборов данных ТГц-спектроскопии [2].

К ТГц-диапазону принято относить область электромагнитного излучения приблизительно

86

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

от 0,3 до 20 ТГц. Следует отметить, что многие исследователи биологического действия микроволнового излучения включают в ТГц-диапазон и результаты, полученные за пределами нижней границы этого диапазона – в области 0,1 ТГц, и называют его околотерагерцовым диапазоном. Так что в данной работе будут представлены ссылки и на некоторые из этих исследований.

Публикация данного обзора продиктована необходимостью осмысления результатов динамичного развития медико-биологического использования ТГц-излучения и роста числа публикаций по данной тематике, которое стремительно увеличивается из года в год.

Пионерские работы в данной области были стимулированы созданием на АО «НПП «Исток» им. Шокина» в 1960-х годах первых в мире промышленных генераторов ТГц-излучения на лампах обратной волны (ЛОВ). Их отличительными особенностями были частотная широкополосность и выходная мощность излучения не менее нескольких милливатт, что позволяло использовать данные генераторы в спектроскопических устройствах [3]. Однако из-за принципиальных ограничений технологического порядка до сих пор не удалось продвинуться на основе базовой конструкции этих приборов за пределы верхней части частотного диапазона в 2...3 ТГц.

Известны применения твердотельных электронных устройств в диапазоне ниже 0,5 ТГц: генераторы на туннельных диодах, диодах Ганна, биполярных транзисторах [4], выходная мощность которых обратно пропорциональна частоте излучения. Используются также лазеры на свободных электронах, как источники ТГц-излучения, но из-за технологических особенностей их применение пока крайне ограничено [5].

Предложена идея создания компактных твердотельных источников непрерывного ТГц-излучения, которые могут быть построены на основе внутренних джозефсоновских переходов в слоистом $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$, или, как его еще называют, BSCCO, который представляет собой высокотемпературный сверхпроводник. По аналогии с лазерным резонатором, возбуждение электромагнитного резонанса образца генерирует когерентное состояние, в котором большее количество переходов синхронизированы по фазе [6].

Известны применения новых физических механизмов для создания генераторов излучения этого диапазона. Один из таких механизмов проявляется в магнитоупорядоченных структурах, а именно на контакте металлических ферромагнитных (ФМ) и антиферромагнитных (АФМ) материалов. В этих условиях ТГц-волны возбуждаются за счет нарушения спинового равновесия в протекающем в этих материалах токе перпендикулярно к их поверхности. Конструкция такого спин-инжекционного генератора представлена в работе [7].

Значительный прогресс последних лет в использовании данного вида излучения связан с разработкой малогабаритных, широкополосных в короткой области ТГц-диапазона, технологичных, с достаточно высоким уровнем выходной мощности квантовых каскадных лазеров [8, 9].

Следует также отметить и значительные успехи в разработке волноведущих структур. Созданы интегрально-оптические волноводы на основе поверхностных плазмонов и направляющих структур из полимерных материалов для передачи ТГц-излучения на значительные расстояния. Кроме традиционного применения, такие волноводные каналы могут быть востребованы в компьютерных платах, где требуется передача информации на высоких частотах. Разработчики считают, что такие волноведущие структуры будут хорошо встраиваться в традиционные технологии микроэлектроники, поскольку, как было установлено, по высокодопированному кремнию могут распространяться ТГц-плазмоны [10].

Примером расширения элементной базы ТГц-устройств может служить создание приборов для контроля и преобразования излучения на основе метаматериалов. Так, в работе [11] представлен переменный аттенюатор амплитуды ТГц-сигнала, обеспечивающий максимальное ослабление до 96 % на частоте 1,39 ТГц, который предполагается использовать для оптимизации контраста изображения. Предлагается также пластина из метаматериала, которая способна изменить фазу сигнала на 90 град на частоте 1,06 ТГц.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЖНОГО ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА

Исследования биологических тканей с помощью излучения в ТГц-диапазоне частот развиваются в основном в двух направлениях. Первое – как диагностические приложения при изучении поверхности тела человека или животного, что связано с интенсивным поглощением данного излучения в поверхностных слоях кожи и малой глубиной проникновения излучения. Второе направление исследований связано с экспресс-анализом образцов тканей организма млекопитающих *in vitro*, способного в некоторых случаях заменить современную биохимическую диагностику «в пробирке».

В работе [12] выполнена верификация портативного ТГц-спектрометра на предмет возможности его использования для оценки состояния кожного покрова человека. Предварительные измерения на свиной коже показали удовлетворительные результаты. В эксперименте на людях измерялся коэффициент поглощения и преломления кожи на ладони, животе и предплечье на частотах от 0,1 до 2,0 ТГц. Кроме того, измерялись уровень гидратации каждого участка кожи, трансэпидермальной потери влаги кожи и концентрация меланина. Экспериментальные результаты показали, что диэлектрические свойства изменялись значительно для кожи с различных участков тела испытуемых, и эти данные показали высокую корреляцию с результатами измерения влажности кожи прямыми методами [12].

Пороговые значения интенсивности излучения, близкого к ТГц, а именно 94 ГГц, были установлены в работе [13]. Измерение порога тепловой чувствительности на коже в середине спины на 15 взрослых мужчинах показало (4,5±0,6) мВт/см², и это значение было сопоставимо с действием ИК-излучения ((5,34±1,07) мВт/см²). В то же время эти значения превышают более чем на порядок тепловой порог ощущения излучения частотой 2,45 ГГц ((63,1±6,7) мВт/см²).

Исследования, выполненные в работе [14], позволяют детализировать картину поглощения кожей ТГц-излучения в длинноволновой части диапазона (75...110 ГГц). Авторы этой работы рассматривают трубочки, через которые осуществляется перспирация в человеческой коже, как винтовые антенны. Предварительно были выполнены модельные расчеты для коэффициента отражения кожи в изменяющихся физиологических условиях [15]. Модельные расчеты оказались в хорошем соответствии с экспериментальными данными, которые убеждают нас в том, что трубочки пота в коже действительно могут вести себя как антенны с низкой добротностью. Таким образом, кожа человека обладает способностью отвечать на действие ТГц-излучения в диапазоне 75...110 ГГц, корректируя скорость перспирации и капиллярного кровотока, что в конечном счете проявляется в изменении частоты пульса систолического кровяного давления. Кроме того, появляется возможность для осуществления дистанционного (неинвазивного) зондирования физиологических параметров и психического состояния человека [15].

Учитывая результаты подобных исследований чувствительности кожи к ТГц-излучению,

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

авторы работы [16] исследовали влияние излучения околотерагерцовой частоты 94 ГГц на систему управления и приема сигналов в нервных окончаниях кожи, а именно на микроканальцы в нейронной цитоплазме. В этой работе было установлено, что воздействие излучения частотой 94 ГГц увеличивает скорость сборки микротрубочек нейронов гладкой шпорцевой лягушки *Xenopus*, и это увеличение связано с повышением температуры объекта исследований на несколько градусов. Механизм рассматриваемого эффекта излучения, близкого к ТГцдиапазону, авторы видят в ускорении движения и присоединения тубулина к положительному концу микроканальца и влиянии температуры на взаимодействие между микроканальцами и различными, связанными с ними белками. Полученные результаты эксперимента предлагается использовать для оценки влияния температуры на процессы сборки и разборки микротрубочек, а также на процессы передачи сигнала в сенсорных нейронах при изучении действия микроволн ТГц-диапазона.

Экспериментальные результаты, полученные при разогреве кожи человека миллиметровыми и субмиллиметровыми волнами, обнаружили необходимость в теоретических модельных расчетах данного объекта, находящегося в условиях облучения. Изучению влияния скорости циркуляции крови, теплопроводности кожи и коэффициента теплопередачи от поверхности кожи к воздушной среде на действие микроволнового излучения были посвящены теоретические исследования [17]. Оценивалось повышение температуры поверхности кожи в одномерной модели для однослойного образца (кожа) и трехслойного (кожа, жир и мышца) при воздействии излучения. Вычисления, выполненные с помощью преобразований Лапласа, показали, что микроволновой разогрев поверхности кожи монотонно уменьшается в зависимости от увеличения скорости циркуляции крови в капиллярах, повышения теплопроводности поверхностных покровов человеческого тела и увеличения теплопередачи от тела к воздушной среде. Было установлено, что скорость микроволнового разогрева поверхности тела в случае использования модели с тремя слоями в 1,3...2,8 раз выше, чем при рассмотрении однослойной модели. Авторы связывают это различие с адиабатическим режимом разогрева жировой подкожной прослойки. Основным же параметром, определяющим скорость микроволнового разогрева поверхностных слоев тела человека, авторы называют коэффициент теплопередачи между поверхностью кожи и воздушной средой [17].

Влияния трубочек потовой железы на распределение температуры в коже были оценены в работе [18]. Цель этой работы состояла в том, чтобы теоретически исследовать потенциальный эффект трубочек потовой железы с определенным коэффициентом поглощения в распределении температуры в объекте при микроволновом облучении. В работе использовался коммерчески доступный пакет программ моделирования SEMCAD X^{тм}. Модель кожи состояла из страты толщиной 30 мкм, эпидермиса – 350 мкм и папиллярного (внешнего) слоя дермы толщиной 1000 мкм. Модель включала в себя пять трубочек потовой железы радиусом 60 мкм и длиной 300 мкм, отстоящих друг от друга на 370 мкм. Облучение поверхности кожи осуществлялось на частоте 94 ГГц с помощью рупора WR-10, размещенного на расстоянии 20 мкм от поверхности кожи. В модели учитывалась солевая проводимость водного раствора трубочек. Коэффициент поглощения и распределение температуры в объекте были вычислены как с учетом трубочек, так и без них. Авторы работы отмечают, что, несмотря на небольшой размер трубочек, коэффициент поглощения был значительно выше в пределах расположения трубочек, чем в папиллярном слое без учета трубочек потовой железы. Максимум поглощения микроволнового излучения был показан в области расположения трубочек потовой железы, в то время как температурный максимум сдвинулся в папиллярный слой. Так как папиллярный слой активно участвует в по-

۲

К. Д. Казаринов

глощении энергии микроволнового излучения, эффект присутствия трубочек потовой железы необходимо принимать во внимание в ноцицептивных исследованиях при изучении восприятия кожей микроволнового излучения. Как считают авторы, данное исследование представляет собой значительный шаг к более высокому пространственному разрешению цифрового моделирования кожи и показывает, что микроструктуры могут играть существенную роль в поглощении микроволнового излучения, благодаря особенностям распределения температуры в таком объекте, как кожа [18]. Роль микротрубочек исследовалась также в работе [19].

Итак, как было показано выше, наличие потовых желез играет важную роль в действии ТГц-излучения на кожу человека.

Исследовались морфологические особенности потовых желез с использованием оптической когерентной томографии для более глубокого понимания таких явлений. Обнаружилась замечательная особенность морфологии каналов, заключающаяся в их четкой спиральной структуре. Было установлено, что разброс размеров диаметра потовых желез был значительно меньше, чем изменения других структурных параметров, таких, как длина и количество витков спирали. Основываясь на данных геометрических измерений потовых каналов и диэлектрических свойств кожи в ТГц-диапазоне, была определена резонансная частота потового канала в предположении, что она функционирует как спиральная антенна. Количественные оценки показали, что резонансная частота соответствует области (0,44±0,07) ТГц.

Большинство исследований медико-биологического действия ТГц-излучения посвящены получению изображений поверхностных тканей человека с помощью импульсной спектроскопии. В то же время ощущается дефицит информации о диэлектрических свойствах тканей как поверхностных, так и внутренних органов человека, которая могла бы быть востребована для инвазивной и неинвазивной диагностики различных заболеваний, а также терапии. Кроме того, для изучения механизмов действия ТГц-излучения на организм человека необходимо знать величину поглощения ТГц-излучения отдельными компонентами органов и тканей. Данные работы [20] позволяют в значительной степени заполнить этот пробел. Авторы этого исследования измерили показатель преломления и коэффициент поглощения на частотах 0,5...2,5 ТГц для кожи, жировой ткани, поперечно-полосатой мышцы вены, нерва, крови и деионизованной воды. Измерения показали достаточно высокую воспроизводимость результатов при взятии ежедневных проб крови у одного и того же человека. Кроме того, результаты экспериментальных исследований, выполненных в этой работе, показали определяющее влияние содержания воды в препарате на величину его показателя преломления и коэффициента поглощения в ТГц-диапазоне излучений.

ТГц-спектрометры в настоящее время часто используются для регистрации ожога кожи. В работе [21] представлены результаты испытаний компактного переносного спектрометра в диапазоне 0,1...1,6 ТГц, который мог бы быть использован в полевых условиях при тушении пожаров и во время боевых действий. Испытывались образцы воды, этанола, а также ткани мышц, жира и кожи свиньи в замороженном и оттаянном виде. Измерения показали данные, сопоставимые с известными из литературы, которые были получены на стационарных ТГцспектрометрах. Анализ толщины хряща коленного сустава кролика с помощью ТГц-излучения был выполнен в работе [22] с целью отработки технологии определения ранних стадий остеопороза.

Учитывая, что терагерцовое излучение находит все более и более широкое применение в новых технологиях, предпринимаются исследования, направленные на оценку потенциальной

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

опасности этого вида излучения на здоровье человека. В работе [23] подвергались ТГц-облучению в непрерывном режиме (0,1 ТГц; 0,031 мВт/см²) делящиеся лимфоциты в течение 1, 2 и 24 ч и оценивались изменения в хромосомах. Наибольшие изменения наблюдались после 24 ч воздействия, которые авторы связывают с низкочастотными коллективными вибрационными модами в белках и ДНК. Предполагается, что наблюдаемая при ТГц-облучении клеток геномная нестабильность может привести к повышенному риску онкологических заболеваний. Четырьмя годами позже при более подробном обследовании данного эффекта в широком диапазоне частот и интенсивностей излучения авторы работы [24] не обнаружили геномное повреждение на хромосомном уровне клеток при ТГц-облучении в диапазоне 0,1...10 ТГц при интенсивности 0,04...2 мВт/см² в течение 2, 8 и 24 ч. Не было отмечено также катастрофических изменений в хромосомном аппарате *L*-клеток хомяка, которые облучались в течение 0,5 ч на частоте 0,106 ТГц при интенсивности 0,043...4,3 мВт/см² [25].

К аналогичному выводу приходят и авторы исследования [26]. Учитывая, что человеческие эмбриональные стволовые клетки (ЭСК) чрезвычайно чувствительны к экологическим раздражителям, авторы пытались исключить влияние тепловых эффектов ТГц-излучения на объект исследований. Было показано, что отсутствуют повреждения ДНК и ЭСК при действии узкополосного ТГц-излучения (2,3 ТГц) и строгом контроле температуры объекта.

В работе [27] описано действие ТГц-излучения на размножение и динамику развития дрозофил. Самок дрозофил стрессировали помещением в ограниченное пространство без корма на 2,5 ч. Часть мух в течение 30 мин подвергли облучению в диапазоне частот 0,1...2,2 ТГц. Затем облученных и необлученных мух спаривали с самцами. Исследовали потомство F1 зрелых и незрелых на момент облучения яйцеклеток (кладки на 1...2 и 9...10 сутки после облучения). Стресс вызвал отклонение динамики созревания обоих потомств от внешнего контроля (потомства мух, содержавшихся в обычных условиях). В потомстве *F1* облученных мух, происшедшем из зрелых яйцеклеток, динамика вылета имаго самцов отличалась от внутреннего контроля (потомства стрессированных необлученных мух). Численность имаго самцов уменьшилась. Динамика вылета имаго самок приблизилась к внешнему контролю. В потомстве F1 облученных мух, происшедшем из незрелых яйцеклеток, динамика созревания и численность особей существенно не отличались от внутреннего контроля. Сделан вывод о том, что воздействие ТГц-излучения на организм плодовой мушки оказывает влияние только на зрелые яйцеклетки. Что же касается механизма наблюдаемого эффекта микроволнового облучения в области ТГц, то исследователи не ушли далеко от традиционного подхода, связанного с привлечением представлений о решающем влиянии водной среды, которая разогревается при поглощении микроволнового излучения в широком диапазоне частот [28].

3. ОНКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая тот факт, что злокачественная ткань содержит более высокий процент воды, можно использовать излучение в диапазоне 0,1...3 ТГц для дифференцировки в медицинской диагностике, как в случае исследования наружных покровов тела человека, так и для контроля биологического материала во время хирургического вмешательства.

Статистика показывает, что рак молочной железы наиболее распространен среди онкологических заболеваний у женщин, т. к. составляет почти 30 % случаев заболеваний (данные американского онкологического общества за 2011 – 2012 гг.). При хирургическом вмешательстве

К. Д. Казаринов

۲

в 25...30 % случаев края вокруг опухоли нечетко распознаются, и пациенты подвергаются повторной процедуре, что увеличивает послеоперационную травму. Терагерцовое излучение позволяет повысить четкость определения границы опухоли, в отличие от рентгеновского излучения, и резко сократить количество повторных операций по поводу рака молочной железы [29]. Основанием для данной работы послужили результаты исследований, выполненных на 20 пациентах, у которых были удалены здоровые и раковые ткани молочной железы. Измерения были выполнены в диапазоне 0,15...2,0 ТГц, а результаты обследования сравнивались с гистологическими испытаниями [30].

Эта экспериментальная работа поддерживается развитием и усовершенствованием теоретических подходов и цифровых методов обработки информации. В частности, использования модели Дебая для оптимизации определения местоположения здоровой и больной ткани, а следовательно, и повышения четкости изображения [31–33].

Измерения коэффициентов поглощения и преломления здоровой и раковой тканей в широком диапазоне частот (0,2...2,0 ТГц) позволили определить участок спектра ТГц-излучения с максимальным поглощением воды, что, в свою очередь, дало возможность усовершенствовать математические модели для получения высокого контраста здоровой и больной тканей [34]. В Сеульском университете (Республика Южная Корея) для повышения контраста изображения больной и здоровой тканей использовались наночастицы золота, что позволило повысить уровень ТГц-сигнала от раковых клеток в 30 раз [35].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И МЕМБРАННЫХ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

Как было сказано выше, большинство исследователей указывают на различное содержание воды в здоровых и раковых тканях как на основную причину появления контраста на границе раковой опухоли. По этой причине обратимся к опыту изучения водных сред в ТГц-диапазоне.

Полезными для изучения влияния ТГц-излучения на движение воды через наноструктуры могут оказаться результаты исследования с помощью моделей молекулярной динамики, выполненые в работе [36]. При нормальном направлении вектора электрического поля ТГц-излучения к поверхности однородных однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) изменение водородных связей приводило к значительному ускорению движения воды через ОУНТ в области 14 ТГц. Авторы этой работы связывают наблюдаемое явление с проявлением резонансных механизмов взаимодействия полярных молекул воды с микроволновым облучением. В случае направления вектора электрического поля излучения параллельно оси ОУНТ резонансных эффектов обнаружено не было.

В результате многолетних исследований в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была создана двухфракционная модель для расчета диэлектрической проницаемости и поглощения жидкой воды в диапазоне мм- и субмм-волн [37]. Данные расчета спектров указанных параметров количественно согласуются с экспериментальными данными и управляются четырьмя молекулярными механизмами *a*, *b*, *c* и *d*.

Модель воды, согласно представлениям этой теории, состоит из фракций либраторов (*LIB*) и вибраторов (*VIB*). *LIB* – жесткие диполи (мономеры), испытывающие свободные переориентации в межмолекулярном потенциале шляпного профиля (составляют примерно 70 % всех молекул воды) и формирующие полосу спектра в области 700 см⁻¹, а также низкочастотный дебаевский

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

релаксационный спектр, максимум потерь которого располагается в области микроволн. Фракцию *VIB* составляют димеры, состоящие из двух разноименно заряженных молекул (30 % молекул воды), которые формируют под действием упругих сил полосу спектра трансляционных колебаний (вибраций двух атомов O_2 в направлении H-связи) в области 200 см⁻¹ – механизм *b*, полосу колебаний в области 150 см⁻¹ – механизм *c* и полосу спектра в области TГц-диапазона – механизм *d*. К механизму *c* относятся переориентации (вращения) ковалентной и *H*-связей (водородных связей) относительно невозмущенного положения последней. К механизму *d* относятся вибрации заряженных атомов кислорода поперек невозмущенного положения водородной связи.

Известны многочисленные результаты экспериментальных исследований диэлектрических свойств воды в ТГц-диапазоне [38, 39]. Вычислялись комплексная диэлектрическая проницаемость воды и комплексный коэффициент преломления. Было показано, что между эти-ми параметрами существует аналитическая зависимость: $\varepsilon = n^2 - k^2$ и $\varepsilon = 2nk$. Также было отмечено [37], что величины диэлектрической проницаемости и проводимости, полученные на основании простых моделей диэлектрической релаксации [40, 41], обеспечивают удовлетворительное совпадение с данными, установленными экспериментально вплоть до значений частот 1 ТГц. В этом диапазоне вода при комнатной температуре демонстрирует две диэлектрические дисперсии с временами релаксации и характерными частотами диэлектрической релаксации: т, = 8,4 пс $(f_1 = 0,019 \text{ T}\Gamma\mu), \varepsilon_1 = 78,36 \text{ и} \tau_2 = 0,19 \text{ пс} (f_2 = 0,84 \text{ T}\Gamma\mu), \varepsilon_2 = 4,93.$ Диэлектрическая проницаемость воды для предельных частот определена как є = 3,48. Для описания межмолекулярной диэлектрической релаксации в данном частотном диапазоне определяют є с помощью измерения n_D^2 , где n_D^2 – коэффициент преломления на длине волны 589 нм (D – линия поглощения натрия), учитывая, что величина n_D^2 соответствует нижнему теоретическому пределу є и представляет диэлектрический вклад в коэффициент диэлектрической проницаемости. Установленная для воды величина $\varepsilon = 3,48$ значительно превосходит $n_D^2 = 1,78$, что свидетельствует о вкладе межмолекулярной релаксации в диапазоне частот около 3 ТГц. Коэффициент поглощения воды на частотах 1, 6, и 19,5 ТГц составляет 230, 1200 и 2900 см⁻¹ соответственно.

Во многих научных публикациях обращается особое внимание на структурную и функциональную модификацию мембран клеток организма человека и животных при действии ЭМП [42]. Кроме того, большое внимание при изучении механизмов биологического действия микроволнового излучения уделялось роли примембранного слоя воды [43]. Было показано, что микроволновое облучение низкой интенсивности вызывает конвекцию в водных средах у границы раздела фаз, которая ускоряет процессы переноса ионов и других веществ в модельных (БЛМ, липосомы) и нативных (эпителий кожи лягушки, дрожжевые клетки) мембранных системах [44, 45].

С помощью ТГц-спектроскопии также изучалось поведение примембранного слоя воды при изменении температуры в интервале 14...35 °С на границе фазового перехода гель – жидкий кристалл мембранной липидной системы [46], которое сопровождалось увеличением числа гидратации от 0,3 до 0,6. Наблюдалось также увеличение коэффициента поглощения воды с температурой в фазе геля липидной мембранной системы и затем его снижение в жидкой фазе липидного бислоя. Метод ТГц-спектроскопии позволил также изучать динамику молекул воды в зависимости от уровня гидратации в системе вода – липидный бислой [47]. При изменении уровня гидратации, т. е. измении числа молекул воды на одну молекулу липида в мембранной модельной системе, авторы данной работы показали перераспределение в системе трех типов молекул воды, вибрирующих с разными частотами. Аналогичная методика [48] позволила

также установить в сравнении с данными рентгеноструктурного анализа несколько связанных примембранных слоев молекул воды, участвующих в процессе гидратации липидов, что было обнаружено по уплотнению слоя воды приблизительно в 10 Å от поверхности липида.

В исследовании [49] особое внимание обращено на релаксационные процессы, один из которых проявляется в терагерцовой области спектра (приблизительно 5...50 см⁻¹). Физическая суть этого процесса на молекулярном уровне до сих пор не ясна. Найдены веские основания для того, чтобы интерпретировать его как мономолекулярную релаксацию несвязанных молекул воды.

В дальнейшей работе этого коллектива [50] в результате анализа спектров водных растворов в терагерцовой области частот получена формула для расчета количества свободных молекул воды в растворах. Аналитическая зависимость установлена исходя из рассмотрения процесса поляризации воды в электрическом поле. Показано, что без учета процессов экранировки электрического поля в воде расчеты ведут к сильному завышению доли свободных молекул воды.

Представляются чрезвычайно важными исследования поглощения в биотканях, выполненные с помощью гиперосмотических агентов, позволяющих регулировать количество воды в измеряемых объектах [51]. Исследования дегидратации мышечной ткани *in vitro* под действием биологически совместимых гиперосмотических агентов проведены на лазерном ТГц-спектрометре в диапазоне частот 0,25...2,5 ТГц. Получены широкополосные ТГц-спектры поглощения и отражения скелетной мышечной ткани быка под воздействием глицерина, полиэтиленгликоля с молекулярной массой 600 (ПЭГ-600) и пропиленгликоля. Представленные результаты могут быть успешно использованы для разработки методов повышения контраста изображений и увеличения глубины исследования биологических тканей с помощью излучения ТГц-диапазона.

Наше внимание будет уделено изучению действия $T\Gamma$ ц-излучения на процессы цитохромзависимого апоптоза, которому до сих пор не уделялось достаточного внимания специалистами биоэлектромагнитных взаимодействий. Теории и экспериментальным исследованием данного процесса в последние 15 лет посвящено большое количество работ. При этом большинство авторов считают, что эвакуация цитохрома *с* из митохондрий является ключевым сигнальным механизмом в апоптозе. Хотя некоторые исследователи считают, что белки на внешней мембране митохондрий могут стимулировать этот процесс и некоторые детали механизма остаются пока неясными. Цитохром *с* (суt *c*) связывается с внутренним митохондриальным мембранным липидом под названием кардиолипин (CL) и проникает через структуры липидной мембраны митохондрии, переживая конформационные изменения и проявляя пероксидазные свойства [52].

В работе [53] представлена непосредственная визуализация флуоресцентного суt *c* при пересечении синтетических, содержащих CL мембран в отсутствие других белков. Наблюдалось сильное связывание суt *c* с CL в липосомах и утечка суt *c* через мембрану митохондрии. Пассивные флуоресцентные маркеры, такие, как карбоксифлуоресциин и полимер декстрана (10 килодальтон), пересекали мембрану одновременно с суt *c*, хотя большие декстраны не имели такой возможности. Данные показывают, что эти процессы являются следствием формирования пор в липидной мембране митохондрии, сформированной молекулой суt *c*, сопряженной с CL. Наблюдалось значительное ингибирование этого процесса в присутствии АТР. Авторы данной работы предложили модель, совместимую с полученными экспериментальными результатами, в которой формирование тороидальных пор липида стимулировано суt *c*-зависимым мембранным искривлением и последующим взаимодействием белка с изменением его конформации. Эти ре-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

24.06.2016 16:43:06

зультаты показывают, что CL-cyt *c*-взаимодействие может быть достаточным для перфорирования митохондриальных мембран и выхода cyt *c* из митохондрий для запуска процесса апоптоза.

Изучению двух форм молекулы суt c с помощью спектроскопии ТГц-излучения посвящена работа [54]. В диапазоне частот 5...80 см⁻¹ был получен диэлектрический отклик, характеризующий плотность коллективных мод молекулы суt c как функцию степени ее окисления и гидратации. При окислении молекулы наблюдалось значительное увеличение коэффициентов поглощения и преломления в широком спектре частот. Степень гидратации суt cвлияла на изменение этих коэффициентов гораздо слабее. Авторы работы предполагают, что наблюдаемый эффект частично связан с изменением амплитуды конформационных колебаний в молекуле суt c.

Кардиолипин – суt *с*-комплекс (КЦ) представляет интерес с точки зрения взаимодействия с ТГц-излучением. Во-первых, он находится на границе раздела фаз липид–вода и катализирует окислительно-восстановительные реакции в обеих фазах. Следовательно, простое усиление конвекции за счёт поглощения ТГц-излучения водой может повлиять на кинетику ферментативной реакции. Во-вторых, белок в КЦ-комплексе находится в состоянии расплавленной глобулы и, следовательно, может иметь максимумы поглощения в очень широком диапазоне частот. Поглощение ТГц-излучения глобулой может влиять на её конформационное состояние и, следовательно, на каталитическую активность гема [55].

Таким образом, нам предстояло проверить указанные, физически обоснованные гипотезы. Результаты наших экспериментальных исследований влияния ТГц-излучения на пероксидазную активность цитохрома *с* и его КЦ-комплекса представлены ниже.

Водорастворимая флуоресцентная молекула Амплекс Красный (AR) сравнительно устойчива в буфере и почти не окисляется в присутствии цитохрома *с* или H₂O₂. Комбинация цитохрома с и перекиси водорода вызывала заметное окисление AR. Однако в присутствии липосом, содержащих кардиолипин (CL) или фосфатидилхолин (PC) (т. е. при образовании комплексов), степень окисления AR многократно усиливается. Причём возрастает как скорость химической реакции, так и выход окисленного субстрата. Используемое нами микроволновое излучение ТГц-диапазона частотой 300 ГГц (генератор на лампе обратной волны OB-30) вызывает усиление окисление AR в присутствии цитохрома с и H₂O₂. Это усиление оксидазной активности заметно с участием разных липосом, однако абсолютная величина эффекта наиболее выражена в присутствии CL [56]. Во флуоресцентной липофильной пробе BODIPY-C11 окислению подвергаются коньюгированные ненасыщенные двойные связи, аналогичные окисляемым группам в фосфолипидах. При этом исходная молекула, флуоресцирующая в оранжево-красной области, превращается в продукт со спектром эмиссии в зелёной области. Эти свойства позволяют применять данную пробу для оценки окисления липидов в модельных системах и клетках. Нам удалось подобрать условия, при которых система цитохрома c/H₂O₂ не вызывает окисления BODIPY-C11 в мембранах, содержащих только PC, в то время как в присутствии CL-содержащих липосом проба окисляется полностью в течение нескольких минут.

Как показали предварительные результаты экспериментов, выполненных Г. Г. Борисенко, ТГц-излучение не вызывало окисления BODIPY-C11 в присутствии PC, однако стимулировало достоверное 20%-ное усиление скорости окисления в системе, содержащей CL. Таким образом, было показано, что ТГц-излучение не влияет (или сравнительно мало влияет) на окислительные процессы, индуцируемые глобулярной формой цитохрома *с*. В то время как оксидазная актив-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

ность КЦ-комплексов на 1...2 порядка превышала активность свободного цитохрома *с* и в ещё большей степени усиливалась под действием ТГц-излучения.

Каким же образом микроволновое излучение низкой интенсивности может ускорить данный процесс? КС-комплекс находится на границе раздела фаз липид-вода и катализирует окислительно-восстановительные реакции в обеих фазах. Следовательно, простое усиление конвекции за счет поглощения излучения водой может нелинейно повлиять на кинетику ферментативной реакции [57]. Кроме того, на активность гема, на конформационные переходы белка и на диффузию водорастворимых субстратов к гему может влиять связанная с белком вода. Поглощение излучения связанной водой – это еще один потенциальный механизм действия излучения на активность КЦ-комплекса. И наконец, белок в КЦ-комплексе находится в состоянии расплавленной глобулы и, следовательно, может иметь максимумы поглощения в очень широком диапазоне энергий. Поглощение излучения глобулой может влиять на ее конформационное состояние, а значит, на каталитическую активность гема.

Рассмотрим последнее предположение более подробно. Было показано, что при взаимодействии с мембраной белок частично разворачивается и переходит в новое конформационное состояние «расплавленной глобулы» [58]. Этот переход важен как для образования комплекса, так и для приобретения пероксидазной активности. Также было обнаружено, что микроволновое излучение стимулирует значительно более эффективное разворачивание белков, чем простой нагрев [59].

Для понимания природы состояния расплавленной глобулы важно, что оно получается из нативного состояния путем кооперативного температурного плавления — фазового перехода первого рода. Это означает, что оно обладает значительно большей энтальпией и энтропией, чем нативное состояние, то есть внутримолекулярные взаимодействия в нем резко ослаблены, а подвижность белковой цепи — резко увеличена. Так как большинство внутренних степеней свободы в белке связано с мелкомасштабными флуктуациями структуры, и прежде всего с движениями боковых групп, именно раскрепощение таких флуктуаций может сделать состояние расплавленной глобулы термодинамически выгодным. Однако раскрепощение мелкомасштабных флуктуаций не требует полного разворачивания белковой цепи — достаточно лишь ее небольшого набухания. При этом в белке резко ослабляется Вандерваальсово притяжение: оно сильно зависит от расстояния и даже небольшого увеличения размеров молекулы достаточно для его значительного ослабления [60]. Поры расплавленной глобулы (поры, необходимые для свободы движений боковых групп) заполнены растворителем, так как перенос молекулы воды в пору внутри белка термодинамически выгоден по сравнению с существовавшим там до того вакуумом.

На опыте об этом свидетельствует ничтожность изменения парциального объема при денатурации белка. Но проникающему внутрь растворителю, если только он не слишком сильно притягивается порами (ведь они окружены в основном неполярными группами, слабо притягивающими воду), удастся только заполнить поры уже существующие, но не удастся создать новые, не удастся разорвать оставшиеся в белке взаимодействия. Тогда он не сможет расширить глобулу – как вода не может растворить губку, хоть и заполняет ее поры, – и белок так и останется компактной расплавленной глобулой (причем "мокрой", насыщенной водой расплавленной глобулой). Компактность такой глобулы обеспечивается остаточными гидрофобными взаимодействиями. Если же растворитель сильно притягивается к порам (т. е. или растворитель сильнее, или поры менее гидрофобны), то он начинает расширять поры, глобула начнет разбухать, – и тем сильнее, чем сильнее притяжение растворителя к белковой цепи, т. е. чем меньше выгоды находят звенья цепи в контакте друг с другом.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Интригующей представляется также модель механизма влияния слабых электромагнитных полей на водные растворы. Модель предсказывает перераспределение протонов на пространственных неоднородностях в водной среде. Показано, что внешнее поле приводит к фазировке ионов на стоячей волне, рассматриваемой как неоднородность. В результате неравномерного распределения ионов водорода появляются локальные области с повышенной и пониженной кислотностью. Кислотность среды существенно влияет на скорость химических реакций, поэтому воздействие слабым внешним полем может изменить этот параметр. Рассмотрено влияние локальных изменений кислотности на скорость производства перекиси водорода. Предсказано, что воздействие слабого электромагнитного поля с определенными параметрами может увеличивать эту скорость и, как следствие, концентрацию перекиси водорода в растворе [61].

В этом же смысле высказывается и автор работы [62]. Воздействие микроволнового излучения может приводить к деструкции молекул и появлению в облучаемом образце повышенной концентрации свободных радикалов. Это позволяет в некоторых случаях проводить с использованием данного вида облучения химические реакции, начало которых обусловлено появлением (обычно в жидкой среде) этих радикалов. Так как такие реакции осуществить без микроволнового облучения вообще не удается, то их протекание под действием излучения иногда называют микроволновым катализом.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в данной работе на основании анализа результатов многочисленных исследований биологического действия ТГц-излучения можно сделать вывод о значительном потенциале использования ТГц-излучения для спектроскопического исследования и неразрушающего контроля материалов биологического происхождения. Исследования биологических тканей с помощью излучения в ТГц-диапазоне частот развиваются в основном в двух направлениях. Первое – как диагностические приложения при изучении поверхности тела человека или животного, что связано с интенсивным поглощением данного излучения в поверхностных слоях кожи. Второе – связано с анализом образцов тканей организма млекопитающего in vitro, способным в некоторых случаях заменить современную биохимическую диагностику. На сегодняшний день наиболее перспективным с точки зрения практики является применение ТГцизлучения в медицине для визуализации, голографирования и томографии тканей, терапии и хирургии. Разработка научно-технических основ использования электромагнитного излучения ТГц-диапазона спектра в голографии и томографии послужит прогрессу в данной области, приведет к созданию нового направления – тераграфии. Учитывая, что энергия ТГц-квантов в определенной части диапазона соответствует колебательной энергии важных биологических молекул, включая молекулы ДНК и РНК, можно надеяться на избирательное воздействие на них как в исследовательских, так и в медицинских целях, например, стимулируя или подавляя развитие вирусов, клеток и их компонентов, а также направленно изменяя скорость биохимических реакций. Подобный подход был продемонстрирован в наших исследованиях по изучению действия ТГц-излучения на процессы цитохром с зависимого апоптоза. Было показано, что излучение усиливает оксидазную активность кардиолипин-суt с-комплекса, что приводит к эвакуации цитохрома с из митохондрий и является ключевым сигнальным механизмом в процессе запрограммированной смерти клеток. Предложены механизмы наблюдаемого эффекта, связанные с переходом мембранного белка в новое конформационное состояние «расплавленной

К. Д. Казаринов

глобулы», конвективным движением водного раствора, а следовательно, и с увеличением скорости диффузии водорастворимых субстратов к гему белка. Таким образом, микроволновое излучение ТГц-диапазона поможет устранить поврежденные клетки из организма, ускоряя их гибель по пути апоптоза, что может найти применение в практической медицине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Terahertz for military and security applications IV: 17–18 April, 2006. Kissimmee, Flori-da, USA // Society of Photo-optical Instrumentation Engineers.

2. Yin, X.-X. Complex extreme learning machine applications in terahertz pulsed signals feature sets / X.-X. Yin, S. Hadjiloucas and Y. Zhang // Computer Methods and Programmes in Biomedicine. – 2014. – 117 (2). – P. 387 – 403.

3. **Гершензон, Е. М.** Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев, К. С. Савельев; под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985. – 135 с.

4. **Chamberlain, J. M.** Introduction to terahertz solid state sources / J. M. Chamberlain, R. E. Miles, C. E. Collins and D. P. Steenson // New Directions in Terahertz Technology. – Dordrecht: Kruwer, 1997. – P. 3 – 27.

5. **Петров, А. К.** Мягкая абляция биологических объектов под воздействием субмиллиметрового излучения лазера на свободных электронах / А. К. Петров, А. С. Козлов, М. Б. Тарабан и др. // ДАН. – 2005. – Т. 404, № 5. – С. 698 – 700.

6. Ozyuzer, L. Emission of coherent THz radiation from superconductors / L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Li. Q. Gopalsami, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp // Science. – 2007. – Vol. 318 (5854). – P. 1291 – 1293.

7. **Гуляев, Ю. В.** Генерация терагерцовых волн током в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, С. Г. Чигарев // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Т. 98 (11). – С. 837 – 847.

8. Williams, B. S. Terahertz quantum-cascade lasers / B. S. Williams // Nature Photonics. – 2007. – No 1 (9). – P. 517 – 525.

9. Sirtori, C. Quantum cascade lasers: breaking energy bands / C. Sirtori // Nature Photonics. – 2009. – No 3(1). – P. 13 – 15.

10. Naftaly, M. Terahertz Metrology / M. Naftaly . - Artech House. Boston, London, 2015.

11. **Peraltaa, X. G.** Metamaterial based devices for terahertz imaging / X. G. Peraltaa, M. C. Wankeb, I. Brenerb, J. Waldmane, W. D. Goodhuee, J. Lie, A. K. Azadd, H.-T. Chend, A. J. Taylord, John F. O'Harad // Proc. of SPIE. – 2010. – Vol. 7562.

12. Echchgadda, I. Using a portable terahertz spectrometer to measure the optical properties of in vivo human skin / I. Echchgadda, J. A. Grundt, M. Tarango, B. L. Ibey, T. Tongue, M. Liang, H. Xin, G. J. Wilmink // J. Biomed. Opt. – 2013, Dec. – No 18 (12). – P. 120 – 503.

13. Blick, D. W. Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin / D. W. Blick, E. R. Adair, W. D. Hurt, C. J. Sherry, T. J. Walters, J. H. Merritt // Bioelectromagnetics. – 1997. – No 18. – P. 403 – 409.

14. **Pickwell, E.** In vivo study of human skin using pulsed terahertz radiation / E. Pickwell, B. E. Cole, A. J. Fitzgerald et al. // Phys. Med. Biol. – 2004. – No 49. – P. 1595 – 1607.

15. Feldman, Y. The electromagnetic response of human skin in the millimetre and submillimetre wave range / Y. Feldman, A. Puzenko, P. B. Ishai, A. Caduff, I. Davidovich, F. Sakran, A. J. Agranat // Phys. Med. Biol. – 2009. – No 54 (11). – P. 3341 – 3363.

16. **Samsonov, A.** The effect of a 94 GHz electromagnetic field on neuronal microtubules / A. Samsonov and S. V. Popov // Bioelectromagnetics. – 2013. – Vol. 34. – P. 133 – 144.

17. **Kanezaki, A.** Parameter variation effects on temperature elevation in a steady-state, one-dimensional thermal model for millimeter wave exposure of one- and three-layer human tissue / A. Kanezaki, A. Hirata, S. Watanabe, H. Shirai // Phys. Med. Biol. – 2010. – No 55 (16). – P. 4647 – 4659.

18. Shafirstein, G. Modelling millimetre wave propagation and absorption in a high resolution skin model: the effect of sweat glands / G. Shafirstein, E. G. Moros // Phys. Med. Biol. – 2011. – No 56(5). – P. 1329 – 1339.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

24.06.2016 16:43:06

19. **Tripathi, S. R.** Morphology of human sweat ducts observed by optical coherence tomography and their frequ-ency of resonance in the terahertz frequency region / S. R. Tripathi, E. Miyata, P. B. Ishai, K. Kawase // Sci. Rep. – 2015, Mar 13. – No 5. – P. 9071.

20. Woodward, R. M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin tissue using time-domain analysis techniques / R. M. Woodward, V. P. Wallace, B. E. Cole et al. // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4625. – P. 160.

21. Wilmink, G. J. Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues / G. J. Wilmink, B. L. Ibey, T. Tongue, B. Schulkin, N. Laman, X. G. Peralta, C. C. Roth, C. Z. Cerna, B. D. Rivest, J. E. Grundt, W. P. Roach // J. Biomed. Opt. – 2011, Apr. – No 16(4).

22. Kan, W. C. Terahertz pulsed imaging of knee cartilage / W. C. Kan., W. S. Lee, W. H. Cheung et al. // Biomed. Opt. Express. – 2010. – Vol. 1. – P. 967 – 974.

23. Korenstein-Ilan, A. Terahertz radiation increases genomic instability in human lymphocytes / A. Korenstein-Ilan, A. Barbul, P. Hasin, A. Eliran, A. Gover, R. Korenstein // Radiat. Res. – 2008. – Vol. 170 (2). – P. 224 – 234.

24. **Hintzsche, H.** Terahertz electromagnetic fields (0.106 THz) do not induce manifest genomic damage in vitro / H. Hintzsche, C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, U. Kärst, T. Schrader et al. // PLoS One. – 2012. – No 7 (9).

25. **Hintzsche, H.** Terahertz radiation induces spindle disturbances in human-hamster hybrid cells / H. Hintzsche, C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, H. Stopper, E. Schmid, T. Schrader // Radiat. Res. – 2011, May. – No 175 (5). – P. 569 – 574.

26. **Bogomazova, A. N.** No DNA damage response and negligible genome-wide transcriptional changes in human embryonic stem cells exposed to terahertz radiation / A. N. Bogomazova, E. M. Vassina, T. N. Goryachkovskaya, V. M. Popik, A. S. Sokolov, N. A. Kolchanov, M. A. Lagarkova, S. L. Kiselev, S. E. Peltek // Sci. Rep. – 2015, Jan 13. – No 5.

27. **Федоров, В. И.** Влияние терагерцового излучения на численность и динамику развития потомства *F1* стрессированных самок дрозофил / В. И. Федоров, Н. Я. Вайсман, Е. Ф. Немова, А. А. Мамрашев, Н. А. Николаев // Биофизика. – 2013. – Т. 58, № 6. – С. 1043 – 1050.

28. Казаринов, К. Д. Изучение механизмов действия электромагнитных полей в широком диапазоне длин волн на биомембранные системы / К. Д. Казаринов // Тезисы симпозиума «Проблемы медицинской биофизики», Москва, МГУ, 14-15 сентября, 2012. – С. 84.

29. **Pickwell-macPherson, E.** Brest cancer tissue diagnosis at terahertz frequencies / E. Pickwell-macPherson, A. J. Fitzgerald and V. P. Wallace // Optical Interactions with Tissue and Cells XXIII: Proc. of SPIE. – Vol. 8221.

30. **Truong, B. C.** A dielectric model of human breast tissue in terahertz regime / B. C. Truong, H. D. Tuan, A. J. Fitzgerald, V. P. Wallace, H. T. Nguyen // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2014 Oct 20. – Vol.PP. Issue:99. – P. 1.

31. Ashworth, P. C. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer / P. C. Ashworth, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano, S. E. Pinder, A. D. Purushotham, M. Pepper, V. P. Wallace // Opt. Express. – 2009, Jul 20. – No 17 (15). – P. 12444. – 12454.

32. Fitzgerald, A. J. Use of finite difference time domain simulations and Debye theory for modelling the terahertz reflection response of normal and tumour breast tissue / A. J. Fitzgerald, E. Pickwell-MacPherson, V. P. Wallace // PLoS One. – 2014, Jul 10. – No 9(7).

33. Fitzgerald, A. J. Classification of terahertz-pulsed imaging data from excised breast tissue / A. J. Fitzgerald, S. Pinder, A. D. Purushotham, P. O'Kelly, P. C. Ashworth, V. P. Wallace // J. Biomed. Opt. – 2012, Jan. – No 17 (1).

34. **Wallace, V. P.** Terahertz pulsed spectroscopy of human Basal cell carcinoma / V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, E. Pickwell, R. J. Pye, P. F. Taday, N. Flanagan, T. Ha // Appl. Spectrosc. – 2006, Oct. – No 60 (10). – P. 1127 – 1133.

35. **Oh, S. J.** Nanoparticle-enabled terahertz imaging for cancer diagnosis / S. J. Oh, J. Kang, I. Maeng, J. S. Suh, Y. M. Huh, S. Haam, J. H. Son // Opt. Express. – 2009, Mar 2. – No 17 (5). – P. 3469 – 3475.

36. **Zhang, Q. L.** Fast water channeling across carbon nanotubes in far infrared terahertz electric fields / Q. L. Zhang, R. Y. Yang, W. Z. Jiang, Z. Q. Huang // Nanoscale. – 2016, Jan. 21. – No 8 (4). – P. 1886 – 1891.

37. Гайдук, В. И. Диэлектрический отклик на упругие трансляции и переориентации водородно-связанных молекул льда и воды / В. И. Гайдук, Б. М. Цейтлин, С. А. Никитов // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 9. – С. 1085 – 1106.

38. **Kindt, J. T.** Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy / J. T. Kindt and C. A. Schmuttenmaer // J. Phys. Chem. – 1996. – Vol. 100. – P. 10373 – 10379.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

39. Van Exter, M. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapour / M. Van Exter, C. L. Fittingar and D. Grischkowsky // Opt. Lett. – 1989. – Vol. 14. – P. 1128 – 1130.

40. Cole, K. Dispersion and absorption in dielectrics / K. Cole and R. Cole // Journal Chem. Phys. – 1941. – Vol. 9. – P. 341 – 351.

41. **Devison, D. W.** Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol and *n*-proposal / D. W. Devison and R. H. Cole // Journal Chem. Phys. – 1951. – Vol. 19. – P. 1484 – 1490.

42. **Kazarinov, K. D.** Effects of electromagnetic fields on cellular membranes / K. D. Kazarinov, G. G. Borisenko, I. G. Polnikov // V International Congress "Low and Superlow Fields and Radiations in Biology and Medicine", Saint-Petersburg, 2009. Sci. proceedings. – Vol. 5. – P. 12.

43. **Казаринов, К. Д.** Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности / К. Д. Казаринов // Итоги науки и техники. Сер. "Биофизика". – М.: ВИНИТИ. – 1990. – Т. 27. – 102 с.

44. **Kazarinov, K. D.** Interface convection in membrane systems under extrahigh frequency irradiation / K. D. Kazarinov, V. S. Malinin, A. V. Putvinsky // 2 World Congress for Electric and Magnetism in Biology and medicine. Abstract book. Bologna. Italy. – 1997. – P. 244.

45. **Казаринов, К. Д.** Роль клеточных мембранных систем в рецепции электромагнитных полей КВЧ-диапазона биологическими объектами / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2008. – № 1. – С. 42 – 55.

46. Choi, D. H. Dielectric relaxation change of water upon phase transition of a lipid bilayer probed by terahertz time domain spectroscopy / D. H. Choi, H. Son, S. Jung, J. Park, W. Y Park, O. S. Kwon, G. S. Park // J. Chem. Phys. – 2012, Nov. 7. – No 137 (17).

47. **Tielrooij, K. J.** Dielectric relaxation dynamics of water in model membranes probed by terahertz spectroscopy / K. J. Tielrooij, D. Paparo, L. Piatkowski, H. J. Bakker, M. Bonn // Biophys. J. – 2009, Nov. 4. – Vol. 97 (9). – P. 2484 – 2492.

48. **Hishida**, **M.** Long-range hydration effect of lipid membrane studied by terahertz time-domain spectroscopy / M. Hishida, K. Tanaka // Phys. Rev. Lett. – 2011, Apr. 15. – Vol. 106 (15).

49. **Пеньков, Н. В.** Об особенностях молекулярной релаксации в водных растворах. Проведен анализ спектров жидкой воды и водных растворов в области частот, характерных для коллективной динамики молекул воды (от 0 до 200 см⁻¹) / Н. В. Пеньков, Н. Э. Швирст, В. А. Яшин и Е. Е. Фесенко // Биофизика. – 2013. – Т. 58, № 6. – С. 933 – 937.

50. **Пеньков, Н. В.** Расчет количества свободных молекул воды в водных растворах с помощью спектральных параметров из терагерцовой области с учетом процессов экранировки / Н. В. Пеньков, В. А. Яшин, Е. Е. Фесенко (мл.), Е. Е. Фесенко // Биофизика. – 2014. – Т. 59, № 3. – С. 428 – 431.

51. Колесников, А. С. Мониторинг дегидратации мышечной ткани in vitro под действием гиперосмотических агентов в терагерцевом диапазоне / А. С. Колесников, Е. А. Колесникова, А. П. Попов, М. М. Назаров, А. П. Шкуринов, В. В. Тучин // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 7. – С. 633 – 640.

52. Bergstrom, C. L. Cytochrome c causes pore formation in cardiolipin-containing membranes / C. L. Bergstrom, P. A. Beales, Y. Lv., T. K. Vanderlick, J. T. Groves // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 2013, Apr. 16. – No 110 (16). – P. 6269 – 6274.

53. **Muenzner, J.** Becoming a peroxidase: cardiolipin-induced unfolding of cytochrome *c* / J. Muenzner, J. R. Toffey, Y. Hong, E. V. Pletneva // J. Phys. Chem. B. – 2013, Oct. 24. – No 117 (42). – P. 12878 –12886.

54. Chen, J.-Y. Large oxidation dependence observed in terahertz dielectric response for cytochrome c / J.-Y. Chen, J. R. Knab, J. Cerne and A. G. Markelz // Physical Review E. – 2005. – Vol. 72.

55. **Казаринов, К. Д.** Биологические эффекты электромагнитного поля терагерцового диапазона / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2009. – № 4. – С. 48 – 58.

56. **Kazarinov, K. D.** The investigation of microwave radiation effects on sensitivity of the stressful cells / K. D. Kazarinov, G. G. Borisenko // V International Congress "Low and Super-low Fields and Radiations in Biology and Medicine". Saint-Petersburg. Sci. proceedings. – 2009. – Vol. 5. – P. 10.

57. **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.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

58. **Kagan, V. E.** Cytochrome *c* acts as a cardiolipin oxygenase required for release of proapoptotic factors / V. E. Kagan, V. A. Tyurin, J. Jiang, Y. Y. Tyurina, V. B. Ritov, A. A. Amoscato, A. N. Osipov, N. A. Belikova, A. A. Kapralov, V. Kini et al. // Nat. Chem. Biol. – 2005. – Vol. 1(4). – P. 223 – 232.

59. **George, D. F.** Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding / D. F. George, M. M. Bilek, D. R. McKenzie // Bioelectromagnetics. – 2008, May. – No 29(4). – P. 324 – 330.

60. **Кузнецова, И. М.** Структурная динамика, стабильность и фолдинг белков (обзор) / И. М. Кузнецова, В. Форже, К. К. Туроверов // Цитология. – 2005. – Т. 47. – С. 943 – 952.

61. **Пономарев, В. О.** Влияние слабого ЭМП на скорость производства перекиси водорода в водных растворах / В. О. Пономарев, В. В. Новиков, А. В. Карнаухов, О. А. Пономарев // Биофизика. – 2008. – Т. 53, № 2. – С. 197 – 204.

62. Бердоносов, С. С. Микроволновая химия / С. С. Бердоносов // Химия. МГУ. Статьи Соросовского Образовательного журнала в текстовом формате. – 2001. – Т. 7, № 1. - С. 32 – 38.

Статья поступила 11 февраля 2016 г.

🚃 НОВЫЕ КНИГИ 🚞

ЛАВРОВ А. А. Авиационные обзорные радиолокаторы. Методы и алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов. Монография. – М.: Радиотехника, 2015. – 224 с.: ил. (Научная серия «Бортовые аэронавигационные системы»).

Рассмотрены принципы построения, методы и алгоритмы обработки и потенциальные характеристики авиационных обзорных радиолокаторов, использующих пространственновременную обработку сигналов, показаны их возможности при обзоре земной и морской поверхности в режимах синтезирования апертуры антенны и формирования скоростного портрета; описаны голографический радиолокатор планового обзора и локатор для измерения полного вектора скорости пространственно распределенного объекта; приведены алгоритмы формирования изображений, технические требования к аппаратуре и характеристики создаваемых портретов – пространственная разрешающая способность и точность измерения скорости.

Для специалистов, занимающихся авиационными системами обзора поверхности Земли и радиолокационными системами оценки состояния атмосферы. Может быть полезна студентам и аспирантам, обучающимся по соответствующим дисциплинам.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

۲

УДК 621.317

УЗКОПОЛОСНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ШУМОВОЙ ГЕНЕРАТОР

Б. Е. Кяргинский

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

Предлагается перестраиваемый узкополосный шумовой генератор, в котором используются широкополосные сигналы и узкополосный перестраиваемый фильтр.

КС: генератор, усилитель, фильтр, напряжение, мощность, полоса усиления, частота

A NARROWBAND TUNABLE NOISE OSCILLATOR

B. E. Kyarginsky

FIRE named after V.A. Kotelnikov RASc, Fryazino

A tunable narrowband noise oscillator is proposed in which wideband signals and a narrowband tunable filter are used.

Keywords: oscillator, amplifier, filter, voltage, power, amplification band, frequency

Генераторы широко применяются в СВЧ-технике. Наиболее распространены генераторы гармонических сигналов. Также используются шумовые генераторы. Здесь рассматривается перестраиваемый узкополосный генератор.

Схема представлена на рис. 1. Три широкополосных генератора *1...3* подключены к сумматору *4*, к выходу сумматора подсоединен ЖИГ-фильтр *5* (железоиттриевый гранат). Этот фильтр за счет питающего напряжения может перестраиваться в широком диапазоне частот сигналов, в данном случае – от 0,7 до 10 ГГц, полоса его пропускания при этом – около 30 МГц. Генератор *1*



Рис. 1. Схема эксперимента

работал в полосе частот от 0,5 до 4,5 ГГц по уровню 10 дБ от максимума, сигнал представлен на рис. 2. Генератор 2 – от 3 до 6,5 ГГц по уровню 10 дБ от максимума (рис. 3). Генератор 3 – от 6,5 до 10 ГГц по уровню 15 дБ от максимума (рис. 4).

Генератор *1* сконструирован на основе микрополосковой линии (на материале ФАФ толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью 2,8) и представлял собой два трехзвенных полосно-пропускающих

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

фильтра с подсоединенными к ним тремя транзисторами типа 2T647A-2 [3]. Методика расчета приведена в [1, 2]. К выходу устройства подключался усилитель, состоявший из четырех микросхем типа MSA-0286 и MSA-1105. К коллекторам транзисторов подводилось напряжение +5 В, к эмиттерам – минус 0,7 В при токе 0,1 А; усилитель потреблял ток 0,2 А при напряжении +5 В. Выходная мощность сигнала при этом составляла 20 мВт.



Рис. 2. Спектр сигнала генератора в диапазоне частот 0,5...4,5 ГГц



Рис. 3. Спектр сигнала генератора в диапазоне частот 3...6,5 ГГц



Рис. 4. Спектр сигнала генератора в диапазоне частот 6,5...10 ГГц

Генератор 2 имел аналогичную конструкцию, только был подсоединен другой усилитель, имевший иную полосу усиления сигнала, тип усилителя – M42188-2. Коллекторы транзисторов запитывались напряжением +5 В, а эмиттеры – напряжением минус 0,7 В при токе 0,1 А. К усилителю подводилось напряжение +9 В при токе 0,3 А. На выходе мощность сигнала составляла около 25 мВт (рис. 3).

Генератор 3 сконструирован так же, как генераторы 1 и 2, только усилитель выбран с еще более высокими частотами усиления сигналов, тип усилителя – М42189-2. В этом генераторе были использованы два усилителя. Питание коллекторов и эмиттеров такое же, как и в первых

۲

۲

двух генераторах, усилители были включены на напряжение + 9 В при токе 0,3 А на каждом усилителе. На выходе мощность составляла около 10 мВт (рис. 4).

Сумматор 4 сконструирован на основе трех кольцевых сумматоров, изготовленных на микрополосковых линиях (материал – ФАФ, толщина – 1 мм, диэлектрическая проницаемость – 2,8). Каждый кольцевой сумматор рассчитан на частоту 3 ГГц. Затухание каждого канала сумматора составляло около 6 дБ на низших частотах и плавно увеличивалось до 12 дБ к верхним частотам. К сумматору подсоединялся ЖИГ-фильтр 5 (см. рис. 1). Можно было наблюдать спектры сигналов в различных диапазонах частот. Так, на частоте 0,7 ГГц полоса сигнала составила 30 МГц, при этом ток питания фильтра равнялся 0,05 А при напряжении 0,24 В, а на частоте 10 ГГц при токе 0,7 А и напряжении 3,6 В сигнал наблюдался полосой 40 МГц. Перестройку по частотам лучше производить при стабилизации питания фильтра по току. Плавная перестройка тока питания фильтра позволяла перестраивать сигнал плавно от 0,7 до 10 ГГц (рис. 5), при этом полоса сигнала изменялась от 30 до 40 МГц (рис. 6).



Рис. 5. Зависимость частоты сигнала от тока питания фильтра



Рис. 6. Зависимость полосы сигнала от частоты

Для увеличения мощности выходного сигнала применялись усилители различных типов. Например, после подсоединения усилителя типа M42188-2 получали усиление сигнала в полосе от 2,5 до 6 ГГц (рис. 7), питание усилителя при этом было 0,25 А при напряжении +9 В. Для усилителя типа M42187-2 зависимость выходной мощности от частоты приведена на рис. 8; здесь сигнал усиливался от 1 до 4 ГГц, на усилитель подавалось напряжение +15 В и минус 3 В при токе 0,2 А. На усилителе типа M42109-1 напряжение питания составило минус 12,6 В при токе 0,1 А, усиление происходило от 0,8 до 3 ГГц (рис. 9). С помощью усилителя типа M42189-2 усиливались частоты с 8 до 12 ГГц (рис. 10), на усилитель подавалось напряжение + 9 В при токе около 0,3 А.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲







Рис. 9. Зависимость выходной мощности от частоты после усилителя М42109-1



Рис. 8. Зависимость выходной мощности от частоты после усилителя М42187-2



Рис. 10. Зависимость выходной мощности от частоты после усилителя М42189-2

Таким образом, можно сказать, что предложенный генератор дает узкополосный (полосой 30...40 МГц) сигнал, который перестраивается в диапазоне частот от 0,7 до 10 ГГц. Для увеличения выходной мощности сигнала можно применять усилители.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седых, В. М. Полосовые линии и устройства сверхвысоких частот / В. М. Седых. -Харьков, 1974.

2. Ковалев, И.С. Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И.С. Ковалева. – Изд. Связь, 1974.

3. **Кяргинский, Б. Е.** Исследование генераторов шумоподобных сигналов на транзисторах на основе полосно-пропускающих фильтров / Б. Е. Кяргинский // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 2001. – Вып. 1 (477). – С. 12 – 16.

Статья поступила 9 июня 2015 г.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

А. К. Балыко

()

УДК 53

ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ МОДУЛЯ РАДИУС-ВЕКТОРА СО СЛУЧАЙНЫМИ КООРДИНАТАМИ В ПРОСТРАНСТВАХ РАЗЛИЧНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

А. К. Балыко

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

Получены выражения для плотностей распределения вероятности модуля вектора, координаты которого в пространствах различной размерности распределены по нормальному закону.

КС: плотность распределения вероятности, закон Рэлея

THE DENSITY OF PROBABILITY DISTRIBUTION OF RADIUS-VECTOR MODULE WITH ACCIDENTAL COORDINATES IN DIFFERENT DIMENSIONALITY SPACE

A. K. Balyko

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

The expressions for the densities of probability distribution of vector module which coordinates in different dimensionality spaces are distributed according to the normal law have been obtained.

Keywords: density of probability distribution, the Rayleigh law

В конце XIX века английским ученым лордом Рэлеем был получен закон для плотности вероятности модуля двумерного радиус-вектора со случайными координатами, каждая с нормальным законом распределения. Поскольку двумерный радиус-вектор на плоскости описывается так же, как и комплексное число, то закон Рэлея оказался применим для описания комплексного радиолокационного сигнала со случайными амплитудой и фазой. Таким образом, закон сыграл и продолжает играть важную роль при решении радиолокационных задач, в том числе для выделения и обнаружения полезных сигналов на фоне помех, а также для измерения параметров сигналов [1, 2].

В настоящей статье приведены результаты дальнейшего обобщения закона Рэлея на случай трехмерного пространства и пространств больших размерностей.

1. Случайная положительная величина *x* имеет нормальный закон распределения со средним значением *a* и дисперсией σ^2 .

Плотность распределения вероятности модуля этой величины r = |x| имеет также вид нормального закона

$$W(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \cdot e^{-\frac{(r-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

Для единства дальнейшего изложения представим его в виде ($\alpha_1 = a$)

106

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Плотности распределения вероятности модуля радиус-вектора со случайными координатами

۲

$$W(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \cdot e^{-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{\frac{ra_1}{\sigma^2}}.$$

При $\alpha_1 = 0$ множитель $w_1(r) = e^{\frac{|v_1|}{\sigma^2}} = 1$.

2. Две случайные величины х и у независимы, и каждая имеет нормальный закон распределения со средними значениями a и b соответственно и одинаковой дисперсией σ^2 .

Геометрическая интерпретация на плоскости: $x = r \cdot \cos \phi$ и $y = r \cdot \sin \phi$ – компоненты радиусвектора с модулем *r* и углом ф (полярные координаты).

В результате преобразования декартовых координат в полярные двумерная плотность распределения вероятности независимых случайных величин $w_2(x, y) = w_1(x) w_1(y)$ преобразуется в двумерную функцию $W_2(r, \varphi) = Q_2 w_2(x, y)$, где $Q_2 = \partial(x, y) / \partial(r, \varphi) -$ якобиан двумерного пре-образования. Поскольку $Q_2 = \begin{vmatrix} \cos \varphi & -r \cdot \sin \varphi \\ \sin \varphi & r \cdot \cos \varphi \end{vmatrix} = r$, то имеем

$$W_{2}(r,\phi) = \frac{r}{(\sqrt{2\pi})^{2} \cdot \sigma^{2}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^{2}}{2\sigma^{2}} - \frac{(y-b)}{2\sigma^{2}}} = \frac{r}{2\pi\sigma^{2}} \cdot e^{-\frac{r^{2}+\alpha^{2}}{2\sigma^{2}}} \cdot e^{\frac{r(a\cdot\cos\phi+b\cdot\sin\phi)}{\sigma^{2}}},$$

где $\alpha_2^2 = a^2 + b^2$.

۲

Плотность распределения вероятности модуля радиус-вектора r находится из $W_{\gamma}(r, \varphi)$ интегрированием по углу ϕ в пределах от 0 до 2π :

$$W(r) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2 + \alpha_2^2}{2\sigma^2}} \cdot \int_{0}^{2\pi} e^{\frac{r}{\sigma^2}(a \cdot \cos\varphi + b \cdot \sin\varphi)} d\varphi.$$

Интеграл в этой формуле выражается через цилиндрическую функцию Бесселя нулевого

порядка
$$2\pi I_0 (r\alpha_2/\sigma^2)$$
, так что получаем $W(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2+\alpha_2^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0 \left(\frac{r \cdot \alpha_2}{\sigma^2}\right)$.
При $\alpha_2 = 0$ множитель $w_2(r) = I_0 \left(\frac{r\alpha_2}{\sigma^2}\right) = 1$.

Формула для W(r) – обобщенный закон распределения Рэлея, который при $\alpha_{2} = 0$ преобразуется в закон распределения Рэлея: $W(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$.

3. Рассмотрим теперь три случайные величины: x, y и z, которые также будем считать независимыми; каждая из них имеет нормальный закон распределения со средними значениями a, b и c соответственно и одинаковой дисперсией σ^2 .

Геометрическая интерпретация в пространстве: x, y и z – компоненты радиус-вектора с модулем r и углами ф и θ, которые связаны известными соотношениями для сферических координат:

 $x = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi$, $y = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi$, $z = r \cdot \cos \theta$, $r^2 = x^2 + v^2 + z^2$.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

В результате преобразования пространственных декартовых координат в сферические трехмерная функция распределения независимых случайных величин $w_3(x, y, z) = w_1(x) \cdot w_1(y) \cdot w_1(z)$ преобразуется в трехмерную функцию по тому же правилу $W_3(r, \varphi, \theta) = Q_3 w_3(x, y, z)$, где $Q_3 = \partial(x, y, z)/\partial(r, \theta, \varphi) - якобиан трехмерного преобразования. Поскольку$

$$Q_{3} = \begin{vmatrix} \sin\theta \cdot \cos\phi & r \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi & -r \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \\ \sin\theta \cdot \sin\phi & r \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi & r \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi \\ \cos\theta & -r \cdot \sin\theta & 0 \end{vmatrix} = r^{2} \cdot \sin\theta,$$

то имеем

$$W_{3}(r,\varphi,\theta) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\cdot\sigma)^{3}} \cdot e^{-\frac{r^{2}+\alpha_{3}^{2}}{2\sigma^{2}}} \cdot e^{\frac{r[c\cdot\cos\theta+\sin\theta\cdot(a\cdot\cos\varphi+b\cdot\sin\varphi)]}{\sigma^{2}}} \cdot r^{2}\cdot\sin\theta,$$

где $\alpha_3^2 = \alpha_2^2 + c^2 = a^2 + b^2 + c^2$.

Плотность распределения вероятности радиус-вектора r находится из $W_3(r, \varphi, \theta)$ интегрированием по углу φ в пределах от 0 до 2π и по углу θ в пределах от 0 до π . При первом ин-

тегрировании, по аналогии с предыдущим случаем, получаем выражение $2\pi I_0 \left(\frac{r \cdot \alpha_2 \cdot \sin \theta}{\sigma^2} \right)$, поэтому

$$W(r) = \frac{r^2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma^3} \cdot e^{-\frac{r^2 + \alpha_3^2}{2\sigma^2}} \cdot \int_0^{\pi} e^{\frac{r \cdot c \cdot \cos\theta}{\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{r \cdot \alpha_2 \cdot \sin\theta}{\sigma^2}\right) \cdot \sin\theta \cdot d\theta.$$

Обозначим: $u = r \cdot \alpha_2 / \sigma_2$, $v = r \cdot c / \sigma^2 - u$ введем новую переменную $\phi = \pi / 2 - \theta$, тогда интеграл в формуле преобразуется к виду

$$R_3 = 2\int_0^{\frac{1}{2}} \operatorname{ch}(v \cdot \cos\varphi) \cdot I_0(u \cdot \sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi.$$

Воспользуемся табличным интегралом [3, формула 6.688 (2)], который для произвольного индекса *v* имеет вид

$$\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} (\sin x)^{\nu+1} \cos(\beta \cdot \cos x) \cdot J_{\nu}(\alpha \cdot \sin x) \cdot dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \alpha^{\nu} \cdot (\alpha^{2} + \beta^{2})^{-\frac{\nu}{2} - \frac{1}{4}} \cdot J_{\nu+\frac{1}{2}}[(\alpha^{2} + \beta^{2})^{\frac{1}{2}}],$$

где $J_{\nu}(x)$ – функция Бесселя порядка v. Для модифицированной функции Бесселя формула примет вид

$$\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} (\sin x)^{\nu+1} \operatorname{ch}(\beta \cdot \cos x) \cdot I_{\nu}(\alpha \cdot \sin x) \cdot dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \alpha^{\nu} \cdot (\alpha^{2} + \beta^{2})^{-\frac{\nu}{2} - \frac{1}{4}} \cdot I_{\nu+\frac{1}{2}} [(\alpha^{2} + \beta^{2})^{\frac{1}{2}}].$$
(1)

В результате находим: $R_3 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{I_1[(u^2 + v^2)^{\overline{2}}]}{(u^2 + v^2)^{\overline{4}}}$. Подставляя в R_3 выражения для u = v,

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲
۲

получим формулу для плотности распределения модуля радиус-вектора в трехмерном пространстве (m m)

$$W(r) = \frac{r^2}{\sigma^3} \cdot e^{-\frac{r^2 + \alpha_3^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{I_1}{\frac{1}{2}} \left(\frac{r \cdot \alpha_3}{\sigma^2}\right)}{\sqrt{\frac{r \cdot \alpha_3}{\sigma^2}}}$$

При $\alpha_3 = 0$ множитель $w_3(r) = \frac{I_{\frac{1}{2}}\left(\frac{r \cdot \alpha_3}{\sigma^2}\right)}{\sqrt{\frac{r \cdot \alpha_3}{\sigma^2}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}.$

4. Введем обобщенные углы ($\phi_0 = \phi, \phi_1 = \theta, \phi_2 = \psi$), обобщенные координаты ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z, x_4 = v$) и средние значения ($a_1 = a, a_2 = b, a_3 = c, a_4 = d$).

По аналогии с рассмотренными пространствами, введем преобразование координат четырехмерного евклидового пространства в четырехмерное сферическое с помощью соотношений [4]:

 $x_1 = r \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_0,$ $x_2 = r \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_0,$ $x_3 = r \cdot \sin \phi_2 \cdot \cos \phi_1$ $x_4 = r \cdot \cos \varphi_2$ $r_2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2.$

Якобиан этого преобразования $Q_4 = r^3 \cdot \sin^2 \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1$ [4]. Плотность распределения модуля радиус-вектора получается из формулы

$$W(r) = \frac{r^3}{(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma)^4} \cdot e^{-\frac{r^2 + a_4^2}{2\sigma^2}} \int_0^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_4 \cdot \cos \varphi_2}{\sigma^2}} \sin^2 \varphi_2 \cdot d\varphi_2 \int_0^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_3 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_1}{\sigma^2}} \sin \varphi_1 \cdot d\varphi_2 \times \\ \times \int_0^{2\pi} e^{\frac{r \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1(a_1 \cdot \cos \varphi_0 + a_2 \cdot \sin \varphi_0)}{\sigma^2}} d\varphi_0,$$

где $\alpha_4^2 = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2$. Интегрирование по φ_0 дает $2\pi \cdot I_0(r \cdot \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1 / \sigma^2)$, интегрирование по φ_1 дает

$$2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{I_1 \left(\frac{r \cdot \alpha_3 \cdot \sin \varphi_2}{\sigma^2}\right)}{\left(\frac{r \cdot \alpha_3 \cdot \sin \varphi_2}{\sigma^2}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad \text{поэтому}$$
$$W(r) = \frac{r^3}{\left(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma\right)^4} \cdot e^{-\frac{r^2 + \alpha_4^2}{2\sigma^2}} \cdot 4\pi \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sigma^2}{r \cdot \alpha_3} \cdot \int_0^{\pi} e^{\frac{r \cdot \alpha_4 \cdot \cos \varphi_2}{\sigma^2}} \cdot I_1 \left(\frac{r \cdot \alpha_3 \cdot \sin \varphi_2}{\sigma^2}\right) \cdot \sin \varphi_2 \cdot d\varphi_2.$$

Используя приведенный выше табличный интеграл, получаем

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

А. К. Балыко

۲

$$\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \sin t \cdot ch(v \cdot \cos t) \cdot I_{\frac{1}{2}}(u \cdot \sin t) \cdot dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot (u^{2} + v^{2})^{-\frac{1}{2}} \cdot I_{1}(\sqrt{u^{2} + v^{2}})$$

и после подстановки $u = r \cdot \alpha_3 / \sigma^2$, $v = r \cdot a_2 / \sigma^2$ имеем $R_4 = \frac{\pi \cdot \alpha_3}{\alpha_4} I_1(\frac{r \cdot \alpha_4}{\sigma^2})$.

Окончательно получим формулу для плотности распределения модуля радиус-вектора в четырехмерном пространстве

$$W(r) = \frac{r^3}{\sigma^4} \cdot e^{-\frac{r^2 + a_4^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{I_1\left(\frac{r \cdot \alpha_4}{\sigma^2}\right)}{\frac{r \cdot \alpha_4}{\sigma^2}}$$

При $\alpha_4 = 0$ множитель $w_4(r) = \frac{I_1\left(\frac{r \cdot \alpha_4}{\sigma^2}\right)}{\frac{r \cdot \alpha_4}{\sigma^2}} = \frac{1}{2}.$

5. Преобразование координат *n*-мерного евклидового пространства в *n*-мерное сферическое имеет вид [4]

Якобиан этого преобразования $Q_n = r^{n-1} \cdot \sin^{n-2} \varphi_{n-2} \cdot \sin^{n-3} \varphi_{n-3} \cdot \dots \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1$ [4]. Плотность распределения модуля радиус-вектора получается из формулы

$$W_{5}(r) = \frac{r^{n-1}}{(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma)^{n}} \cdot e^{-\frac{r^{2} + a_{n}^{2}}{2\sigma^{2}}} \cdot R_{n}, \quad \text{где } \alpha_{n}^{2} = a_{1}^{2} + a_{2}^{2} + a_{3}^{2} + \ldots + a_{n-1}^{2} + a_{n}^{2},$$
$$R_{n} = \int_{0}^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_{n} \cdot \cos \varphi_{n-2}}{\sigma^{2}}} \sin^{n-2} \varphi_{n-2} \cdot d\varphi_{n-2} \int_{0}^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_{n-1} \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdot \cos \varphi_{n-3}}{\sigma^{2}}} \sin^{n-3} \varphi_{n-3} \cdot d\varphi_{n-3} \dots$$
$$\dots$$
$$\prod_{0}^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_{4} \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdots \cdot \sin \varphi_{3} \cdot \cos \varphi_{2}}{\sigma^{2}}} \sin^{2} \varphi_{2} \cdot d\varphi_{2} \int_{0}^{\pi} e^{\frac{r \cdot a_{3} \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdots \cdot \sin \varphi_{2} \cdot \cos \varphi_{1}}{\sigma^{2}}} \sin \varphi_{1} \cdot d\varphi_{1} \int_{0}^{2\pi} e^{\frac{r \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdots \cdot \sin \varphi_{2} \sin \varphi_{1} \cdot (a_{1} \cdot \cos \varphi_{0} + a_{2} \cdot \sin \varphi_{0})}{\sigma^{2}}} d\varphi_{0}.$$

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

110

۲

۲

Плотности распределения вероятности модуля радиус-вектора со случайными координатами

۲

Первое интегрирование по ϕ_0 дает $2\pi \cdot I_0 \left(\frac{r \cdot \alpha_2 \cdot \sin \phi_{n-2} \cdot ... \cdot \sin \phi_2 \cdot \sin \phi_1}{\sigma^2} \right)$, второе интегриро-

вание по ϕ_1 дает $2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{I_1 \left(\frac{r \cdot \alpha_3 \cdot \sin \phi_{n-2} \cdot ... \cdot \sin \phi_3 \cdot \sin \phi_2}{\sigma^2} \right)}{\left(\frac{r \cdot \alpha_3 \cdot \sin \phi_{n-2} \cdot ... \cdot \sin \phi_3 \cdot \sin \phi_2}{\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$, третье интегрирование по ϕ_2 дает

$$4\pi^{2} \cdot \frac{I_{1}(\frac{r \cdot \alpha_{4} \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdot ... \cdot \sin \varphi_{3}}{\sigma^{2}})}{\frac{r \cdot \alpha_{4} \cdot \sin \varphi_{n-2} \cdot ... \cdot \sin \varphi_{3}}{\sigma^{2}}}$$
 и т. д.

В результате многократного интегрирования с применением формулы (1) приходим к выражению для плотности распределения модуля радиус-вектора в *n*-мерном пространстве (*n* > 1)

$$W_{n}(r) = \frac{r^{n-1}}{\sigma^{n}} \cdot e^{-\frac{r^{2} + a_{n}^{2}}{2\sigma^{2}}} \cdot \frac{I_{n}}{\frac{1}{2} - 1} \left(\frac{r \cdot \alpha_{n}}{\sigma^{2}}\right)}{\left(\frac{r \cdot \alpha_{n}}{\sigma^{2}}\right)^{\frac{n}{2} - 1}}.$$

При $\alpha_{n} = 0$ множитель $w_{n}(r) = \frac{I_{n}}{\frac{1}{2} - 1} \left(\frac{r \cdot \alpha_{n}}{\sigma^{2}}\right)}{\left(\frac{r \cdot \alpha_{n}}{\sigma^{2}}\right)^{\frac{n}{2} - 1}} = 2^{\frac{n}{2} - 1} \cdot \Gamma(n/2),$ где $\Gamma(v)$ – гамма-функция.

Таким образом, в работе получено выражение для плотности вероятности распределения модуля радиус-вектора *n*-мерного пространства.

При выводе приведенных выше соотношений в некоторых случаях использовались разложения в ряд специальных функций. При этом было получено ранее неизвестное выражение для сумм биноминальных коэффициентов

$$\sum_{k=0}^{n} (-1)^{k} \cdot \frac{(2 \cdot k)!}{(2 \cdot k - m)!} \cdot C_{k}^{n} = 0,$$

 $n \ge m + 1.$

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1966.

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

3. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: ГИФМЛ, 1963.

4. Смирнов, В. И. Курс высшей математики. Т. 4. / В. И. Смирнов. – М.: ГИТТЛ, 1953.

Статья поступила 5 июня 2015 г.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

111

 $(\mathbf{\Phi})$

ЭКОНОМИКА

 $(\blacklozenge$

УДК 338:621.37/39

МОДЕЛЬ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КЛАСТЕРА В ОСОБОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

М. В. Чекаданова

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

Описаны цели и задачи, структура, участники, механизмы взаимодействия, источники экономической эффективности модели инновационного развития радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне.

КС: модель, инновационное развитие, радиоэлектронный кластер, особая экономическая зона

MODEL OF THE RADIO-ELECTRONIC CLUSTER INNOVATIVE DEVELOPMENT IN THE SPECIAL ECONOMIC ZONE

M. V. Chekadanova

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

The purposes and tasks, structure, participants, interaction mechanisms, sources of economic efficiency of model radio-electronic cluster innovative development in the special economic zone are described in the article.

Keywords: model, innovative development, radio-electronic cluster, special economic zone

Предлагаемая модель инновационного развития радиоэлектронного кластера (рисунок) должна послужить достижению следующей цели: создание научно-производственной территории для решения государственных задач глобального технологического лидерства России к 2025 году в области СВЧ-электроники. В рамках поставленной цели предполагается решение следующих задач:

• создание инновационно-активной площадки на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина», обеспечивающей функционирование цепочки полного научно-производственного цикла посредством Национального центра СВЧ-электроники, особой экономической зоны (ОЭЗ), промышленного и инновационно-территориального кластеров, технопарка, образовательного кластера и других моделей взаимодействия и кооперации, в том числе международного;

• создание механизмов концентрации ресурсов для разработки и производства продукции мирового уровня посредством институтов партнёрства органов власти, фундаментальной науки, прикладной науки, производства, образования, бизнеса;

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Модель инновационного развития радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне

۲

• применение механизмов комплексной поддержки научно-производственных «Start-up», развития предпринимательской деятельности, сотрудничества с финансовыми институтами.



в ОЭЗ

Результатом работы кластера должны стать *перспективные конструкторско-технологические решения, определяющие создание передового рыночного продукта*.

Предлагаемая система интеграции участников научно-производственного кластера (НПК) решает задачи:

• формирование условий для динамичного развития малых и средних частных компаний – интеграторов-резидентов, способных осуществлять коммерцилизацию высокотехнологич-

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

М. В. Чекаданова

 $(\blacklozenge$

ной продукции и услуг и формировать перспективный спрос на продукцию и услуги малых и средних предприятий в научно-технической сфере, вузов и научных организаций;

• выстраивание на базе компаний – интеграторов-резидентов преимущественно российских <u>технологических цепочек</u> поставок, в т. ч. обеспечивающих выполнение задач импортозамещения высокотехнологичной продукции;

• формирование вокруг кластера <u>«инновационного пояса»</u> из компаний, научных организаций и высших учебных заведений;

• обеспечение выхода компаний – интеграторов-резидентов на <u>мировые рынки</u> интеллектуальной собственности, высокотехнологичной продукции и услуг, финансовоинвестиционные.

Структурно модель состоит из «закрытой области», включающей в себя участников радиоэлектронного кластера и «инновационного пояса» из интеграторов-резидентов, и «открытой области», состоящей из механизма международной научно-производственной кооперации и резидентов, реализующих инновационные проекты самостоятельно и/или поставляющих инновационные решения участникам кластера. Две области располагаются в сфере с высокой концентрацией экономических преференций, научного, образовательного, трудового, инфраструктурного потенциала ОЭЗ технико-внедренческого типа (ТВТ) «Исток» на территории наукограда Фрязино.

Радиоэлектронный кластер состоит из якорных предприятий, проводящих научноисследовательские и опытно-конструкторские работы для обеспечения национальных стратегических интересов РФ, а также интересов населения, бизнеса и инвесторов. Они обеспечивают разработку и продвижение на российский и глобальные рынки товаров и услуг, тем самым обеспечивая рост качества жизни населения. Якорные предприятия – это генераторы и усилители инноваций, разработчики сложной и комплексной продукции и услуг.

Особенностью якорных предприятий является то, что они изначально ориентированы на работу с госзаказом, в последние годы стремятся обеспечить выход своей продукции на мировые рынки и имеют характерный типовой набор проблем при управлении продуктовыми проектами: слабая проработка коммерческой и маркетинговой составляющей, акцент на технические характеристики, недостаточная экспертная поддержка и отсутствие реальной возможности пересмотра актуальности проекта при изменении внешних условий. Для учета требований быстроменяющегося рынка и всесторонней оценки проектов предлагается использовать методологию stage-gate («последовательных шлюзов»), состоящую из формализованных процедур, предполагающих поэтапный отбор и отсев проектов исходя из информации об их текущем состоянии. Для регулярной и оперативной координации процесса ускоренной разработки и запуска нового продукта в производство предлагается использовать следующие успешные мировые практики:

• формирование межфункциональных проектных команд, включающих представителей R&D (НИОКР) центра, производственных и маркетинговых подразделений и/или компаний;

• внедрение инструментов коллективной работы и создание условий для взаимодействия и заинтересованности в конечном продукте интеграторов-резидентов (например, через совместное владение патентом на результат научной деятельности);

• перекрестный мониторинг процессов разработки продукта и совершенствования технологии производства противоположными группами;

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

Модель инновационного развития радиоэлектронного кластера в особой экономической зоне

• близкое размещение исследовательских и производственных компаний (например, в промышленной зоне городского округа Фрязино);

применение технологий виртуального моделирования производственного процесса.

Якорные предприятия, работая по модели «открытых инноваций», ищут организаций-партнеров для реализации собственных инновационных идей и для привлечения идей извне, а также для разделения рисков с учетом потенциальных выгод.

Резиденты (представители малого и среднего бизнеса) – это проводники и исполнители; это жизненно важный элемент НПК, который материализует инновационную идею, повышает уровень жизни населения через образование новых рабочих мест, увеличение налоговых платежей в бюджеты всех уровней, обновление фондов, благотворительность и прочее.

Интеграторы-резиденты выполняют две основные функции:

• <u>Проектного офиса:</u>

 – является интерфейсом между заказчиками и якорными предприятиями в направлении разработки ЭКБ под нужды заказчиков;

администрирует проекты совместных разработок и конечных продуктов с резидентами ОЭЗ;

- организует разработку по принципу открытых инноваций.

• Коммерческого офиса:

- осуществляет маркетинг продуктов с СВЧ ЭКБ;

– проводит переговоры с потенциальными потребителями СВЧ ЭКБ в своих продуктах;

– формирует пул резидентов ОЭЗ для совместных разработок и производства продуктов;

– обеспечивает продажи СВЧ ЭКБ и готовой продукции нерезидентам ОЭЗ в гражданской сфере.

Крупные компании частного и государственного секторов экономики, в т. ч. АО «НПП «Исток» им. Шокина», могут выступать и в роли квалифицированного заказчика перспективных компонентов и систем, которые необходимы для эффективного развития их деятельности. Поставщиком таких интегрированных решений должен стать класс компаний:

• «национальных технологических лидеров», которые уже добились значительных успехов на внутренних и международных рынках и имеют необходимый ресурсный и интеллектуальный потенциал (на модели – резиденты);

• малые инновационные предприятия, физические и юридические лица, которые могут проводить НИРовские и ОКРовские работы на материально-технической базе якорных предприятий, созданной в данном случае АО «НПП «Исток» им. Шокина» в рамках программы технического перевооружения.

Таким образом, на инновационной площадке происходит обмен идеями и технологиями.

Объединение «заказчиков» и «поставщиков» высокотехнологичной продукции и услуг в НПК значительно повысит эффективность решения конечных задач, позволит в кратчайшие сроки собрать и локализовать необходимые цепочки поставок и создать устойчивую администрируемую среду для внедрения стимулирующих пакетов мер государственной поддержки.

Эффективность деятельности кластера и применяемых инструментов государственночастного партнерства обеспечивается созданием системы экономической ответственности всех участников кластера: от исследователей и разработчиков до резидентов, которые выводят конечный продукт на рынок.

М. В. Чекаданова

 $(\blacklozenge$

При этом деятельность кластера не замыкается внутри страны и должна иметь конкретные механизмы по конкуренции за доли на соответствующих мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг («открытая область»). Таким образом, к участию в кластере приглашаются иностранные компании и инвесторы через механизм Европейской научно-технической интеграции – программу «Эврика» или аналогичные программы БРИКС, ЕЭК, АТЭС. Функции Проектного офиса РФ в программе «Эврика» выполняет Центр инновационных технологий и инжиниринга «Московского технологического университета», созданный при участии АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Предполагается использовать «Эврику» как инструмент индустриальных инноваций, которому ставится основная задача – поддержка прикладных исследований и развитие инновационной активности на основе тесного взаимодействия мировой промышленности и науки. «Эврика» ориентирована на развитие промышленного сектора и поддержку инновационной активности малых и средних предприятий и обладает рядом характеристик:

• это гибкая децентрализованная организационная структура (отсутствие жесткой системы централизованного регулирования);

• имеет отработанные механизмы обеспечения финансовой поддержки национальных участников программы со стороны государств;

• использует современные механизмы финансирования проектов, следовательно, является интегратором и проводником участников радиоэлектронного кластера в мировое исследовательское пространство.

Проектный офис «Эврики» в РФ осуществляет координацию участия и заявление российских компаний в проектах Европейской программы научно-технического сотрудничества «Эврика» по развитию инновационных технологий в следующих областях: электроника, приборостроение, биомедицина, химия, ИКТ, новые материалы, транспорт, авиация и космос, энергетика.

В настоящее время формируется механизм проведения экспертизы проектных предложений с участием АО «НПП «Исток» им. Шокина» и «Московского технологического университета» МИРЭА, который объединяет шесть вузов и научно-исследовательских организаций. Участники «открытой области» ведут самостоятельные проекты и являются поставщиками инновационных решений, которые реализуются участниками радиоэлектронного кластера.

В качестве финансовой поддержки инвестиционных проектов «Start-up» (недавно созданных компаний) предлагаются следующие механизмы:

- Институт федеральных целевых программ по развитию высоких технологий.
- Ресурсы, выделяемые на поддержку создания высокотехнологичной продукции:
- по линии федеральных органов исполнительной власти;
- госкорпораций, фондов и др.
- Совместное финансирование проектов страной-партнером.

Для получения экономического преимущества инвестиционных проектов «Start-up» предлагается использовать преференции ОЭЗ ТВТ «Исток», созданной 31.12.2015 г. на территории городского округа Фрязино Московской области Постановлением правительства.

ОЭЗ – часть территории РФ, которая определяется Правительством РФ и на которой действует особый режим осуществления предпринимательской деятельности и может применяться таможенная процедура свободной таможенной зоны. Регламентируется Федеральным законом

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

N 116-ФЗ от 22.07.2005 г. Создается на 49 лет. Предоставляет гарантии резидентам ОЭЗ от неблагоприятного изменения законодательства РФ о налогах и сборах на весь срок функционирования ОЭЗ.

Особый режим предпринимательской деятельности на территории ОЭЗ проявляется в первую очередь в предоставлении резидентам ОЭЗ различного рода льгот: таможенных (внешнеторговых); налоговых; финансовых (различные формы субсидии, которые могут предоставляться в виде снижения арендной платы за пользование земельными участками и производственными помещениями, льготных кредитов и т. п.); административных (упрощенные процедуры регистрации организаций, упрощенный режим въезда-выезда иностранных граждан и т. п.).

По Закону Московской области о Льготном налогообложении в МО установлена пониженная ставка налога на прибыль, зачисляемого в региональный бюджет, при условии направления высвобожденных средств на развитие резидентов. Также предполагается применение ускоренной амортизации и отсутствие ограничений по переносу убытков в будущие периоды. Таким образом, создан механизм стимулирования реинвестирования прибыли.

Преференции по налогу на имущество, земельному и транспортному налогам, страховым взносам на фонд оплаты труда, нулевым ставкам таможенных пошлин, которые входят в себестоимость продукции, создают конкурентное преимущество по цене у резидентов при реализации готовой продукции.

Пониженные ставки страховых взносов на фонд оплаты труда и кооперация внутри кластера и ОЭЗ снижают инвестиционные затраты на создание продуктов (НИР и ОКР). Дополнительно снижают сумму инвестиций нулевые таможенные пошлины на ввоз импортного оборудования для организации НИОКР и производства продукции. Эти два фактора и нулевая ставка ввозного НДС уменьшают инвестиционный поток, а также, при условии привлечения платных заемных ресурсов, сокращают расходы на их привлечение (например, проценты по кредитам), что ведет к росту чистой прибыли.

Разработку системы оценок эффективности функционирования представленной модели инновационного развития радиоэлектронного кластера в ОЭЗ предполагается проводить в следующих направлениях:

• финансовая (коммерческая) эффективность, учитывающая последствия реализации проекта для его непосредственных участников – резидентов кластера;

• экономическая эффективность, показывающая затраты и результаты, связанные с реализацией проектов, выходящие за пределы прямых финансовых интересов его участников;

• бюджетная и налоговая эффективность, учитывающая отношение бюджетного эффекта к объему полученных резидентами ОЭЗ льгот по таможенным пошлинам и другим налогам и вложение бюджетных средств в реализацию проектов;

• социальная эффективность, характеризующая общественную сторону осуществления проектов и его значимость для населения региона и РФ;

эффективность международного сотрудничества.

Формирование радиоэлектронного кластера на принципах, описанных в модели, инициированного АО «НПП «Исток» им. Шокина», усилит модернизационные процессы и стимулирует инновационную активность хозяйствующих субъектов для устойчивого развития экономики РФ и г. Фрязино в долгосрочной перспективе.

М. В. Чекаданова

۲

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.eurekanetwork.org

2. Абашкин, В. Л. Методические материалы по разработке и реализации программ развития инновационных территориальных кластеров и региональной кластерной политике/ В. Л. Абашкин, Е. С. Куценко, П. Б. Рудник. – М.: НИУ ВШЭ, 2016.

3. **Гершман, М. А.** Программы инновационного развития компаний с государственным участием: промежуточные итоги и приоритеты / М. А. Гершман. – М.: НИУ ВШЭ, 2015.

4. О льготном налогообложении в Московской области: Закон Московской области от 24.11.2004 № 151/2004-ОЗ.

5. Об особых экономических зонах в Российской Федерации: Федеральный закон от 22.07.2005 № 116-ФЗ.

6. О промышленных кластерах и специализированных организациях промышленных кластеров: Постановление Правительства РФ от 31.07.2015 № 779.

7. О создании на территории городского округа Фрязино Московской области особой экономической зоны технико-внедренческого типа: Постановление Правительства РФ от 31.12.2015 № 1538.

Статья поступила 15.04.2016 г.

🚃 НОВЫЕ КНИГИ 🚃

ДЖУРИНСКИЙ К. Б. Основы технологии производства радиоэлектронных средств: курс лекций /К. Б. Джуринский. Московский гос.ун-т информационных технологий, радиотехники и электроники. – МИРЭА. Филиал в г. Фрязино. – Фрязино, 2016. – 280 с.: ил.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», дисциплина 210000 «Технология производства электронных средств», очной, очно-заочной и заочной форм обучения и может быть использовано для повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

🚃 НОВЫЕ КНИГИ 🚞

 $(\mathbf{0})$

ШАРОВ Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 640 с.: ил.

Рассмотрены вопросы, связанные с теорией и принципом действия волноводных устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн, методами их расчета и проектирования, конструктивной реализацией, электрическими характеристиками. Значительное внимание уделено широкополосным устройствам, в том числе предназначенным для работы в многомодовых волноводных трактах. Рассмотрены волноводные направленные ответвители разных типов, делители мощности, преобразователи типов волн и волноводные фильтры различного назначения и конструктивного исполнения. Представлены данные по таким элементам СВЧ-трактов, как волноводные мосты и тройники, аттенюаторы и нагрузки, волноводные рупорные излучатели, фазовращатели и поляризаторы, устройства на ферритах, фланцевые соединения, металлодиэлектрические волноводы и устройства на них для диапазона коротких миллиметровых и субмиллиметровых волн. Материал изложен как с позиции электродинамики СВЧ, так и в значительной мере с точки зрения теории цепей (общей и СВЧ).

Для широкого круга специалистов, работающих в области техники СВЧ, а также студентов, аспирантов, преподавателей вузов радиотехнических и радиофизических специальностей.

۲

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);

- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;

• краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

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

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

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – A4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

• растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;

размер рисунка – не более 17 × 20 см;

• буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;

• текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например
 подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научнотехнической области.

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

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

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(529), 2016

۲

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

۲

СЕРИЯ 1 **«СВЧ-ТЕХНИКА»** НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

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

Подписано к печати 9.6.2016 г.	Усл. п. л. 15,0	Формат 60×88 ^{1/8}
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"	Учизд. л. 15,5	Тираж 500
г. Москва	Индекс 36292	13 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12 E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru

۲

۲

۲



Подписной индекс 36292 в каталоге агентства «Роспечать»

۲

۲