

СЕРИЯ 1

# СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (508)

2011

ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

## СЕРИЯ 1 **СВЧ-ТЕХНИКА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск	1	(50	8)
•		· ·	

2011

Издается с 1950 г.

### Главный редактор д.т.н. **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

к.т.н. С.А. Зайцев (зам. главного редактора), д.т.н. Б.Н. Авдонин (зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»), Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. А.В. Галдецкий, Б.Ф. Горбик, С.И. Гришин, д.ф.-м.н. Б.Ч. Дюбуа, д.т.н. А.Д. Закурдаев, д.т.н. С.С. Зырин, к.т.н. Ю.А. Кондрашенков, к.т.н. А.С. Котов, д.т.н. П.В. Куприянов, к.т.н. В.В. Лисс, д.т.н. М.И. Лопин, В.М. Малыщик, к.т.н. П.М. Мелешкевич, к.т.н. В.Ю. Мякиньков, д.ф.-м.н. А.Б. Пашковский, Е.Н. Покровский, к.т.н. А.В. Потапов, к.т.н. С.Е. Рожков, д.т.н. К.Г. Симонов, В.П. Стебунов (ответственный секретарь), к.т.н. А.М. Темнов, д.т.н. Н.Д. Урсуляк, д.т.н. М.М. Трифонов (ЗАО НПП «Исток-Система»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»), к.т.н. А.Г. Михальченков (МУП «ДПРН Фрязино»), д.ф.-м.н. А.И. Панас (ИРЭ РАН), к.т.н. В.В. Абрамов (ФГУП СКБ ИРЭ РАН), А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2011 г.

#### ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящий выпуск научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника» посвящен юбилейной дате – 55-летию со дня создания на «Истоке» катодного отдела.

В конце 1955 года в НИИ-160 (ныне ФГУП «НПП «Исток») впервые в Советском Союзе было создано специализированное подразделение с задачами исследования эмиссионных материалов, разработки инженерных методов расчета и конструирования и организации производства высокоэффективных катодов.

За период существования катодного отдела его сотрудниками были разработаны все известные к настоящему времени типы катодов практически для всех классов электровакуумных приборов СВЧ.

В частности, были воссозданы во всех возможных технологических вариантах наиболее экономичные и дешевые оксидные катоды, которые нашли широкое применение в первых вакуумных приборах СВЧ, особенно на начальном этапе развития радиолокационной техники. Впервые были разработаны ленточные микрокатоды с молекулярно-напыленным оксидным покрытием, обладающие рекордными эмиссионными параметрами и долговечностью (до 2 А/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме при долговечности несколько тысяч часов), что обеспечило создание приборов на быстрой циклотронной волне (ЭСУ и ЦЗКУ), разработанных на нашем предприятии.

Основой современных электровакуумных приборов СВЧ (ЛБВ, ЛОВ, магнетронов, клистронов, клистродов) являются сильноточные металлопористые катоды. Особенно велика их роль в разработке многолучевых приборов, поскольку идея «многолучевости», решая проблему высоких напряжений, расширения полосы усиливаемых частот, повышения КПД, неизбежно требует увеличения катодного тока.

В настоящее время разработанные металлопористые катоды обеспечивают плотность тока в импульсном режиме до 10 А/см<sup>2</sup> при долговечности 20...30 тыс. ч. К уникальным разработкам необходимо отнести также катоды для ЛОВ миллиметрового диапазона, обеспечивающие ток до 50 А/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме с долговечностью не менее 1000 ч.

Особо следует отметить исследования и разработку металлосплавных катодов – этот вид катодов не имеет зарубежных аналогов. Впервые в мире эффективные катоды были созданы не на основе окисей активных металлов, а на основе сплавов металлов. Эта разработка позволила решить проблему создания «холодных» вторично-эмиссионных катодов для магнетронных усилителей. Применение металлосплавных катодов в магнетронах миллиметрового диапазона длин волн не имеет альтернативы: плотность тока 100...150 A/см<sup>2</sup> с долговечностью до 2000 ч могут обеспечить в настоящее время только металлосплавные катоды.

Низкая скорость испарения металлосплавных катодов позволяет создавать конструкции катодных узлов с малым запасом эмиссионного материала, обеспечивая таким образом их низкую тепловую инерционность. Миниатюрные металлосплавные катоды для ЛОВ миллиметрового диапазона при высокой плотности катодного тока (не менее 100 A/cm<sup>2</sup>) имеют время готовности на уровне одной секунды.

С первых дней создания катодного отдела его тематика была насыщена сложными научно-техническими проблемами. Их успешное решение оформлялось в виде научных отчетов, публикаций в журналах и защитой диссертаций. За время существования катодного отдела (особенно до 1990 г.) было защищено 25 кандидатских диссертаций и 3 докторских. Сотрудники отдела дважды награждались Государственной премией СССР.

Статьи, представленные в настоящем выпуске сборника, свидетельствуют о том, что творческий потенциал сотрудников катодного отдела не увядает.

## СОДЕРЖАНИЕ

Выпуск	1	(50	<b>)8)</b>

## 2011

\_

## Электровакуумные приборы

Дюбуа Б.Ч., Королёв А.Н. – Современные эффективные катоды (К истории их созда- ния на ФГУП «НПП «Исток»)	5
Бакуменко А.В., Борисов А.А., Галина Н.М., Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Дюбуа Б.Ч., Литвинюк И.Ю., Михальченков А.Г., Покровский Е.Н., Темирязева М.П., Туру- тин Ю.А. – Об одной возможной причине нестабильности сигнала атомно-лучевой трубки в системе «ГЛОНАСС-М»	25
<i>Дюбуа Б.Ч., Поливникова О.В.</i> – Низкотемпературные припои для соединения эмис- сионного тела металлопористого катода с катододержателем	39
Дюбуа Б.Ч., Земчихин Е.М., Поливникова О.В., Пугнин В.И., Чистова Г.И., Юнаков А.Н. – Катоды для мощных многолучевых вакуумных приборов СВЧ	44
Галина Н.М., Дюбуа Б.Ч., Литвинюк И.Ю., Макаров А.П., Поливникова О.В., Сухоруко- ва О.В., Чистова Г.И., Востров М.С., Закурдаев А.Д., Ипполитов В.М. – Катодные узлы для мощных многолучевых клистронов с малым временем готовности	54
<i>Соколов А.М., Каргин А.Н., Морозов О.А.</i> – Современные металлооксидные катоды для СВЧ-приборов	64

## ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

## SERIES 1

## **SVCH-TEKHNIKA**

(Microwave Engineering)

#### COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise "RPC "Istok" The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (MINPROMTORG) Radioelectronic Industry Department

#### CONTENTS

Issue 1(508) 2011 Founded in 195
----------------------------------

#### **Electrovacuum devices**

<i>Djubua B.Ch., Korolev A.N.</i> – Modern effective cathodes (To the history of their creation in FSUE "RPC "Istok")	5
Bakumenko A.V., Borisov A.A., Galina N.M., Golenitsky I.I., Dukhina N.G., Djubua B.Ch., Litvinyuk I.Yu., Mikhalchenkov A.G., Pokrovsky E.N., Temiryazeva M.P., Turutin Yu.A. – About one of possible reasons of signal instability of atomic-beam tube in «GLONASS-M» system	25
<i>Djubua B.Ch., Polivnikova O.V.</i> – Low-temperature solders for connecting the emission body of a dispenser cathode with the cathode holder	39
<i>Djubua B.Ch., Zemchikhin E.M., Polivnikova O.V., Pugnin V.I., Chistova G.I., Yunakov A.N.</i> – Cathodes for microwave power multiple-beam vacuum devices	44
Galina N.M., Djubua B.Ch., Litvinyuk I.Yu., Makarov A.P., Polivnikova O.V., Sukhoruko- va O.V., Chistova G.I., Vostrov M.S., Zakurdaev A.D., Ippolitov V.M. – Cathode assemblies for high power multiple-beam klystrons with a low readiness time	54
Sokolov A.M., Kargin A.N., Morozov O.A. – Up-to-date metal oxide cathodes for microwave devices	64

## ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.7

#### СОВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ КАТОДЫ

(К истории их создания на ФГУП «НПП «Исток»)

#### Б. Ч. Дюбуа, А. Н. Королёв

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Кратко рассмотрены результаты исследований и разработок эмиссионных материалов и катодных узлов, выполненных за последние 55 лет в катодном отделе «Истока». Описаны основные достижения в области технологии оксидных, металлопористых и металлосплавных катодов.

*КС: эмиссионный материал, катодный узел, технология, оксидный, металлопористый, металлосплавной* 

The results of research and development of emission materials and cathode assemblies made for the last 55 years in the cathode department of "Istok" have been considered briefly. The main achievements in the field of technology of oxide, dispenser and metal-alloy cathodes are described.

Keywords: emission material, cathode assembly, technology, oxide, dispenser, metal-alloy

Хорошо, если ТАМ что-то есть, но лучше, если ТАМ ничего нет.

Эдисон Томас Алва (1847 – 1931 гг.)

#### 1. НЕМНОГО ПРЕДЫСТОРИИ

Термоэлектронная и вторично-электронная – два вида эмиссии электронов, которые нашли широкое применение в современных ЭВП СВЧ. Правда, в последние годы интенсивно ведется поиск путей построения конструкций и технологий изготовления миниатюрных ЭВП СВЧ с использованием полевой (автоэлектронной) эмиссии [1].

Со дня открытия термоэлектронной эмиссии прошло более 100 лет. В 1883 году Т. А. Эдисон впервые обнаружил это явление в лампе накаливания с угольной нитью, хотя ошибочно предположил, что ток, идущий с нити, создается заряженными частицами воздуха или углерода (отсюда, по традиции, за рубежом эмиссия этого вида называется термоионной).

Истинная природа носителей электрических зарядов, испускаемых накаленным проводником в вакууме, была установлена в 1899 году Дж. Дж. Томсоном, который показал, что отношение их заряда к массе совпадает со значением этого отношения для электрона.

Теоретическое рассмотрение явления термоэлектронной эмиссии на основе классической электронной теории металлов было сделано в 1901 году О.У. Ричардсоном. В дальнейшем С. Дэшман внес уточнения в это рассмотрение с учетом достижений квантовой теории, в результате чего было получено известное уравнение Ричардсона-Дэшмана для термоэлектронной эмиссии.

Явление вторичной электронной эмиссии было открыто в 1902 году Остином и Й. Штарке. Позднее, в 1903 году, Ф. Э. А. Ленард изучил это явление подробно и установил, что в потоке вторичных электронов имеются медленные, истинно вторичные электроны и быстрые, отраженные электроны (рассеянные атомами мишени).

Автоэлектронная эмиссия была открыта Р. У. Вудом в 1897 году. В 1928 году Р. Фаулер и Л. Нордхейм дали теоретическое объяснение автоэлектронной эмиссии на основе туннельного эффекта.

Первый эффективный катод появился в результате открытия в 1903 году А. Венельтом высокой термоэлектронной активности окисей щелочно-земельных металлов – возник так называемый оксидный катод, обеспечивающий при довольно низких температурах (700...900 °C) плотность тока 0,1...0,5 А/см<sup>2</sup>.

Не менее важным является открытие в 1914 году И. Ленгмюром и Роджерсом высокой термоэмиссионной активности проволоки из торированного вольфрама. В дальнейшем это явление было подробно изучено И. Ленгмюром, У. Б. Ноттингемом, У. Браттейном, Беккером и др. на модельных системах, представляющих собой тугоплавкий металл (например, вольфрам), помещенный в поток атомов активных металлов, таких, как торий, барий или цезий. Было показано, что высокая электронная эмиссия в этом случае обусловливается образованием на поверхности вольфрама моноатомной пленки активного металла.

Эти исследования заложили фундамент для разработки современных эффективных и экономичных катодов.

Облик современных конструкций катодных узлов был предопределен в России в 1918 году изобретением А. А. Чернышовым катода с косвенным накалом (до этого все катоды были прямонакальными).

В нашей стране впервые приемно-усилительные лампы с оксидным катодом косвенного накала были разработаны под руководством С. А. Векшинского на ленинградском заводе «Светлана» в 1931 году. В 1934 году эта разработка была передана на фрязинский завод «Радиолампа», на базе которого был организован в 1943 году Электровакуумный институт (ныне ФГУП «НПП «Исток»). Первым директором этого института стал С. А. Векшинский. Его активный интерес к вакуумной технологии, в частности к катодам (он даже имел патент на оксидный катод с металлической дисперсной фазой [2]), положительно сказался на развитии этой тематики в Электровакуумном институте. В этот период времени совершенствованием оксидных катодов занимались в лаборатории А. П. Ивлева (переводчик широко известной книги Германа и Вагнера «Оксидный катод», вышедшей под редакцией Б. М. Царева), а подогревателями к катодам – в лаборатории Г. А. Метлина.

После войны, в 1946 году, в отделе, руководимом Г. А. Метлиным, была создана катодная группа, в которой под руководством Б. М. Царева решались вопросы дальнейшего совершенствования оксидных катодов для приемно-усилительных ламп и намечались пути решения принципиально новых катодных проблем в связи с развитием мощных магнетронов и клистронов для радиолокации.

Впервые возникла необходимость получения больших плотностей катодного тока в импульсном режиме, что для оксидных катодов ограничивалось не их эмиссионной способностью, а появлением искрений в оксидном покрытии при высоких анодных напряжениях. Необходимо было найти пути увеличения электро- и теплопроводности оксидного покрытия, повышения прочности сцепления покрытия с керном и увеличения запаса активного вещества.

Иными словами, складывались новые требования к катодам, в соответствии с которыми необходимо было иметь:

- плотность тока в постоянном режиме до 1 А/см<sup>2</sup>, в импульсном - 5...10 А/см<sup>2</sup>;

 – гладкую эмиссионную поверхность и высокую электро- и теплопроводность эмиссионного покрытия, что должно обеспечить отсутствие искрений и устойчивость к пробоям вакуумных промежутков в области катода;

 низкую скорость испарения активных веществ с катода для предотвращения паразитной эмиссии с окружающих катод электродов;

- стабильность эмиссионных параметров при воздействии электронной бомбардировки;

 – быстрое восстановление работоспособности катода после отравления эмиссии остаточными газами или после воздействия ионной бомбардировки.

Эти требования начали формироваться в 40 – 50-х годах. В дальнейшем в связи с необходимостью увеличения выходной мощности ЭВП СВЧ, повышения их надежности и долговечности, освоения более коротковолнового диапазона генерируемых колебаний, уменьшения массы и габаритных размеров приборов требования к катодам расширялись и ужесточались. Под влиянием этих требований и формировалась катодная наука, которая впитывала в себя необходимые знания из физики и химии поверхности твердого тела.

Конструирование катодных узлов базировалось на достижениях теоретической механики, металловедения и сопротивления материалов.

Для исследования свойств эмиссионных материалов и катодных узлов разрабатывались и использовались современные методы диагностики твердых тел (электронная микроскопия и Оже-спектроскопия, растровая электронная микроскопия, термографический анализ и др.). Технология катодов включила в себя многие достижения порошковой металлургии и пленочной технологии.

Исследования и разработки новых эмиссионных материалов и катодных узлов существенно ускорились после создания на «Истоке» в конце 1955 года специализированного катодного отдела. Это была первая организация такого рода в Советском Союзе.

Первым начальником этого отдела стал Б. Н. Попов.

#### 2. ОКСИДНЫЕ КАТОДЫ

Оксидный катод – наиболее экономичный и дешевый из всех типов термоэлектронных катодов – используется традиционно в приемно-усилительных лампах (которые продолжают еще выпускать) и электронно-лучевых трубках. В приборах СВЧ он прочно удерживает позиции в мощных импульсных клистронах и ЛБВ с отбором импульсного тока до 5 A/cm<sup>2</sup> в течение более 10 тыс. ч, в ЛБВ для аппаратуры спутников связи – с отбором тока до 0,15 A/cm<sup>2</sup> в течение 100 тыс. ч.

Получению этих параметров предшествовала длительная работа в разных направлениях. Всесторонне изучен весь комплекс физико-химических параметров оксидного катода (электрои теплопроводность оксидного слоя, работа выхода электронов, вторично-электронная эмиссия, низкочастотные флуктуации эмиссии, адсорбция активных металлов, испарение компонентов катода [3-9]). Эти исследования позволили уточнить механизм работы оксидного катода и выработать рекомендации по режимам его использования в приборах.

В связи с необходимостью решения проблемы повышения плотности тока, отбираемого с оксидного катода, проводились исследовательские и технологические работы по металлизации оксидного слоя [10, 11]. С целью решения этой же задачи была разработана технология нанесения тонких и плотных оксидных покрытий с помощью дуговой плазменной струи [12, 13]. Покрытия получались при совместном нанесении карбоната щелочно-земельных металлов с никелевым порошком.

Особое внимание было уделено керну оксидного катода. Было изучено влияние различных присадок в керне этого катода на его эмиссионные свойства и долговечность [14, 15]. Была показана целесообразность использования в качестве присадки к никелевому керну кальция, который достаточно хорошо активирует катод и не дает прослоек с высоким сопротивлением между керном и оксидным покрытием.

Существенное улучшение параметров оксидного катода обеспечила разработка ионно-плазменного метода нанесения тонкопленочных оксидных покрытий [16, 17]. Микрокатоды с таким покрытием, предназначенные для формирования ленточных электронных потоков, обеспечивают плотность токоотбора до 2 А/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме при долговечности несколько тысяч часов [18].

Результаты исследовательских и технологических работ находят выражение в разработке надежных и долговечных катодно-подогревательных узлов. Особое внимание уделяется повышению экономичности узлов, снижению их времени разогрева, повышению формоустойчивости в режиме циклического включения накала, контролю качества узлов в процессе их производства [19 – 21].

В связи с развитием идеи создания вакуумных интегральных схем разрабатываются конструкция и технология оксидного катода на диэлектрической подложке на основе использования методов планарной технологии [22].

Для обеспечения производства катодных узлов было разработано специальное оборудование и организованы производственные помещения, в которых поддерживались необходимые температура, влажность и чистота окружающей среды.

Для нанесения качественных оксидных покрытий были разработаны и изготовлены полуавтоматы с программным управлением [23, 24].

В связи с необходимостью разработки эффективных катодов для мощных магнетронных приборов в катодном отделе были начаты исследования эмиссионных свойств тугоплавких окисей и металлокерамических систем. Были всесторонне изучены термо- и вторичноэлектронная эмиссии окиси тория, редкоземельных металлов, скандия и иттрия, в частности влияние на эмиссию этих веществ электронной бомбардировки и отравления кислородом [25–29]. Было показано, что наиболее перспективными среди этого класса соединений являются окись иттрия, а также твердые растворы на основе окисей тория, иттрия и лантана, которые обладают значением коэффициента вторично-электронной эмиссии, большим, чем исходные окиси.

Наши представления о свойствах различных оксидных катодов на разных этапах их развития нашли отражение в монографиях, выпущенных сотрудниками «Истока» [30 – 32].

#### 3. МЕТАЛЛОПОРИСТЫЕ КАТОДЫ

С 1950 года начинается новый этап в развитии катодной техники, связанный с появлением сильноточных металлопористых (металлокапиллярных, диспенсерных, распределительных) катодов [33].

Металлопористые катоды нашли применение в основном в приборах О-типа: в мощных импульсных многолучевых клистронах с отбором тока до 30 A/см<sup>2</sup> при долговечности несколько тысяч часов, в ЛБВ с отбором тока в постоянном режиме до 2 A/см<sup>2</sup> в течение более 50 тыс.ч, в ЛОВ мм-диапазона – до 50 A/см<sup>2</sup> в течение 1000 ч.

За очень короткий срок (около года) была разработана технология первого отечественного металлокапиллярного катода (Л-катода) [34]. Были отработаны технология изготовления пористых вольфрамовых таблеток, их пайка с молибденовым керном, выработаны требования к специальным катодным вольфрамовым порошкам и разработаны первые образцы оборудования для изготовления таких катодов[35], разработаны методы количественного анализа примесей в катодных материалах [36].

Дальнейшее совершенствование Л-катода шло в направлении уменьшения скорости испарения бария с его поверхности за счет повышения плотности губки [37], улучшения равномерности распределения пористости губки путем использования вольфрамового порошка со сферической формой частиц [38].

Появился первый успешный опыт использования Л-катода в отражательных клистронах [39] (ранее в этих приборах использовались только оксидные катоды).

Однако технология Л-катода довольно сложна и недостаточно гибка в применениях к различным типоразмерам катодных узлов. Поэтому развивались другие варианты технологий металлопористых катодов – прессованные и пропитанные [40].

Улучшения параметров металлопористых катодов добивались путем изыскания необходимых составов активных веществ и металлической губки, а также структуры и состава поверхности катода. Некоторого улучшения эмиссионной способности и долговечности катодов удалось достичь в результате введения рения в состав вольфрамовой губки [41, 42]. Существенное улучшение (в 6...8 раз) эмиссионной способности было достигнуто путем осмирования поверхности катода [43 – 46]. Однако долговечность таких катодов ограничивается диффузионным взаимодействием пленки осмия с вольфрамом, сопровождаемым образованием интерметаллического соединения. Для того чтобы преодолеть этот недостаток, было предложено вводить осмий в объем губки катода (объемное осмирование) [47]. Кроме этого, введение менее активного металла, в частности осмия, в губку привело к уменьшению скорости испарения бария в 6...8 раз.

Поскольку металлопористый катод стал основным катодом, применяемым в ЭВП СВЧ, для изучения механизма его работы было разработано специальное оборудование, использовались современные методики. На «Истоке» был создан первый высоковакуумный электронный микроскоп [48]. Дальнейшие усовершенствования сделали его мощным инструментом в исследованиях и контроле свойств поверхности катодов [49 – 51].

Большое значение для изучения механизма работы катодов и выяснения причин их брака имеет разработка количественного химического анализа состава поверхности катода, основанного на методе электронной Оже-спектроскопии [52, 53].

Привлечение рентгеноструктурного анализа, метода Кнудсена и масс-спектрометрического анализа продуктов испарения с катода для изучения химических реакций, происходящих в ка-

тодах на стадиях их изготовления и работы в приборах, позволило повысить стабильность технологического процесса изготовления катодов и увеличить их срок службы [54 – 56].

Экспериментальное и теоретическое изучение работы металлопористого катода привело к выводу, что основной эмитирующей фазой на поверхности катода является моноатомная пленка бария, активированная кислородом [57, 58]. «Пленочная» модель оказалась весьма продуктивной в изучении природы поверхности катода и в разработке новых катодных материалов [59, 60].

Изучение явлений адсорбции и миграции активных металлов на поверхности тугоплавких металлов было необходимо не только для выяснения физикохимии работы катода, но и для решения такой проблемы, как локализация термоэлектронной эмиссии с определенных, строго ограниченных участков поверхности катода, что особенно важно для работы катода в многолучевых приборах. Решение этой проблемы было получено после того, как был понят механизм, обеспечивающий низкую электронную эмиссию металлов в потоке бария (растворение или слабая адсорбция бария [61]), и были найдены высокотемпературные антиэмиссионные материалы. Был найден целый класс таких материалов (цирконий, гафний, сплав молибден-цирконий, карбиды, бориды, дисилициды) и разработаны технологии их нанесения [62 – 67].

Для изготовления катодов многолучевых приборов необходимо было иметь широкий набор технологических приемов, обеспечивающих формирование эмиссионных участков размером от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Поэтому кроме обычных для катодной техники механических приемов обработки эмиссионного тела нашли применение электроэрозионная обработка в среде керосина [68], фотолитография по антиэмиссионному покрытию, нанесенному на поверхность катода [69, 70]. Использование таких «грязных» для катодной техники процессов потребовало введения необходимых корректив в технологию изготовления катодов, чтобы их эмиссионные параметры не изменились после контакта с керосином, органическими растворителями, щелочами и пр.

Рабочая температура металлопористых катодов градусов на двести выше, чем оксидных. Поэтому разработка надежного и долговечного подогревателя для металлопористых катодов оказалась более трудной задачей. Для повышения вибропрочности и долговечности подогревателя было предложено использовать керамическую стойку, на которую крепился подогреватель, покрытый оплавленной вакуумно-плотной керамикой, состоящей из смеси алунда и окиси бериллия [71]. Для увеличения теплопередачи от подогревателя к эмиссионному телу катода было предложено заливать в камеру подогревателя суспензию из молибденового порошка, или смеси порошков тугоплавких металлов [72, 73], или эвтектической смеси окисей алюминия и иттрия [74, 75].

Надежность сборки катодного узла обеспечивается всеми возможными способами крепления его элементов: лазерной и контактной сваркой, пайкой [76 – 79].

Важной тенденцией в разработке катодных узлов является использование вычислительной техники для расчета их тепловых и электрических параметров. При этом важно то, что эти расчеты позволяли оценивать стабильность процесса сборки узлов, выявлять причины брака, причем не только в самом катодно-подогревательном узле, но и в процессе его монтажа в пушку прибора [80].

Взаимосвязь между параметрами катода и условиями его эксплуатации в приборе всегда была важной и «деликатной» проблемой. Деликатной потому, что в каждом конкретном случае, когда в приборе катод не давал нужного тока, необходимо было решать, кто виноват: разработ-

чик катода или разработчик прибора? Поэтому изучение таких явлений, как устойчивость эмиссионных свойств катода к воздействию электронной и ионной бомбардировок, остаточных газов, напылению различных посторонних веществ на поверхность катода – все эти исследования помогали разбираться в сложных процессах, сопровождающих работу катода в приборе, снимать взаимные обвинения, что, в конце концов, обеспечивало успешное выполнение разработок приборов.

Изучение влияния газовой среды на эмиссионные параметры металлопористых катодов показало, что для каждой температуры катода существует некоторое критическое давление газа (кислорода, окиси углерода, двуокиси углерода), при превышении которого наблюдается резкое падение эмиссии катода [81 – 83]. Однако некоторые газы, например окись углерода, водород, при определенных условиях могут и активировать эмиссию катода. Поэтому для эффективной и долговечной работы катода в приборе нужен не «сверхвысокий» вакуум, а восстановительная газовая среда. При быстром подъеме (несколько минут) температуры катода во время его обезгаживания на посту формируется необходимая восстановительная среда (остаточный газ состоит в основном из CO и H<sub>2</sub>), при медленном подъеме температуры – остаточная среда окислительная (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O) [83]. Этот важный факт лежит в основе построения правильной стратегии обезгаживания и обработки катодного узла и всего прибора в целом.

#### 4. МЕТАЛЛОСПЛАВНЫЕ КАТОДЫ

Все рассмотренные выше эффективные катоды, как оксидные, так и металлопористые, содержат активный металл в виде его окиси. Несмотря на высокую термо- и вторично-электронную эмиссию окисей щелочно-земельных металлов, тория, иттрия и др., они обладают рядом недостатков: низкая электро- и теплопроводность, падение эмиссии в результате воздействия электронной бомбардировки, низкая термическая устойчивость.

В магнетронах указанные недостатки особенно ощутимо стали проявляться по мере увеличения генерируемой частоты и мощности: с увеличением анодных токов появлялись искрения (причем с увеличением длительности импульса искрения наступали при меньших токах), нестабильность анодных токов, распыление покрытия.

Использование металлических матриц, заполненных тем или иным способом окисями активных металлов (металлопористые и металлокерамические катоды), улучшало положение дел, но радикально не могло изменить ситуацию: в той или иной степени сохранялись недостатки, присущие эмиссионным системам, содержащим кислород.

Новый подход к синтезированию эмиссионных материалов удалось найти в результате проведения комплекса исследований термо- и вторично-электронной эмиссии, состава поверхности, скорости испарения и других физико-химических свойств металлических сплавов. Эти исследования впервые были начаты в Советском Союзе на «Истоке» в 1960 г., в результате этих исследований был создан новый тип эффективных катодов – металлосплавные катоды [84 – 88].

Существуют три основных параметра, характеризующих эмиссионный материал: работа выхода электронов, коэффициент вторично-электронной эмиссии и скорость испарения активных металлов, которые, в первую очередь, определяют возможность его использования как эффективного источника электронов в приборах О- или М-типа.

Наиболее важным результатом исследования эмиссионных свойств систем металлических сплавов является то, что установлены закономерности появления фазовых составов сплавов с экстремальными величинами работы выхода и коэффициента вторично-электронной эмиссии. Было установлено, что при образовании твердых растворов из компонентов с различной температурой плавления концентрация компонентов в поверхностном слое сплава отличается от объемной, т. е. происходит адсорбция того компонента сплава, который обладает меньшей температурой плавления. В случае, если на поверхности сплава адсорбируется компонент с меньшей работой выхода, его адсорбция приводит к уменьшению поверхностного дипольного момента и, следовательно, к снижению работы выхода; если работа выхода адсорбированного компонента выше – к увеличению работы выхода. Изменение дипольного момента на поверхности сплава приводит к изменению не только работы выхода, но и вероятности выхода медленных, истинно вторичных электронов. При этом коэффициент неупругого отражения электронов при изменении состава сплавов изменяется монотонно, что позволило рассматривать процесс возбуждения вторичных электронов как независимую ионизацию атомов компонентов сплава первичными электронами.

Для двухфазных сплавов (одна из фаз – интерметаллическое соединение, а вторая – тугоплавкий металл) интерметаллическое соединение является источником активного металла, который за счет миграции покрывает моноатомной пленкой поверхность тугоплавкого металла.

Наибольший практический интерес представляют двухфазные сплавы на основе рения и металлов платиновой группы, вторая фаза в которых – интерметаллическое соединение: Re<sub>2</sub>Th, Os<sub>2</sub>Th, Ir<sub>5</sub>La, Ir<sub>5</sub>Ce, Pt<sub>5</sub>Ba, Pd<sub>5</sub>Ba (количество активного металла – 0,5...6 %) [89 – 91].

Металлосплавные катоды обладают рядом свойств, характерных для чистых металлов: устойчивостью эмиссии к действию электронной бомбардировки, высокой электро- и теплопроводностью, гладкостью поверхности. Максимальный коэффициент вторично-электронной эмиссии для разных сплавов составляет 1,8...3,0.

Совокупность этих свойств особенно благоприятна для использования этих катодов в магнетронных приборах с диапазоном рабочих температур от 300 °C («холодные» катоды Pd–Ba) до 2 000 °C (катоды Re–Th).

Металлосплавные катоды Re–Th в магнетронных генераторах обеспечивают отбор катодного тока в импульсном режиме до 10 A/см<sup>2</sup> в течение более 10 тыс. ч, что по долговечности превышает в 8...10 раз металлокерамические катоды W–ThO<sub>2</sub>–C, обычно используемые в таких режимах.

Миниатюрные металлосплавные катоды Ir–La в магнетронных генераторах мм-диапазона длин волн обеспечивают отбор катодного тока в импульсном режиме до 150 A/см<sup>2</sup> в течение 1000 ч. Какие-либо разумные аналоги среди других типов катодов подобрать трудно, например, металлопористый катод в этом режиме работает всего несколько десятков часов.

Наиболее целесообразно применение металлосплавных катодов Pt–Ba и Pd–Ba как «холодных» вторично-эмиссионных в магнетронных усилителях с безмодуляторным питанием. В этом случае накладывается ограничение по току термоэлектронной эмиссии – не более 10<sup>-6</sup> A/см<sup>2</sup>, что объясняет наличие верхней рабочей температуры катодов (для указанных сплавов это – 600...700 °C). Нижняя рабочая температура (250...300 °C) определяется способностью катода сопротивляться отравляющему воздействию остаточных газов и напылений с анода.

Наиболее опасными газами для холодных катодов являются углеродсодержащие (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), поскольку под воздействием электронной бомбардировки происходит их разложение и

накопление углерода на катоде, что, естественно, приводит к резкому падению вторично-электронной эмиссии.

Поэтому разработка активных методов откачки с использованием водорода способствует удалению примесей углерода, содержащихся в катоде и других узлах прибора, и установлению более высоких и стабильных эмиссионных параметров катода [92]. Под воздействием водорода максимальный коэффициент вторично-электронной эмиссии катода Pd–Ba возрастает с 2,4 до 3,8.

Есть еще две уникальные особенности катода Pd–Ba, которые благоприятствуют длительной (более 10 000 ч) и устойчивой его работе в приборе.

Под воздействием ионной бомбардировки электронная эмиссия катода Pd–Ba, в отличие от электронной эмиссии всех других известных катодов, улучшается [93]. Природа этого явления до настоящего времени полностью не выяснена, хотя можно предположить, что оно связано с другим, не менее интересным явлением: конгруэнтностью испарения сплава Pd–Ba (испарение сплава происходит как бы послойно, без изменения приповерхностной концентрации его компонентов [94]).

Металлосплавные катоды нашли также применение в приборах О-типа (ЛБВ и ЛОВ ммдиапазона), для работы которых необходим отбор катодного тока свыше 100 А/см<sup>2</sup> в течение не менее 1000 ч. В этом случае наилучшие результаты получены при использовании катода Ir–Ce, который обладает очень низкой скоростью испарения активного компонента сплава [95]. Примечательно то, что скорость испарения церия из этого сплава оказалась даже меньше скорости испарения чистого иридия и на один–два порядка меньше скорости испарения борида лантана. Низкая скорость испарения церия позволяет изготавливать катодные узлы очень малого размера, что обеспечивает рекордно малое время их готовности (меньше 1с).

Возможность изменять скорость испарения активного компонента сплава, а следовательно, устойчивость катода к действию ионной бомбардировки, отравлению остаточными газами, а также формоустойчивость появилась в результате изучения механизма влияния дополнительного компонента, вводимого в двухфазный сплав, который обеспечивает перевод активного металла из интерметаллического соединения в свободное состояние [96], например, по реакции: Ir<sub>5</sub>Ce + *x*Me  $\rightarrow$  Ce<sub>r</sub> + Me<sub>x</sub>Ir.

Используя термодинамические данные для интерметаллических соединений и твердых растворов, были проведены расчеты давления паров церия, согласно указанной выше реакции, и установлено, что активирующее действие тугоплавких металлов возрастает в следующей последовательности: Re  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  Mo  $\rightarrow$  Ta [97].

В результате этих работ фактически был открыт новый механизм управления эмиссионной активностью металлических сплавов.

Применение катодов Ir–Ce в электронных и ионных источниках электронного Оже-спектрометра позволяет на порядок повысить долговечность (более 10 тыс. ч) первичных источников при работе в инертных и активных средах (Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и др.) и снизить тепловые нагрузки на катодные узлы источников в 5...7 раз [98].

Выбор технологических приемов изготовления металлосплавных катодов осуществляется с учетом свойств исходных материалов и самих сплавов, размеров и конструктивных особенностей катодного узла, дефицитности используемых материалов и пр.

Так, например, для изготовления катодов Re–Th и Ir–La в виде втулок используются методы порошковой металлургии, т. е. прессование смеси порошков компонентов, входящих в сплав, и

последующее спекание заготовок. Температурный режим спекания выбирается с учетом необходимости получения нужной плотности материала и полноты процесса диффузионного взаимодействия исходных компонентов с образованием нужного фазового состава сплава. Для этого используются как рентгенофазовый анализ спеченных втулок, так и термографический анализ процесса взаимодействия порошков.

Широко используется также метод электроэрозии для получения катодных заготовок нужной формы из слитка сплава, полученного обычной дуговой плавкой. Этот метод нашел применение в основном при изготовлении Ir–Ce-катодов.

Разработана технология получения в виде фольги практически любой толщины (до 20...30 мкм) сплавов, обладающих необходимой пластичностью (например, Pt–Ba, Pd–Ba). При формировании катодного узла фольгу из сплава целесообразно закреплять диффузионной сваркой, которая обеспечивает надежный и контролируемый контакт разнородных материалов [99].

Преодолеть недостаточную технологичность твердых и хрупких сплавов удается в некоторых случаях путем использования пленочной технологии. Для получения пленок сплавов Ir–La и Os–Th использовалось электронно-лучевое распыление материалов [100]. При удельной мощности электронного потока 10<sup>7</sup>...10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> в зоне облучения за несколько микросекунд развиваются температуры, значительно превышающие температуру кипения сплава. При столь высокой скорости нагрева область расплава практически исчезает, а материал из зоны нагрева удаляется микровзрывом. Продукты испарения, конденсируясь на поверхности керна катода, образуют гладкое покрытие, количественный состав и распределение составляющих в котором не отличаются от состава исходного сплава.

Иногда (например, спиральные катоды для магнетронов СВЧ-печей бытового назначения) нет необходимости в получении поверхности катода высокого качества (гладкой, четко ограниченной). В этом случае необходима технология, обеспечивающая экономию дефицитных материалов и выполнение процессов на относительно простом оборудовании (например, можно воспользоваться классическим методом нанесения суспензии порошков с последующим их отжигом для получения нужного фазового состава сплава и закрепления покрытия). Такая технология разработана для катодов спиральной формы, поверхность которых покрыта порошковым сплавом Ir–La, Re–Th или Os–Th [101, 102]. При плотности тока 5...6 A/см<sup>2</sup> долговечность таких катодов составляет более 5000 ч.

#### 5. БОРИДНЫЕ КАТОДЫ

Бориды – соединения бора с металлами переходных групп – обладают четко выраженными металлическими свойствами: высокой электро- и теплопроводностью, металлическим блеском и т. п.

Исследование эмиссионных свойств этого класса соединений показало, что наиболее перспективным катодным материалом является гексаборид лантана LaB<sub>6</sub> [103], который нашел широкое применение в электронно-лучевом технологическом оборудовании (сварка, плавление, резка). Причина – высокая устойчивость катода LaB<sub>6</sub> к отравлению остаточными газами.

Однако из-за высокой скорости испарения при рабочих температурах катода LaB<sub>6</sub> (1600...1700 °C), сравнительно низкой его экономичности, низкого коэффициента вторично-

электронной эмиссии (максимальный коэффициент меньше единицы) применения в приборах СВЧ (как О-типа, так и М-типа) этот катод не нашел.

Боридные катоды могут изготавливаться методом холодного прессования с последующим спеканием в водороде или вакууме, а также методом горячего прессования.

Поскольку LaB<sub>6</sub> является очень хрупким и непластичным материалом, холодное прессование порошка этого материала возможно только при добавлении в шихту связок (например, парафина). После спекания заготовок в вакууме или в водороде при температуре 2000...2100 °C пористость материала составляет 30...35 %.

Более плотные образцы можно получить горячим прессованием в графитовых пресс-формах. Однако в некоторых случаях, когда необходимо иметь повышенную устойчивость к катодному распылению и пробоям, необходимо использовать плавленые образцы боридов. В этом случае можно получить полированную поверхность катода с нужной кристаллографической ориентацией.

Установлена возможность регулирования эмиссионных свойств LaB<sub>6</sub> путем добавки (5...10 %) в этот материал металлов (вольфрам, молибден, тантал и др.). Катоды из таких сложных систем обладают более высокими эмиссионными свойствами, чем катоды из чистого LaB<sub>6</sub> [104]. Объясняется это тем, что взаимодействие борида с металлом приводит к образованию свободного лантана, который, адсорбируясь на поверхности, снижает ее работу выхода.

Наиболее распространенными конструкциями катодных узлов с гексаборидом лантана являются прямонакальные или с эмиссионным нагревом [105].

#### 6. АВТОКАТОДЫ

Миниатюризация вакуумных приборов получила новый импульс в своем развитии после разработки матричного автокатода [1]. При этом рассматривается возможность потеснить полупроводниковые приборы в тех областях применения, где их положение, казалось бы, достаточно прочно.

Конкурентоспособность вакуумной микроэлектроники основывается на известных физи-ческих положениях:

 вакуумные приборы более устойчивы к проникающей радиации и электромагнитным излучениям, к воздействию как высоких, так и низких температур (работа их возможна при температуре «холодного ночного неба» 2 К, тогда как в полупроводниковых приборах при таких условиях происходит вымораживание носителей тока);

– вакуум как среда, в которой переносится заряд, обладает тем преимуществом, что электроны в нем могут перемещаться со скоростями теоретически до 3·10<sup>10</sup> см/с, а в микроэлектронных приборах – практически до (6...8)·10<sup>8</sup> см/с, тогда как в полупроводниках из-за рассеяния на акустических и оптических модах скорость дрейфа носителей заряда не превышает 5·10<sup>7</sup> см/с;

- вакуумный промежуток между электродами более устойчив к пробоям.

Отсутствие накала и возможность получить большие плотности тока (с одного катода в виде острия плотность тока может достигать 10<sup>8</sup> A/см<sup>2</sup>) оправдывают усилия, направленные на использование автокатодов в миниатюрных вакуумных приборах. Кроме того, поскольку размеры эмитирующей части острия очень малы (около 0,05 мкм), проблемы паразитных емкостей должны решаться легче, чем в полупроводниковых приборах. Однако практическое использование одноострийных катодов в приборах наталкивается на две трудности: мал общий ток с катода (несколько микроампер) и нужны очень высокие поля у поверхности катода (более 10<sup>7</sup> В/см). Увеличить общий ток с острийного катода можно путем использования его в режиме автотермоэлектронной эмиссии. В этом режиме с катода LaB<sub>4</sub> в ускорителях частиц можно получить плотность катодного тока свыше 1000 A/см<sup>2</sup> [106].

Для того чтобы использовать катоды при меньшем электрическом поле, необходимо уменьшить радиус кривизны острия. Однако для LaB<sub>6</sub> получить острие с радиусом кривизны менее 1,5 мкм не представляется возможным из-за высокой хрупкости этого материала.

Изготовить острие из металлического сплава, обладающего малой работой выхода (Pt–Ba, Ir–La и др.), затруднительно в силу двухфазности сплава.

Возможен иной подход к решению этой проблемы. В работе [107] предложена структура автокатода, в которой использовано явление активирования острия за счет миграции активного металла с прилегающих к острию областей. С целью реализации этой идеи была разработана технология насыщения приповерхностных слоев иридиевой проволоки лантаном с последующим электрохимическим травлением ее конца. Внешний вид катода напоминает карандаш, в котором роль грифеля выполняет иридий, а наружная оболочка – интерметаллид Ir,La.

При радиусе кривизны острия такого катода 0,3...0,4 мкм он обеспечивает в постоянном режиме стабильный отбор тока до 30 мА при температуре 1000 К в течение 1000 ч.

Для того чтобы увеличить общий ток с катода, отдельные острия необходимо объединить в регулярную матрицу с плотностью острий 10<sup>6</sup>...10<sup>7</sup> см<sup>-2</sup>. Чтобы получить высокую напряженность поля при относительно низком напряжении, вытягивающий электрод с отверстиями напротив острий располагается очень близко (0,5...0,7 мкм). Поэтому с матричного катода диаметром, например, в 1 мм возможен отбор тока 100...200 мА при напряжении на вытягивающем электроде 200...300 В.

Для анализа возможностей применения матричных катодов в диодных и триодных системах важна также проводимость таких структур. Для катодов с молибденовыми остриями проводимость, рассчитанная на одну ячейку, составляет около 0,1 мкА/В. Использование для острий материалов с работой выхода, меньшей, чем у молибдена, должно привести к увеличению проводимости. Так, например, использование гафния дает величину 1 мкА/В [108].

Применять матричные автокатоды, вероятно, целесообразно в следующих типах вакуумных микроприборов:

 – усилителях сантиметровых и миллиметровых длин волн, использующих встроенные микрополосковые триоды, и распределенных усилителях, которые имеют сверхширокую полосу и высокую эффективность;

- генераторах на частоту от 100 до 1000 ГГц;

- сверхбыстрых (время срабатывания менее 10<sup>-12</sup> с) электронных ключах для компьютеров;

- высокочувствительных приемниках оптических излучений;

– устройствах для получения сверхкоротких (около 10<sup>-10</sup> с) импульсов фотоэлектронного тока, вызываемого лазерным излучением, что необходимо для создания мощных сверхкоротких импульсов микроволновых и рентгеновских излучений.

Намеченная программа постепенно реализуется: разработана методика расчета, необходимая для проектирования микроминиатюрных вакуумных приборов, разработаны и испытаны первые отпаянные усилительные триоды с матричными автокатодами [109, 110]. Самостоятельный интерес представляет разработка плоских экранов на матричных автокатодах для дисплеев и телевизоров. Интерес к созданию такого рода экранов вызван рядом их особенностей. Для формирования изображения на экране используются низкие напряжения (не более 400 В), что исключает рентгеновское излучение и делает дисплей или телевизор экологически чистым. Использование холодных автоэмиссионных катодов обеспечивает при включении мгновенную готовность. В отличие от аналогичных устройств на жидких кристаллах, экраны с матричными автокатодами работоспособны, как и все вакуумные приборы, в широком диапазоне температур, стойки к ионизирующему излучению, обладают большой собственной яркостью свечения (примерно 300 кд/м<sup>2</sup>) и высокой энергетической эффективностью. Малые массы и габаритные размеры являются существенными достоинствами плоского экрана с матричными автокатодами [111, 112].

#### 7. ПРОБЛЕМЫ (ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ)

Производство электронных приборов СВЧ содержит в себе частично неуправляемые технологические процессы [113]. Эта неуправляемость является следствием неполноты наших знаний о процессах, происходящих в объеме и на поверхности эмиссионного тела катода.

Важной особенностью всех эффективных катодов является то, что их эмиссионные свойства определяются практически полностью свойствами поверхности. Это утверждение относится не только к металлопористым и металлосплавным катодам, но и к оксидным [114, 115]. Толщина поверхностного слоя, определяющего эти свойства, близка к толщине моноатомного слоя. При этом становится ясным то, что катодные проблемы сближаются с проблемами твердотельных электронных приборов при их микроминиатюризации, поскольку в объектах твердого тела наноразмеров доля поверхностных атомов составляет уже несколько десятков процентов. Развитая поверхность оказывает влияние на решеточные и электронные подсистемы нанообъектов, изменяя их реакционную способность, электрические, механические, тепловые, оптические и другие свойства.

Такими нанообъектами, представляющими не только научный, но и практический интерес для вакуумной и твердотельной электроники, являются углеродные нанотрубки. Полевая эмиссия нанотрубок после работ [116, 117] стала предметом интенсивных исследований и разработок, направленных на создание на их основе дисплеев, рентгеновских трубок, СВЧ-приборов и пр. [118]. Основной проблемой полевых холодных катодов является обеспечение их надежности и долговечности при эксплуатации в реальных условиях электровакуумных приборов: ионная бомбардировка, пробои, посторонние напыления с других электродов – все это разрушает изначально созданную поверхность катода, а следовательно, приводит к потере его эмиссионной способности.

Проблема возобновления структуры и химического состава поверхности термокатодов решается автоматически путем миграции атомов активных металлов из объема эмиссионного тела на его поверхность. Такое самоподдерживание свойств поверхности термокатодов в течение всего их срока службы означает, что они удовлетворяют принципам синергетики.

Однако свойства поверхности эффективных термокатодов (несмотря на огромное количество публикаций) изучены недостаточно. Так, например, феноменально высокая эмиссионная способность металлопористых скандатных катодов (около 400 A/см<sup>2</sup> при приблизительно 900 °C) пока не нашла объяснения. Хотя такие попытки делаются: в работе [119] посредством атомно-силового микроскопа обнаружены на поверхности этих катодов пирамидальные структуры, которые формируются спонтанно в процессе прогрева катодов в вакууме. Авторы [119] полагают, что высокие эмиссионные свойства скандатных катодов обуславливаются термополевой эмиссией именно с этих пирамидальных структур. Однако состав этих структур, физико-химические процессы, объясняющие их появление, остаются неясными.

Следствием неполноты наших знаний о скандатных катодах является то, что пока не удается наладить технологический процесс получения воспроизводимых эмиссионных параметров этих катодов и получить высокую стабильность этих параметров в приборах.

Ключевой проблемой в разработке высокоэмиссионных и долговечных металлопористых катодов является создание такой структуры и пористости вольфрамовой губки, которая обеспечит достаточный запас активного металла и эффективную его доставку на поверхность катода. Существует два механизма доставки активного вещества к поверхности катода: миграционный и кнудсеновский. Но только миграционный обеспечивает доставку активного вещества на поверхность катода. Уменьшить бесполезность кнудсеновского потока можно путем использования двухслойных катодов, в которых внешний слой состоит из пористой мелкодисперсной структуры, снижающей кнудсеновский поток и увеличивающей миграционный, а нижний слой, не имеющий непосредственно выхода к поверхности без ущерба для работы катода, может быть образован крупнозернистой структурой. Такие структуры, согласно расчетам [120], могут обеспечить увеличение срока службы катодов на один–два порядка.

Однако главная трудность при этом состоит в создании стабильной структуры верхнего слоя губки из зерен размером из нанодиапазона (50...100 нм).

В настоящее время широко используются металлопористые катоды, поверхность которых покрыта пленкой осмия. Пленка способствует увеличению термоэлектронной эмиссии в 6–8 раз. В работе [43] этот результат объясняется тем, что работа выхода в моноатомной пленке активного металла тем меньше, чем больше работа выхода подложки. Однако это предположение не соответствует действительности [59]. В работе [121] благоприятное воздействие осмия на эмиссионные характеристики катода связывается с увеличением эмиссионных центров, которые, как полагают авторы этой работы, представляют собой кристаллиты окисей активных металлов. Исследования катодов в атомно-силовом микроскопе показали, что на поверхности катода при напылении пленки осмия формируется пирамидальная структура, в результате чего увеличивается эмиссионная поверхность и возможно появление термополевой эмиссии [119].

Остается также открытым вопрос, в какой степени обнаруженная на поверхности скандатных и осмированных катодов пирамидальная структура способствует инициированию пробоев в высоковольтных приборах?

Не получен ответ на один из интригующих вопросов в эмиссионной электронике: какова роль окиси кальция в увеличении электронной эмиссии как металлопористых, так и оксидных катодов? И это, несмотря на столетние усилия понять механизм работы оксидных катодов.

Рабочая температура всех термоэлектронных катодов задается исходя из требования получить нужную величину катодного тока. Какой-либо оптимизации теплового режима работы катодного узла, учитывающей необходимую скорость подачи активного вещества на поверхность катода, скорость протекания химических реакций в объеме эмиссионного тела и пр. – таких попыток просто не предпринималось. При такого рода оптимизации необходимо также учитывать получение необходимого времени разогрева катодного узла. Совершенно очевидно, что в том случае, когда необходимо обеспечить малое время готовности, желательно было бы нагреть вначале поверхность катода, а затем уже все остальные его части.

Для частного случая магнетронных катодов решение такой проблемы намечено в работе [122]. Суть решения этой проблемы состоит в следующем: источник активного вещества отделен от эмитирующей спирали вакуумным промежутком. В этом случае возможен независимый выбор теплового режима работы как источника активного вещества, обеспечивающего необходимую его подачу на поверхность спирали, так и самой спирали, обеспечивающей нужный катодный ток.

Перечисленные проблемы – это только малая доля того, что необходимо решать специалистам в области эмиссионной электроники. Но от их решения существенно зависит прогресс в области катодной техники, да и всего электровакуумного приборостроения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Brodie I., Spindt C.A.* // Vacuum Microelectronics, Advances in Electronics and Electron Phys. – 1992. – Vol. 83. – P. 12.

2. Пат. 8726 СССР, Н О1 Ј 9/04. Способ изготовления оксидных катодов для вакуумных приборов / С.А. Векшинский. – Опубл. 1.12.27.

3. *Киселев А.Б., Никонов Б.П*. Термоэлектронная эмиссия и работа выхода оксидного катода // Радиотехника и электроника. – 1967. – Т. 12, вып. 5. – С. 872.

4. *Аникиев Ю.Г., Попов Б.Н.* Вторичная эмиссия окиси бария // Физика твердого тела. – 1961. – Т. 3, вып. 6. – С. 1768.

5. *Киселев А.Б., Смирнов В.А.* Электрические и тепловые свойства покрытий оксидных катодов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 5. – С. 150.

6. *Киселев А.Б., Никонов Б.П., Турсунметов К.А.* Механизм проводимости покрытий оксидных катодов // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, вып. 5. – С. 1041.

7. *Никонов Б.П., Бейнар К.С.* Термоэлектронная эмиссия оксидного катода в потоке бария // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, вып. 6. – С. 1272.

8. *Киселев А.Б., Ходневич С.П.* Низкочастотные флуктуации эмиссии оксидного катода // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1969. – Т. 33, № 3. – С. 458.

9. *Никонов Б.П., Отмахова Н.Г.* Исследования испарения щелочно-земельных окислов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1971. – Вып. 1. – С. 117.

10. Горностаева П.Д., Киселев А.Б., Турсунметов К.А. Эмиссионные свойства металлизированных оксидных катодов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1972. – Вып. 11. – С. 66.

11. Шувалова С.Н., Лобова Э.В., Киселев А.Б. Применение металлизированного оксидного катода в ЛБВ средней мощности // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1974. – Вып. 10. – С. 66.

12. Плазменный метод нанесения тонких плотных покрытий из окислов щелочно-земельных металлов на керны катодов / А.Н. Ким, Ю.В. Куликов, А.Г. Родкин, В.А. Смирнов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 4. – С. 129.

13. Зубов Л.Н., Потапов Ю.А., Смирнов В.А. Технология покрытия губчатых оксидных катодов плазменным методом // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1969. – Вып. 12. – С. 128.

14. *Никонов Б.П., Царев Б.М.* Исследование никелевых сплавов для кернов оксидных катодов // Радиотехника и электроника. – 1958. – Т. 3, вып. 3. – С. 313.

15. *Никонов Б.П., Тараш И.Л., Царев Б.М.* Влияние температуры и материала керна на долговечность оксидного катода // Радиотехника и электроника. – 1958. – Т. 3, вып. 8. – С. 1043.

16. Дружинин А.В., Кондрашенков Ю.А. Новый эффективный термокатод с высокой эмиссионной однородностью // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, вып. 7. – С. 1531.

17. Исследование ионно-легированного керна молекулярно-напыленного оксидного катода / Ю.А. Володин, А.В. Дружинин, А.Я. Князев, С.И. Куличихина // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1973. – Т. 37, вып. 12. – С. 2528.

18. *Knyazev A.Ya., Kondrashenkov Yn.A.* Thermionic cathodes with microgeometry of emission surface // 1994 Tri-Service / NASA, Cathode Workshop, Conference Record. – Cleveland, Ohio, USA, 1994. – P. 249.

19. Галина Н.М., Никонов Б.П., Свешникова Н.М. Исследование формоустойчивости торцевых оксидных катодов в режиме циклического включения накала // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 6(366). – С. 49.

20. Галина Н.М., Никонов Б.П., Соколов А.М. Катодный узел с малым временем разогрева // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1985. – Вып. 3(375). – С. 61.

21. *Никонов Б.П.* Техническая диагностика катодно-подогревательных узлов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1975. – Вып. 1. – С. 70.

22. Дружинин А.В., Уткалова Л.И. Оксидный термокатод на диэлектрической подложке // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1973. – Вып. 6. – С. 68.

23. Гипсман И.К., Иосилевич В.Л. Полуавтомат для покрытия сферических катодов // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. – 1965. – Вып. 2. – С. 28.

24. Демин Е.П., Иосилевич В.Л., Никонов Б.П. Новое оборудование для нанесения эмиссионных покрытий // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1968. – Вып. 5. – С. 147.

25. Попов Б.Н., Коливердов В.Ф. Вторичная эмиссия окиси тория, активированной барием // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1958. – Т. 22, № 5. – С. 496.

26. *Гугнин А.А., Каганович М.В.* Активирование синтезированных оксидно-ториевых катодов на танталовом и молибденовом кернах и влияние кислорода на их термоэлектронную эмиссию // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 3. – С. 109.

27. *Ермолаев Л.А., Каганович М.В.* Влияние электронной бомбардировки на эмиссионные свойства окиси тория // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 7. – С. 99.

28. *Ермолаев Л.А*. Влияние электронной бомбардировки на эмиссионные свойства некоторых тугоплавких окислов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1962. – Вып. 4. – С. 75.

29. Каганович М.В., Макарова Р.А. Эмиссионные свойства окислов металлов III группы // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. – Вып. 7. – С. 72.

30. Царев Б.М. Расчет и конструирование электронных ламп. – М.: Госэнергоиздат, 1961.

31. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов; под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Энергия, 1966.

32. Никонов Б.П. Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979.

33. Lemmens H.J., Jansen M.J., Loosjes R.A. A new thremionic cathode for heavy loads // Philips Technical Rev. – 1950. – No 11. – P. 341.

34. *Морозов А.В.* О технологии изготовления вольфрамо-бариевого катода и некоторых его свойствах // Труды НИИ. – 1952. – Вып. 2. – С. 10.

35. *Морозов А.В.* Технология изготовления металлопористых камерных термокатодов (*L*-катодов) // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. – Вып. 10. – С. 86.

36. *Павлова Л.Н., Савостин С.А.* Анализ вольфрама высокой чистоты на содержание примесей // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1964. – Вып. 10. – С. 126.

37. *Морозов А.В., Рожков С.Е., Филиппова А.Е.* Металлопористый катод с пониженной скоростью испарения // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 5. – С. 94.

38. Металлопористые катоды с губками, изготовленными из порошка со сферической формой частиц / А.В. Морозов, В.А. Петруничев, Е.А. Кириллов, В.И. Михайлов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1968. – Вып. 9. – С. 151.

39. Применение *L*-катодов в отражательных клистронах / И.И. Бродуленко, П.П. Брусянская, А.К. Галанин, А.В. Морозов, Э.И. Бердавцева, О.В. Антонова // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1972. – Вып. 10. – С. 36.

40. Прессованные катоды на основе алюминатов и вольфраматов бария-кальция / А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.Н. Попов, А.А. Маклаков // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1958. – Т. 22, № 5. – С. 613. 41. Валуйчикова А.Е., Мельников А.И., Морозова А.В. Рений-бариевые прессованные катоды // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. – Вып. 3. – С. 82.

42. Гугнин А.А., Дюбуа Б.Ч., Невская Л.В. Распределительные катоды на основе солей бария и сплавов вольфрама с молибденом и рением // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1964. – Вып. 11. – С. 117.

43. Zalm P., van Stratum A.I.A. Osmium dispenser cathodes // Philips Technical Review. - 1966. - Vol. 27, No 3/4. - P. 69.

44. Дружинин А.В., Некрасов В.И. Эмиссионные свойства распределительных катодов с напыленными пленками металлов // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, вып. 2. – С. 411.

45. *Гурков Ю.В., Дружинин А.В.* Эмиссионные параметры пропитанного металлопористого термокатода // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1979. – Т. 43, № 9. – С. 1850.

46. Эмиссионные свойства и долговечность металлопористых катодов / Б.Ч. Дюбуа, Е.М. Земчихин, А.П. Макаров, О.К. Култашев, Е.Д. Куранова, О.В. Поливникова // Радиотехника и электроника. – 1991. – Вып. 5. – С. 985.

47. *Вирин Я.Л., Дюбуа Б.Ч.* Эмиссионные свойства металлопористых катодов на основе осмия // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1979. – Т. 43, № 3. – С. 662.

48. Дружинин А.В., Попов Б.Н. Высоковакуумный электронный микроскоп для исследования катодов // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1959. – Т. 23, № 4. – С. 522.

49. Телевизионный эмиссионный микроскоп / *Ю.В. Гурков, А.В. Дружинин, А.А. Исаев, В.С. Коровин* // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1974. – Т. 38, № 11. – С. 2264.

50. Исаев А.А., Гурков Ю.В., Дружинин А.В. Светоэлектронный термоэмиссионный микроскоп для контроля эмиссионных параметров катодов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1975. – Вып. 9. – С. 40.

51. *Гурков Ю.В., Петров К.П., Самойлов В.Д.* Применение светоэлектронного эмиссионного микроскопа для совершенствования технологии изготовления металлопористых термокатодов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1976. – Вып. 12. – С. 57.

52. *Камерцель А.Ю., Карпухин С.В.* Диагностика поверхности металлопористых катодов с различным составом губки // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1988. – Т. 52, № 8. – С. 1628.

53. Механизм работы и старения осмированного металлопористого катода / А.П. Макаров, О.К. Култашев, Е.Д. Куранова, Е.М. Земчихин, Ю.В. Гурков // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36, вып. 11. – С. 2196.

54. *Жмудь Е.С., Остапченко Е.П.* Рентгеноструктурные исследования активных веществ, применяемых в импрегнированных и прессованных катодах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 5. – С. 108.

55. Дмитриева В.Н., Жмудь Е.С., Остапченко Е.П. Исследование механизма реакций в вольфрамо-бариевых термокатодах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. – Вып. 3. – С. 44.

56. Виноградов Д.П., Дмитриева В.Н., Жмудь Е.С. Исследование реакций в алюминатных и вольфраматных катодах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1962. – Вып. 11. – С. 90.

57. Дружинин А.В. О природе эмитирующей поверхности металлопленочных катодов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1961. – Вып. 10. – С. 76.

58. Термодинамические условия существования эмитирующих фаз на поверхности металлопористого алюминатного катода / О.К. Култашев, А.П. Макаров, Т.М. Новикова, В.И. Соловьев // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 11. – С. 38.

59. *Култашев О.К., Макаров А.П., Рожков С.Е.* Влияние кислорода на работу выхода пленок электроположительных металлов, адсорбированных на 4*d*- и 5*d*-переходных металлах // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1976. – Т. 40, № 12. – С. 2479.

60. *Култашев О.К., Макаров А.П.* Электронно-адсорбционные свойства пленочных систем Os–O–Ba, Ir–O–Ba и некоторые свойства металлопористых катодов с пленкой Os или Ir // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1977. – Вып. 6. – С. 87.

61. *Дюбуа Б.Ч., Ермолаев Л.А.* Антиэмиссионные и антидинатронные материалы // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1964. – Вып. 12. – С. 170.

62. Дюбуа Б.Ч. Термоэлектронная эмиссия некоторых тугоплавких металлов в парах бария // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, вып. 6. – С. 1161.

63. Дюбуа Б.Ч., Степанов Л.А. Термоэлектронная эмиссия некоторых металлоподобных соединений в парах бария // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, вып. 12. – С. 2200.

64. Дюбуа Б.Ч., Степанов Л.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства сплавов вольфрама с танталом и молибдена с цирконием // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1973. – Вып. 7. – С. 70.

65. *Дюбуа Б.Ч.* Применение циркония как антиэмиссионного материала // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 12. – С. 61.

66. Дюбуа Б.Ч., Новикова Т.М., Степанов Л.А. Способы нанесения антиэмиссионных покрытий // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 3. – С. 197.

67. *Djubua B.Ch.* Research and development of dispenser, metal alloy and oxide thermionic cathodes // 1994 Tri-Service / NASA, Cathode Workshop: Conference Record. – Cleveland, Ohio, USA, 1994. – P. 3.

68. Эмиссионная активность пропитанных металлопористых термокатодов, изготовляемых с помощью электроэрозионной обработки / *Е.Д. Ильюшина, Н.В. Малеваная, И.Л. Тараш, Ю.В. Гурков* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 9. – С. 99.

69. *Судакова Л.Н., Чубун Н.Н.* Пленочные антиэмиссионные покрытия на поверхности металлопористого катода // Тез. докл. XX1 Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. – Л., 1990. – Т. 1. – С. 183.

70. *Chubun N.N.* Litographic process for anti-emissive film coating impregnated cathodes //1994 Tri-Service / NASA, Cathode Workshop: Conference Record. – Cleveland, Ohio, USA, 1994. – P.27.

71. *Тимошин Л.А*. Конструкция вибропрочного подогревателя с повышенным сроком службы для высокотемпературных катодов // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1958. – Т. 22, № 5. – С. 640.

72. А. с. 136823 СССР. Катод для электровакуумных приборов / О.К. Култашев, Л.А. Тимошин, А.И. Мельников. – Приоритет 23.06.60.

73. Металлопористые катоды с повышенной плотностью тока / А.И. Мельников, Т.М. Новикова, И.А. Носкова, Н.И. Шмелева // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1965. – Вып. 5. – С. 183.

74. А. с. 291600 СССР. Способ изготовления катодного узла / *Н.М. Оголева, Д.П. Виноградов, В.П. Монастырев.* – Приоритет 22.05.69.

75. Вирин Я.Л., Дюбуа Б.Ч., Оголева Н.М. Эффективный миниатюрный металлопористый катод // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 4(418). – С. 42.

76. А. с. 1415973 СССР. Способ изготовления торцового металлопористого катода / В.А. Резнев. – Приоритет 10.11.86.

77. А. с. 316553 СССР. Припой для пайки термоэлектронных эмиттеров / Т.А. Батькова, А.М. Зябликова, Б.Ф. Гохштейн, А.И. Мельников. – Приоритет 16.03.70.

78. Пат. 39223 РФ, 7 Н О1 Ј 1/20 В 23 К 35/30. Прямонакальный катод для приборов магнетронного типа / О.В. Поливникова. – Приоритет 28.02.02.

79. Пат. 2278010 РФ, В 23 К 35/30. Припой для соединения элементов катодно-подогревательного узла / О.В. Поливникова. – Приоритет 18.08.04.

80. *Харитонов В.П., Никонов Б.П.* О методе контроля тепловых характеристик металлопористых катодов с залитым подогревателем // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 9(321). – С. 48.

81. Попов Б.Н., Гугнин А.А. Исследование влияния кислорода и окислов углерода на эмиссию импрегнированного и металлопористого катодов // Радиотехника и электроника. – 1958. – Т. 3, вып. 8. – С. 1024.

82. *Гугнин А.А., Попов Б.Н.* Влияние остаточных газов на эмиссию бариевых пленочных катодов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 4. – С. 99.

83. Сытник А.Я. Исследование процесса обезгаживания и активировки металлопористых катодов в условиях откачки ЭВП // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 12(324). – С. 27.

84. Термоэлектронная эмиссия сплавов вольфрама с титаном и гафнием и ее зависимость от давления кислорода / Б.Ч. Дюбуа, А.И. Пекарев, Б.Н. Попов, М.А. Тыкина // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7, вып. 9. – С. 1566.

85. Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Цыганова И.А. Работа выхода сплавов Nb–Ta, Ti–Re и Ta–Re // Радиотехника и электроника. – 1964. – Т. 9, вып. 11. – С. 2061.

86. *Култашев О.К., Макаров А.П.* Работа выхода сплавов тантала с рутением // Физика металлов и металловедение. – 1970. – Т. 30, вып. 5. – С. 924. 87. Дюбуа Б.Ч., Ермолаев Л.А. Вторичная электронная эмиссия сплавов вольфрама с гафнием // Физика твердого тела. – 1964. – Т. 6, вып. 3. – С. 760.

88. Дюбуа Б.Ч., Ермолаев Л.А. Вторичная электронная эмиссия рения с вольфрамом, танталом и титаном // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1964. – Т. 28, № 9. – С. 1508.

89. Дюбуа Б.Ч., Ермолаев Л.А., Култашев О.К. Эмиссионные свойства сплавов Pt–Th, Ir–Th, Os–Th, Re–Th // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т. 11, вып. 11. – С. 1149.

90. Электронная эмиссия сплавов Pt–Ba, Pd–Ba, Au–Ba / Б.Ч. Дюбуа, Л.А. Ермолаев, Н.П. Есаулов, И.П. Стародубов // Радиотехника и электроника. – 1967. – Т. 12, вып. 8. – С. 1523.

91. Эмиссионные свойства сплавов Pt–La, Ir–La, Os–La / *Е.В. Васильева, Б.Ч. Дюбуа, Л.А. Ермолаев, О.К. Култашев* // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т. 11, вып. 11. – С. 1150.

92. Дюбуа Б.Ч., Сытник А.Я. Влияние водорода на обезгаживание и активирование катодов на основе сплава палладия с барием // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. –1976. – Вып. 6. – С. 68.

93. Гнучев Н.М., Каничева И.Р., Кирсанова Т.С. Влияние ионной бомбардировки на термоэмиссионные свойства сплава палладия с барием // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1970. – Вып. 12. – С. 131.

94. Скорость испарения бария из сплавов Pt–Ba, Pd–Ba / В.Н. Ильин, И.Д. Калинина, А.П. Казаков, В.В. Обухов-Денисов, Т.С. Златоустовская // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1971. – Вып. 5. – С. 120.

95. *Рожков С.Е., Култашев О.К., Гугнин А.А.* Технические характеристики термоэмиттеров на основе сплава иридия с лантаном, церием, празеодимом // Электронная техника. Сер. 16. Генераторные, модуляторные и рентгеновские приборы. – 1960. – Вып. 2. – С. 81.

96. Структура, работа выхода, скорость испарения и состав поверхности сплава иридия с церием и тугоплавкими металлами / О.К. Култашев, А.П. Макаров, Б.В. Маркин, В.А. Михайлов, С.Е. Рожков // Тез. докл. XX Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. – Киев, 1987. – Т. 1. – С. 158.

97. Вареха Л.М., Дмитриева В.Н., Резухина Т.Н. Термодинамический подход к оценке долговечности металлосплавных катодов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 8(422). – С. 39.

98. *Маркин Б.В., Михайлов В.А.* Применение металлосплавных эмиттеров в электронных и ионных источниках Оже-спектроскопии // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 5(429). – С. 44.

99. Котюргин Е.А., Пукало Л.И. Сварка металлов в твердом состоянии через пластичную прокладку // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1970. – Вып. 12. – С. 144.

100. Способ получения покрытий из эмиссионных сплавов / Б.Ч. Дюбуа, Н.Т. Островерхов, В.К. Попов, И.П. Стародубов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1968. – Вып. 6. – С. 122.

101. Дюбуа Б.Ч., Лысенко В.К. Металлосплавной прямонакальный катод спиральной формы // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 10(322). – С. 28.

102. Металлосплавной катод спиральной формы магнетронов СВЧ-нагрева / О.В. Поливникова, А.П. Макаров, Б.Ч. Дюбуа, О.К. Култашев, Е.М. Земчихин // Краткое содержание докладов 22-й конференции по эмиссионной электронике. – М., 1994. – Т.1. – С. 161.

103. Lafferty J.M. Boride cathodes // J. Appl. Phys. - Vol. 22, No 3. - P. 299.

104. *Кудинцева Г.А., Кузнецова Г.М., Никулов В.В.* Эмиссионные свойства сложных эмиттеров на основе гексаборида лантана // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 11. – С. 73.

105. *Кузнецова Г.М., Кудинцева Г.А.* Крупногабаритные катодные узлы с эмиттером из гексаборида лантана // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1972. – Вып. 3. – С. 62.

106. Елинсон М.И., Кудинцева Г.А. Автоэлектронные катоды на основе металлоподобных тугоплавких соединений // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7, вып. 9. – С. 1511.

107. *Djubua B.Ch., Polivnikova O.V.* Stratum-like structured metal alloy cathode // Appl. Surface Science. – 2003. – Vol. 215. – Issues 1–4. – P. 242.

108. *Djubua B.Ch., Chubun N.N.* Emission properties of spindt-type cold cathodes with different emission cone material // IEEE Transaction of Electron Devices. – 1991. – Vol. 38, No 10. – P. 2314.

109. Расчет параметров вакуумного микротриода с автоэмиссионным катодом / И.И. Голеницкий, Л.Н. Марычева, А.С. Победоносцев, В.П. Сазонов, Н.Н. Чубун // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 6(430). – С. 8. 110. Experimental investigation of the microvacuum triode amplifier / V.I. Bayle, N.N. Chubun, B.Ch. Djubua, A.V. Galdetskiy, V.P. Sazonov // Technical Digest of IVMC"91. – Nagahama, 1991. – P. 76.

111. Field-emission array cathodes for a flat-panel display / N.N. Chubun, B.Ch. Djubua, B.I. Gorfinkel, E.V. Rusina // Technical Digest of IVMC"91. – Nagahama, 1991. – P. 60.

112. *Chubun N.N., Sudakova L.N.* 4 inches diagonal field-emitters matrix on glass substrate for flat-panel display // IVMC"94. 7-th International Vacuum Microelectronics Conference, SFV. – 1994. – P. 211.

113. *Ребров С.И.* Статистический анализ надежности частично неуправляемых технологических процессов производства приборов СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1973. – № 4. – С. 73.

114. *Никонов Б.П.* Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979. – С. 62.

115. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: Изд. МФТИ, 2002. – С. 21.

116. Field emitter arrays on nanofilament carbon structure film / Yu.V. Gulyaev, L.A. Chernozatonskii, Z.Ya. Kosakovskaya, N.I. Sinitzyn, G.V. Torgashov, Yu.F. Zakharchenko // Le Vide, les couches Minces, Rev. – 1994. – No 271, Mars-Avril. – P. 322.

117. Автоэлектронная эмиссия с углеродных нанотрубок и нанокластерных пленок / Ю.В. Гуляев, Н.И. Синицын, Г.В. Торгашов, А.И. Жбанов, С.Г. Торгашов, С.Г. Савельев // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 11. – С. 1399.

118. Carbon nanotube based cathodes for microwave amplifiers / *P. Legagneux* et al. // IVEC 2009. Book of Abstracts and Conference Programmer. – 2009. – P. 82.

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

120. Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В. Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (К истории идей в катодной технологии) // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 2008. – Вып. 4(497). – С. 3.

121. Эмиссионно-микроскопическое и рентгеноспектральное исследование поверхности металлопористого катода / Ю.В. Гурков, А.В. Дружинин, Т.А. Куприянова, В.И. Некрасов // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1974. – Т. 38, № 11. – С. 2270.

122. Spiral cathodes for microwave heating magnetrons / B.Ch. Djubua, V.N. Ilyin, O.V. Polivnikova, E.M. Zemchikhin // Appl. Surface Science. – 1997. – Vol. 111. – P. 99.

Статья поступила 9 декабря 2010 г.

УДК 621.317.76

#### ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СИГНАЛА АТОМНО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ В СИСТЕМЕ «ГЛОНАСС-М»

#### А. В. Бакуменко, А. А. Борисов, Н. М. Галина, И. И. Голеницкий, Н. Г. Духина, Б. Ч. Дюбуа, И. Ю. Литвинюк, А. Г. Михальченков, Е. Н. Покровский, М. П. Темирязева, Ю. А. Турутин

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Одной из возможных причин нестабильности сигнала атомно-лучевой трубки является низковольтность электродов индикатора атомного пучка цезия. При низких напряжениях на электродах, управляющих потоком ионов цезия, существенную роль играет стабильность контактных потенциалов, которая может изменяться при адсорбции цезия и электроотрицательных атомов и молекул (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Cl, F), а также при изменении структуры и чистоты поверхности самой ленты-ионизатора. Рассматриваются способы, уменьшающие влияние этих факторов на стабильность сигнала.

#### КС: атомно-лучевая трубка, стабильность сигнала, индикатор

One of possible reasons of signal instability of atomic-beam tube is low voltage electrodes of cesium atomic beam indicator. At low voltages on electrodes controlling cesium ion beam the significant part plays the stability of contact potentials which may change at adsorption of cesium and electronegative atoms and molecules ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , CI, F) as well as at the change of the structure and surface purity of ionizer tape itself. Methods decreasing the influence of these factors on signal stability are considered.

Keywords: atomic-beam tube, signal stability, indicator

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Квантовые стандарты частоты на основе атомно-лучевых цезиевых трубок (АЛТ) обеспечивают наиболее высокую долговременную стабильность при высокой точности номинального значения частоты генерируемых колебаний [1]. Российская глобальная навигационная спутниковая система позиционирования «ГЛОНАСС» целиком базируется на указанных трубках.

Одним из многочисленных параметров, характеризующих техническое состояние АЛТ, является уровень сигнала трубки. Этот сигнал пропорционален ионному току пучка цезия. Если обеспечивается стабильная подача атомов цезия, то стабильность потока ионов цезия целиком определяется физико-химическими процессами в индикаторе атомного пучка.

Индикатор атомного пучка – это устройство, состоящее из ионизатора в виде танталовой ленты, накаленной до температуры ~1000 °C, фокусирующего электрода, регулирующего пучок ионов по горизонтали, магнитного масс-спектрометра, который отфильтровывает и направляет на вход усилителя только ионы цезия, и коллектора, на который собираются фокусированные ионы. Важно отметить, что появившееся в некоторых работах утверждение о том, что на поверхности металла (например, тантала или вольфрама) происходит полная ионизация атомного пучка цезия, ошибочное: степень ионизации атомов цезия существенно зависит от работы выхода электронов металла, его температуры, а также от интенсивности потока атомов цезия.

Существенной особенностью ионизатора, определяющей его надежность, является низковольтность электродов, управляющих потоком ионов.

А это значит, что при изменении работы выхода ленты-ионизатора будет изменяться не только степень ионизации цезия, но и контактная разность потенциалов между управляющими электродами. Изменение контактной разности потенциалов возможно и при адсорбции на электродах цезия [2].

Причем эти изменения могут быть весьма значительные – несколько электронвольт [3]. То, что контактная разность потенциалов между электродами сравнима с потенциалами, подаваемыми от внешнего источника питания, делает электронно-оптическую систему индикатора весьма уязвимой и зависимой от технологии изготовления индикатора (материалов, их обработки, вакуумных условий и пр.) и его эксплуатации.

#### 2. РАБОТА ВЫХОДА

Степень ионизации α цезия определяется уравнением Саха-Ленгмюра [4]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \exp \frac{e(\varphi - v_i)}{kT} = \frac{n_p}{n_a},\tag{1}$$

где  $n_p$  – десорбция цезия в виде ионов;  $n_a$  – десорбция цезия в виде атомов;  $\varphi$  – работа выхода электронов;  $v_i$  – потенциал ионизации атомов цезия; T – температура.

Ионный ток *j*<sub>p</sub>, идущий от поверхности, равен

$$j_p = en_p = en\beta, \tag{2}$$

где  $\beta = n_p/n$  – коэффициент ионизации;  $n = n_a + n_p$ . Поэтому

 $\beta = \frac{\alpha}{1 + \alpha}.$ (3)

На рис. 1 представлены зависимости  $\beta$  от температуры при различных значениях работы выхода. Зависимости  $d\beta/dT$  от работы выхода приведены на рис. 2. Иными словами, зная зависимость ионного тока в приборе от температуры, можно отслеживать изменение работы выхода ионизатора.

Экспериментальное изучение работы выхода проводилось с использованием реального ионизатора, но помещенного в стеклянную колбу, в которой можно было измерять температуру ленты.

На рис. 3, 4 показано изменение работы выхода нескольких танталовых лент при  $I_{\rm H} = 2,2$  и 2,5 А в вакууме  $10^{-8}$  (кривые 1...3) и  $10^{-5}$  мм рт. ст. (кривые 4, 5). Видно, что стандартное значение работы выхода (для поликристаллического тантала оно составляет 4,0...4,2 эВ) [5]



Рис. 1. Зависимости коэффициента ионизации цезия β от *T* при различных значениях работы выхода



Рис. 2. Зависимость  $d\beta/dT$  от работы выхода  $\phi$ 



Рис. 3. Изменение работы выхода  $\varphi$  лент в течение срока службы t при  $I_{\rm H}$  = 2,2 A

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(508), 2011



Рис. 4. Изменение работы выхода  $\phi$  лент в течение срока службы *t* при  $I_{\rm H}$  = 2,5 A

устанавливается в течение первых 400...500 ч прогрева при высоком вакууме и температуре 1000 °С. При дальнейшем прогреве работа выхода существенно не изменяется.

Прогрев лент в недостаточно хороших вакуумных условиях сопровождается некоторым увеличением работы выхода (рис. 3 и 4, кривые 4 и 5), которая сохраняется на уровне 4,35...4,45 эВ в течение всего времени проведения испытаний (около 4000 ч). Увеличение работы выхода может быть связано с адсорбцией на поверхности тантала электроотрицательных атомов и молекул, присутствующих в газовой среде трубки ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , Cl, F). При этом необходимо отметить парадоксальную ситуацию: в «плохих» вакуумных условиях сигнал АЛТ может быть выше, чем в «хороших».

Увеличение работы выхода танталовой ленты может происходить также в том случае, если после очистки ленты в вакууме 10<sup>-8</sup> мм рт. ст. ухудшить вакуум до 10<sup>-5</sup> мм рт. ст. (рис. 5). Стрелками показано направление изменения работы выхода в течение 2...3 мин при ухудшении вакуумных условий.



Рис. 5. Влияние вакуумных условий на работу выхода *ф* ленты в течение срока службы *t* 

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(508), 2011

#### **3. TEMHEPATYPA**

Важнейшим параметром, определяющим величину сигнала АЛТ, является температура ионизатора. Для сохранения ее неизменной в системе «ГЛОНАСС» предусмотрена стабилизация тока накала.

Результаты измерения температуры ленты-ионизатора представлены на рис. 6. Перепад температуры между концами ленты, где она закреплена, составляет приблизительно 150 °C, что неизбежно вызовет поток атомов цезия в направлении менее нагретых частей ленты.



Рис. 6. Начальное распределение температуры по длине ленты при  $I_{\mu} = 2,0$  А

На рис. 7 приведены зависимости холодного сопротивления 6 лент от времени их горения при токе накала 2,0 А. Зависимости температуры при тех же условиях представлены на рис. 8 (температура измерялась в центральной части лент).



Рис. 7. Изменение сопротивлений R<sub>ход</sub> лент в течение срока службы t



Рис. 8. Изменение температуры  $T_{_{\rm SDK}}$  в центре лент в течение срока службы *t* при  $I_{_{\rm H}} = 2,0$  А

Результаты, представленные на этих рисунках, позволяют сделать следующий вывод: стабилизация тока накала не обеспечивает сохранение постоянной температуры ленты-ионизатора в течение срока службы.

Начальный разброс температуры между лентами разных партий (представлены результаты испытаний 6 экземпляров) составлял 50 °C, через 3000...5000 ч он увеличился до 100 °C. Изменение электрического сопротивления и температуры связано скорее всего со структурными изменениями в объеме и на поверхности лент.

#### **4.** С Т Р У К Т У РА

Как уже было отмечено, в качестве ионизатора цезия используется поликристаллическая танталовая лента. На рис. 9 представлено изображение структуры такой ленты, полученное в оптическом микроскопе. Лента проработала в составе индикатора при температуре 1030 °C



Рис. 9. Внешний вид ленты-ионизатора в оптическом микроскопе

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(508), 2011

в течение 3500 ч. Из рисунка видно, что после указанной тепловой обработки в основном сохраняется структура вытянутых кристаллов, характерная для образцов лент, полученных прокаткой. Однако в областях, близких к месту крепления ленты, т. е. там, где имеется высокий градиент температуры, наблюдается интенсивная рекристаллизация. Кроме того, в этих областях за счет диффузии происходит также увеличение концентрации примесей и дислокаций. Следствием всего этого является уменьшение механической прочности материала. Поэтому, как правило, разрыв ленты при натяжении происходит не в том месте, где высокая температура (центр ленты), а в месте, близком к ее креплению, где высокий градиент температуры.

Тепловая обработка ленты сопровождается структурной перестройкой ее поверхности. Атомно-силовой микроскоп (использована модель SOLVER H–47H) позволил проследить изменение морфологии поверхности и контактного поля пятен после различных вариантов температурной обработки.

Для определения контактной разницы потенциалов применялся метод Зонда Кельвина, который основывается на двухпроходной методике кантилевера. При первом проходе определяется рельеф поверхности образца. На втором проходе этот рельеф отслеживается при прохождении кантилевера на некоторой высоте над образцом для определения поверхностного электрического потенциала. В течение этого, второго прохода колебания кантилевера возбуждаются не механически, а электрически – путем приложения к зонду напряжения смещения. Система обратной связи изменяет переменную составляющую потенциала зонда, в результате получаем картину распределения поверхностного потенциала по поверхности ленты-ионизатора. Когда на зонд не подается постоянное смещение, это распределение представляет распределение контактной разности потенциалов.

На рис. 10 представлено изменение структуры поверхности после термического прогрева ленты при разных температурах и времени. Как видно из этого рисунка, увеличение температуры и времени прогрева сопровождается ростом размеров кристаллов и сглаживанием их поверхности. При этом контраст по работе выхода отдельных областей ионизатора возрастает (см. таблицу).

Температура отжига, °С	Время отжига, мин	Изменение контактной разности потенциалов, эВ
1000	5	0,20
1200	5	0,10
1300	30	0,30
1400	5	0,20
1400	30	0,23
1500	5	0,40



Таким образом, поверхность танталовой ленты состоит из пятен с различной работой выхода (рис. 11).



Рис. 11. Контактное поле пятен ленты-ионизатора

На рис. 12 представлено схематично контактное поле пятен такой поверхности. Проанализировать процессы, которые сопровождают ионизацию цезия на пятнистой поверхности, очень сложно [5].



Рис. 12. Изменение степени ионизации в падающем потоке частиц у поверхности эмиттера из-за действия контактного поля пятен

Размер пятен составляет около 5...10 мкм (рис. 11), а разность контактного потенциала – 0,1...0,4 эВ. Так что поле пятен может меняться в пределах 10<sup>2</sup>...10<sup>3</sup> В/см. Если внешнее поле компенсирует поле пятен, то эмиссия ионов цезия из каждого пятна происходит независимо друг от друга, но наибольший вклад в эмиссию ионов дают пятна с большей работой выхода.

Если внешнее поле меньше поля пятен, а реально оно равно около 10...20 В/см, то в этом случае поле пятен подавляет эмиссию с областей с большой работой выхода. Поскольку в этом случае происходит нарушение равновесия между падающими на поверхность частицами цезия и испарившимися в виде атомов или ионов, то должен появиться миграционный поток цезия с пятен, обладающих большой работой выхода.

Миграционные потоки приводят к неравномерным изменениям эмиссионной способности отдельных участков ленты, что неизбежно должно привести к увеличению фликкер-шумов.

Для того чтобы избежать трудностей, связанных с эмиссионной неоднородностью лентыионизатора, необходимо перейти к использованию ионизаторов с текстурированной поверхностью (лучше – монокристаллов).

Для тантала лучше всего грань (110) с работой выхода 4,7...4,8 эВ [6].

#### 5. ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИНДИКАТОРА АТОМНОГО ПУЧКА

Для повышения уровня выходного сигнала цезиевой атомно-лучевой трубки необходимо обеспечить максимальное (близкое к 100 %-му уровню) токопрохождение на коллектор в ионно-оптической системе индикатора атомного пучка. Сложность этой задачи состоит в том, что для достижения требуемого уровня токопрохождения ионная пушка, в которой осуществляется отбор ионов цезия с поверхности термического ионизатора и последующее формирование ионного потока, должна быть согласована с отклоняющим магнитным полем масс-спектрометра, установленного вне области ионной пушки, за вытягивающей анодной диафрагмой. Решение этой задачи стало возможным благодаря ранее разработанной методике комплексного расчета систем формирования потоков заряженных частиц и магнитных систем [7].

В настоящей работе выполнен расчет токопрохождения ионного потока в одной из промышленных АЛТ [1]. Математическая модель ионной пушки и магнитной системы масс-спектрометра учитывает реальные размеры электродов, магнитные свойства материалов, поля рассеяния магнитной системы масс-спектрометра в переходной области между анодной вытягивающей диафрагмой и полюсными наконечниками, влияние поля собственного пространственного заряда положительных однозарядных ионов цезия, изменение потенциала вдоль термического ионизатора за счет прохождения постоянного тока накала.

Процесс термической ионизации смоделирован в приближении заданной и постоянной плотности ионного тока на активной (облучаемой атомным пучком) поверхности ленты-ионизатора размерами 5,0×1,1 мм. Начальная энергия ионов вблизи поверхности ленты задана равной 0,1 эВ. Учтены масса иона цезия ( $m_{\mu} = 242300m_{e}$ , где  $m_{e}$  – масса электрона) и положительный заряд иона ( $e_{\mu} = -e$ , где e – величина заряда электрона).

Циклотронный радиус вращения  $R_{_{IIIK}}$  однозарядных положительных ионов цезия в однородном поперечном магнитном поле масс-спектрометра, индукция поперечного магнитного поля  $B_0$  и ускоряющее напряжение  $U_{_{IIOH}}$  (потенциал ленты в центре эмиссионной зоны, измеренный относительно анода – заземленного корпуса индикатора) связаны известными соотношениями:

$$R_{\mu\nu} = m_{\mu} v_{\mu\nu} / eB_{0}, \quad v_{\mu\nu}^{2} = 2e/m_{\mu} U_{\mu\nu}.$$
(4)

В рассмотренной конструкции ионно-оптической системы промышленной АЛТ с заданными размерами анодной камеры индикатора, которые ограничивают возможную величину циклотронного радиуса вращения ионов значением  $R_{\text{цик}} \approx 15...16$  мм, соотношение (4) может быть преобразовано к виду

$$U_{\rm HOH}^{1/2}/B_0 = 9,0,\tag{5}$$

где  $U_{_{\text{нон}}}$  – потенциал в центре ленты-ионизатора, В;  $B_{_0}$  – индукция поля в однородной области поля масс-спектрометра, Тл.
Из соотношения (5) следует, что необходимая (оптимальная для разворота ионного потока на 90 град) величина потенциала ленты тем меньше, чем меньше величина индукции поля масс-спектрометра. Следовательно, для обеспечения работы индикатора в режиме повышенных напряжений источников питания необходимо усиливать отклоняющее поле масс-спектрометра.

На рис. 13 показаны ионно-оптическая система и магнитный масс-спектрометр, формирующие квазиленточный ионный поток в пространстве между поверхностью ленты и коллектором ионов на боковой поверхности корпуса индикатора.



Рис. 13. Электроды ионно-оптической системы (*a*) и магнитный масс-спектрометр (*б*). Показано положение ионного потока относительно отдельных элементов формирующей системы

Величина магнитного поля масс-спектрометра ( $B_0 = 3000 \, \Gamma c$ ) определена путем компьютерного моделирования его магнитной системы. Рассчитанная в соответствии с (5) оптимальная величина потенциала ленты в центре эмиссионной зоны в данном случае равна 6,725 В. Перепад потенциала по всей длине ленты между ее держателями, по предварительным оценкам, задан в пределах от 6,45 до 7,15 В.

На рис. 14 приведены функциональные зависимости токопрохождения от потенциала фокусирующего электрода для указанного постоянного потенциала ленты при разных значениях ионного тока, величина которого может изменяться путем выбора температурного режима работы ленты.

Как следует из рис. 14, функции токопрохождения имеют максимум при определенном значении потенциала фокусирующего электрода. Ширина области изменения потенциала фокусирующего электрода на заданном уровне токопрохождения (зона токопрохождения) в зоне максимума может служить критерием для оценки возможной допустимой действующей разности потенциалов между лентой и фокусирующим электродом с учетом контактной разности потенциалов.

Наличие максимума функции токопрохождения обусловлено процессами, связанными с изменениями размеров поперечного сечения ионного потока, а также изменениями распределения



Рис. 14. Зависимости токопрохождения от потенциала фокусирующего электрода  $U_{\phi o \kappa}$  и величины ионного тока при потенциале ленты-ионизатора  $U_{\mu o \mu}$  = 6,725 В и индукции поля в зазоре масс-спектрометра  $B_0$  = 3000 Гс:

$$I - I_{reg} = 1,11 \cdot 10^{-8} \text{ A}; 2 - 2,78 \cdot 10^{-9} \text{ A}; 3 - 6,27 \cdot 10^{-10} \text{ A}, 4 - 8,36 \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

плотности тока и скоростей ионов по сечению ионного потока в процессе его распространения от поверхности ленты до коллектора.

Ширина поперечного сечения ионного потока и поперечные составляющие скоростей ионов изменяются под действием поля фокусирующего электрода, а длина – под действием отклоняющего магнитного поля масс-спектрометра.

Левый пологий участок функции токопрохождения связан с увеличением ширины ионного потока в области ионной пушки, что приводит к перехвату периферийной части потока на края прямоугольного отверстия вытягивающей анодной диафрагмы.

Правый крутой фронт функции токопрохождения обусловлен процессом запирания эмитирующей поверхности термического ионизатора под действием положительного потенциала фокусирующего электрода и поля пространственного заряда ионов.

По данным проведенного расчета, максимумы кривых токопрохождения расположены в области потенциалов фокусирующего электрода  $U_{\phi o \kappa} = 6, 4...6, 6$  В, в пределах заданной величины ионного тока. В точках максимума разность потенциалов между центром эмиссионной зоны ленты ( $U_{\mu 0 \mu} = 6,725$  В) и фокусирующим электродом составляет соответственно +(0,325 ...0,125) В. Эта величина сравнима с величиной перепада потенциала вдоль ленты за счет прохождения постоянного тока накала и вероятной величиной контактной разности потенциалов между лентой и фокусирующим электродом.

Проведенные расчеты показали, что в случае изменения оптимальной величины потенциала ленты  $U_{_{\rm ион}}$  (например, за счет увеличения индукции отклоняющего поля до уровня  $B_{_0}$ = 4335 Гс) относительная величина разности потенциалов между лентой и фокусирующим электродом остается постоянной величиной:

$$(U_{\rm ион} - U_{\rm фок})/U_{\rm ион} = 1/12.$$
(6)

Таким образом, для увеличения абсолютной величины разности потенциалов между лентой и фокусирующим электродом (а значит, уменьшения чувствительности токопрохождения к из-

менению контактной разности потенциалов) в масс-спектрометре необходимо обеспечить более высокий уровень однородной индукции сортирующего магнитного поля.

Наконец, важно отметить, что результаты компьютерного моделирования подтверждают возможность некоторого расширения зоны токопрохождения и, следовательно, снижения влияния возможной контактной разности потенциалов за счет перехода к слаботочному режиму работы индикатора при пониженной температуре нагрева термического ионизатора.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стабильность потока ионов цезия и, следовательно, сигнала АЛТ при прочих неизменных условиях зависит от стабильности работы выхода электронов для всех электродов индикатора (в первую очередь, для танталовой ленты и фокусирующего электрода), а также от температуры танталовой ленты, на поверхности которой происходит термическая ионизация атомов цезия.

Существенной особенностью индикатора является то, что контактная разность потенциалов между электродами ионной пушки сравнима с разностью потенциалов между лентой и фокусирующим электродом, подаваемой от внешнего источника.

Исследования показали, что в условиях «хорошего» вакуума (10<sup>-8</sup> мм рт. ст.) при рабочей температуре (1000...1100 °C) работа выхода материала ленты достигает стандартных величин не менее чем за 500 ч. В худших вакуумных условиях (около 10<sup>-5</sup> мм рт. ст.) она за то же время не изменяется и остается на уровне 4,35...4,45 эВ. В первом случае ионный поток цезия будет падать, а во втором – остается неизменным.

Стабильность работы выхода тантала в «плохих» вакуумных условиях обеспечивается, скорее всего, наличием в газовой среде прибора и в тантале электроотрицательных атомов и молекул (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Cl, F).

Приведенные в данной статье значения работы выхода являются усредненными по всей рабочей поверхности тантала. Однако если в качестве ионизатора используется поликристаллическая танталовая лента, то, как показали исследования распределения работы выхода по ее поверхности в атомно-силовом микроскопе, разница в работе выхода между отдельными участками ленты достигает приблизительно 0,4 эВ, что вызывает контактное поле пятен  $10^2...10^3$  В/см.

Поле от низковольтных напряжений на электродах ионизатора не может компенсировать поле пятен такой величины. В этом случае происходит подавление эмиссии ионов в областях с большой работой выхода, поток ионов становится многоструйным, появляется миграционный поток атомов цезия в направлении пятен, обладающих меньшей работой выхода. Все это неизбежно должно привести к увеличению фликкер-шумов.

Стабильность ионного тока при случайных изменениях потенциала на электродах индикатора определяется функциональной зависимостью ионного тока от потенциала фокусирующего электрода.

В результате компьютерного моделирования работы индикатора было обнаружено, что с уменьшением ионного тока в диапазоне величин 10<sup>-11</sup>...10<sup>-8</sup> А наблюдается уменьшение крутизны спада ионного тока вблизи точки максимума тока и увеличение ширины зоны токопрохождения.

Для стабилизации температуры ионизатора в системе «ГЛОНАСС» предусмотрена стабилизация тока накала ленты. В настоящей работе показано, что в процессе срока службы (испытания проходили в течение 6 тыс. ч) изменяется электрическое сопротивление ленты, а ее температура меняется на 50...100 °C, так что стабилизация тока накала не может обеспечить стабильность ее температуры из-за структурных изменений, происходящих в объеме и на поверхности ленты.

#### ЛИТЕРАТУРА

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

2. Об ускоренной оценке надежности атомно-лучевых трубок «Успех-ЗАМ» в составе бортовых синхронизирующих устройств космических аппаратов / А.А. Борисов, В.М. Исаев, О.И. Обрезан, Д.С. Трофимов, Ю.А. Турутин, С.В. Щербаков, Г.И. Дульский, Л.В. Панченко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 3 (506). – С. 4.

3. *Герман Г., Вагнер С.* Оксидный катод. – М.: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1949. – С. 67.

4. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966. – С. 452.

5. Зандберг Э.Я., Ионов Н.И. Поверхностная ионизация. – М.: Наука, 1969. – С.107.

6. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 64.

7. Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Каневский Е.И. Комплексный расчет трехмерных электронно-оптических и магнитных фокусирующих систем ЭВП СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 2 (482). – С. 20–43.

Статья поступила 14 января 2010 г.

УДК 621.385.7

# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРИПОИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ЭМИССИОННОГО ТЕЛА МЕТАЛЛОПОРИСТОГО КАТОДА С КАТОДОДЕРЖАТЕЛЕМ

## Б. Ч. Дюбуа, О. В. Поливникова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены результаты исследований и разработки припоев для соединения эмиссионного тела металлопористого катода с катододержателем. Разработанные припои перекрывают диапазон температур пайки 1150...1450 °C. Пайка возможна в водороде и в вакууме.

КС: припой, металлопористый катод, катододержатель, катодный узел

The results of investigations and development of solders for connecting the emission body of a dispenser cathode with the cathode holder are presented. The developed solders cover 1150....1450°C temperature range of soldering. The soldering is possible both in hydrogen and vacuum.

Keywords: solder, dispenser cathode, cathode holder, cathode assembly

Надежность катодного узла в значительной степени определяется способом крепления эмиссионного тела к катододержателю. Существуют различные способы крепления: завальцовка, электронно-лучевая и лазерная сварки, прессование металлического порошка в катододержатель с последующей пропиткой запрессовки (губки) активным веществом или прессование готовой смеси металлического порошка и активного вещества, а также пайка. Последний способ крепления, по нашему мнению, обеспечивает наиболее надежное соединение указанных элементов катодного узла.

Температура пайки должна быть, по возможности, низкой. Это требование возникает в том случае, когда необходимо паять катоды после осмирования. С повышением температуры происходит изменение состава и структуры пленки осмия, что приводит к падению эмиссионной способности катода и уменьшению его срока службы.

Возможность проведения пайки как в водороде, так и в вакууме расширяет применимость этого процесса. Пайка в вакууме необходима и в том случае, если катододержатель покрыт антиэмиссионным материалом, например гафнием, который активно взаимодействует с водородом.

Важно также, чтобы в процессе пайки и при дальнейшей работе катода в приборе материал припоя не оказывал отравляющего воздействия на эмиссию катода.

В настоящей работе представлены результаты исследований свойств низкотемпературных припоев. Составы припоев приведены в таблице.

При выборе составов припоев учитывалось давление паров входящих в них материалов и их влияние на скорость восстановления активного вещества.

Состав припоя	Температура пайки, °С				
(массовая доля В, %)	в водороде	в вакууме			
Ru–B (9 – 10)	1450	_			
Ir–B (5 – 6)	1250	1250			
Rh–B (5 – 6)	1250	1250			
Ni–B (4 – 6)	1200	1150			

Поскольку для припоев, содержащих В, полных фазовых диаграмм состояний не построено, необходимо было провести ряд исследований по уточнению их состава. Из литературы [1] известно, что в этих системах существует ряд интерметаллических соединений типа Ru<sub>2</sub>B, RuB, Ru<sub>B</sub>, (c Ir, Rh и Ni аналогично) и эвтектики.

Первой задачей было нахождение состава эвтектик. За показатель того, что мы имеем дело с составом, близким к эвтектическому, принимались температура, которая должна быть наименьшей, и однородность расплава. Работа проводилась на нейтральной подложке  $Al_2O_3$ . На ее поверхность наносились припои с различным содержанием В (от 2 до 15 %) и плавились в водородной или вакуумной печи при температурах от 900 до 1600 °C. В результате были установлены составы эвтектических сплавов, которые указаны в таблице.

Расплавить припой – это еще не значит получить хороший спай. Необходимо, чтобы припой обладал определенной текучестью, мог заполнять паяемый зазор. Растекание припоя изучалось на таблетках пористого W, пропитанного активным составом – алюминатом бария–кальция (3:0,5:1), и чистых металлов путем измерения диаметра пятна припоя, нанесенного на таблетку, при разных температурах отжига. На рис. 1 представлены зависимости изменения диаметра пятна  $д_n = D_t/D_0$  на поверхности металлопористых катодов от температуры.



До начала плавления диаметр пятна не изменялся. При плавлении припоя наблюдалось резкое увеличение его текучести – диаметр растекания резко возрастал. Исключение составлял Ni–B, где капиллярные силы оказались настолько велики, что при высоких температурах расплав преимущественно поглощался губкой, а не растекался. На рис. 1 видно, как в этом случае уменьшается высота припоя  $d_{\rm B} = H_t/H_{1250}$  с ростом температуры. Выбор припоя и режимов пайки должен осуществляться с учетом необходимости получения минимального воздействия материалов припоя на свойства катода.

Для этого были предприняты исследования глубины проникновения припоя в толщу материала губки и основного конструкционного материала – Мо. Для изучения глубины диффузии компонентов припоя использовался микрорентгеновский анализ. Результаты исследования представлены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Распределения элементов (в отн. ед.) на границе припоя и паяемого материала для систем W–Rh–B (*a*) и W–Ir–B (*б*). Для бора ось ординат – справа

В результате этих исследований было установлено, что в режиме пайки проникновение Ni, Ru, Ir, Rh в W, металлопористый катод (МПК) и Mo незначительное (5...7 мкм). С другой стороны, в припое на всю его глубину (20...30 мкм) растворяются W и Mo. Это закономерно, так как Ni, Ru, Ir, Rh в указанных материалах растворяются очень мало (1...2 %), а W и Mo в основных материалах припоя растворяются значительно (более 30...40 %). Аналогичная закономерность наблюдается и для припоя Ni–B с чистыми W и Mo, а для МПК с увеличением температуры увеличивается проникновение Ni в W-губку. Проникновение, вероятно, идет по порам губки за счет капиллярных сил. Нужно учесть, что Ni из всех исследуемых металлов самый низкоплавкий (Ni – 1450 °C, Rh – 1960 °C, Ru – 2450 °C, Ir – 2440 °C, Mo – 2620 °C, W – 3380 °C) и при температурах 1200...1500 °C должен обладать высокой текучестью.

Как видно из рисунков, из припоя уходит В, насыщая приповерхностный слой W или Mo, но проникает В в эти металлы не глубоко. Один из возможных механизмов диффузии В в Mo или W может состоять в его накоплении в приповерхностном слое путем последовательного перехода от соединений бедных к более богатым бором:  $Mo_2B$ , MoB,  $MoB_2$ ,  $Mo_2B_5$ , аналогично и с вольфрамом.



Рис. 3. Распределения элементов (в отн. ед.) на границе припоя и паяемого материала для систем W–Ni–B (*a*) и Мо–Ni–B (*б*). Для бора ось ординат – справа

Таким образом, в результате пайки состав припоя существенно изменяется: он насыщается тугоплавкими металлами W и Mo, из него уходит В. Поэтому неудивительно, что попытки вторично расплавить паяные соединения при температуре пайки не удаются (нагревание до температуры 1700 °C не приводит к разрыву паяного соединения).

Разрушение паяного шва возможно по другим причинам. В процессе пайки может происходить эрозия тугоплавкого металла (W и Mo) и образование в нем пор. Это часто наблюдается, когда диффузия идет несимметрично, например из *A* в *B* переходит атомов больше, чем из *B* в *A*. В результате чего место паяного шва увеличивается в объеме и происходит разрыв пайки и всей детали. Поэтому необходимо паяемые детали изготавливать с большой точностью и шов заполнять как можно меньшим количеством припоя.

Однако изучение шлифов спаев показало, что в разработанных режимах пайки конструкции паяемых соединений не имеют пористости. Это видно, например, на фотографии (рис. 4).



Рис. 4. Шлиф границы припоя Rh–B и Mo

Особое значение имеет величина зазора. Поскольку пайка ведется низкотемпературными припоями, повышение температуры распая которых на 500...600 °С обусловлено взаимодействием с паяемыми деталями, ширина зазора не должна быть больше глубины этого взаимодействия. Было установлено, что величина зазора не должна быть более 10 и менее 5 мкм, чтобы обеспечить согласованное соединение материалов с различными коэффициентами теплового расширения.

Испытания катодных узлов на термоциклы в диапазоне температур  $T_{\rm spk} = 1050...1150$  °C показали, что через 3 000 циклов стабильность геометрических параметров паяных соединений сохраняется в пределах 2 %, а изменения температуры катодов не наблюдается.

Исследования паяных катодных узлов в эмиссионном микроскопе показали, что материал припоя не влияет на эмиссионные параметры катода. В приборах, работающих в импульсном режиме с отбором тока 10 A/cm<sup>2</sup>, паяные катодные узлы обеспечивают стабильные эмиссионные параметры в течение 25 тыс. ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Благородные металлы: Справочник / Под ред. Е.Н. Савшукова. – М.: Металлургия, 1984. – С. 246.

Статья поступила 29 декабря 2010 г.

УДК 621.385.7:621.385

## КАТОДЫ ДЛЯ МОЩНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ ВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ

# Б. Ч. Дюбуа, Е. М. Земчихин, О. В. Поливникова, В. И. Пугнин, Г. И. Чистова, А. Н. Юнаков

#### ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Описана конструкция катодно-подогревательного узла для мощных многолучевых клистронов. Оптимизирован состав эмиссионного тела металлопористого катода, применяемого в этой конструкции, с учетом необходимости получения плотности катодного тока до 10 А/см<sup>2</sup>, долговечности несколько тысяч часов и снижения скорости испарения бария для уменьшения вероятности возникновения пробоев в клистроне. Приведены основные параметры клистронов, в которых использованы разработанные катоды.

# *КС: катодно-подогревательный узел, мощный многолучевой клистрон, металлопористый катод,* <u>эмиссионное тело</u>

The design of cathode-heater assembly for power multiple-beam klystrons is described. The composition of emission body used in this dispenser cathode design was optimized taking into account the necessity of getting cathode current density up to 10 A/cm2, life of several thousand hours and decreasing barium evaporation speed which is necessary for decreasing the possibility of breakdowns in the klystron. The principal parameters of the klystrons in which the developed cathodes were used are presented.

Keywords: <u>cathode-heater assembly</u>, <u>power multiple-beam klystron</u>, <u>dispenser cathode</u>, <u>emission body</u>

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные многолучевые широкополосные клистроны благодаря низким питающим напряжениям нашли широкое применение в выходном каскаде усиления передатчиков мощных радиолокационных станций различного назначения. Клистроны, используемые в таких РЛС, должны удовлетворять ряду требований.

Выходная мощность определяет максимальную дальность обнаружения целей, поэтому непременным требованием является увеличение импульсной и средней выходной мощности клистронов. Расширение полосы рабочих частот клистрона дает возможность увеличить помехозащищенность станции, а также позволяет повысить электромагнитную совместимость, что особенно важно в условиях современных радиоэлектронных средств, насыщенных множеством электромагнитных излучателей. Поимпульсный переход от частоты к частоте в условиях помех и различных погодных условий обеспечивает оптимизацию методов определения цели на максимальных расстояниях.

Непременным требованием к клистронам является также работа при длительностях импульса от долей до сотен микросекунд. Работа при малых длительностях импульса и с большой частотой повторения возможна при использовании низковольтной модуляции. Таким образом, в клистроне возникает необходимость применения управляющего электрода в электронной пушке. Наличие низковольтного, относительно катода, управляющего электрода, находящегося под высоким электрическим потенциалом, а также работа при больших длительностях импульсов приводят к увеличению вероятности пробоя между электродами.

Многолучевые клистроны с тороидальными резонаторами на основном виде колебаний во многом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СВЧ-источникам для мощных РЛС. Однако в средней и коротковолновой части см-диапазона длин волн параметры клистронов с тороидальными резонаторами на основном виде колебаний ограничены из-за невозможности увеличения диаметра пролетной трубы более половины длины волны.

Известным путем увеличения выходной мощности является её суммирование за счет применения резонаторов, работающих на высших видах колебаний. С этой целью были использованы кольцевые резонаторы. В пучностях электрического поля такого резонатора устанавливался емкостной выступ, через который проходил один электронный поток. Данная конструкция позволяет создавать клистроны с высоким уровнем выходной мощности, однако не обеспечивает широкую полосу частот, присущую многолучевым клистронам на основном виде колебаний.

Сочетать преимущества клистронов с резонаторами на высших видах колебаний и многолучевых клистронов на основном виде колебаний позволяет гибридная конструкция, в которой каждая отдельная ячейка резонатора на высшем виде колебаний является многолучевой. Таким образом, в средней и коротковолновой части см-диапазона длин волн возникает необходимость в использовании резонаторов на высших видах колебаний с многолучевыми пролетными трубами. Многолучевые клистроны с резонаторами на втором виде колебаний являются наиболее простыми и, наряду с возможностью увеличения выходной мощности, обладают наибольшей широкополосностью среди клистронов с резонаторами на высших видах колебаний.

Катодно-подогревательный узел (КПУ) для таких приборов, как правило, представляет собой совокупность отдельных элементарных катодов, закрепленных в общем катододержателе.

Комплекс требований, которые предъявляются к КПУ такого типа, довольно сложен: плотность катодного тока в импульсном режиме – не менее 10 А/см<sup>2</sup>, срок службы – несколько тысяч часов, высокая устойчивость к пробоям, при диаметре КПУ до 30 мм время готовности – не более 2 мин.

Эти требования, в свою очередь, предполагают высокую точность изготовления отдельных деталей и всего КПУ в целом. Разброс температуры между отдельными элементарными катодами должен быть весьма мал – не более  $\pm 5$  °C – и сохраняться таким в процессе многократных циклических включений напряжения накала катода (не менее 1000 циклов).

Испарение активных веществ с катода должно быть сведено к минимуму. Само по себе испарение бария или окиси бария не является причиной пробоя, однако эти вещества, оседая на поверхности различных дефектов в приборе (острия, углубления, царапины, следы окисления поверхностей электродов, пылевые частицы), активируют их (увеличивают их полевую, термо- и вторично-электронную эмиссию), что и приводит к увеличению вероятности возникновения пробоев в приборе.

#### 2. ЭМИССИОННОЕ ТЕЛО КАТОДА

В приборах рассматриваемого типа прочные позиции удерживают металлопористые катоды (МПК) [1]. Эмиссионное тело этих катодов представляет собой металлическую губку, пропитанную активным веществом. Существует огромное количество работ, в которых описываются свойства МПК разных составов. Наиболее широко используются МПК, в которых губка изготавливается из вольфрамового порошка, а активным веществом является алюминат бария–кальция состава 3BaO·0,5CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Содержание алюмината в губке обычно колеблется в пределах 8...9 %.

На рис. 1 (кривая *1*) приведена зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии при нулевом поле у катода от температуры МПК с таким эмиссионным телом. Для увеличения эмиссионного тока поверхность катода покрывают осмием (кривая *2*) [2].



Рис. 1. Зависимости плотности тока от температуры при нулевом поле у катода для неосмированного (1) и осмированного (2) МПК

Три параметра МПК зависят от количества активного вещества, вводимого в губку эмиссионного тела: плотность тока термоэлектронной эмиссии *J*, долговечность  $\tau$  и скорость испарения *v*. Зависимость этих параметров от количества алюмината в губке при температуре МПК  $T_{\rm spk} = 1100$  °C представлена на рис. 2. Видно, что эмиссионная способность МПК начинает падать при концентрации алюмината в губке менее 4 %, а долговечность – при менее 5,5 %, тогда как скорость испарения бария монотонно возрастает с увеличением концентрации алюмината с 3 до 8 %.

Поэтому оптимальное количество алюмината бария-кальция в вольфрамовой губке МПК, по нашему мнению, 6...7 %.

Дополнительного снижения скорости испарения бария в 2...2,5 раза можно достичь за счет использования алюмината с добавкой окиси кремния ( $3BaO.0,5CaO.0,5SiO_2.Al_2O_3$ ). Изменение эмиссионных свойств катода и его долговечности в этом случае не происходит. При этом необходимо отметить, что при снижении скорости испарения бария с катода ухудшаются и его геттерирующие свойства. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению более высоких вакуумных условий в приборе.

Соединение эмиссионного тела с молибденовым керном катода осуществляется с помощью припоев Rh–B или Ir–B [3]. Случайный выход припоя на эмиссионную поверхность не приво-



Рис. 2. Зависимости плотности тока *J*, долговечности τ и скорости испарения *v* от количества алюмината Ва–Са в губке эмиссионного тела неосмированного МПК

дит к потере эмиссии с этих участков катода. На рис. 3 представлено изображение поверхности МПК в эмиссионном микроскопе.



Рис. 3. Изображение поверхности МПК в эмиссионном микроскопе

Светлая линия – искусственно созданный выплыв припоя Rh–В на поверхности неосмированного катода. Некоторое увеличение эмиссии с этих участков обусловлено, скорее всего, тем, что все металлы платиновой группы обладают «эффектом осмия», т. е. их нанесение на поверхность МПК приводит к увеличению эмиссионных свойств катода.

#### 3. КОНСТРУКЦИЯ КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНОГО УЗЛА

Типичные требования к точности изготовления КПУ для многолучевых приборов следующие: плоскостность поверхности элементарных катодов – не более  $\pm 0,04$  мм, а их расположение относительно друг друга –  $\pm 0,02$  мм.

Для двухтрубных клистронов был выбран вариант КПУ, состоящего из двух отдельно изготовленных катодных модулей, каждый из которых имел свой подогреватель, тепловую развязку и тепловые экраны для уменьшения мощности нагрева.

На рис. 4 представлен общий вид такого узла.



Рис. 4. Общий вид КПУ для двухтрубного клистрона

Эскиз катодного модуля приведен на рис. 5. Модуль состоит из катодного блока, подогревателя, держателя катода и двух тепловых экранов. Точность сборки катодного модуля определяется специально разработанной оправкой и точностью изготовления катодного блока и держателя.

На рис. 6 приведен общий вид катодного блока, представлющего собой обойму с 15 впаянными в нее элементарными катодами.

Было разработано два варианта элементарных катодов, которые показаны на рис. 7.

Первый вариант (рис. 7, a) – в молибденовом керне находится только выступающая из обоймы часть катода. Однако из-за хрупкости вольфрамовой губки при сборке пушки наблюдалось скалывание выступающей из обоймы части катода, если его диаметр был менее 3 мм. Поэтому был разработан второй вариант, в котором вся заготовка катода помещается в молибденовый керн (рис. 7,  $\delta$ ). В этой конструкции припой в основном сосредоточен в хвостовой части катода и в фасках между керном и катодом. На поверхность припой не поступает. Такая конструкция более прочная, что необходимо при сборке пушки.

Плоскостность поверхности элементарных катодов в катодном блоке определяется следующими факторами: точностью изготовления элементарных катодов и отверстий в обойме, плоскостностью поверхности самой обоймы и уходом геометрии при пайке катодов с обоймой.





Рис. 5. Катодный модуль: *I* – катодный блок; *2* – подогреватель; *3* – держатель катода; *4*, *5* – экраны



Рис. 6. Общий вид катодного блока



Рис. 7. Элементарный катод: 1 – молибденовый керн; 2 – эмиссионное тело катода

На расположение элементарных катодов относительно друг друга влияет точность изготовления самих катодов и отверстий в обойме, как по диаметрам расположения, так и по углам. Последнее условие особенно важно для внешнего ряда катодов в обойме. Если пары катод – отверстие в обойме подобраны по плотной посадке, то главное влияние на расположение катодов оказывает точность изготовления отверстий в обойме: при необходимой точности расположения центров элементарных катодов  $\pm 0,02$  мм допуск по углам расположения отверстий на внешнем диаметре должен составлять  $\pm 5$  мин. По радиусу точность расположения отверстий должна быть  $\pm 0,01$  мм.

На рис. 8 показан общий вид подогревателя и держателя катода с приваренным лазерной сваркой нижним тепловым экраном.



I – кольцо; 2 – основание

Подогреватель представляет собой три монофиляра, вкрученных друг в друга и сформованных затем в водороде в виде спирали Архимеда в специальных оправках по стандартному режиму отжига для подогревателей. Сформованная тройная (для увеличения излучающей поверхности подогревателя) спираль закрепляется в танталовое основание с помощью изолирущих втулок и танталовых хомутиков. Внешний конец спирали закорачивается на дне основания с помощью контактной и лазерной сварок, а центральный, изолированный конец спирали выводится через отверстие керамической втулки, надежно закрепленной в центре основания. Опыт использования такой конструкции подогревателя показал ее надежность и долговечность.

Проведено испытание катодного модуля на цикличность включения и выключения напряжения накала; определено время его разогрева до уровня  $0,9T_{\rm spk}$  (945 °C) при рабочей температуре катода 1050 °C; измерена температура спирали на макете модуля, в котором вместо катодного блока была помещена молибденовая обойма с одним отверстием для пирометрирования. Время разогрева при этой температуре составило 2 мин. После 3000 циклов включения и выключения напряжения накала ток накала изменился в пределах ±1,3 % при напряжении накала 12,5 В.

Расчет отношения  $R_{rop}/R_{xon}$ , выполненный по показаниям измерительных приборов, дал значение 3,05, что соответствует температуре спирали  $T_{spk} \approx 1600$  °C. Однако если учесть при расчете сопротивление подводящих элементов накала в экспериментальной лампе (танталовые выводы подогревателя и молибденовые траверсы, используемые для крепления модуля в лампе), даже без учета их нагрева, то отношение  $R_{rop}/R_{xon}$  получается меньше 3, что соответствует температуре спирали  $T_{spk} = 1550$  °C. Измерение температуры спирали в макете модуля с отверстием для пирометрирования в молибденовой обойме показало хорошее совпадение с расчетом. Подогреватель при такой, сравнительно низкой температуре является надежным и долговечным.

Необходимо отметить, что в собранной пушке добавочное паразитное сопротивление подводящих накал катода конструктивных элементов, включенное последовательно с подогревателем КПУ, может приводить к уменьшению падения напряжения на подогревателе на несколько десятых долей вольта (по нашей оценке, до 0,9 В), поэтому необходимо увеличить питающее напряжение.

Точность изготовления держателя катода (см. рис.  $8, \delta$ ) оказывает существенное влияние на параллельность поверхности элементарных катодов в модуле и на соосность их расположения относительно основания катодного модуля. Первое необходимое условие – точность изготовления кольца *1* и основания *2*. В процессе совершенствования держателя основание, выдавленное из тантала, было заменено на выточенное из ковара (с промежуточным отжигом) основание, что существенно уменьшило изменение формы основания при последующих сварках. Кроме того, была разработана специальная оправка для сборки держателя катода. Соосность и параллельность держателя с использованием такой оправки получается не хуже 0,02 мм.

Результаты исследования распределения температуры между элементарными катодами, проведенного на установке\* (рис. 9), представлены на рис. 10. Как видно из рисунка, разброс температур между элементарными катодами находится в пределах точности измерения пирометра  $\pm 5^{\circ}$ C.

<sup>\*</sup>Разработчик установки – Исаев А.А. Измерения проводил инженер Сухоручкин Ю.С.



Рис. 9. Установка для пирометрирования КПУ



Рис. 10. Распределение температуры между элементарными катодами

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование разработанного КПУ и резонаторов на втором виде колебаний с многолучевыми пролетными трубами позволило создать мощные – более 600 кВт импульсной выходной мощности – и широкополосные – до 6,3 % – клистроны. В таблице приведены основные параметры разработанных клистронов.

Параметр	Клистрон							
Парамстр	КФ-3-1К	КФ-3-1КМ	КФ-3-2КМ	«Амарант»	«Вакуум»			
Рабочая длина волны, см	5,5	5,5	5,5	4	5,2			
Рабочая полоса, МГц	175	350	200	180	250			
Выходная мощность: импульсная, кВт средняя, Вт	170–300 11,1	170–300 11,1	450–700 12	90–150 15–25	200–300 11,1			
Длительность импульса, мкс	1–512	1–512	1–150	1,6–500	1,6–500			
Минимальный КПД, %	24	20	30	30	22			
Напряжение луча, кВ	20–25	22–26	30–33	13–15	22-26			
Напряжение модуляции, кВ	4,5–5,5	5–5,5	7–7,5	3,5-4,5	5–5,5			

## ЛИТЕРАТУРА

1. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.Н. Никонов. – М.: Энергия, 1966. – С. 203.

2. *Дружинин А.В., Некрасов В.И.* Эмиссионные свойства распределительных катодов с напыленными пленками металлов // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, вып. 2. – С. 411.

3. Патент 39223.7 РФ. Н 01 J 1/20, В 23 К 35/30. Прямонакальный катод для электронных приборов магнетронного типа / *О.В. Поливникова.* – Приоритет 20.11.02.

Статья поступила 18 января 2011 г.

УДК 621.385.7

# КАТОДНЫЕ УЗЛЫ ДЛЯ МОЩНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ С МАЛЫМ ВРЕМЕНЕМ ГОТОВНОСТИ

# Н. М. Галина, Б. Ч. Дюбуа, И. Ю. Литвинюк, А. П. Макаров, О. В. Поливникова, О. В. Сухорукова, Г. И. Чистова, М. С. Востров, А. Д. Закурдаев, В. М. Ипполитов

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Описаны конструкция и способ изготовления миниатюрных многолучевых катодно-подогревательных узлов с внешним диаметром 3,5 и 6,4 мм и временем разогрева соответственно 3...5 и 10...15 с для мощных миниатюрных многолучевых клистронов с малым временем готовности.

КС: катодный узел, время разогрева катода, время готовности клистрона

The design and manufacturing method of miniature multiple-beam cathode-heating assemblies having outer diameter 3.5 and 6.4 mm and 3...5 and 10...15 s heating time accordingly for high power miniature multiple-beam klystrons with a low readiness time are described.

Keywords: cathode assembly, heating cathode time, klystron readiness time

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы уделяется особое внимание разработке вакуумных приборов CBЧ с малым временем готовности, поскольку они применяются в различных системах вооружений и в значительной степени определяют их готовность.

Время готовности электровакуумных приборов СВЧ, использующих электронные пушки с термоэлектронными катодами, зависит от многих факторов, и прежде всего от времени достижения нужной величины анодного тока после включения питающих напряжений.

В свою очередь, на скорость нарастания анодного тока влияет ряд физико-химических процессов, которые происходят внутри вакуумного прибора. Например, нарастание анодного тока может привести к увеличению температуры элементов конструкции внутри прибора и ухудшению вакуумных условий, а следовательно, к отравлению катода и уменьшению его электронной эмиссии, то есть к замедлению её роста. Если включение прибора происходит после дежурного режима (включен только накал катода), то возможно возникновение электрического разряда. Причина тому – барий, накопившийся на холодных электродах. В момент перехода из дежурного режима в рабочий под действием электронной бомбардировки барий заполняет пространство между электродами, в результате чего катод под воздействием бомбардировки ионами бария теряет эмиссию.

Однако основным фактором в обеспечении малого времени готовности электровакуумного прибора является тепловая инерция катодно-подогревательного узла (КПУ), определяющая время разогрева катода до необходимой температуры.

Проблеме расчета и уменьшения времени разогрева термоэлектронных катодов в электронных приборах посвящен ряд работ [1–6].

Разработка КПУ с малым временем разогрева ведется на основе поиска различных конструктивно-технологических решений. В зависимости от размера эмитирующей поверхности катодов используются КПУ косвенного накала [7–11], прямонакальные [12] и с эмиссионным нагревом [13]. Значительное внимание в последние годы уделяется разработке КПУ с подогревателем косвенного накала, поскольку они получили наиболее широкое применение [7–10].

Уменьшение времени разогрева может быть достигнуто за счет снижения температуры катода при использовании высокоэмиссионных материалов, уменьшения массы катода и подогревателя, оптимизации конструкции КПУ, а также применения форсированного режима накала подогревателя.

Время разогрева КПУ соответствует времени разогрева эмитирующей поверхности катода до температуры, обеспечивающей отбор необходимого для работы прибора тока катода, который составляет 0,9...0,95 от номинального значения тока. Температура катода, соответствующая этому току, обычно соответствует значению 0,9 от значения температуры катода при номинальном значении напряжения накала на подогревателе катода ( $0,9T_{HOM}$ ).

Расчет времени разогрева катода требует решения задачи нестационарного теплообмена с привлечением сложного математического аппарата, ЭВМ и является весьма трудоемким. Однако при поиске конструктивных решений для разработки КПУ с малым временем разогрева существенное значение имеют оценочные «инженерные» методы расчета времени разогрева КПУ. Достаточно точную оценку времени разогрева катода можно провести по уравнению из [6]:

$$t_{\text{pa3}} = \frac{\sum mc\Delta T}{P - 0.5P_{\text{Teff}} - 0.2P_{\text{M3J}}},$$

где  $t_{\text{раз}}$  – время разогрева катода; *m* – масса элемента КПУ; *c* – коэффициент теплоемкости элемента КПУ;  $\Delta T$  – изменение температуры элемента КПУ; *P* – мощность накала подогревателя;  $P_{\text{теп}}$  – потеря мощности накала на теплопроводность держателя катода;  $P_{\text{изл}}$  – потеря мощности накала на теплопроводность держателя катода;  $P_{\text{изл}}$  – потеря мощности накала на теплопроводность держателя катода;  $P_{\text{изл}}$  – потеря мощно-

Для упрощения расчетов предполагается, что подводимая мощность не меняется в процессе нагрева и все элементы конструкции узла нагреваются одновременно, а не последовательно. В действительности же подводимая мощность не постоянна в процессе нагрева катода и не все элементы конструкции узла нагреваются одновременно. Оценка влияния каждого элемента конструкции и тепловых потерь на время теплового разогрева катода служит базой для оптимизации конструкции КПУ с малым временем разогрева [6].

В многолучевых приборах СВЧ, в частности в многолучевых клистронах (МЛК), применяются в основном высокоэмиссионные бариевые металлопористые катоды (МПК) двух типов: осмированные [14, 15] и объемно осмированные [7].

В настоящей работе ставилась задача разработать конструкции многолучевого КПУ диаметром 3,5 и 6,4 мм и временем разогрева соответственно 3...5 и 10...15 с для малогабаритных многолучевых клистронов (ММЛК).

## 2. КОНСТРУКЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОГО КАТОДА ДИАМЕТРОМ 3,5 мм

Основными элементами катодного узла с быстрым нагревом являются подогреватель, изолирующий состав и катодное тело, имеющее эмитирующую поверхность с высокой эмиссионной способностью.

Мощность накала, передаваемая от подогревателя к катоду, зависит от конструкции КПУ, применяемых в нем материалов катода и подогревателя, других факторов и существенно влияет на время разогрева катода.

Для обеспечения необходимой плотности тока с катода, до 45 А/см<sup>2</sup>, и заданной мощности в ряде усилительных клистронов используется многолучевой МПК диаметром 3,5 мм, покрытый пленкой осмия, и общей массой 0,2 г. Подогревателем этого катода служит спираль из проволоки BP-20, помещенная в молибденовую чашку и залитая изоляционным составом – расплавленной эвтектической смесью окислов алюминия и иттрия. Необходимо отметить, что время разогрева такого КПУ при номинальной мощности накала подогревателя 6,6 Вт составляет 15 с, а при применении форсированного режима включения накала и мощности накала 17...19 Вт – менее 5 с. Однако такая мощность накала подогревателя почти в 3 раза превышает свое номинальное значение и, как отмечено в работе [6], такое соотношение является критическим для заплавленных подогревателей. В результате температура подогревателя теля может превысить значение 1850 °C, привести к плавлению изолятора и перегоранию подогревателя.

Проведенные оценочные расчеты показали, что для уменьшения времени разогрева этого КПУ необходимо:

- уменьшить массу эмиссионного тела катода и подогревателя;

– улучшить теплопередачу от спирали подогревателя к эмиссионному телу катода за счет уменьшения толщины изоляционного покрытия спирали подогревателя и замены изоляцион-

ной заливки из смеси окислов алюминия и иттрия, имеющей невысокую теплопроводность [6], на заливку на основе молибденового порошка определенной зернистости, обладающую большей теплопроводностью;

 – отработать оптимальную толщину изоляционного покрытия из окиси алюминия, состав заливки на основе молибденового порошка и режимы его спекания;

использовать форсированный режим накала подогревателя.

Внешний вид разработанного катодно-подогревательного узла представлен на рис. 1.

Эмиссионное тело многолучевого катода должно обеспечивать требуемые ток эмиссии, долговечность и устойчивость к циклическим и механическим воздействиям. Для реализации требуемой эмиссионной способности и долговечности поверхность эмиттера покрыта пленкой осмия толщиной 0,4...0,6 мкм [14,15], толщина эмиттера составляет 0,4 мм. Выбор такой толщины эмиттера обоснован тем,



Рис. 1. Многолучевой КПУ диаметром 3,5 мм

что, как было показано ранее [14,15], при испытании осмированного МПК на долговечность в приповерхностном слое губки катода возникает зона обедненения барием и кальцием протяженностью 100...200 мкм.

Способ изготовления КПУ с заливкой на основе молибденового порошка, имеющего высокую теплопроводность, известен [16–18]. Однако ранее он применялся с целью снижения температуры подогревателя и имел недостаток – значительную усадку молибденовой заливки при длительной работе КПУ, приводящую к разрушению изоляционного покрытия подогревателя, появлению тока утечки между эмиттером и подогревателем и, в конечном счете, к изменению температуры катода и перегоранию подогревателя.

Повышение надежности разработанного КПУ достигнуто за счет отработки метода нанесения и толщины изоляционного покрытия из окиси алюминия, состава заливки на основе молибденового порошка и её режима спекания.

Для обеспечения отбора тока эмиссии плотностью до 45 А/см<sup>2</sup> номинальная рабочая температура катода, согласно [14], должна составлять 1150 °С (по эмитирующей поверхности катода) при измерении температуры катода оптическим пирометром сравнения.

Измерения температуры катода во времени при подаче напряжения накала как в номинальном режиме, так и с применением форсированного режима проводились при помощью пирометра сравнения с записью результатов измерений на компьютер и представлены на рис. 2.



Рис. 2. Зависимости температуры катода-аналога (1) и разработанного катода (2...6) от времени разогрева в номинальном (1, 2) и форсированном (3...6) режимах подачи напряжения накала на подогреватель (время подачи форсированного напряжения накала подогревателя – 3,0 с, а затем включался номинальный режим): 1, 2 – U<sub>µ</sub> = 4 B; 3 – 5,5 B; 4 – 6,0 B; 5 – 6,05 B; 6 – 6,1 B

Время разогрева до значения 0,9*T*<sub>ном</sub> (1120 °C) разработанного КПУ при напряжении накала подогревателя 6,0...6,1 В (форсированный режим) составило 2,8...3,2 с.

Зависимость температуры  $T_{\text{к.ярк}}$  и времени разогрева  $t_{\text{раз}}$  типичного катода диаметром 3,5 мм до значения 1120 °C от напряжения накала  $U_{\text{н}}$  и мощности накала  $P_{\text{н}}$  представлена в табл. 1.

<i>U</i> <sub>н</sub> , В	<i>I</i> <sub>н</sub> , А	<i>Р</i> <sub>н</sub> , Вт	<i>Т</i> <sub>к.ярк</sub> , °С	$t_{\rm pa3},{ m c}$
3,5	1,31	4,60	1070	—
4,0	1,44	5,76	1150	7,0
4,5	1,55	6,97	1210	4,6
5,0	1,68	8,40	1290	3,6
5,5	1,77	9,75	1360	2,8

Таблица 1

Разработанные конструкция и технология КПУ обеспечивают необходимые требования по числу циклов включения и выключения накала подогревателя (до 2000 циклов в номинальном режиме и более 200 циклов в форсированном), долговечности и стойкости к механическим воздействиям.

Применение этого катода в усилительном ММЛК 2-см диапазона длин волн позволило получить время готовности прибора 4...5 с.

Проведены также испытания в усилительном ММЛК катодного узла, эмиттером которого служит скандатный МПК, обладающий более высокой эмиссионной способностью, чем осмированный МПК. Эти испытания показали перспективность применения скандатного МПК для дальнейшего уменьшения времени разогрева КПУ и соответственно времени разогрева МЛК.

Разработан многолучевой КПУ с внешним диаметром 3,5 мм, который имеет объемно осмированное эмиссионное тело, запрессованное непосредственно в катодную чашку, и облегченный алундированный подогреватель, нагревающий катодное тело термическим излучением, что позволило уменьшить массу катода до 0,066 г и получить время разогрева 3...4 с при мощности накала 6...7 Вт. В этом КПУ применен держатель катода в виде диска с отходящими от него лепестками из фольги тантала толщиной 20...30 мкм. Такой держатель выполняет также роль камеры подогревателя и экрана.

Для сравнения на рис. 3 представлены зависимости времени разогрева до температуры 1120 °C этих катодов (кривые 2 и 3) и катода-аналога (кривая *I*) от мощности накала подогревателя.



Рис. 3. Зависимости времени разогрева КПУ диаметром 3,5 мм от мощности накала

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 1(508), 2011

## 3. КОНСТРУКЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОГО КАТОДА ДИАМЕТРОМ 6,4 мм

С целью обеспечения отбора тока с катода до 45 А/см<sup>2</sup> и заданной мощности в ряде усилительных клистронов применен многолучевой металлопористый катод диаметром 6,4 мм, покрытый пленкой осмия, с рабочей температурой 1150 °С (по эмитирующей поверхности катода) при измерении температуры катода оптическим пирометром сравнения.

Аналогом при разработке стал КПУ, у которого подогревателем служит спираль из проволоки ВР-20, помещенная в молибденовый колпачок и залитая изоляционным составом – расплавленной эвтектической смесью окислов алюминия и иттрия. Время разогрева этого КПУ, которое составляет около 20 с, достигается при мощности накала подогревателя 26 Вт, что часто приводит к перегоранию подогревателя.

На основе проведенных оценочных расчетов уменьшение времени разогрева этого КПУ было достигнуто:

- за счет уменьшения массы эмиссионного тела катода и подогревателя;

 – за счет улучшения теплопередачи от спирали подогревателя к эмиссионному телу катода путем замены изоляционной заливки из смеси окислов алюминия и иттрия на тонкостенные изоляторы из окиси алюминия;

 – за счет отработки оптимальной толщины изоляторов из окиси алюминия и их конструкции;

- за счет использования форсированного режима накала подогревателя.

Разработанный многолучевой катод диаметром 6,4 мм изображен на рис. 4.



## Рис. 4. Многолучевой КПУ диаметром 6,4 мм

Для обеспечения требуемых долговечности и стойкости к механическим воздействиям толщина эмиттера равна 0,6 мм. Зависимость температуры  $T_{_{\kappa,ярк}}$  и времени разогрева  $t_{_{раз}}$  типичного катода диаметром 6,4 мм до значения 0,9 $T_{_{\rm HOM}}$  (1120 °C) от напряжения  $U_{_{\rm H}}$  и мощности накала  $P_{_{\rm H}}$  представлена в табл. 2.

Таблица 2

$U_{\scriptscriptstyle \rm H},{ m B}$	<i>I</i> <sub>н</sub> , А	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}},$ Вт	<i>Т</i> <sub>к.ярк</sub> , °С	$t_{\rm pas},{ m c}$
6,0	2,0	12,0	1135	—
6,4	2,15	13,5	1150	29
7,0	2,23	15,7	1240	21
7,5	2,4	18,0	1280	17
8,0	2,5	20,0	1330	14

Время разогрева разработанного КПУ при мощности накала подогревателя 20 Вт (форсированный режим) составило 14 с.

Разработанные конструкция и технология КПУ обеспечивают необходимые требования по числу циклов включения и выключения накала, долговечности и стойкости к механическим воздействиям.

Применение этого катода в усилительном клистроне типа КИУ-223В позволило в 3–4 раза уменьшить время готовности прибора и достигнуть значения 15...20 с.

В работе ставилась также задача получения времени разогрева катода в форсированном режиме питания накала 5...10 с. Эти исследования были проведены на двух конструкциях КПУ диаметром 6,4 мм.

Первый КПУ отличался от разработанной конструкции только толщиной держателя катода (уменьшена с 0,15 до 0,1 мм) и высотой изолятора подогревателя (уменьшена с 1,5 до 1,0 мм). Это позволило уменьшить массу КПУ на 0,08 г и получить время разогрева катода до 10 с при мощности накала 22 Вт. Результаты испытания этого КПУ на время разогрева в зависимости от мощности накала представлены на рис. 5 (кривая 3).



Рис. 5. Зависимости времени разогрева КПУ диаметром 6,4 мм от мощности накала: *1* – масса КПУ 1,6 г; *2* – 1,0 г; *3* – 0,9 г; *4* – 0,2 г

Конструкция и технология этого КПУ обеспечивают необходимые требования по числу циклов включения и выключения накала подогревателя (200 циклов в форсированном режиме и 2000 циклов в номинальном режиме питания накала подогревателя катода; испытания продолжаются).

Второй многолучевой КПУ с внешним диаметром 6,4 представлял собой объемно осмированное эмиссионное тело, запрессованное непосредственно в катодную чашку, с облегченным алундированным подогревателем, нагревающим катодное тело термическим излучением. Такая конструкция позволила уменьшить массу катода до 0,2 г и получить время разогрева 5...6 с при номинальной мощности накала 8...9 Вт. КПУ устойчив к циклическим испытаниям на включение и выключение накала (более 500 циклов).

Для сравнения на рис. 5 представлена зависимость времени разогрева катодов до температуры 1120 °С от мощности накала подогревателя разработанных катодов (кривые 2...4) и катодааналога (кривая *I*).

## 4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ КПУ

Оптимизация конструкции и расчет времени разогрева разрабатываемых КПУ проводились с привлечением сложного математического аппарата и ЭВМ.

Расчет тепловых параметров КПУ состоял из двух этапов: построения тепловой модели КПУ (задания геометрии, теплофизических параметров, тепловых нагрузок) и определения температурного поля КПУ и его выходных параметров ( $T_{\kappa, \mathrm{ярк}}$  и  $t_{\mathrm{раз}}$ ).

Использован следующий подход. Строится трехмерная тепловая модель исследуемого КПУ и для нее решается задача теплопроводности.

Для расчета температуры катода решается стационарная задача теплопроводности при заданной мощности накала. Для определения времени разогрева катода решается нестационарная задача, когда задаются начальная температура КПУ и закон изменения мощности накала во времени, а температурное поле вычисляется в конце каждого временного шага. На основе кривой изменения  $T_{\rm к.ярк}$  во времени определяется время разогрева катода до заданной температуры.

С использованием этой модели выполнены расчеты тепловых параметров варианта КПУ диаметром 3,5 мм с молибденовой заливкой подогревателя, представленные в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Режим		P BT	$T_{\kappa, ярк}, °С$		Р/Э %	
I CARINA	Сн, В	1 <sub>H</sub> , 11	$I_{\rm H}, DI$	Расчет	Эксперимент	170,70
Рабочий	4,0	1,70	6,80	1236	1250	98,9
<u>م</u> ۲	4,5	1,83	8,235	1357	1340	101,3
Форсированныи	5,0	1,96	9,80	1452	1430	102,6

*Примечание*. Р/Э – отношение расчетного значения  $T_{\rm к, ядк}$  к экспериментальному.

Режим		P BT	<i>t</i> <sub>pa3</sub> , c		P/7 %	
i Untilui	Сн, В	- <sub>H</sub> ,		Расчет	Эксперимент	1/0, /0
Рабочий	4,0	1,70	6,80	5,38	4,6	118
Donaunapauuu uu	4,5	1,83	8,235	4,03	3,6	112
Форсированныи	5,0	1,96	9,80	2,83	2,8	101

Таблица 4

Примечания. 1.  $t_{\text{раз}}$  – время подъема температуры катода до 1120 °С.

2. Р/Э – отношение расчетного значения  $t_{\text{раз}}$  к экспериментальному.

С использованием этой модели выполнены также расчеты тепловых параметров варианта КПУ диаметром 6,4 мм с подогревателем, нагревающим катод термическим излучением (табл. 5 и 6).

Таблица 5

Режим	<i>II</i> B	ΙΔ	P BT	$T_{\kappa, ярк}$ °С		P/7 %
ТСжим	Сн, В	1 <sub>H</sub> , 11	и н, вт	Расчет	Эксперимент	170,70
Рабочий	6,5	2,25	13,5	1196	1190	100,5
Форсированный	8,0	2,75	22,0	1457	1420	102,6

Таблица 6

Режим	U. B	L. A	P <sub>u</sub> Bt	$t_{\rm pas}$	3, C	Р/Э %
	Сн, В	-H, 1 -	г н, вт	Расчет	Эксперимент	1,0,70
Рабочий	6,5	2,25	13,5	27,5	26	105,84
Форсированный	8,0	2,75	22,0	17,4	14,8	117,5

Представленные в табл. 3-6 результаты расчета температуры катодов и времени их разогрева хорошо согласуются с фактическими тепловыми параметрами разработанных узлов.

Разработанная методика может быть рекомендована для практического использования при создании катодных узлов с малым временем разогрева.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкция и технология миниатюрных многолучевых катодно-подогревательных узлов с внешним диаметром 3,5 и 6,4 мм и временем разогрева соответственно 3...5 и 10...15 с для мощных миниатюрных многолучевых клистронов с малым временем готовности.

Уменьшение времени разогрева катодов до заданных значений при отборе тока эмиссии плотностью до 45 А/см<sup>2</sup> достигнуто за счет применения металлопористого катода, покрытого пленкой осмия, или объемно осмированного МПК, уменьшения массы катодов и подогревателей к ним, оптимизации конструкций КПУ, применения современных технологий при изготовлении элементов катодных узлов и их сборки, применения форсированного режима накала подогревателей катодов. Оптимизация конструкции КПУ проведена с использованием компьютерного моделирования и корректировки расчетов по результатам экспериментов. Отработана методика построения тепловой модели КПУ и расчета времени разогрева КПУ до заданной температуры. Результаты расчета хорошо согласуются с фактическими тепловыми параметрами разработанных катодных узлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В.Ф. Элементы теории разогрева катода // Электроника. – 1958. – № 9. – С. 3–21.

2. *Черепнин Н.В.* Конструктивно–технологические факторы, определяющие время готовности миниатюрных приемно-усилительных ламп // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1959. – Вып. 5. – С. 110–121.

3. *Эфрос В.Я.* К вопросу о длительности разогрева катодно-подогревательного узла // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 4. – С. 76–85.

4. Термоэлектронные катоды / Г.М. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов. – М.: Энергия, 1966. – С. 368.

5. *Киселев А.Б., Галина Н.М.* Влияние конструктивно-технологических факторов на время разогрева катодноподогревательных узлов электровакуумных приборов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 8(432). – С. 3–10.

6. Лучин А.А. Подогреватели катодных узлов ЭВП. – М.: ЦНИИ «Электроника». –1991. – С. 80.

7. Вирин Я.Л., Дюбуа Б.Ч., Оголева Н.М. Эффективный миниатюрный металлопористый катод // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 4(418). – С. 42–44.

8. Володин Ю.А., Дружинин А.В. Экспериментальные исследования тепловых характеристик металлопористого катода // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 1(325). – С. 32–36.

9. Володин Ю.А., Дружинин А.В. Экономичный катодно-подогревательный узел с металлопористым катодом // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1979. – Вып. 9. – С. 69–73.

10. Галина Н.М., Никонов Б.П., Соколов А.М. Катодный узел с малым временем разогрева // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 3(387). – С. 61.

11. Orlowska S. Fast warm cathode – practical fielded design // National Vacuum Electronics Conference 2007. Surrey Ion Beam Centre.

12. *M.J. Cattelino, C.V. Miram* and *Bernard Smith*. Fast- and super-fast-warm-up cathodes using novel APG/APBN heaters // IEEE Transaction on Elektron Devices. – 1991. – Vol. 38, № 10.

13. Совершенствование конструкции и технологии изготовления катодного узла с электронным подогревом для изделия типа «Восток» с целью стабилизации его параметров и увеличения долговечности до 2000 ч: науч.техн. отчет № 142–1932 / ФГУП «НПП «Исток»; *Гаврин С.Н., Волков В.И., Култашев О.К., Макаров А.П., Куранова Е.Д.* – Фрязино, 1989.

14. *Дружинин А.В.* Предельные параметры бариевых катодов // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 8. – С. 27–32.

15. Дружинин А.В., Куликов В.А. и Митюхляев В.Б. Исследования металлопористых катодов методами растровой электронной микроскопии // Известия АН СССР. Сер. физическая. – 1984. – Вып. 12. – С. 2454–2458.

16. Металлопористые катоды с повышенной плотностью тока / А.И. Мельников, Т.М. Новикова, И.А. Носкова, Н.И. Шмелева // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1965. – Вып. 5. – С. 183–188.

17. Дарьев А.Г., Дубинина А.М., Ковалева Е.И. Использование металлической заливки в качестве заполнителя пространства катод-подогреватель для высокотемпературных катодов // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1983. – Вып. 12 (185). – С. 9–11.

18. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева. – М., 1991.

Статья поступила 26 января 2011 г.

УДК 621.385.7

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТАЛЛООКСИДНЫЕ КАТОДЫ ДЛЯ СВЧ-ПРИБОРОВ

## А. М. Соколов

ФГУП «НПП «Исток», г.Фрязино

## А. Н. Каргин, О. А. Морозов

ЗАО «НПП «Магратеп», г.Фрязино

Показана зависимость долговечности оксидных катодов от запаса активного вещества (BaSrCa)CO<sub>3</sub>. Приведены примеры использования прессованного оксидного катода на основе никелевой губки в магнетронах большой мощности и при реставрации приборов М- и О-типа.

КС: оксидный катод, долговечность, реставрация

The dependency of oxide cathodes life time versus active material reserve (BaSrCa)CO3 is shown. The examples of using pressed oxide cathode based on nickel sponge in high power magnetrons and during restoration of M- and O-type devices are given.

Keywords: oxide cathode, life time, restoration

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие полупроводниковой техники привело к вытеснению вакуумных приборов СВЧ малой мощности, в которых использовались традиционные оксидные катоды. Однако катоды в виде толстой никелевой губки, заполненной эмиссионно-активным веществом (тройным карбонатом бария, стронция и кальция), до сих пор применяют в мощных магнетронах и приборах О-типа. В настоящее время существует много технологических вариантов изготовления губчатого эмиссионного покрытия [1]. Наибольшее распространение получили катоды с запасом карбонатов 15...30 мг/см<sup>2</sup>. В последние годы с целью увеличения долговечности было проведено исследование эмиссионных свойств катодов с повышенным запасом активного вещества в губке, до 70 мг/см<sup>2</sup> [2].

Другим важным направлением использования прессованных оксидных катодов является реставрация выработавших ресурс приборов. Интерес к реставрации вызван тем, что ряд производителей ЭВП из бывшего СССР оказались за рубежом. Производить эти приборы в России нецелесообразно либо по причине несоответствия затрат на освоение и ограниченного внутреннего спроса, либо по причине их морального старения. По этой же причине сокращается или прекращается выпуск ЭВП для внутреннего употребления. Кроме того, ЭВП в зарубежных станциях, используемых у нас, значительно дешевле реставрировать, чем покупать.

## 2. ЭМИССИЯ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

На ФГУП «НПП «Исток» и ЗАО «НПП «Магратеп» для новых и реставрируемых СВЧприборов используется прессованный металлооксидный катод (МОК). При его изготовлении к поверхности никелевого керна припекается при температурах до 1280 °C слой никелевого порошка из частиц диаметром от 40 до 100 мкм. Полученная пористая губка заполняется тройным карбонатом бария, стронция и кальция и прессуется в широком интервале давлений: от нескольких десятков до сотен килограмм на квадратный сантиметр. На рис. 1 приведены типичные кривые изменения тока эмиссии МОК, измеренного в глубоком недокале, в процессе срока службы. Запас карбонатов – до 25 мг/см<sup>2</sup>. Для всех кривых характерен начальный этап, во время которого ток эмиссии уменьшается примерно в 2 раза. Затем изменение тока эмиссии резко уменьшается. При температуре испытания 800 °C этот этап составляет 1...2 тыс. ч, а при 1000 °С – 100...200 ч. Значение температуры точки перегиба накальной характеристики T<sub>x</sub>, измеренной при отборе тока с катода 0,1 А/см<sup>2</sup>, на этом этапе может быть достаточно низким (600...650 °C), а к концу этапа увеличивается до 700...750 °C. Некоторое падение тока эмиссии (примерно в 2 раза) на начальном этапе испытания при форсированных температурах, видимо, связано с испарением бария, который находится на поверхности губки. При переходе к механизму подпитки поверхности барием из пор губки величина тока эмиссии стабилизируется и в дальнейшем, так же как значение Т, изменяется сравнительно медленно по мере расходования бария и замедления его поступления из глубины губки. При отсутствии поверхностного слоя такого падения не наблюдается (кривая 3).





Таким образом, при работе МОК его долговечность определяется в основном запасом активного вещества, находящегося в объеме губки. Однако поверхностный слой играет свою положительную роль на начальном этапе активирования катода после обезгаживания на откачном посту и при последующей тренировке прибора. В частности, дополнительный поверхностный слой активного вещества может использоваться для очистки электродов электронной бомбардировкой. На рис. 2 приведены зависимости времени работы от температуры оксидного катода с традиционным покрытием, с запасом активного вещества до 9 мг/см<sup>2</sup> (зона *1*), по результатам испытаний в диодах и приборах [3], и прессованного МОК (зона *2*), по результатам испытаний в диодах. Испытания традиционных оксидных катодов в диодах при температуре 900 °C показали, что с увеличением запаса активного вещества от 4...5 до 7...9 мг/см<sup>2</sup> долговечность увеличивается от 50...100 до 250...350 ч (отрезки *A* и *Б* на рис. 2). При дальнейшем увеличении запаса карбонатов до величины более 20 мг/см<sup>2</sup> за счет пропитки ими толстой никелевой губки долговечность возрастает до 450...850 ч. Реальная долговечность катодов в приборах может быть гораздо больше, чем определенная по критерию падения тока эмиссии в 2 раза.



Рис. 2. Зависимость времени работы оксидных катодов от температуры: *I* – область долговечности катодов с карбонатным покрытием, нанесенным пульверизацией, по критерию падения тока эмиссии в 2–3 раза [3] (*A* – запас карбонатов 4...5 мг/см<sup>2</sup>; *Б* – запас карбонатов 7...9 мг/см<sup>2</sup>); *2* – область долговечности прессованных МОК в диодах

В качестве примера использования МОК с поверхностным слоем карбонатов можно привести разработанный в 90-х годах малогабаритный магнетрон с выходной мощностью в непрерывном режиме 40 Вт [4] и запасом карбонатов в катоде 35 мг/см<sup>2</sup>. Результаты испытаний приборов на долговечность при рабочей и форсированных температурах показаны на рис. 2 крестиками.

В настоящее время ведется разработка прессованных МОК площадью 50...60 см<sup>2</sup> для современных магнетронов с импульсной мощностью 3...10 МВт [5] (рис. 3). Напряжение накала катода включается на 5 мин для запуска прибора и выключается после включения напряжения



Рис. 3. Металлооксидный катод с полюсным наконечником

на аноде. Рабочая температура катода поддерживается за счет обратной электронной бомбардировки.

При реставрации приборов [6] возникают еще большие трудности получения необходимой долговечности. Связано это с тем, что при вскрытии реставрируемого прибора всегда возникает проблема очистки его внутренних поверхностей. Степень их загрязнения сильно различается от прибора к прибору, например у приборов, вышедших из строя через короткое время в результате случайного отказа, и у приборов, вышедших из строя после длительной работы и полного расхода ресурса катода. Во втором случае часть элементов конструкции, подверженных действию электронного потока, существенно загрязнена продуктами взаимодействия испаряющихся компонентов катода с другими элементами конструкции. При вскрытии ЭВП на воздухе происходит окисление загрязнений. Ситуация осложняется, когда в силу конструктивных особенностей невозможно очистить весь объем прибора химическим способом, поскольку остатки растворителей нельзя удалить из скрытых полостей, в результате чего возникает опасность воздействия травителей на паяные швы конструкции с нарушением их вакуумной плотности.

Загрязнения, которые невозможно удалить на предварительном этапе обычными методами, могут быть удалены на откачном посту. Это требует корректировки режимов обработки прибора: прогрева оболочки, использования водорода, изменения режима обработки и активирования катода и т. д. Таким путем часть загрязнений можно удалить.

Наибольшее распространение получил способ реставрации, при котором прибор вскрывают, заменяют КПУ, а внутренние поверхности очищают от загрязнений. Приборы, реставрированные таким способом, если и достигают уровня требуемых параметров, практически всегда имеют меньшую долговечность, чем приборы, изготовленные вновь по стандартной технологии.

Задача достижения реставрированным прибором долговечности, не меньшей, чем предусмотрено техническими условиями, может быть решена за счет того, что в приборе оксидный катод обычного типа заменяют на прессованный металлооксидный катод с повышенным запасом активного вещества в губке. Кроме этого, на поверхность губки до или после ее прессования может быть нанесен дополнительный слой карбонатов толщиной до 20 мкм. Этот слой предназначен для расходования в период активирования катода и тренировки прибора после откачки, т. е. в период, когда наблюдается максимальное воздействие на катод отрицательных факторов, обусловленных недостаточной очисткой арматуры реставрируемого прибора [7]. В технологии, не рассчитанной на реставрацию, подобного использования материала катода не предусмотрено; наоборот, всегда стараются сохранить запас для обеспечения высокой долговечности прибора, для чего время выдержки оксидного катода при повышенных температурах во время активирования и тренировки ограничивают величиной 900 °C. В реставрируемом приборе на этом этапе максимальная температура может достигать значений 1050...1100 °C, находящихся на уровне температур, граничных для условий конгруэнтного испарения компонентов из оксидного катода на основе двойного и тройного растворов окислов щелочно-земельных металлов [8]. Прогрев при температурах свыше указанных значений приведет к существенной потере окиси бария из твердого раствора окислов щелочно-земельных металлов, составляющих активное покрытие катода, и соответственно к ухудшению эмиссионной способности катода.

Примеры замены катодных узлов разработки 50–70-х годов на узлы с современным прессованным металлооксидным покрытием приведены далее.

1. При реставрации усилительного клистрона разработки 70-х годов губчатый оксидный катод с запасом активного вещества 20 мг/см<sup>2</sup> был заменен на прессованный МОК с запасом 50 мг/см<sup>2</sup>. Долговечность отреставрированного прибора при форсированной температуре катода 900 °C составила более 5 тыс. ч (кружочки на рис. 2), против 1 тыс. у исходного. Кроме того, значительно улучшилась устойчивость эмиссионного покрытия к пробоям на этапе тренировки.

2. В магнетроне разработки 50-х годов с импульсной мощностью 1 МВт оксидный катод с запасом активного вещества 15 мг/см<sup>2</sup> был заменен на прессованный МОК с запасом 25...30 мг/см<sup>2</sup>. Долговечность прибора увеличилась с 0,5...1 тыс. до 2....4 тыс. ч.

3. Срок службы магнетрона с импульсной мощностью 2 МВт, применяемого в гражданской авиации, составлял 12...25 тыс. ч. В этом магнетроне губчатый оксидный катод с запасом активного вещества 20...25 мг/см<sup>2</sup> был заменен на прессованный МОК с запасом 50 мг/см<sup>2</sup>. Из сорока пяти реставрированных приборов долговечность тридцати составила 14...30 тыс. ч, тринадцати – 30...40 тыс. ч и двух приборов – 50 тыс. ч (треугольники на рис. 2).

#### 2. ВЫВОДЫ

Более высокие долговечность и устойчивость к пробоям по сравнению с традиционным оксидным катодом позволяют использовать прессованные МОК при разработках мощных приборов М-типа. При замене обычного оксидного катода на прессованный МОК в реставрируемых приборах М- и О-типа возможно увеличение долговечности по сравнению с исходным прибором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: Издательство МФТИ, 2001. – 240с.

2. *Соколов А.М.* Прессованные металлооксидные катоды с повышенным запасом активного вещества // Наукоемкие технологии. – 2003. – № 2. – С. 47–49.

3. Никонов Б.П. Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979.

4. *Каргин А.Н.* Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 62–66.

5. Каргин А.Н., Воскобойник М.Ф., Морозов О.А., Савенко Г.П. Мощный импульсный магнетрон L-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2009. – Вып. 2 (501).

6. *Бакуменко А.В., Киселев А.Б., Соколов А.М.* Проблемы реставрации ЭВП в современной России // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2001. – № 5. – С. 30–33.

7. Патент 2243611 РФ, Н О1 Ј 9/50. Способ реставрации электровакуумных приборов с оксидным катодом / А.В. Бакуменко, А.Б. Киселев, Г.Ф. Корепин, О.А. Морозов, А.М. Соколов. – Заявл. 17.06.03; опубл. 17.06.03, Бюл. № 36.

8. *Смирнов В.А.* Исследование испарения компонентов оксидного катода во время его длительной работы // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 1. – С. 36–40.

Статья поступила 31 января 2011 г.

## 🚃 НОВЫЕ КНИГИ 🚃

Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. В 2 т. Т. 1. Стационарные процессы / Под ред. А. А. Кураева, Д. И. Трубецкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.

Нелинейная динамика процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями электродинамических систем является достаточно широкой и многоплановой областью исследований в современной физике. В этой области в последние годы получен ряд фундаментальных результатов, относящихся как к новым механизмам излучения релятивистских электронных потоков, так и к новым явлениям, сопровождающим взаимодействие электронных потоков с электромагнитными полями.

Новые явления и механизмы могут быть успешно использованы при создании усилителей и генераторов электромагнитного излучения с уникальными характеристиками.

Первый том посвящен стационарным процессам, для которых математические модели наиболее проработаны и математически обоснованы. Полученные для стационарных режимов результаты имеют широкий спектр и представляются интересными как с научной, так и с прикладной точек зрения.

Книги рассчитаны на специалистов в области СВЧ электроники и нелинейной динамики, а также на аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

**Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот.** В 2 т. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы / Под ред. А. А. Короновского, Д. И. Трубецкова, А. Е. Храмова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 392 с.

Во втором томе книги «Нестационарные и хаотические процессы» рассмотрены такие современные области исследования в радиофизике, электронике и нелинейной динамике, как разработка новых принципов генерации хаотических сигналов СВЧ-диапазона и создание на их основе источников широкополосных шумоподобных сигналов для современных информационно-телекоммуникационных систем, различные методы управления хаотическими колебаниями в пучково-плазменных системах, синхронизация (в том числе и хаотическая) в приборах электроники сверхвысоких частот, нелинейные волновые процессы в системах с магнитостатическими волнами и при распространении волновых пучков.

Для физиков различных специальностей, интересующихся процессами взаимодействия электронов с электромагнитными полями, для научных работников, аспирантов и инженеров, проводящих исследования в области вакуумной СВЧ электроники, радиофизики, радиотехники и физики плазмы. Она может быть полезна студентам старших курсов соответствующих специальностей.
#### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «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 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 RTF), записанного на магнитном (FDD 3,5") или оптическом (CD) носителе, и двух экземпляров распечатки.

4. Статья должна быть сформатирована через 1 интервал с выравниванием по ширине. Абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
размер рисунка – не более 17 × 20 см;

• буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв – прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;

• текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии принимаются в оригиналах (не более 18 × 24 см) или в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками \*.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией, о чем авторы ставятся в известность.

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

### КАТАЛОГ информационных изданий на 2011 г.

Проводится подписка на следующие виды изданий:

• «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника» (4 вып. в год). Стоимость подписки – 1200 руб.,

включая НДС (18 %).

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

«Новости СВЧ-техники» – информационный сборник (12 вып. в год). Стоимость подписки – 1200 руб.,

включая НДС (18 %).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам:

ФГУП «НПП «Исток», ИНН 5052002576, р/с 40502810640480100019, «Сбербанк России» г. Москва, БИК 044525225, к/с 3010181040000000225, ОКПО 07622667,

ОКОНХ 95120, КПП 509950001, ОСБ 2575 г. Щелково

и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, ФГУП «НПП «Исток», НИО-100; тел./факс: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

3.	АКАЗ
Прошу принять подписку на «	» на 2011 г. и направлять по адресу:
Куда	
(почтовы	й индекс, адрес)
Кому(названи	е организации)
Заказ оплачен платежным поручением №	дата
на сумму	30 <del>Э</del> КЗ

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## «СВЧ-ТЕХНИКА»

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

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

Подписано к печати	Усл. п. л. 9	Формат 60×88 <sup>1/8</sup>
09.03.2011 г.	Учизд. л. 9,5	Тираж 500
Заказ № 65	Индекс 36292	6 статей

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12 E-mail: istok-info@flexuser.ru

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2011, вып. 1(508), с. 1-72

Подписной индекс 36292 в каталоге агентства «Роспечать»