
С О Д Е Р Ж А Н И Е

Выпуск 4(497)

2008

Технология

Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В. – Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (К истории идей в катодной технологии) 3

Коретин Г.Ф. – Проблемы отстройки металлокерамических ЭВП СВЧ 23

Твердотельная электроника

Дутышев И.Н. – СВЧ-фильтры на полусосредоточенных элементах с емкостными и индуктивными связями 47

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

C O N T E N T S

Issue 4(497)

2008

Founded in 1950

Technology

Djubua B.Ch., Koultashev O.K., Polivnikova O.V. – Emission electronics, nanotechnology, synergetics (To the history of ideas in cathode technology) 3

Korepin G.F. – The problems of pumping out microwave metal-ceramic electrovacuum devices 23

Solid-state electronics

Dutyshhev I.N. – Microwave filters on semi-lumped elements with capacitive and inductive couplings 47

ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.385.7

ЭМИССИОННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИЯ, СИНЕРГЕТИКА (К ИСТОРИИ ИДЕЙ В КАТОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ)

Б. Ч. Дюбуа, О. К. Кулгашев, О. В. Поливникова

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Эмиссионная электроника внесла решающий вклад в становление и развитие вакуумных и твердотельных электронных приборов. Миниатюризация изделий электронной техники, переход к наноразмерам усиливают роль свойств поверхности в обеспечении надежности этих изделий.

Особый интерес представляют нанослои (монослойные и субмонослойные пленки Ленгмюра-Блоджетт), которые являются необходимым этапом в технологии формирования упорядоченных массивов квантовых проволок и квантовых точек методом самосборки. Свойства моноатомных слоев активных металлов лежат также в основе работы современных эффективных металлосплавных, металлопористых и оксидных катодов. В этих катодах заложен синергетический механизм возобновления пленки на поверхности катодов, что обеспечивает их высокую надежность работы в реальных условиях вакуумных приборов. Поиск способов сохранения свойств наноструктур твердотельных приборов в течение всего их срока службы (использование самоорганизации не только как технологического приема) – путь к повышению надежности этих приборов.

Emission electronics contributed a lot into foundation and development of vacuum and solid-state electronic devices. Miniaturization of electronic engineering products and transition to nano dimensions are enhancing the role of surface properties in providing reliability of these devices.

Of special interest are nanolayers (monolayer and submonolayer Langmuir-Blodgett films) which represent a necessary step in technology of formation of ordered masses of quantum wires and quantum points by self-assembling method. The properties of monoatomic layers of active metals are also in the basis of work of modern effective metal-alloyed, metal-porous and oxide cathodes. These cathodes are based on synergetic mechanism of film restoration on the surface of cathodes which provides their high reliability of work in real conditions of vacuum devices. Searching for methods of maintaining nanostructures' properties of solid-state devices for the whole period of their service life (using self-formation not only as a technological method) is the way to increase the reliability of these devices

КС: эмиссия, катод, работа выхода, нанотехнология, синергетика, надежность

1. ВВЕДЕНИЕ

Эмиссионная электроника (электронная микроскопия, ионно-полевая микроскопия, сканирующая микроскопия, Оже-спектроскопия и многое другое) внесла существенный вклад в становление и развитие нанотехнологии. Методология эмиссионной электроники всегда была направлена на изучение прежде всего поверхности твердого тела. Актуальность этих исследований с развитием нанотехнологии существенно возросла. В объектах твердого тела размером менее 100 нм доля поверхностных атомов может составлять несколько десятков процентов. Развитая поверхность оказывает влияние на решеточные и электронные подсистемы наночастиц, изменяя их реакционную способность, электрические, магнитные, тепловые, эмиссионные, оптические и другие свойства.

Особое место среди объектов нанотехнологии занимают моноатомные слои, свободно расположенные в пространстве или адсорбированные на поверхности твердого тела или жидкости (пленки Ленгмюра-Блоджет) [1]. К такого рода объектам относятся, например, однослойные углеродные нанотрубки, стенки которых состоят из монослойного графита, а один конец закрыт фуллереновой структурой. Нанотрубки обладают рядом удивительных электрических и механических свойств. Полевая эмиссия нанотрубок после работ [2,3] стала предметом интенсивных исследований и разработок, направленных на создание на их основе дисплеев, рентгеновских трубок, микроминиатюрных СВЧ-приборов и пр.

Уникальность проявляется также в том, что в зависимости от диаметра нанотрубок, механических нагрузок, киральности они могут обладать как металлическими, так и полупроводниковыми свойствами, что позволило создать на их основе макеты транзисторов, диодов, переключателей и других электронных устройств [4].

В настоящее время становится очевидным, что создание наноэлектронных устройств сдерживается физическими и технологическими ограничениями классических методов литографии. В связи с этим возрастает интерес к нелитографическим методам создания поверхностных периодических структур (квантовых точек и проволок), использующим явление самоорганизации в напыленных пленках [5]. При этом предполагается, что такие структуры формируются спонтанно в результате релаксации упругих напряжений, возникающих в адсорбированных пленках при толщинах от субмонослойных до нескольких атомных слоев [6].

При дальнейшем развитии нанотехнологии вряд ли можно будет основываться на использовании явления самоорганизации только как на технологическом приеме, обеспечивающем создание изначальных структур наноразмеров. Поскольку в наноструктурах роль свойств поверхности в обеспечении надежности их работы возрастает, а подвижность атомов в поверхностных слоях существенно выше, чем в объеме, то возрастает и роль таких явлений, как миграция, электронный ветер, адсорбция посторонних примесей из окружающей среды, перераспределение примесей между объемом и поверхностью (адсорбция из объема), которые могут повлиять на стабильность электрических параметров наноструктур. Поэтому должны быть найдены методы и изучены процессы, обеспечивающие автоматическое поддержание и восстановление свойств наноструктур в течение всего времени их активной жизни, несмотря на все разрушающие факторы.

А это означает, что объекты нанотехнологии должны удовлетворять принципам синергетики.

Надежность работы вакуумных приборов, их устойчивость к конкурентному напору твердотельных приборов обусловлены тем, что их работа основана на использовании в качестве источников электронной эмиссии металлосплавных, металлопористых (МПК) и оксидных катодов, которые удовлетворяют этим принципам. Эффективная работа этих катодов обеспечивается моноатомной пленкой активных металлов, которая, несмотря на потери за счет испарения и разрушающее действие ионной и электронной бомбардировок, отравление остаточными газами и напыление с других электродов прибора, воспроизводится на поверхности катода путем диффузии и миграции активного металла из объема эмиссионного тела в течение всего срока службы. В качестве активных металлов в основном используются торий, иттрий, щелочно-земельные (ЩЗМ) и редкоземельные металлы (РЗМ)

В металлосплавных катодах активный металл запасается в виде интерметаллических соединений [7], в металлопористых и оксидных – в виде окисей активных металлов [8,9].

2. О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ МОНОАТОМНОЙ ПЛЕНКИ

Методами эмиссионной электроники изучена адсорбция практически всех элементов I...VI групп периодической системы Д. И. Менделеева на всех основных гранях ОЦК, ГЦК и ГПУ-кристаллов тугоплавких металлов. Наиболее детально изучены пленки активных щелочных металлов (ЩМ), ЩЗМ и РЗМ.

Перечислим основные свойства моноатомных пленок.

При увеличении концентрации атомов активных металлов в адсорбированном слое работа выхода электронов приближается к своему минимуму. Как правило, эта величина на 0,3...0,4 эВ меньше работы выхода активного металла в компактном состоянии. Минимальная величина работы выхода достигается при монослойном или близком к этой величине покрытии. При субмонослойных покрытиях работа выхода с увеличением концентрации адсорбированных атомов (адатомов) изменяется не плавно. Зависимость состоит из линейных участков с изломами, при которых происходит изменение структуры пленки [10]. Для определенного типа адатомов величина работы выхода в минимуме и структура монослойного покрытия определяются кристаллической и электронной структурой подложки и глубиной потенциального рельефа, а также характером взаимодействия между адатомами.

Если наиболее сильным взаимодействием между адатомами является прямое взаимодействие, то уже при самых тонких покрытиях возникают двумерные островки адсорбата, а если это взаимодействие больше, чем с подложкой, то возникают и трехмерные образования [11].

Роль непрямого взаимодействия (обмен электронами через зону проводимости подложки) возрастает с уменьшением дипольного момента адсорбированных атомов в последовательности от щелочных к щелочно-земельным и далее к редкоземельным металлам. В такой же последовательности уменьшается кулоновское отталкивание между адсорбированными атомами, а следовательно, возрастает вероятность зарождения трехмерных кластеров.

В адсорбированных слоях, содержащих кроме электроположительных адатомов и электроотрицательные (например, кислород), уменьшается минимальная величина работы выхода и одновременно увеличивается теплота адсорбции электроположительных адатомов. Например, для грани (100) системы W-Wa минимальная работа выхода составляет 2,52 эВ и теплота адсорбции – 4,2 эВ, а для системы W-O-Wa эти величины соответственно равны 1,96 эВ и 5,15 эВ [12].

Объяснение этому может быть дано, если учесть возможность внедрения атомов кислорода в октаэдрические пустоты, образованные атомами бария с поверхностными атомами вольфрама, и увеличения, вследствие этого, положительного заряда на атомах бария.

Увеличение ковалентной связи электроположительных адатомов с поверхностью в присутствии кислорода приводит к тому, что адсорбированная пленка становится неустойчивой к воздействию электронной бомбардировки. Так, например, если атомы РЗМ адсорбированы на поверхности чистого вольфрама, то с высокой степенью достоверности можно утверждать, что электронно-стимулированная десорбция адатомов в этом случае отсутствует (площадь поперечного сечения этого процесса меньше 10^{-23} см²). Если же атом РЗМ адсорбирован на вольфраме, поверхность которого покрыта хотя бы монослоем кислорода, то наблюдается резкое возрастание электронно-стимулированной десорбции атомов РЗМ, которая носит резонансный характер [13].

Переход от моноатомного покрытия к более толстому слою сопровождается промежуточным образованием так называемых кластеров (нанокристаллов) размером от 10 до 100 нм, на что затрачивается энергия, необходимая для образования новых поверхностей. Причем для образования кластера с радиусом кривизны r давление паров P над кластером должно быть больше, чем над плоской поверхностью P_0 (закон Лапласа).

Отношение этих двух давлений можно оценить, используя уравнение Кельвина-Томсона:

$$\frac{P}{P_0} = \exp \frac{2\sigma v}{rRT}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение; v – молярный объем.

Оценка по этой формуле, выполненная, например, для бария, показывает, что при размере кластеров 10 нм, $\sigma \approx 200$ дин/см и температуре 1000 К давление паров бария P для образования кластера должно превышать давление P_0 в 1,2...1,3 раза.

Более точный и подробный теоретический анализ механизма образования кластеров показывает, что в зависимости от условий их образования (например, от степени превышения P над P_0 ; от температуры) может проявиться полимодальность в образовании нанокристаллов: при одинаковой поверхностной энергии могут образовываться как кубические, так и пластинчатые, и стержневидные нанокристаллы, состоящие из равного числа атомов. При малом количестве атомов внутренние флуктуации или внешние воздействия могут запустить процесс осцилляции формы нанокристалла – перестройку формы нанокристалла из пластинчатой в стержневую и обратно [14].

Однако отметим еще раз важнейшее свойство моноатомного слоя – его самодостаточность: переход от монослоя к более толстому слою (а следовательно, к более высокой работе выхода) требует дополнительных затрат энергии.

3. МЕТАЛЛОСПЛАВНЫЕ КАТОДЫ

3.1. «Холодные» вторично-эмиссионные катоды

Для СВЧ-усилителей магнетронного типа нужны так называемые «холодные» вторично-эмиссионные катоды, термоэлектронная эмиссия которых, чтобы избежать возбуждения приборов,

не должна превышать величины 10^{-6} А/см². Как это ни странно, но с понижением рабочей температуры катода проблема обеспечения его надежной и долговечной работы, как правило, обостряется. Причина этого состоит в том, что все механизмы, обеспечивающие поддержание и восстановление физико-химических свойств поверхности катода в условиях постоянного ее разрушения, основаны на активированных процессах (разложение соединений, содержащих активные вещества, их доставка на поверхность катода путем диффузии и миграции). А эти процессы протекают тем интенсивнее, чем выше температура.

Наиболее успешно в таких приборах используется металлосплавной палладий-бариевый (Pd-Ba) катод [15]. Катод Pd-Ba представляет собой двухфазный сплав с массовой долей бария 0,5...2%, причем одна фаза – интерметаллическое соединение Pd₅Ba, вторая – чистый палладий [16]. Эмиссионные свойства Pd-Ba (работа выхода ϕ , коэффициент вторичной эмиссии σ) обусловлены адсорбцией пленки бария, источником которого является соединение Pd₅Ba. Стабильные и воспроизводимые значения эмиссионных параметров достигаются после прогрева сплавов в вакууме при яркостной температуре 800...900 °С, в результате чего происходит очистка их объема и поверхности от примесей. Изменение элементного состава поверхности от температуры прогрева, исследованное методом Оже-спектроскопии, представлено на рис. 1 [17]. После такого прогрева формируется состав поверхности, характерный для металлосплавных катодов: кислород, азот и другие примеси исчезают, остается пик активного металла бария и основы – палладия. Изменение σ от температуры нагрева представлено на рис. 2: стабилизация состава поверхности и эмиссионных параметров происходит одновременно и устанавливается на уровне $\phi = 2,5$ эВ (при 1000 К) и $\sigma_{\max} = 2,6$ (при $E_p = 550$ эВ) [18]. Эмиссионные свойства сплава, очищенного от всех электроотрицательных примесей (прежде всего от кислорода), проявляют абсолютную стабильность к воздействию электронной бомбардировки. На рис. 3 представлены данные сравнительных исследований устойчивости вторично-электронной эмиссии к воздействию электронной бомбардировки металлосплавных, металлопористых и оксидно-ториевых катодов.

Для всех пленочных катодов, в том числе и металлосплавных, ионная бомбардировка является разрушающим фактором, приводящим к ухудшению их эмиссионных свойств. Однако катоды из Pd-Ba являются исключением из этого правила. Было установлено [19], что под воздействием ионной бомбардировки работа выхода Pd-Ba не возрастает, а понижается на 0,3...0,4 эВ. После прекращения бомбардировки прежняя величина работы выхода восстанавливается. Вторично-эмиссионные свойства Pd-Ba под воздействием ионной бомбардировки также улучшаются (рис. 4) [20].

Такое поведение сплава Pd-Ba можно понять, если обратиться к результатам измерения скорости испарения бария из этих сплавов, которые представлены на рис.5 [21]. Оказывается, что скорость испарения более тугоплавкого металла – палладия выше, чем скорость испарения бария.

Поэтому можно найти объяснение специфическому поведению Pd-Ba под воздействием ионной бомбардировки, если рассматривать этот процесс как локальный разогрев места падения ионов, в результате которого происходит увеличение концентрации бария в адсорбированной пленке.

Совокупность указанных свойств катода из Pd-Ba обеспечивает ему эффективную работу в магнетронных приборах при рекордно низких температурах (300...350 °С).

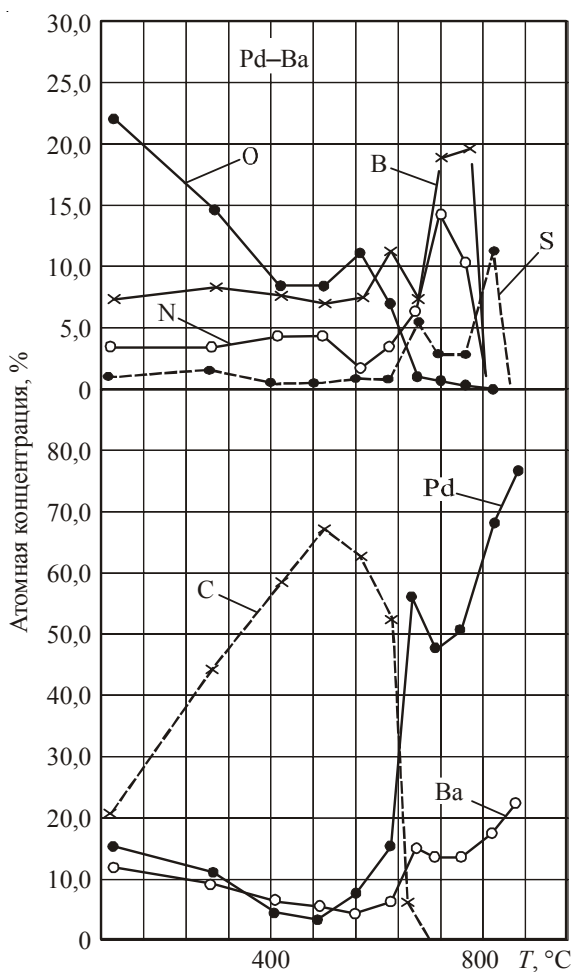


Рис. 1. Изменение состава поверхности при нагревании

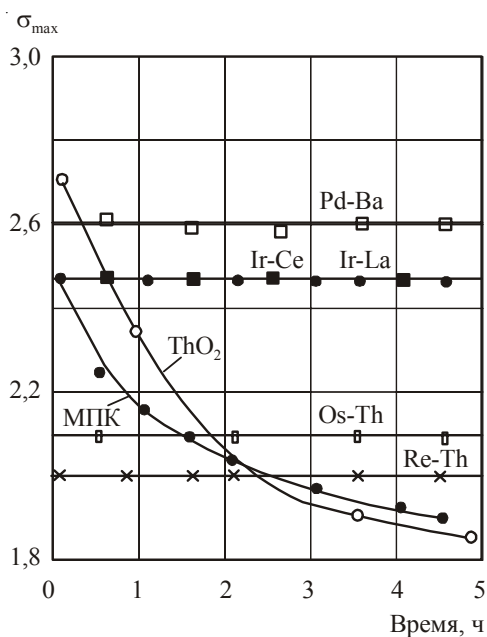


Рис. 3. Зависимость σ_{\max} от продолжительности воздействия электронной бомбардировки (для МПК из ThO_2 плотность тока бомбардировки – 5 mA/cm^2 при энергии $1,5 \text{ кэВ}$; для МПК из Pd-Ba, Ir-La, Ir-Ce, Os-Th и Re-Th – соответственно 30 mA/cm^2 и 3 кэВ)

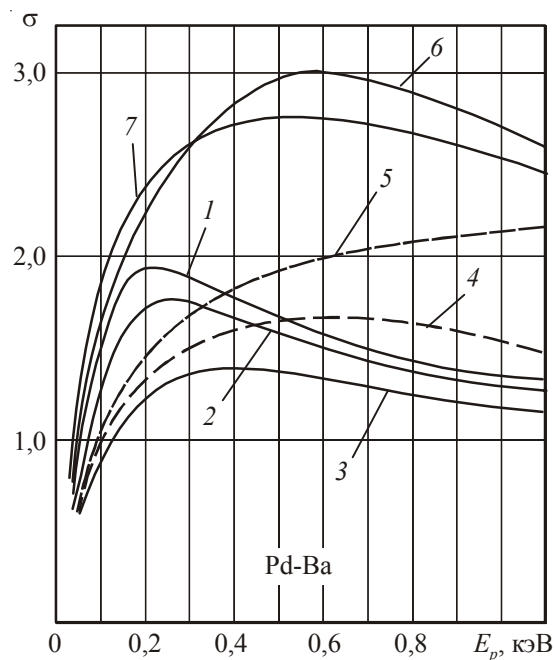


Рис. 2. Изменение коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p при нагревании:

1 – $T_{\text{ярк}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_{\text{ярк}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_{\text{ярк}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$;
 4 – $T_{\text{ярк}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; 5 – $T_{\text{ярк}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; 6 – $T_{\text{ярк}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$;
 7 – $T_{\text{ярк}} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$

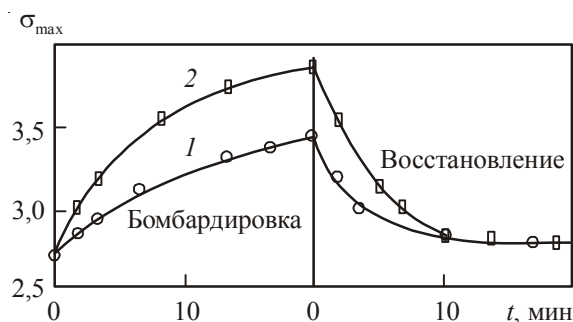


Рис. 4. Зависимость вторичной электронной эмиссии сплава Pd–Ba от ионной бомбардировки. Плотность тока ионов аргона – $5 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (1), $2 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ (2). Энергия ионов – 2000 эВ. $T = 1100 \text{ K}$

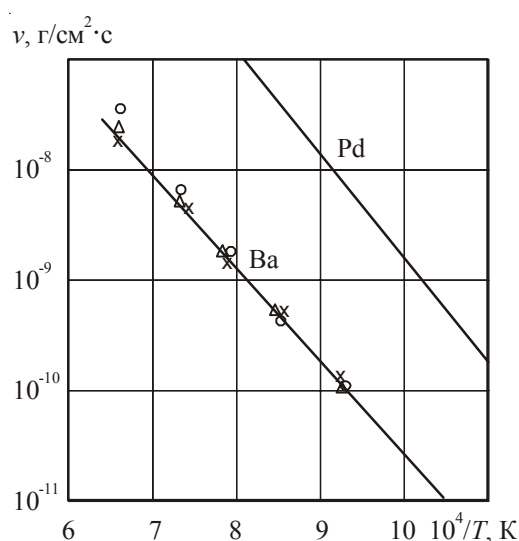


Рис. 5. Скорость испарения бария из сплава Pd–Ba:
 \times – 0,5 % Ba; \circ – 1,5 % Ba; Δ – 6 % Ba

Отметим одну из проблем неудачных попыток использовать чистые металлы, палладий или платину, в качестве «холодных» вторично-эмиссионных катодов. Эти металлы обладают высокой каталитической активностью и, кроме того, не образуют карбидов. Поэтому, если в остаточных газах в приборе присутствуют такие углеродосодержащие газы, как CO , CO_2 , CH_4 , их разложение на поверхности палладия или платины приводит к накоплению углерода, а следовательно, к существенному снижению вторично-электронной эмиссии катодов. Наличие пленки бария не только повышает эмиссионную способность этих металлов, но и подавляет их каталитическую активность.

3.2. Автотермоэлектронный катод

Автоэмиссионные (полевые) катоды традиционно являются острийными и ориентированы на использование без дополнительного нагрева. В этом усматривается их главное преимущество перед термоэлектронными катодами. Однако обеспечение долговечности и надежности

работы автокатодов в условиях недостаточно хорошего вакуума и при возможности пробоев – существенная для них проблема.

Определенный успех в решении этой проблемы был найден путем использования тонкой фольги с постоянной шириной, обеспечивающей стабильность формы автокатада [22]. Таким же свойством «неизнашиваемости» обладают и углеродные нанотрубки [2].

Увеличения стабильности, долговечности и общего тока можно достичь путем использования катодов с развитой рабочей поверхностью (углеродные волокна, пироуглерод, стеклографит) [23–26].

В некоторых вакуумных приборах находят применение автокатода, изготовленные из металлоподобных соединений, в частности из LaB_6 и ZrC [27, 28], поскольку они обладают повышенной стойкостью к воздействию ионной бомбардировки.

Но пока имеет место единственный случай использования автокатодов в промышленных приборах СВЧ: в магнетронах автокатод из тонкой фольги используется только для их запуска в работу, обеспечивая мгновенную готовность [29].

Расширить использование автокатодов в вакуумных приборах можно при условии проведения работ в следующих направлениях: для увеличения тока с рабочей поверхности катода эффективным является метод объединения отдельных острий в матрицу [30]; для снижения анодного напряжения при сохранении напряженности поля на конце острия необходимо уменьшать радиус кривизны; для увеличения плотности тока требуется использовать материалы с возможно меньшей работой выхода.

Обычно автокатода используются при полях около 10^7 В/см. Если при этом необходимо, чтобы анодное напряжение было не выше 100 В, то радиус кривизны острия должен быть меньше 100 нм. В этом случае придется решать проблемы обеспечения стабильности формы такого острия, характерные для любого объекта нанотехнологии.

Для автокатодов в качестве материала, обладающего малой работой выхода, может быть использован, как отмечалось выше, LaB_6 , но получить острие с радиусом кривизны меньше 1...1,5 мкм не представляется возможным в силу высокой хрупкости этого материала [28].

Совершенно очевидно, что невозможно изготовить острие из сплава с малой работой выхода по простой причине – все известные сплавы являются двухфазными (платина-барий, иридий-лантан и др.).

Возможен иной подход к решению этой проблемы. В работе [31] предложена структура автокатада, 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, в результате чего была получена структура, схема которой представлена на рис. 6. Внешне катод напоминает карандаш, в котором роль грифеля выполняет иридий, а наружная оболочка – интерметаллид Ir_2La .

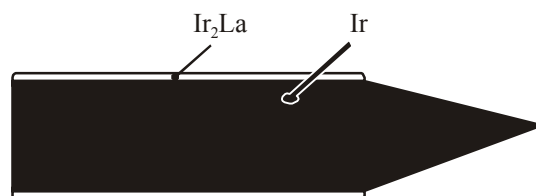


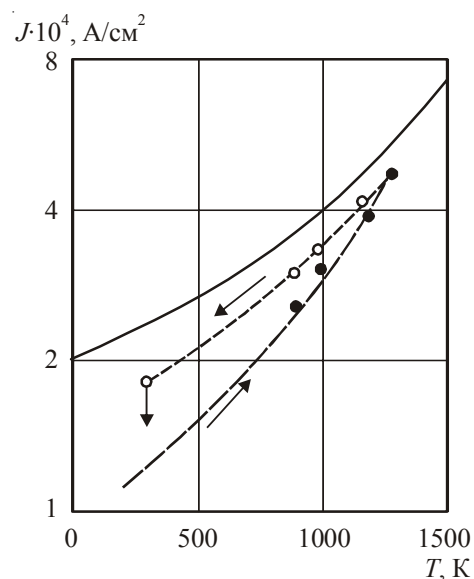
Рис. 6. Принципиальная схема острейного автотермоэлектронного катода, полученного путем насыщения поверхности иридиевой проволоки лантаном из его газовой фазы

Такой катод может работать только при определенной температуре, обеспечивающей доставку лантана из интерметаллического соединения к острию. Иными словами, катод должен работать в режиме автотермоэлектронной эмиссии. Зависимость тока от температуры для этого случая представлена на рис. 7. Сплошная кривая на этом рисунке – результат теоретических расчетов по формуле [32, 33] при $\phi = 2,7$ эВ:

$$\frac{I(T)}{I(0)} = 1 + \frac{1,4 \cdot 10^8 \phi T^2}{E^2}. \quad (2)$$

Рис. 7. Зависимость плотности тока автотермоэлектронной эмиссии острия из Ir-La от температуры (радиус кривизны острия – 0,3 мкм, поле – $2 \cdot 10^7$ В/см):

- – при повышении температуры; ○ – при ее снижении;
- сплошная кривая – результат теоретического расчета



Описываемые катоды обеспечивают стабильный отбор тока при температуре 1000 К в постоянном режиме 20...30 мА в течение 800...1000 ч. В течение указанного срока службы периодически проводилась проверка эмиссии в импульсном режиме, которая фиксировала стабильный ток 300...400 мА при поле $(2...3) \cdot 10^7$ В/см.

Плотность тока в режиме автотермоэлектронной эмиссии при этом поле составляла 40 000 А/см².

Дальнейшее развитие автотермоэлектронных катодов, по нашему мнению, должно идти в направлении разработки технологии получения наноразмерных полевых структур, стабильных в условиях высоких электрических полей, отравляющего действия остаточных газов, ионной бомбардировки. С целью снижения рабочей температуры таких структур необходимо использовать более эмиссионно-активные металлы, чем, например, лантан или цезий. Такую возможность предоставляют углеродные нанотрубки, полость которых можно заполнить металлическим цезием. Возможно на основе таких структур будут созданы «теплые» автотермоэлектронные катоды.

3.3. Термоэлектронные катоды

Среди изученных составов металлосплавных катодов наибольшую плотность тока (не менее 100 А/см²) термоэлектронной или вторично-электронной эмиссии обеспечивают сплавы

на основе иридия и лантана (Ir-La) или иридия и церия (Ir-Ce) [34–36, 7]. Эмиссионные параметры этих катодов близки друг другу ($\phi_{1300\text{ К}} = 2,57$ эВ, $\sigma_{\text{max}} = 2,45$), но скорость испарения лантана несколько выше, чем церия. Однако лантан окисляется на воздухе с меньшей скоростью, чем церий. Поэтому, если для изготовления катодов используют методы порошковой металлургии, то предпочтение отдают катодам, содержащим лантан, как более технологичным.

Материал для катодов из Ir-Ce изготавливают прямым сплавлением исходных компонентов в дуговой печи, а нужную форму катоду придают электроискровым способом.

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 [37], например, по реакции: $\text{Ir}_5\text{Ce} + x\text{Me} \rightarrow \text{Ce}_r + \text{Me}_x\text{Ir}$.

Используя термодинамические данные для интерметаллических соединений и твердых растворов, были проведены расчеты давления паров церия, согласно указанной выше реакции, и установлено, что активирующее действие тугоплавкими металлами возрастает в следующей последовательности: $\text{Re} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{Mo} \rightarrow \text{Ta}$ [38].

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

4. КАТОД С ВАКУУМНЫМ ПРОМЕЖУТКОМ

Во всех эффективных катодах активный металл поступает на поверхность, находящуюся в непосредственном контакте с эмиссионным телом катода, в котором запасен этот металл. Выбор рабочей температуры катода, как правило, определяется необходимостью получения нужной величины эмиссионного тока. Далеко не всегда эта температура совпадает с той, которая необходима для обеспечения доставки активного металла на поверхность. Кроме того, когда необходимо обеспечить малое время готовности катода, желательно было бы вначале нагревать поверхность катода, а затем уже все остальные его части.

Решение этих проблем дается в работе [39] для катодов спиральной формы, обеспечивающих малое время готовности (1...2 с) магнетронов непрерывного генерирования. Суть решения поясняется рис. 8. Источником активного вещества является втулка 1, которая нагревается спиралью 2, отделенной от втулки вакуумным промежутком. Активное вещество, испарившись из втулки, адсорбируется на спирали, увеличивая ее электронную эмиссию.

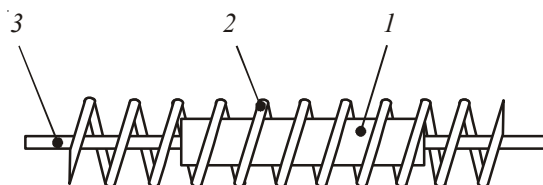


Рис. 8. Конструкция спирального катода с вакуумным промежутком:

1 – втулка с источником активного металла; 2 – спираль; 3 – керн, на котором закреплена втулка (диаметр спирали – 4 мм; длина рабочей части спирали – 10 мм; диаметр проволоки – 0,5 мм)

Оптимизация работы такого катодного узла достигается путем соответствующего выбора тепловых режимов работы всех его элементов и, исходя из этих режимов и требований, обеспечения нужного катодного тока, а также выбором активного металла.

Исследованы эмиссионные и теплофизические свойства катодов с вакуумным промежутком, содержащих в качестве активного вещества барий, лантан или торий. Определены диапазоны рабочих температур для каждого эмиссионного материала. Испытания показали, что эти катоды обеспечивают все параметры магнетронов непрерывного генерирования (мощность, КПД, время готовности) в течение более 9000 ч [40].

В дальнейшем следует направить усилия на то, чтобы идею катодов с вакуумным промежутком использовать в решении проблем создания катодов с малым временем готовности для электронно-лучевых приборов.

5. МЕТАЛЛОПОРИСТЫЕ КАТОДЫ

Металлопористые катоды остаются пока наиболее широко применяемыми катодами в приборах СВЧ. Традиционные требования к улучшению их характеристик – увеличение плотности тока эмиссии и долговечности. Эти два параметра взаимосвязаны, и одновременное их улучшение представляет наибольшие трудности. Работа металлопористого катода зависит: от эффективности механизмов образования монокатодной пленки из атомов бария и кислорода на поверхности металлической губки катода, от генерации атомов свободного бария из запасов алюмината бария, хранящихся в порах губки, и от механизма доставки этих атомов на поверхность для поддержания необходимой их концентрации и предотвращения обеднения пленки вследствие простого испарения атомов и действия факторов агрессивной среды в приборе. Механизм доставки атомов на поверхность является ключевым для обеспечения высокой плотности тока и необходимой долговечности катода.

Транспортные механизмы включают в себя следующие процессы: доставка атомов на поверхность за счет кнудсеновского потока атомов через поры $W_{\text{Кн}}$, миграционный поток по стенкам пор $W_{\text{миг}}$, а также миграция атомов, заполняющих собой монослой на поверхности металлических зерен. Движущей силой кнудсеновского потока является градиент давления паров бария, вследствие которого число атомов, передвигающихся к поверхности, превышает противоположный поток. Атомы в миграционном потоке также движутся в сторону поверхности, и движущей силой этого потока является градиент поверхностной пристеночной концентрации атомов или градиент связанного с этой концентрацией локального давления.

Далее представлены зависимости величин этих потоков от градиента давления и радиуса пор, который, в свою очередь, определяется величиной пористости и плотности пор в поперечном сечении губки катода.

$$W_{\text{Кн}} = A_{\text{Кн}} R_{\text{п}}^3 \frac{(P_2 - P_1)}{L}. \quad (3)$$

$$W_{\text{миг}} = A_{\text{миг}} (2\pi R_{\text{п}}) \frac{(P_2 - P_1)}{L}. \quad (4)$$

Здесь $R_{\text{п}}$ – радиус, а $2\pi R_{\text{п}}$ – периметр сечения поры; $(P_2 - P_1)$ – разность значений локального давления бария; L – расстояние между плоскостями с указанными давлениями; $A_{\text{Кн}}$ и $A_{\text{миг}}$ – константы, зависящие от атомной массы, температуры и газовой постоянной.

При схожести движущей силы и причин появления обоих потоков между ними есть серьезные различия:

1) атомы в кнудсеновском потоке не могут сами по себе выйти на поверхность. Они могут просто образовать поток атомов, покидающих катод через устья пор, и таким образом играют в известной степени отрицательную роль в транспорте атомов;

2) мощность кнудсеновского потока сильно зависит от поперечного сечения поры, т. к. большое расстояние между противоположными частями стенки – залог того, что эти атомы могут проходить большие расстояния по длине поры при движении от одной стенки до столкновения с другой;

3) атомы в миграционном потоке имеют меньшую энергию, чем кнудсеновские атомы. Поэтому они не отрываются на большие расстояния от поверхности стенки, следуют всем ее изгибам и могут без потерь выходить на поверхность;

4) миграционный поток пропорционален периметру поры, а не площади поперечного сечения, как атомы в кнудсеновском потоке. Этот поток не требует большой величины пор и растет с увеличением общей поверхности пор, т. е. увеличивается при диспергировании. Таким образом, по всем признакам миграционный поток – это более подходящий механизм для роли снабжения поверхности катода атомами бария. Однако у этого механизма есть другие отличия, снижающие его эффективность. Например, недостаточная мощность потока миграции по сравнению с потоком Кнудсена при повышенных температурах, необходимых для поддержания высокой эмиссии. Это связано с тем, что температурный рост потока мигрирующих атомов меньше, чем атомов испаренных, которые и являются атомами кнудсеновского потока.

Тем не менее, есть универсальный способ понизить значение потока Кнудсена хотя бы вблизи поверхности катода. С этой целью необходимо использовать двухслойные катоды, в которых верхний (внешний) слой образован более мелкодисперсной структурой, снижающей мощность этого потока, с одной стороны, и увеличивающей миграционный поток – с другой, по причине более развитой поверхности, являющейся средой для миграции. Нижний (глубинный) слой, не имеющий непосредственного выхода к поверхности без ущерба для работы катода, может быть образован крупнопористой структурой, к тому же вмещающей больший запас алюмината, чем структура с мелкими порами, но с малой плотностью пор.

Для оценки возможностей такого подхода к построению катода нами была создана модель работы МПК с учетом существования обоих механизмов транспортировки атомов бария, а также разработана компьютерная программа для оценки поведения двухслойных катодов при различных параметрах пористости слоев и исходного давления бария в разных слоях, что позволяет варьировать в программе не только параметры пористости, но и химический состав слоев катода.

Особое внимание было уделено поведению потоков активных атомов в приповерхностной зоне верхнего слоя, определяющей как величину потерь прямым испарением, так и поток атомов бария, заполняющих поверхность. На рис. 9 схематически изображена терминальная зона поры, в которой простая картина потока Кнудсена разбита на отдельные потоки испаренного бария, а также отдельные ветви миграционного потока. Равновесное локальное давление зоны принято постоянным.

Расчеты показывают, что это предположение оправдано при протяженности выходного участка верхнего слоя, близкой к радиусу или нескольким радиусам пор. Все потоки внутри зоны,

а также в большей части верхнего и нижнего слоев рассматриваются в рамках представления о квазиравновесном распределении давления по всей глубине катода.

Результаты расчета демонстрируются на примерах выбора различных параметров пористости и размеров слоев катода с наполнителем в виде трехбариевого алюмината. Делаются обычные предположения о характере реакций восстановления бария из алюмината.

На рис. 10 представлена временная зависимость скорости испарения атомов бария с металлических зерен катода, величина которой может служить в качестве критерия работоспособности катода в отличие от общей скорости испарения, включающей бесполезные потери. В качестве одного из объектов обсчета включен обычный МПК, для которого известны как динамика испарения бария, так и долговечность. Используя эти данные и приняв в качестве критерия уровень испарения в конце срока службы, можно оценить долговечность и для других проектируемых двухслойных катодов. Здесь представлены данные по расчетам для катодов с двумя уровнями уменьшения размера пор катода. Один из них предусматривает относительно небольшую степень «диспергирования» губки, вероятно, достижимую с помощью имеющихся в отрасли технологий (это губка с размером частиц около 2 мкм), а второй – с частицами из нанодиапазона, а именно с размером зерен около 70 нм.

Из того же рисунка видно, что кривая уменьшения потока вещества в обычном катоде подчиняется известным закономерностям подобных кривых: является прямой с наклоном 1/2 в логарифмической системе координат и выполаживается в области начала работы катода. Две другие кривые естественно разбиваются на две части, соответствующие моменту прохождения уровня обеднения губки через границу двух слоев. Такой момент перехода указан на рисунке стрелками. В этих точках наклон кривых резко изменяется с последующим возвращением к закону одной второй. Уровень критически низкой скорости испарения достигается для этих катодов при значениях срока службы, больших на один-два порядка, чем обычные значения долговечности для выбранной температуры 1500 К. При этом, разумеется, общая толщина катода должна быть значительно больше, чем в обычных катодах. Следует понимать, что простое увеличение толщины не изменит срок службы катода с обычной структурой, потому что уже при

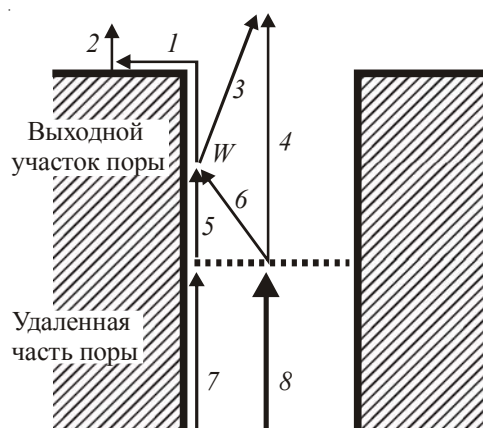


Рис. 9. Схема потоков в поре:

1 – миграция на поверхность зерна $W_{\text{миг}}$; 2 – испарение с зерен; 3 – испарение со стенок поры в устье поры; 4 – испарение со дна поры в устье; 5 – миграция от дна поры к центру (точке W); 6 – перепыление со дна на стенки поры; 7 – миграция по стенкам поры; 8 – поток Кнудсена

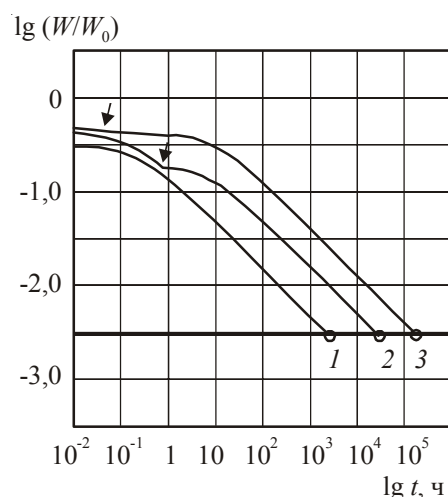


Рис. 10. Скорость испарения бария с металлических зерен губки при $T = 1500 \text{ K}$:

1 – однослойная вольфрамовая губка (пористость – 26 %; толщина губки – 0,5 мм); 2 – двухслойная губка (пористость верхнего слоя – 10 %, нижнего слоя – 50 %; размер зерна верхнего слоя – 2,14 мкм, нижнего – 11,28 мкм; толщина верхнего слоя – 0,01 мм, нижнего – 1,8 мм); 3 – двухслойная губка (пористость верхнего слоя – 1 %, нижнего слоя – 65 %; размер зерна верхнего слоя – 0,072 мкм, нижнего – 28,93 мкм; толщина верхнего слоя – 0,01 мм, нижнего – 8 мм); стрелками указаны границы работы слоев

толщинах 0,5 мм для такого катода достигается предельно низкая скорость подачи и испарения бария, а дальнейшее увеличение толщины не повлияет на долговечность, так как глубинные запасы алюмината не будут использованы.

Чрезвычайно большие для указанной температуры расчетные значения долговечности (см. таблицу), превышающие 100 000 ч, разумеется, надо еще обеспечить мерами по сохранению выбранных параметров дисперсности губки. Работа по выявлению и предотвращению процессов, нарушающих структуру катода, является сложной. То же следует сказать и о создании и налаживании принципиально новой технологии изготовления предлагаемых «наногубок».

Расчетная долговечность металлопористых бариевых катодов при $T = 1500 \text{ K}$

Тип катода		Пористость, %	Размер зерна, мкм	Толщина матрицы (минимальная), мкм	Долговечность, ч
Однослойный		26	5,6	500	2500
Двухслойный мелкодисперсный	Верх	10	2,14	10	27000
	Низ	50	11,28	1800	
Двухслойный с нанозернами	Верх	1	0,072	10	180 000
	Низ	65	28,93	8000	

Первые результаты использования двухслойной губки с обычным размером зерен 2...3 мкм в МПК являются обнадеживающими [41]. Катод, у которого верхний слой толщиной 0,5 мм

состоял из W+30%Os+8% алюмината бария-кальция, а нижний слой – из вольфрама и алюмината в отношении 1:1, обладает долговечностью, в 3...5 раз большей, чем обычный МПК с пленкой осмия (см. рис. 11).

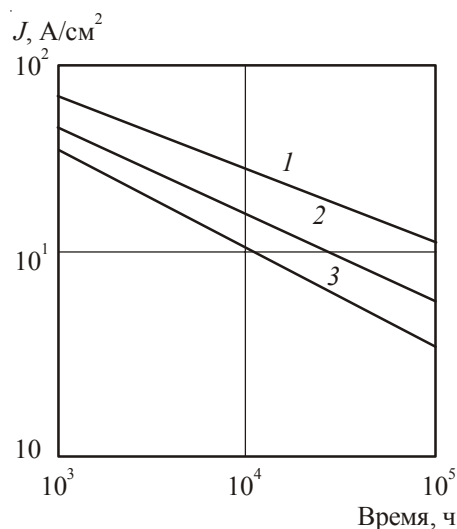


Рис. 11. Взаимосвязь плотности тока термоэлектронной эмиссии и долговечности для двухслойного МПК (1), МПК с пленкой осмия (2) и стандартного МПК (3)

6. АНТИЭМИССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К трем звонким словам, которые стоят в названии статьи, можно было бы добавить еще одно – диалектика. Дело в том, что проблема паразитной эмиссии (термо- или вторично-электронной) в некоторых вакуумных приборах стоит не менее остро, чем получение нужного катодного тока. И подавить эмиссию нужно в реальных условиях работы прибора, при напылении активных веществ с катода и при воздействии остаточных газов. В этих условиях антиэмиссионный материал не обязательно должен изначально обладать высокой работой выхода, как это предполагается в работе [42].

Основное требование к этому материалу вытекает из синергетического принципа – сохранять требуемый низкий уровень электронной эмиссии в динамических условиях работы материала в приборе.

Золото является первым антиэмиссионным материалом, нашедшим широкое применение для подавления электронной эмиссии с сеток в приемно-усилительных лампах [43]. Механизм подавления основан на образовании интерметаллического соединения с барьером с работой выхода около 3,3 эВ [44]. Диапазон рабочих температур золота 300...500 °С.

В приборах СВЧ возникла потребность в более высокотемпературных антиэмиссионных материалах. Успешно для этих целей были использованы платина, титан [45 – 47]. Механизм проявления антиэмиссионных свойств титана впервые был изучен в работе [48]. Оказалось, что антиэмиссионные свойства титана, а также, как в дальнейшем было установлено, циркония [49], гафния [50] и сплавов молибдена с цирконием [51] обусловлены слабой связью активного металла, испаряющегося с катода, с поверхностью этих материалов (см. рис. 12).

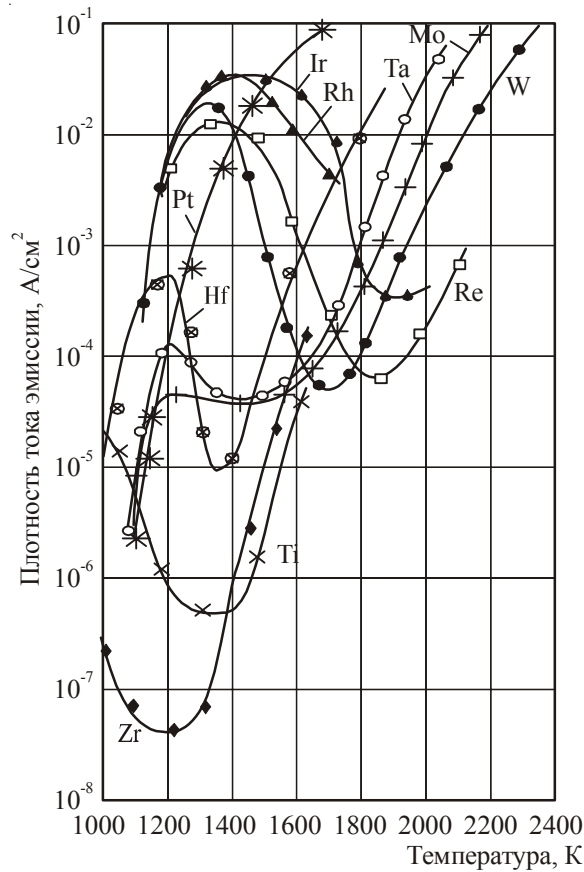


Рис. 12. Зависимость плотности тока эмиссии от температуры для различных металлов, помещенных в одинаковый поток бария (10^{13} атом \cdot см^{-2}). Давление остаточных газов – не больше $5 \cdot 10^{-9}$ мм рт.ст.

Для сплава молибдена с цирконием наблюдается симбатная зависимость между работой выхода и теплотой адсорбции бария (рис. 13).

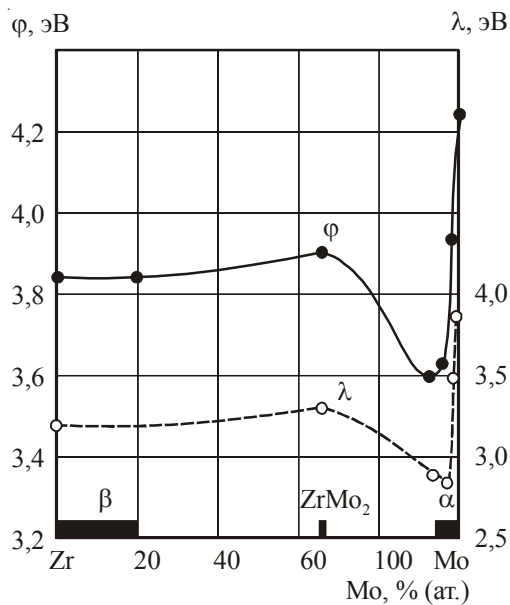


Рис. 13. Зависимость работы выхода ϕ при 1500 К и теплоты адсорбции бария λ от состава сплавов молибдена с цирконием

Аналогичный механизм подавления эмиссии действует при использовании металлоподобных соединений, таких, как бориды, карбиды и дисилициды тугоплавких металлов [52].

Иными словами, при рабочей температуре поверхность этих антиэмиссионных материалов практически не содержит активных металлов, испаряющихся с катода. В этом их отличие от платины, палладия и родия, антиэмиссионные свойства которых обусловлены насыщением своих приповерхностных слоев путем образования интерметаллических соединений с активными металлами (Th, Y, ЩЗМ, РЗМ).

При всем различии в механизме подавления эмиссии эти металлы объединяет одно удивительное свойство – их эмиссия устойчива к действию кислорода [53]. Если для вольфрама, помещенного в поток бария, первые порции кислорода приводят к резкому возрастанию эмиссии и только затем к падению, то для указанных металлов в широком интервале изменения давления кислорода электронная эмиссия остается без изменений (см. рис. 14).

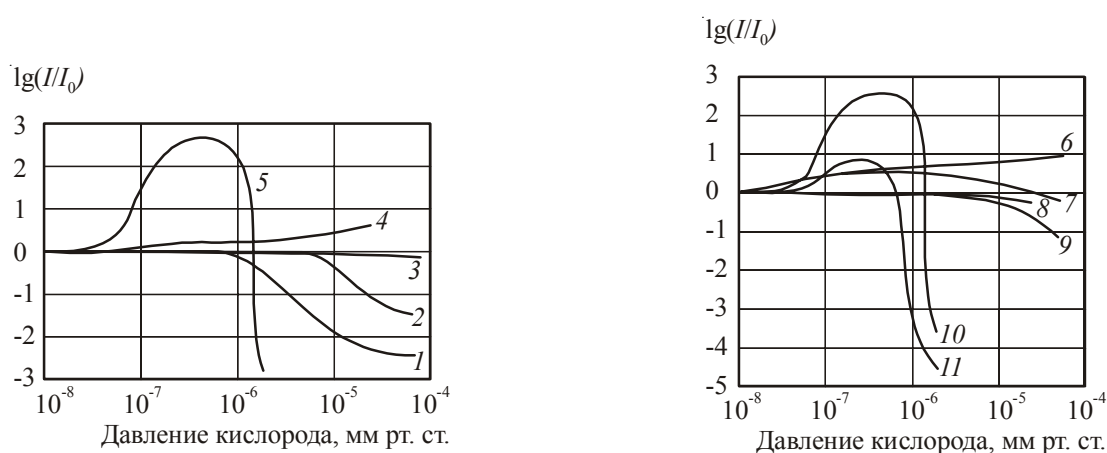


Рис. 14. Устойчивость эмиссии различных металлов, помещенных в поток бария, к действию кислорода:

1 – Re (1330 K); 2 – Ir (1330 K); 3 – Rh (1370 K); 4 – Pt (1400 K); 5 – W (1400 K); 6 – Zr (1200 K); 7 – Zr (1400 K); 8 – Ti (990 K); 9 – Hf (1390 K); 10 – W (1200 K); 11 – W (1400 K)

7. ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Более ста лет прошло с того времени, как Эдисон открыл эмиссию заряженных частиц с нагретого катода в вакуум (1883 г.) и как после открытия Томсона (1897 г.) стало ясно, что этими частицами являются электроны.

Трудно представить состояние наших знаний об окружающем мире и степень развитости современной цивилизации, если бы мы не знали о существовании электрона и не научились бы управлять его движением в вакууме и твердом теле.

Нанотехнология только этап в «жизни» электрона, важный этап, но не первый и, конечно, не последний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии; перевод с англ.; под ред. Ю.И. Головина. – М.: Техносфера, 2004. – С. 229.
2. Field emitter arrays on nanofilament carbon structure films / Yu.V. Gulyaev, L.A. Chernozatonskii, Z.Ya. Kosakovskaya, N.I. Sinitzyn, G.V. Torgashov, Yu.F. Zakharchenko // *Le Vide, les Couches Minces: Revue.* – 1994. – Supplement No 271. Mars-avril. – P. 322.
3. Автоэлектронная эмиссия с углеродных нанотрубных и нанокластерных пленок / Ю.В. Гуляев, Н.И. Сеницын, Г.В. Торгашов, А.И. Жбанов, И.Г. Торгашов, С.Г. Савельев // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, № 11. – С. 1399.
4. Нанотехнологии в электронике: сб. статей; под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – С. 143.
5. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых структур // *Физика и техника полупроводников.* – 1998. – Т. 32, вып.1. – С. 3.
6. Герасименко Н., Пархоменко Ю. Кремний – материал наноэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – С. 91.
7. Дюбуа Б.Ч. Современные эффективные катоды // *Радиотехника.* – 1999. – № 4. – С. 55.
8. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов. – М.: Энергия, 1966. – С. 203.
9. Никонов Б.П. Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979. – С. 66.
10. Городецкий Д.А., Мельник Ю.П. О корреляции между работой выхода и структурой мономолекулярных пленок // *Физика твердого тела.* – 1974. – Т. 16, вып. 9. – С. 2781.
11. Браун О.М., Медведев В.К. Взаимодействие между частицами, адсорбированными на поверхности металлов // *Успехи физических наук.* – 1989. – Т. 157, вып. 4. – С. 631.
12. Култашев О.К., Макаров А.П. Влияние адсорбции кислорода на электронные и адсорбционные свойства атомов бария на гранях (100), (110) и (111) вольфрама // *Известия АН СССР.* – 1974. – Т. 38, № 2. – С. 317.
13. Агеев В.Н., Кузнецов Ю.А., Потехина Н.Д. Электронно-стимулированная десорбция атомов редкоземельных металлов // *Физика твердого тела.* – 2004. – Т. 46, вып. 5. – С. 945.
14. Магомедов М.Н. О зависимости поверхностной энергии от размера и формы нанокристалла // *Физика твердого тела.* – 2004. – Т. 46, вып. 8. – С. 924.
15. Djubua B.Ch., Plyin V.N., Koultashev O.K. Metall-allayed cathode for high-power vacuum tubes // *IVESC-96. Sec. J13. Eindhoven. The Netherlands.*
16. Исследование фазового состава сплавов платина-барий и палладий-барий / В.Н. Дмитриева, Н.П. Есаулов, Н.Н. Журавлев, В.М. Рождественский // *Благородные металлы и их применение: сб.* – Свердловск. – 1971. – Вып. 28. – С. 58.
17. Secondary electron emission, surface composition and modes of activation of metal alloy cathodes / B.Ch. Djubua, E.M. Zemchikhin, A.P. Makarov, O.V. Polivnikova // *Applied Surface Science.* – 1997. – Vol. 111. – P. 285.
18. Электронная эмиссия сплавов Pt-Ва, Pd-Ва, Rh-Ва, Au-Ва / Б.Ч. Дюбуа, Л.А. Ермолаев, Н.П. Есаулов, И.П. Стародубов // *Радиотехника и электроника.* – 1967. – Т. 12, № 8. – С. 1523.
19. Гнучев Н.М., Каничева И.Р., Кирсанова Т.С. Влияние ионной бомбардировки на термоэмиссионные свойства палладия с барием // *Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.* – 1970. – Вып.12. – С. 131.
20. Дюбуа Б.Ч. Металлосплавной «холодный» вторично-эмиссионный катод // *Вопросы прикладной физики.* – 2004. – № 11. – С. 102.
21. Скорость испарения бария из сплава Pt-Ва, Pd-Ва / 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.

22. Бондаренко Б.В. Проблема стабильности автоэлектронной эмиссии и некоторые пути ее решения // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 9. – С. 3.
23. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.Б. Автоэлектронные эмиттеры с развитой рабочей поверхностью // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 10. – С. 44.
24. Baker F.S., Osborn A.R., Williams I. The carbon-fibred field // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 7, No 15. – P. 2105.
25. Бондаренко Б.В., Ильин В.Н., Кузьмич К.В. Эмиссионные характеристики автокатодов из пластин пирографита // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 10. – С. 34.
26. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. – М.: Физматкнига, 2001. – С. 102.
27. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Исследование автоэлектронной эмиссии гексаборида лантана // Радиотехника и электроника. – 1958. – Т. 3, № 7. – С. 945.
28. Елинсон М.Е., Кудинцева Г.А. Автоэлектронные катоды на основе тугоплавких металлоподобных соединений // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7, № 9. – С. 1511.
29. Kopylov M.F., Bondarenko B.V., Makhov V.I. High-performance heating free M-type generators with field emission excitation // IVMC-91, Technical Digest, Nagahama, Japan. – 1991. – P. 74.
30. Brodie I., Spindt C.A. Vacuum microelectronics // Advances in Electronics and Electron Physics. – 1992. – Vol. 83. – P. 1.
31. Djubua B.Ch., Polivnikova O.V. Stratum-like structured metal alloy cathode // Appl. Surface Science. – 2003. – Vol. 215, Issues 1-4. – P. 242.
32. Шредник В.Н. Теория автоэлектронной эмиссии: сб. статей; под ред. М.И. Елинсона. – М.: Сов. радио, 1974. – С. 174.
33. Marphy E.L., Good R.N. Thermionic emission, field emission and the transition region // Phys. Rev. – 1956. – Vol. 102, No 6. – P. 1464.
34. 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.
35. 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. – 1969. – Вып. 2. – С. 81.
36. Kultashev O., Djubua B. Miniature metal alloy thermionic cathodes // Physic Scripta. – 1997. – Vol. 71. – P. 127.
37. Структура, работа выхода, скорость испарения и состав поверхности сплавов иридия с церием и тугоплавкими металлами / О.К. Култашев, А.П. Макаров, Б.В. Маркин, В.А. Михайлов, С.Е. Рожков // Тезисы докладов на XX Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. – Киев, 1987. – Т. 1. – С. 158.
38. 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.
39. 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.
40. Поливникова О.В. Исследование и разработка эффективных магнетронных катодов на принципе переноса активного вещества из независимого источника на эмитирующую поверхность через вакуум: автореферат дисс. канд. техн. наук. – Фрязино, 2006. – С. 26.
41. The impregnated cathode for high power klystron / B.Ch. Djubua, O.V. Polivnikova, N.M. Ogoleva, Y. Ding, J. Peng // ICMMT 2000, September 14-16, 2000, Beijing, China. – P. 146.
42. Царев Б.М. Контактная разность потенциалов. – М.: Техничко-теоретическая литература, 1955. – С. 257.

43. Дюбуа Б.Ч., Ермолаев Л.А. Антиэмиссионные и антидинаatronные материалы // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1964. – Вып. 12. – С. 170.
44. Шишкин Ю.Г. // Радиотехника и электроника. – 1964. – Т. 9, вып. 11. – С. 2058.
45. Champion J.A. Thermionic properties of thorium deposits on control grid materials // Brit. J. Appl. Phys. – 1959. – Vol. 10. – P. 71.
46. Espersen A., Rogers J.W. Studies on grid emission // IRE Trans, ED-3. – 1956. – Vol. 2. – P. 100.
47. Винк М.В. Новые антиэмиссионные и чернящие покрытия деталей электронных приборов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. – 1960. – Вып. 2.
48. Дюбуа Б.Ч., Попов Б.Н. Некоторые эмиссионные и адсорбционные свойства системы барий-титан и барий-вольфрам // Вопросы радиоэлектроники. Сер.1. Электроника. – 1960. – Вып. 9. – С. 96.
49. Дюбуа Б.Ч. Применение циркония как антиэмиссионного материала // Вопросы радиоэлектроники. Сер.1. Электроника. – 1960. – Вып. 12. – С. 61.
50. Дюбуа Б.Ч. Термоэлектронная эмиссия некоторых тугоплавких металлов в парах бария // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, № 6. – С. 1161.
51. 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. – № 7. – С. 70.
52. Дюбуа Б.Ч., Степанов Л.А. Термоэлектронная эмиссия некоторых металлоподобных соединений в парах бария // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, № 12, – С. 2200.
53. Дюбуа Б.Ч., Попов Б.Н. Металлы с повышенной устойчивостью термоэлектронной эмиссии к действию кислорода // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7, № 9 – С. 1556.

Статья поступила 16 июля 2008 г.

УДК 621.385.002

ПРОБЛЕМЫ ОТКАЧКИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭВП СВЧ

Г. Ф. Корепин

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Показаны современные проблемы откачки различных типов металлокерамических ЭВП СВЧ, заключающиеся в оптимизации термовакуумной обработки и комплексном подходе к решению возникающих проблем. Экспериментально установлено, что требования к обезгаженности ЭВП СВЧ определяются условиями применения, особенностями конструкции и технологической обработки прибора. Определено минимальное время, необходимое для обезгаживания ЭВП, представлены некоторые критерии достаточности обезгаженности и даны границы применения этих критериев.

The actual problems of pumping out different types of microwave metal-ceramic electrovacuum devices lying in optimization of thermovacuum processing and complex approach to solution of emerging problems are shown. It is found experimentally that the demands to degassing microwave electrovacuum devices are defined by application conditions, peculiarities of design and technological processing of the device. Minimal time required for electrovacuum devices degassing is set, several criteria of degassing sufficiency are presented and the application ranges of these criteria are given.

КС: откачка, газовыделение, обезгаживание, оптимизация

1. ВВЕДЕНИЕ

Откачка ЭВП СВЧ, как известно, предназначена для создания условий, благоприятных для работы прибора в радиотехнической аппаратуре. Поэтому нельзя рассматривать прибор отдельно, необходим комплексный подход:

– при проведении технологических обработок на стадии изготовления прибора необходимо особо обращать внимание именно на формирование атмосферы остаточных газов и газов, сорбированных на деталях вакуумного объема [1, 2];

– для нормальной работы ЭВП необходимы четкие знания по условиям эксплуатации, взаимному влиянию аппаратуры и прибора и физико-химическим процессам, происходящим в объеме ЭВП [3, 4].

Основными проблемами откачки ЭВП в настоящее время являются: недостаточная стабильность технологических процессов в части обеспечения необходимого уровня давления остаточных газов и повышенный уровень частоты электрических пробоев в некоторых приборах. Встречаются также нестабильность эмиссионных характеристик катодов от прибора к прибору при обеспеченности качественными катодами и натекания ЭВП в процессе откачки или после ее завершения, хотя перед откачкой приборов обычно проводится масс-спектрометрический контроль. Поэтому целесообразно рассмотреть полный цикл откачки ЭВП [3–10] с целью снижения вышеперечисленных потерь.

Чисто практические вопросы откачки заключаются в определении:

- продолжительности и режима подъема температуры обезгаживания ЭВП;
- величины температуры обезгаживания и продолжительности обезгаживания при максимальной температуре;
- режима обработки катода и других электродов;
- режима снижения температуры обезгаживания ЭВП, контроля качества откачки и момента отпайки прибора;
- герметичности оболочки как на стадии откачки, так и отпайки ЭВП.

2. ОГРАНИЧЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЪЕМА ТЕМПЕРАТУРЫ

Одним из наиболее ответственных моментов является режим подъема температуры обезгаживаемого прибора в связи с интенсивной десорбцией газа с поверхностей ЭВП и соответственно увеличением давления газа в приборе [1]. Часто считается, что достаточно иметь давление в вакуумной системе откачного поста не более $6,5 \cdot 10^{-4}$ Па и это обеспечит качество процесса обезгаживания ЭВП при повышении температуры. Однако, рассматривая конкретные конструкции приборов, легко убедиться в обратном. Реальное давление не во всех областях конструкции прибора может соответствовать молекулярному течению газа. Например, для некоторых ЛБВ проводимость самого прибора может более чем на порядок быть меньше, чем проводимость штенгеля. Такое положение приводит к нарушению режима молекулярного течения в наиболее удаленной от штенгеля части прибора (как правило, в коллекторе), если ЭВП откачивается со стороны электронной пушки. Следствием этого является ухудшение условий обезгаживания коллектора, результаты которого могут наблюдаться визуально при вскрытии коллектора прибора.

Возникновение участков с различными типами проводимости в ЭВП вызывает окислительные процессы в материалах наиболее удаленных частей конструкции. Окисленные поверхности и повышенное давление не позволяют провести качественное обезгаживание прибора, что и проявится в виде повышенного давления газов в отпаянном ЭВП при достаточном и одинаковом времени обезгаживания и максимальной температуре. Так, для приборов с незначительными конструктивными отличиями результаты их откачки могут быть совершенно разными: в одних давление остаточных газов соответствует нормальным условиям работы ЭВП, а в других этого нет.

В процессе работы такого отпаянного ЭВП должно наблюдаться интенсивное газовыделение при попадании электронного потока на область окисленной поверхности коллектора, что может явиться своеобразным индикатором качества обезгаживания прибора. Итак, причина кроется в неконтролируемых режимах течения газа при повышенной температуре, хотя расчет давления газа для квазистационарного случая с учетом перепада давления по штенгелю прибора и показывает, что в этом месте имеется молекулярное течение газа (для ЭВП с высокими значениями собственной проводимости во всех конструктивных элементах имеется молекулярное течение газа [1]).

Чтобы избежать подобного явления, необходимо для каждого прибора проводить расчет проводимости наиболее проблематичных направлений конструкции. Критерием давления газа в вакуумной системе во время подъема температуры или газовыделения при обработке, на-

пример, катода должно быть давление в откачиваемом приборе в соответствии с требованиями обеспечения молекулярного течения во всех частях прибора.

Обоснование необходимости обеспечения именно молекулярного течения очевидно из следующих соображений:

– если в какой-то части откачиваемого ЭВП будет повышенное давление, то физико-химические процессы при температуре обезгаживания будут иметь другое состояние, отличное от процессов, происходящих при молекулярном течении, что может вызвать окисление поверхностей, а следовательно, и задержку в обезгаживании этих поверхностей;

– задержка в обезгаживании части поверхностей вакуумного объема в отпаянном приборе приведет к диффузии газа в вакуумный объем и повышению давления в приборе, что является одной из причин так называемой «газности».

Расчет может быть сделан из условия обеспечения молекулярного течения газа во всей вакуумной системе как откачного поста, так и всех частей ЭВП. Типичная схема откачки прибора приведена на рис. 1, а упрощенная – на рис. 2. Вначале необходимо рассчитать проводимости от входного патрубка высоковакуумного насоса (ВВН) до места присоединения преобразователя давления. Затем рассчитать эффективную быстроту действия в области преобразователя по известной проводимости от насоса до преобразователя и известной скорости действия ВВН.

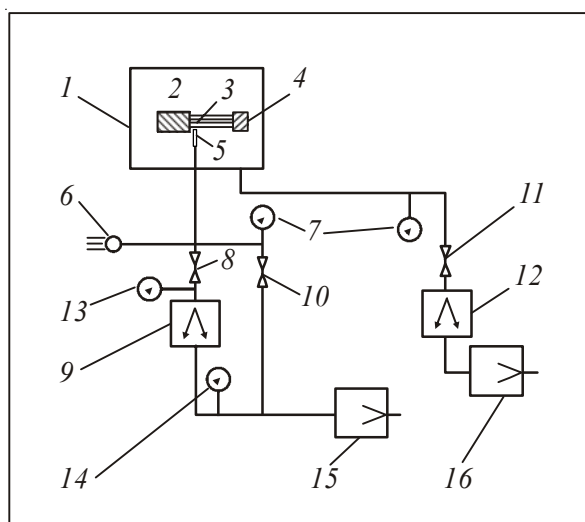


Рис. 1. Вакуумная схема откачного поста:

1 - вакуумная камера; 2, 3, 4 – соответственно электронная пушка, пространство взаимодействия, коллектор откачиваемого ЭВП; 5 – штенгель ЭВП; 6 – масс-спектрометр; 7, 13, 14 – преобразователи давления; 8, 10, 11 - клапаны; 9 – турбомолекулярный насос; 12 – диффузионный насос; 15, 16 – пластинчато-роторный форвакуумный насос

Следующий этап расчета включает определение проводимости трубопровода от ВВН до ЭВП, включая и проводимость штенгеля прибора. Далее проводится расчет проводимости от штенгеля до наиболее проблемного участка конструкции прибора. Необходимо также определить давление в этом проблемном участке, которое нельзя превышать для обеспечения в нем молекулярного течения. Затем, исходя из известных величин скорости откачки в области преобразователя давления и в области проблемного участка и известного максимального дав-

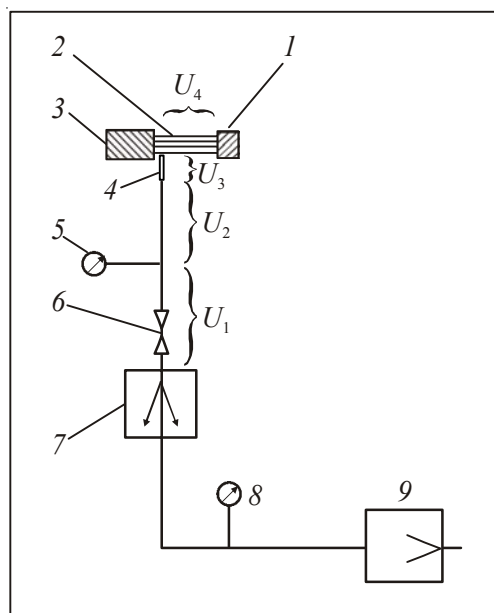


Рис. 2. Упрощенная вакуумная схема откачки ЭВП:

1, 2, 3, 4 – соответственно коллектор, пространство взаимодействия, электронная пушка, штенгель откачиваемого ЭВП; 5, 8 – преобразователи давления; 6 – клапан; 7 – турбомолекулярный насос; 9 – пластинчато-роторный форвакуумный насос; $U_1 \dots U_4$ – проводимости соответствующих участков трубопровода и ЭВП

давления на этом участке, следует найти максимальное давление, которое не должно быть превышено у преобразователя давления для соблюдения молекулярного течения в области проблемного участка. В результате получим:

$$S_{1n} = \frac{U_1 S_n}{U_1 + S_n}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{1n}} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} + \frac{1}{U_4}, \quad (2)$$

где U_1 – проводимость от ВВН до преобразователя давления; S_n – быстрота действия насоса; S_{1n} – эффективная быстрота откачки в области преобразователя давления; S_k – эффективная быстрота откачки коллектора; U_2 – проводимость от преобразователя давления до штенгеля; U_3 – проводимость штенгеля; U_4 – проводимость от штенгеля до коллектора.

Если d_k – максимальный диаметр вакуумной части коллектора, то давление в коллекторе, которое соответствует молекулярному течению газа, будет равно

$$P_k \leq 0,02/d_k. \quad (3)$$

Из уравнения $P_k S_k = P_{1n} S_{1n}$ и уравнения (3) имеем

$$P_k \leq \frac{0,02}{d_k} \frac{S_k}{S_{1n}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) связывает быстроту откачки коллектора и быстроту откачки в области преобразователя давления с поперечным размером коллектора d_k , м. Для стандартных откачных постов величина S_{1n} близка к скорости действия ВВН, а величина S_k может быть для некоторых типов ЭВП меньше S_{1n} на 4...5 порядков. Поэтому давление в коллекторе может существенно превышать предельно допустимое для осуществления молекулярного течения газа ($6,5 \cdot 10^{-4}$ Па), так как по расчетам давление P_{1n} не должно превышать нескольких единиц (10^{-6} Па), что близко к предельному давлению насоса. В результате время подъема температуры обезгаживания ЭВП настолько сильно затягивается, что начинает превышать все допустимые пределы. Для обеспечения молекулярного течения в этом случае необходимо иметь два штенгеля: и со стороны пушки прибора, и со стороны коллектора. Возможен и другой выход: сдвиг реакции окисления в противоположную сторону путем использования реакции восстановления или такого известного эффекта, как конкуренция газа за место адсорбции. Реакция восстановления может быть реализована соответствующим потоком восстановителя, например водорода, а конкуренция – за счет использования инертного газа, например аргона или гелия.

На практике недоучет перепада давлений по откачиваемому и обезгаживаемому объему (в том числе и перепад давлений по вакуумной системе откачного поста и штенгеля прибора) приводит к появлению «газных» ЭВП, как это показано выше. Отмечены случаи и окисления коллектора после проведения операции откачки. В целом можно отметить также следующее: нельзя заранее предугадать давление в проблемном участке ЭВП исходя из его габаритов, не предпринимая соответствующего моделирования или расчетов. Не следует считать, что для приборов с большими габаритами будет все нормально, так как проводимость таких ЭВП высока. Для таких приборов и поперечные размеры больше, поэтому условие молекулярного течения также будет жестче, чем для приборов с небольшими габаритами.

Ни один этап откачки не следует также затягивать, так как действие обратного потока, который, как правило, играет вредную роль, при этом усиливается. Поэтому на данном этапе лучше всего откачку построить так, чтобы давление в откачном посту при подъеме температуры обезгаживания прибора было бы, по возможности, ближе к расчетному или немного меньше его. В этой связи возрастает роль точности расчетов. По-видимому, наиболее точные расчеты получаются методом Монте-Карло с применением соответствующих расчетных программ с учетом отклонения от квазистационарности.

3. РЕЖИМ ОБЕЗГАЖИВАНИЯ ЭВП ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Режим обезгаживания определяется условиями применения прибора. Например, для мощных высоковольтных ЭВП необходимым условием является, как правило, отсутствие электрических пробоев между электродами или в выходном высокочастотном элементе – выводе СВЧ-энергии. Поэтому требуется снижать вероятность возникновения пробоев различного характера.

Одним из источников электрических пробоев в ЭВП является повышенное поверхностное газосодержание, которое на несколько порядков превышает количество газа в вакуумном объеме прибора. После проведения обезгаживания и обработки прибора на откачном посту в состав остаточных газов обычно входят: CO, CO₂, N₂, H₂O, Ar, H₂, CH_n [2]. Парциальный состав газов

зависит от условий термовакuumной обработки ЭВП в процессе откачки, от свойств материалов и качества подготовки прибора к откачке. Развитие электрического пробоя приводит к выделению газа как из объема материала электродов, так и с их поверхностей. Известно несколько механизмов пробоя, связанных, так или иначе, с газовыделением в объем ЭВП [11,12]. Во время возникновения пробоев основную долю газовыделений составляют СО и СО₂, при этом считается, что и СО, и СО₂ являются результатом реакции окисления углерода и следствием хорошей их растворимости в материале электродов [13].

В связи с этим возникают следующие вопросы:

- каким образом оптимизировать процесс откачки ЭВП?
- насколько необходимо обезгазить поверхности ЭВП, чтобы они удовлетворяли требованию минимального количества пробоев?
- какие критерии режимов откачки являются оптимальными?
- являются ли режимы откачки, оптимальные с точки зрения снижения количества пробоев, оптимальными и для других целей этого процесса?

Наличие посторонних углеродных или других частиц приведет к повышению вероятности электрических пробоев. Создание условий интенсивного газовыделения при работе ЭВП также способствует возникновению пробоев [6, 11, 12, 14, 15]. Поэтому необходима выработка мер, снижающих интенсивность газовыделения если не в процессе откачки ЭВП, то на других технологических операциях после проведения откачки. Ясно, что в процессе проведения откачки нужно снижать величину обратного потока газов в откачном посту, а также продолжительность действия этого потока. Это приводит к выводу о необходимости снижения времени откачки прибора, что уменьшает время обезгаживания прибора и увеличивает в конечном итоге газовыделение самого материала, участвующего в последующем в электрическом пробое. Таким образом, режим откачки является величиной, зависящей разнонаправленно по отношению к одной из целей откачки – минимальной вероятности электрических пробоев.

Так как для уменьшения вероятности пробоев требуется уменьшение газосодержания поверхностей ЭВП, следовательно, возникает необходимость проведения оценки качества обезгаживания. Определение доли поверхностной составляющей адсорбированных газов для отпаянных приборов может быть проведено путем термической десорбции газа и расчета поверхностной концентрации газов, выраженной количеством молекул газа на единицу площади геометрической поверхности ЭВП. Эти измерения могут быть проведены при достижении температуры ЭВП, превосходящей максимум десорбции газа при постоянной (или переменной) скорости откачки встроенного магнитного электроразрядного насоса (МЭН).

Количество поглощенного газа внутренними поверхностями ЭВП определяется при прогреве прибора с одновременной откачкой его встроенным МЭН. В процессе откачки поток газа [4] вычисляется по формуле:

$$Q = PS = V \frac{dP}{dt} = kT \frac{dN}{dt}, \quad (5)$$

где Q – поток десорбируемого газа; P, S – давление и быстрота откачки газа в месте измерения потока; V – откачиваемый объем; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура газа. Тогда количество десорбированных атомов и молекул равно

$$N = \frac{S}{kT} \int_{t_1}^{t_2} P dt. \quad (6)$$

То есть графическое интегрирование изменения давления во времени отражает количество десорбированных атомов и молекул в ЭВП и соответственно поглощенных в МЭН. В случае изменения быстроты откачки в зависимости от давления формула (2) приобретает вид

$$N = \frac{1}{kT} \int_{t_1}^{t_2} SP dt. \quad (7)$$

С учетом линейной зависимости между давлением и током МЭН при постоянной скорости откачки имеем

$$N = \frac{k_0 S}{kT} \int_{t_1}^{t_2} I dt, \quad (8)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности между током и давлением МЭН; I – ток МЭН как функция от времени откачки. Допущение постоянной скорости откачки в первом приближении вполне оправдано в пределах реальных давлений газов отпаянных ЭВП.

Интегральные кривые (6) – (8) служат для сравнения эффективности обезгаживания поверхностей ЭВП, в откачке которых использовались различные технологические режимы термовакуумной обработки. На основании таких кривых могут быть разработаны критерии откачки ЭВП, а сама операция проводится по результатам откачки. Операция контроля качества обезгаживания прибора должна осуществляться именно после отпайки прибора, так как во время откачки действуют другие «паразитные» потоки в самом откачном агрегате, а в отпаянном приборе этих потоков нет.

Как уже отмечено выше, продолжительность обезгаживания при максимальной температуре не должна превышать некую величину из-за действия обратного потока, но в то же время должна быть достаточной для обеспечения низкого давления остаточных газов. Поэтому необходимо практически определить это время.

Поток газа в откачном агрегате может быть определен как сумма потоков по формуле:

$$Q = PS = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_8 + Q_9 = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (9)$$

где P – давление газа, регистрируемое преобразователем давления откачного агрегата; S – эффективная быстрота откачки в месте измерения давления P ; $Q_1 \dots Q_5$ – потоки газа, соответствующие различным механизмам превалирующего газовыделения ЭВП (например, пяти механизмам); Q_6 – поток газа, соответствующий десорбции газа из вакуумной системы откачного поста; Q_7 – поток газа, соответствующий натеканию вакуумной системы и ЭВП; Q_8 – обратный поток газа в откачиваемый ЭВП; Q_9 – возвратная часть обратного потока после реакции в откачиваемом приборе.

Каждый из потоков может быть представлен в условии откачки формулой [3]:

$$Q_i = a_i t^{k_i}, \quad (10)$$

где t – время; a_i и k_i – постоянные величины, характеризующие десорбцию газа превалирующего механизма газовыделения из материалов ЭВП при постоянной температуре откачиваемого прибора. Формула (10) справедлива для конкретного механизма газовыделения. Если

остальные потоки незначительны по отношению к рассматриваемому потоку, то в конкретный момент можно принять, что поток $Q = Q_i$. Тогда из формул (9) и (10) получаем

$$\lg P = \lg a_i - \lg S + k_i \lg t = B + k_i \lg t. \quad (11)$$

Очевидно, что зависимость (11) давления от времени в логарифмическом масштабе должна представлять собой прямую линию с углом наклона, тангенс которого равен k_i , если механизм выделения газа остается постоянным и является основным (превалирующим). При изменении механизма выделения газа в приборе коэффициент k_i изменит свою величину и на графике прямая линия изменит угол наклона. Таким образом, по изменению величины k_i можно судить о действии того или иного механизма превалирующего газовыделения.

Уравнение (11) может быть применено в том случае, если энергии активации процессов газоразделения разных механизмов существенно отличаются друг от друга. Если такое условие не соблюдается, то переход одного механизма в другой не будет четко заметен на графике.

Механизмы газоразделения, ответственные за малые потоки газов из материалов исследуемого объема, могут быть найдены при соблюдении дополнительного условия, ограничиваемого предельным минимальным давлением ВВН откачного поста. Ясно, что точность измерений зависит от соотношений потоков $Q_1 \dots Q_9$, как следует из уравнения (9). Поэтому следует стремиться, чтобы потоки $Q_6 \dots Q_9$ были как можно меньше, что требует тщательного предварительного обезгаживания вакуумной системы откачного поста, отсутствия течей и более высокого предельного вакуума применяемых насосов.

Так как известно, что газоразделение зависит от температуры, то изменение температуры приводит к изменению величины потока выделяющихся газов из ЭВП. Это выдвигает к экспериментальным измерениям дополнительные требования: стабильность температуры прибора при его нагреве и снижение отклонения температуры от номинальной величины различных участков ЭВП в пределах рабочей высокотемпературной зоны откачного поста. Очевидно, что обычно применяемые системы регулировки температуры для таких целей непригодны. Поэтому при проведении измерений давлений в вакуумной системе откачного агрегата следует применять нагрев ЭВП без периодических включений и отключений нагревателей печи, плавно, без скачков устанавливая и поддерживая заданную температуру.

Таким образом, требуется чистая и обезгаженная вакуумная система с минимальным предельным давлением, чистым вакуумным объемом, газоразделение которого должно быть много больше газоразделения вакуумной системы и действующих в этой вакуумной системе различных фоновых потоков газа. Погрешности измерения давления также должны быть по возможности минимальные при сохранении условий квазистационарности потоков газа и стабильности температурных характеристик обезгаживаемого прибора.

Известно несколько механизмов, газоразделение которых подчиняется определенным математическим соотношениям. Скорость выделения газа [3] пропорциональна $1/t^{1/2}$, если газоразделение обусловлено диффузией из объема материала (где t – время обезгаживания), для хемосорбированного газа скорость пропорциональна $1/t$, а для газа, образующегося при поверхностной термической диссоциации, – $1/t^2$, что практически соответствует формуле (10). Очевидно, что и другие механизмы газоразделения (например, обусловленные ассоциацией углерода, диффундирующего из объема материала, и кислорода – из вакуумного объема) имеют свои отличия, подчиняющиеся формуле:

$$1/t^n = t^{k_i}. \quad (12)$$

Если при смене механизма превалирующего газовыделения будет наблюдаться монотонное изменение показателя n , то излом кривой будет происходить в одну и ту же сторону. Если изменение показателя n характеризуется то ростом, то уменьшением относительно предыдущего механизма, то и излом кривой также будет происходить то с увеличением, то с уменьшением угла наклона зависимости давления от времени конкретного участка кривой.

Можно предположить, что прекращение одного из превалирующих процессов определяет долговечность прибора. Например, увеличение длительности обезгаживания газоразрядного прибора выше критического времени, оптимальным образом соответствующего физико-химическим процессам в таком приборе, приведет к ускоренному жестчению газа и снижению долговечности, а недостаточное обезгаживание – к появлению в спектре посторонних парциальных составляющих. Для вакуумного прибора уменьшение продолжительности обезгаживания ниже критической величины превалирующего процесса десорбции будет приводить к нежелательным явлениям ухудшения токопрохождения, повышенной ионной бомбардировке катода, высоковольтным электрическим пробоям и другим явлениям.

Под критическим временем обезгаживания понимается время окончания действия того или иного механизма превалирующего газовыделения, соответствующее минимальному времени обезгаживания ЭВП при заданной температуре с соблюдением условий достаточности обезгаживания для эксплуатации ЭВП, обеспечивающих заданные параметры. Наряду с критическим временем обезгаживания ЭВП следует ввести и время обезгаживания рекомендуемое, которое соответствует критическому времени с известным коэффициентом запаса, учитывающим разброс по индивидуальным характеристикам материалов. Соответственно целесообразнее такие времена назвать по порядковому номеру их возникновения (или по тем закономерностям, которым они подчиняются). Так как интенсивность десорбции газа зависит от температуры, то следует ожидать, что критическое время обезгаживания, соответствующее данному механизму газовыделения, будет также зависеть от температуры. Очевидно, что для каждого из таких механизмов зависимость давления от температуры будет своя.

Видимо, если в процессе обезгаживания прибора происходит какое-то дополнительное газовыделение в течение определенного времени, то кривая будет повторяться по мере истощения дополнительного источника газовыделения, если выделившийся газ, прежде чем быть удаленным из прибора, сначала сорбируется поверхностями прибора, например, во время обезгаживания катода [4], обработки электродов и других процессов.

Очевидно, что время обезгаживания зависит и от температуры, так как интенсивность газовыделения экспоненциально зависит от температуры. Поэтому критическое время необходимо определять для каждой температуры обезгаживания ЭВП отдельно, а затем по полученным данным построить кривую, показывающую, как изменяется критическое время обезгаживания от температуры. Именно в силу зависимости интенсивности газовыделения от температуры следует также учесть и особенности обезгаживания ЭВП, имеющих отдельные конструктивные элементы, работающие при повышенной температуре, причем так, чтобы обеспечить необходимый требуемый запас по достигнутому давлению остаточных газов после проведения процесса откачки.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Время подъема температуры обезгаживания

Исследования влияния этого времени на качество обезгаживания ЭВП показали, что соблюдение молекулярного режима течения газа в откачиваемом ЭВП и трубопроводе откачного поста позволяет получить при прочих равных условиях необходимое давление остаточных газов на уровне 10^{-6} Па.

Расчеты величины перепада давлений между преобразователем давления откачного поста и наиболее проблемными участками ЭВП выявили характерную непропорциональную зависимость между габаритами ЭВП и величиной проводимости прибора, что подтверждает высказанное выше предположение. В приборах миллиметрового диапазона предпочтительно иметь два штенгеля для откачки: и со стороны коллектора, и со стороны пушки.

Реальное время подъема температуры при соблюдении условий молекулярного течения для большинства ЭВП составляет от нескольких до 29 ч для откачных постов, имеющих предельное давление на уровне $3 \cdot 10^{-6}$ Па с проводимостью штенгеля около 1...5 л/с, если приборы были подготовлены к откачке по традиционной вакуумной технологии.

Экспериментально установлено, что соблюдение режима молекулярного течения при подъеме температуры обезгаживания уменьшает газовыделение при пробоях на порядок по сравнению с режимом без соблюдения режима молекулярного течения во всех частях ЭВП; соответственно уменьшается и время высоковольтной тренировки в несколько раз.

Время обезгаживания при максимальной температуре, режим снижения температуры обезгаживания

Исследования проводились по результатам откачки металлокерамических ЭВП СВЧ. При этом одни приборы откачивались с применением потока водорода в качестве буферного конструирующего газа, другие – по обычной технологии термического обезгаживания, без применения потока водорода. При использовании потока буферного газа последний вводился в вакуумную систему при условии обеспечения молекулярного течения, но при этом давление было выше, чем при обычном высокотемпературном обезгаживании, на 1 – 2 порядка. После проведения обезгаживания с потоком водорода проводились обезгаживание без потока водорода и соответствующие измерения давления газов в вакуумной системе при установленной температуре обезгаживания ЭВП. Для приборов с традиционным высокотемпературным обезгаживанием, без применения потока водорода, измерения давления газов в вакуумной системе проводились сразу после установления максимальной температуры обезгаживания ЭВП.

Результаты экспериментов термического обезгаживания представлены на рис. 3 и 4. Из рисунков видно, что количество линейных участков колеблется от 4 до 5. Существенное отличие этих графиков состоит в том, что предельное давление вакуумного поста на рис. 4 достигало $3 \cdot 10^{-7}$ Па, а на рис. 3 – было много выше этой величины (по факту $6,5 \cdot 10^{-6}$ Па). Ясно, что действие фоновых потоков газа для ЭВП на рис. 3 было сильнее, чем для ЭВП на рис. 4, что проявляется заметным отклонением от линейности. Линейность участков на рис. 4 больше соответствует высказанным теоретическим посылкам. Очевидно, что на рис. 3 снижение давления в ЭВП затруднило выявление участков кривой при давлениях ниже 10^{-6} Па. Таким образом, из экспериментальных данных видна роль откачного поста, что подтверждает действие формул (9) – (11).

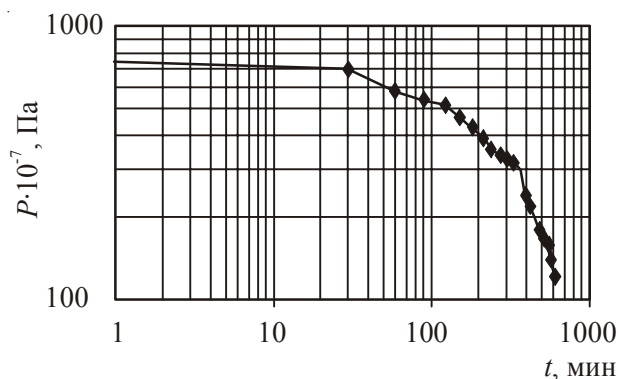


Рис. 3. Изменение давления P в вакуумной системе откачного поста (температура обезгаживания ЭВП – 450 °С; предельное давление вакуумной системы – $6,5 \cdot 10^{-6}$ Па)

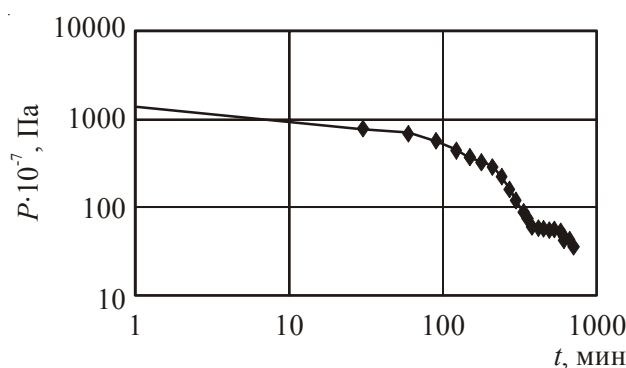


Рис. 4. Изменение давления P в вакуумной системе откачного поста (температура обезгаживания ЭВП – 500 °С; предельное давление вакуумной системы – $3 \cdot 10^{-7}$ Па)

Рис. 5 представляет случай откачки и обезгаживания разных ЭВП с применением потока водорода. После прекращения подачи водорода и продолжения обезгаживания без него зависимость также имеет участки, соответствующие разным механизмам газовой выделению, причем эти участки носят нелинейный характер, отличающийся от традиционного термического обезгаживания ЭВП.

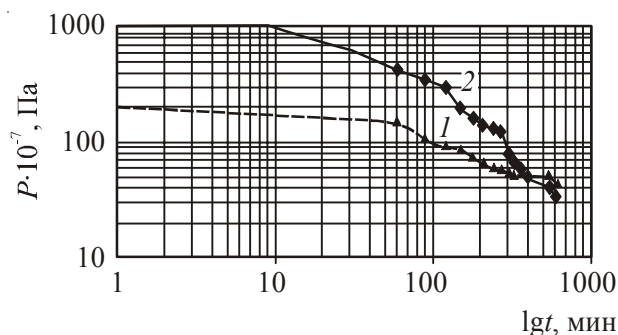


Рис. 5. Изменение давления P в вакуумной системе откачного поста при температуре обезгаживания ЭВП 500 °С после прекращения подачи водорода: 1 – время подачи водорода при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Па и максимальной температуре обезгаживания составляет 15 ч; 2 – 2 ч

Вогнутый характер некоторых участков кривых показывает более сложные процессы, чем процессы газовой выделения при термическом обезгаживании. Такое поведение каждой части кривой может быть только соотнесено с большим влиянием водорода в начале процесса превалирующего газовой выделения и уменьшением его роли по мере окончания этого процесса. Вероятно, разная скорость влияния водорода в пределах одного механизма превалирующего газовой выделения связана с его относительно высоким коэффициентом диффузии, и по мере его истощения и одновременного действия механизма газовой выделения резко уменьшается влияние водорода на данный процесс, что и приводит к вогнутому характеру кривой. То есть механизм газовой выделения испытывает одновременно и действие собственного газовой выделения, и влияние водорода, которые по-разному изменяются во времени.

Большое значение имеет то (см. рис. 5), что время окончания действия превалирующего механизма газовой выделения различно для разных условий обезгаживания ЭВП, за исключением перехода на последний, короткий участок, где резко снижается давление. В эксперименте время воздействия водорода для кривой 1 больше, чем для кривой 2. Таким образом, различное время воздействия водорода на ЭВП в процессе откачки и обезгаживания вызывает и различный отклик материалов ЭВП на это воздействие. Длительное воздействие водорода вызывает и более длительное последствие, что находит подтверждение в работе [8].

Был поставлен эксперимент по определению величины температуры обезгаживания при откачке с потоком водорода, при которой прекращается ход последней вогнутой кривой для ЭВП (рис. 5, кривая 2). Сущность эксперимента заключалась в снижении температуры обезгаживания ЭВП до окончания действия превалирующего механизма газовой выделения, соответствующего второй вогнутой кривой (при $t = 300$ мин был выключен нагрев печи обезгаживания), с целью определения минимальной температуры, при которой происходит более ранний излом кривой, чем это показано на рис. 5.

Зависимости на рис. 6 показывают, что механизм превалирующего газовой выделения с характерной вогнутостью кривой заканчивается раньше, чем это происходит при постоянной температуре обезгаживания (см. рис. 5), где происходит излом кривой. То есть при температурах ниже $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ не происходит эффективного обезгаживания при воздействии водорода. Очевидно, что нельзя снижать температуру ЭВП ниже $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с известным коэффициентом запаса такая температура может быть определена в $250\text{ }^{\circ}\text{C}$) пока не произойдет обезгаживание от водорода, если до этого откачка шла с применением потока водорода.

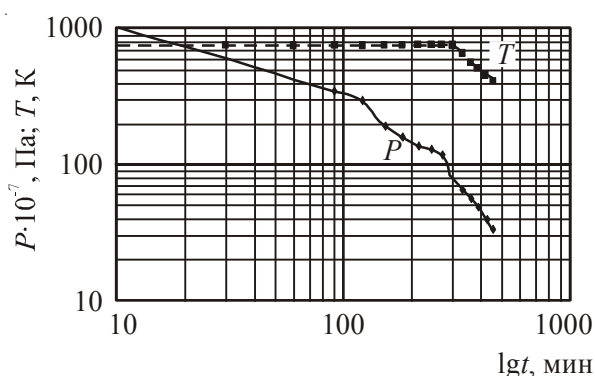


Рис. 6. Изменение давления P в вакуумной системе откачного поста и температуры прибора T после прекращения подачи водорода

Таким образом, для окончания процессов, связанных с десорбцией водорода из прибора и вакуумной системы, критической может считаться температура 250 °С. Одновременно можно констатировать, что после обезгаживания ЭВП с потоком водорода уменьшение температуры прибора ниже 250 °С приводит к возрастающему и существенному влиянию роли обратного потока газов на качество обезгаживания ЭВП. Следовательно, при снижении температуры прибора ниже 250 °С после проведения обезгаживания необходимо принимать меры по снижению действия обратного потока.

Для определения влияния температуры на величину критического времени проведены обезгаживания ЭВП при разных температурах. Эти данные отражены на рис. 7, где приведена кривая для рекомендуемого минимального времени обезгаживания ЭВП (с учетом коэффициента запаса 1,2 относительно максимальной величины измеренного критического времени обезгаживания). Отклонение по обнаруженному критическому времени от средней величины составляет ± 1 ч (термическое обезгаживание без применения потока водорода). Эти данные свидетельствуют о том, что величина критического времени обезгаживания для конкретного ЭВП определяется индивидуальными характеристиками подготовки прибора к процессу откачки и обезгаживания. Одновременно ясно, что режимы обезгаживания имеют общие черты. Учет этих общих закономерностей и отличий приводит к необходимости введения коэффициента запаса по времени обезгаживания, причем относительно максимальной величины критического времени. Критическое время рассчитывалось относительно последнего перегиба зависимости. Из рисунка следует, что снижение времени обезгаживания не пропорционально снижению температуры обезгаживания ЭВП.

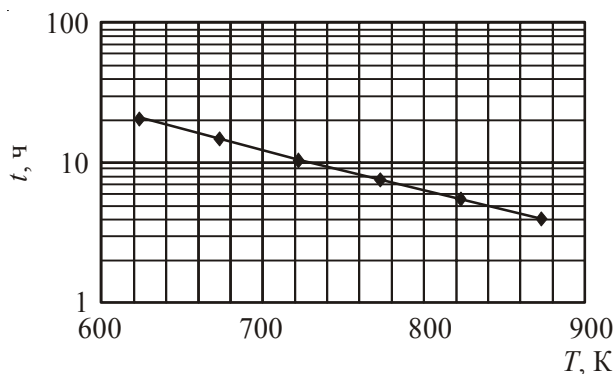


Рис. 7. Зависимость минимально необходимого времени обезгаживания $t_{\text{обезг}}$ металлокерамического ЭВП от температуры T ($t_{\text{обезг}} = 1,2t_{\text{крит}}$)

По результатам проведенных экспериментов для ЭВП [16] вычислена формула для рекомендуемого времени обезгаживания относительно критического времени при установленной температуре T :

$$\lg t_{\text{обезг}} = 3,117 - 0,00288T, \quad (13)$$

$$t_{\text{обезг}} = 1,2t_{\text{кр.макс}}, \quad (14)$$

где $t_{\text{обезг}}$ – рекомендуемое время обезгаживания ЭВП при температуре нагрева T (К), а $t_{\text{кр.макс}}$ – максимальное критическое время обезгаживания (ч), ниже которого не всегда будет преодолен

механизм газовой выделения, который обеспечивает необходимое давление остаточных газов на уровне $(3...7) \cdot 10^{-6}$ Па.

Представляет интерес и скорость изменения давления в вакуумной системе откачного агрегата во время действия каждого из механизмов преобладающего газовой выделения. Типичные кривые такого изменения давления приведены на рис. 8, из которого следует, что газовой выделение из ЭВП, обезгаженного с применением потока водорода, закончилось по окончании действия третьего механизма газовой выделения. Для ЭВП, откачанного без потока водорода, по окончании действия третьего механизма газовой выделения еще продолжается газовой выделение. Рис. 8 показывает преимущества и недостатки обоих способов откачки и обезгаживания ЭВП. Это позволяет выбрать основные направления управления процессом откачки и обезгаживания ЭВП в части формирования необходимой газовой среды остаточных газов в отпаянном приборе. Рис. 8 является наиболее наглядным подтверждением действия критического времени обезгаживания, когда заканчиваются процессы газовой выделения и еще в течение минимального времени действует обратный поток.

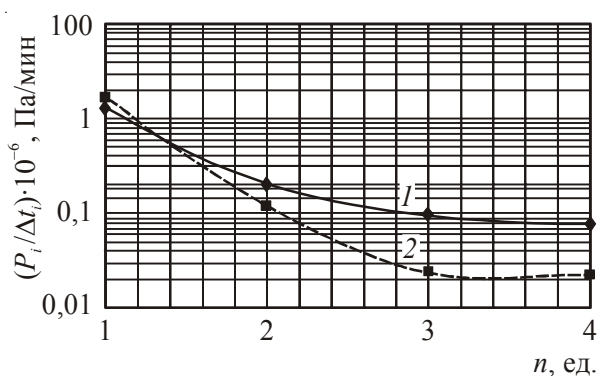


Рис. 8. Скорость изменения давления в вакуумной системе откачного поста по отдельным механизмам преобладающего газовой выделения при обезгаживании ЭВП (1 – термическое обезгаживание; 2 – обезгаживание с потоком водорода; n – номер механизма газовой выделения от начала обезгаживания)

Контроль результатов процесса обезгаживания термическим прогревом отпаянного ЭВП

Контроль проводился двумя способами:

- по результатам термического прогрева отпаянного прибора путем определения величины газовой выделения по показаниям встроенного МЭН;
- по результатам газовой выделения при высоковольтной тренировке, также фиксируемого по току МЭН.

При контроле по результатам прогрева отпаянного ЭВП в соответствии с формулами (5) – (8) процесс проводился до температуры 150 °С, так как большей температуры не требуется (максимум газовой выделения отпаянного и обезгаженного ЭВП в основном приходится на (110 ± 5) °С в отличие от обезгаживания на откачном посту, где максимум газовой выделения соответствует 300...350 °С). Типичные кривые приведены на рис. 9. Проверкой отпаянного ЭВП на величину давления по броску тока МЭН в момент включения насоса и сравнением с данными рис. 9

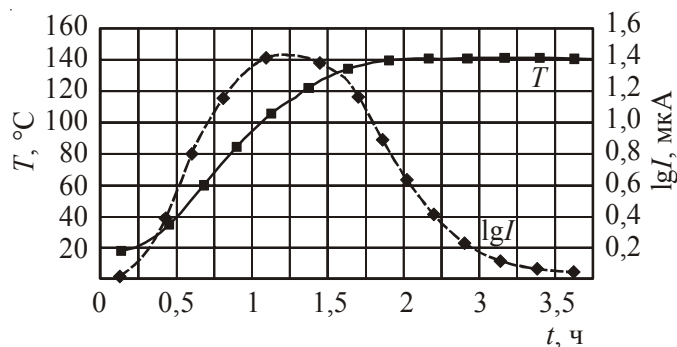


Рис. 9. Изменение температуры прибора T и тока МЭН I в процессе нагрева отпаянного ЭВП

установлено, что газосодержание поверхностей вакуумного объема физически адсорбированного газа в $4 \cdot 10^4 \dots 10^6$ раз больше, чем содержание газа непосредственно вакуумного объема. Установлено также, что газосодержание зависит от условий откачки и подготовки ЭВП к откачке.

Контроль результатов процесса обезгаживания по результатам газовыделения при высоковольтной тренировке

Ток МЭН фиксировался при возникновении пробоев. Соответствующие типичные характеристики газовыделения при тренировке промежутка сетка – анод представлены на рис. 10. Из рисунка следует, что выделение газа нарастает по мере роста напряжения тренировки, что может быть объяснено увеличением энергии пробоя, пропорциональной квадрату напряжения. ЭВП, подлежащие высоковольтной тренировке, отличались друг от друга тем, что выделение газа у одних много больше, чем у других. Приборы с большим выделением газа при пробоях имели большую площадь катода (соответственно и сетки), чем ЭВП с меньшим газовыделением.

При дальнейшем росте напряжения тренировки кривая стремится к насыщению, что соответствует условиям изменения источников газовыделения. Очевидно, насыщение связано с тем, что энергия пробоя расходуется не только на осуществление десорбции газа с поверхности

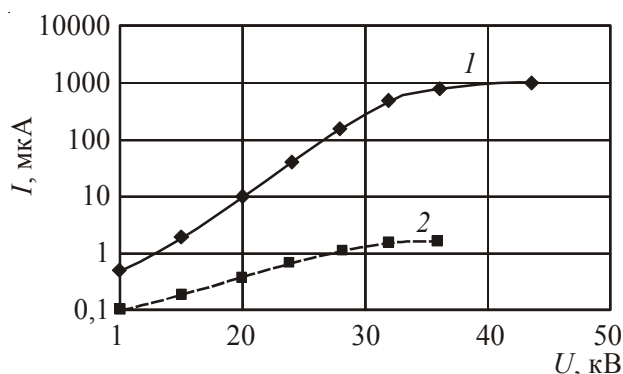


Рис. 10. Изменение максимального тока МЭН I при подъеме напряжения тренировки промежутка сетка – корпус U :
 1 – для ЭВП с большей площадью катода; 2 – для ЭВП с меньшей площадью катода

электродов, но и на прогрев массы материала хорошо обезгаженных поверхностей электродов. В области насыщения может наблюдаться после достижения максимума газовыделения и его падение, несмотря на рост напряжения. Такое возможно в том случае, если исчерпывается источник газа на поверхности электродов, а новое его пополнение из толщи материала электродов меньше существовавшего поверхностного источника.

Газовыделение для разных приборов и соответственно пушек отличалось до трех порядков, а площади катодов и сеток ЭВП отличались в десятки раз. Следовательно, разница в выделении газа при пробоях не может быть объяснена только разницей в площади электродов. Тем более если учесть, что энергия, выделяемая при пробоях, в обоих случаях одинакова.

Подтверждением того, что именно поверхностные газы влияют на вероятность возникновения пробоев, является зависимость, представленная на рис. 11. С целью соблюдения чистоты эксперимента зависимость исследовалась в отсутствие каких-либо других воздействий в это время. Следует отметить, что, как правило, пробои возникают только в первоначальный момент подачи напряжений, если прибор уже до выдержки соответствовал критерию окончания тренировки – не имел пробоев в течение 10 мин при максимальном напряжении тренировки. Ясно, что в процессе выдержки прибора наблюдается эффект накопления газа на поверхности электродов, что и приводит к росту количества пробоев при возрастании времени выдержки ЭВП.

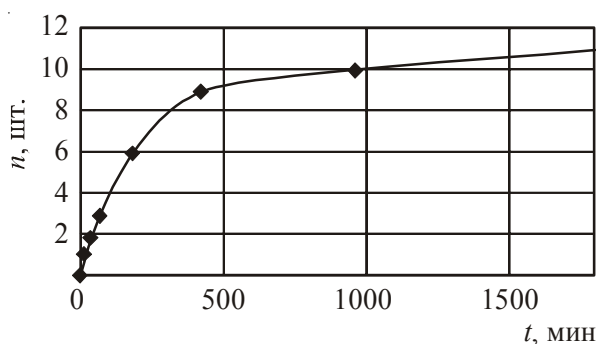


Рис. 11. Зависимость количества пробоев n при подаче максимального напряжения тренировки предварительно тренированного промежутка сетка – корпус от времени выдержки прибора без напряжений t

Если причиной такого поведения являлись бы структурные перестройки поверхностей кристаллических материалов электродов, то газовыделение при вторичном включении напряжения тренировки не приводило бы к заметному изменению давления. Реально такое изменение выделения газа происходит на рис. 12. Зависимости рис. 11. и 12 похожи, они взаимно дополняют друг друга.

Длительный процесс динамической тренировки частично и обусловлен повышенной поверхностной концентрацией газа, а снижение вероятности возникновения пробоев – возможностью сорбции этого газа в приборе, например во встроенном МЭН. Это доказывает рис.13 [6], где приведена зависимость газовыделения (величина газовыделения пропорциональна току МЭН) при тренировке в процессе прохождения прибором технологического цикла его изготовления (при проведении измерений газовыделения величина энергии пробоя была одна и та же).

Динамика процессов выделения и поглощения газов зависит от вакуумной предыстории. Так, в [7] показано, что при наличии «карманов» после длительной выдержки прибора проис-

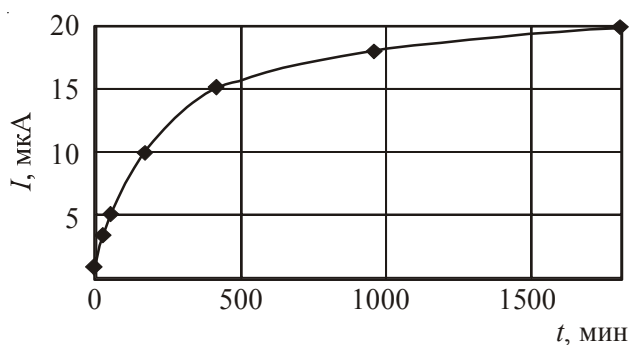


Рис. 12. Зависимость изменения максимального тока МЭН I в процессе тренировки ЭВП при подаче максимального напряжения промежутка сетка – корпус от времени выдержки прибора без напряжений t

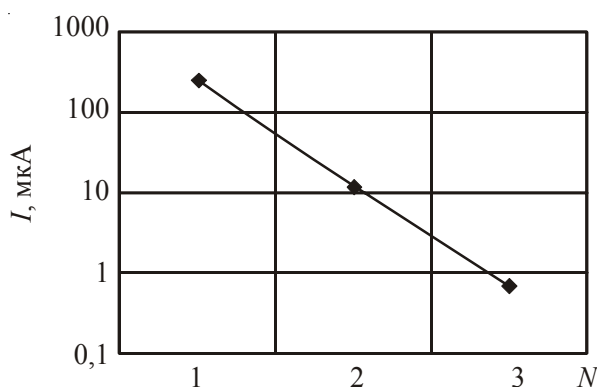


Рис. 13. Зависимость изменения среднего тока МЭН I за один пробой от номера этапа тренировки N (1 – начало предварительной тренировки; 2 – окончание предварительной тренировки; 3 – окончание динамической тренировки)

ходит уменьшение газовыделения, а следовательно, в конечном итоге и уменьшение поверхностного газосодержания. И наоборот, если поверхности ЭВП по тем или иным причинам содержат большое количество газов, то и частота пробоев будет заметно больше, чем в наиболее эффективно обезгаженных приборах.

Приборы с большими мощностями накала катода имеют большие газовыделения в процессе высоковольтной тренировки. Поэтому следует определить причины резкого отличия газовыделения при пробоях разных ЭВП, исходя из отмеченных выше особенностей процесса высоковольтной тренировки, и рассмотреть аспект внесения изменений в технологию откачки в части термовакуумной обработки мощного катодно-подогревательного узла в процессе высокотемпературного обезгаживания прибора. С этой целью были проведены измерения температуры корпуса пушки отпаянного ЭВП при разогреве пушки от источника накала катода. Такая зависимость приведена на рис. 14.

«Перегрев» пушки приводит к дополнительному газовыделению из ее деталей. Выделившиеся газы за счет механизмов их переноса оказываются и на других поверхностях ЭВП, с протеканием соответствующих химических реакций, что в последующем и приводит к повышенному газовыделению в процессе высоковольтной тренировки. Соответствующие кривые максимального газовыделения показаны на рис. 15.

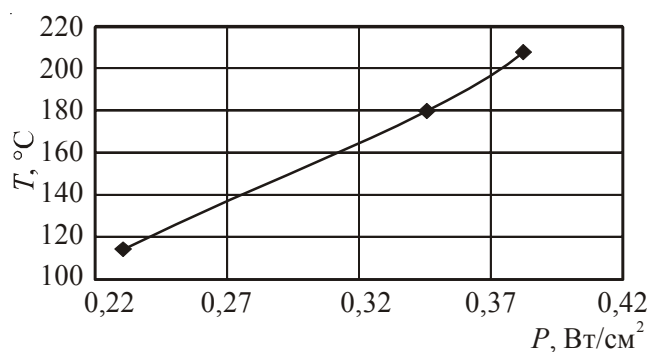


Рис. 14. Зависимость температуры корпуса пушки отпаянного ЭВП T от удельной мощности нагрева пушки подогревателем катода P

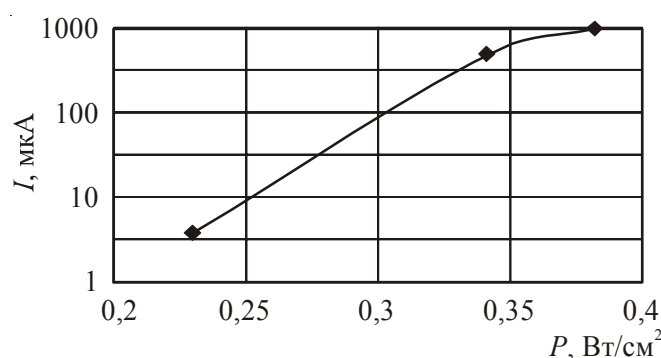


Рис. 15. Зависимость максимального тока МЭН I в процессе тренировки пробоями отпаянного ЭВП от удельной мощности нагрева поверхности пушки

Определено, что безопасной температурой обезгаживания прибора во время обработки катода [17] является температура 400 °С для ЭВП с наибольшим перегревом пушки и 450 °С – для ЭВП с меньшим перегревом. Эта температура зависит от величины рассеиваемой удельной мощности поверхностями пушки ЭВП, что и показано на рис. 16.

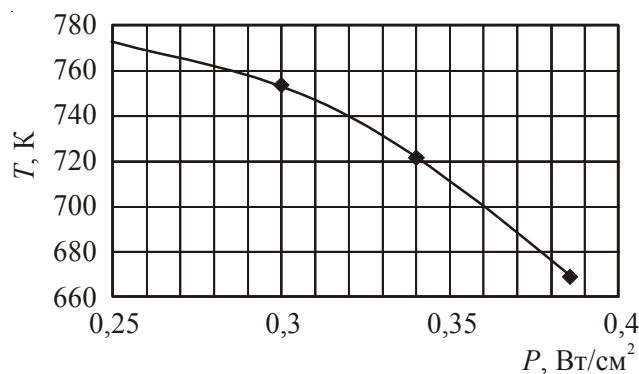


Рис. 16. Зависимость критической температуры обезгаживания ЭВП T от удельной мощности нагрева пушки P

Для того чтобы избавиться от «перегрева» и связанных с ним процессов, обработка катода проведена при меньших температурах корпуса ЭВП, то есть перед обработкой катода температура на корпусе ЭВП снижалась с 500 до 400...450 °С. Приборы, откачанные по измененной технологии, в процессе тренировки имели газовыделение на 1–2 порядка меньше, чем по прежней технологии, когда обезгаживание катода проводилось при температуре 500 °С на корпусе ЭВП. Таким образом, удалось обеспечить компромисс между обезгаживанием прибора и обработкой пушки при разогреве катода.

В целом можно сделать практический вывод: любое увеличение в нормальных условиях температуры пушки свыше 120 °С должно быть скомпенсировано снижением температуры прибора во время его совместного обезгаживания с катодом, если температура обезгаживаемого ЭВП превышает критическую температуру, соответствующую началу повышения поверхностного газосодержания материалов пушки.

В результате исследований величины газовыделения в процессе высоковольтной тренировки установлено, что при очередном повышении напряжения максимум газовыделения происходит после нескольких пробоев (рис. 17), а не после первого пробоя. Известно, что основными парциальными составляющими при возникновении пробоев являются CO/CO_2 . При этом считается, что, несмотря на низкие давления этих газов в составе атмосферы остаточных газов, их появление обусловлено реакциями кислорода с углеродом.

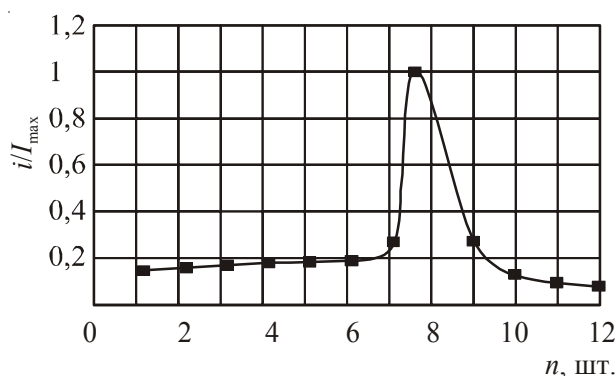


Рис. 17. Зависимость относительной величины газовыделения i/I_{\max} от номера пробоя n при постоянном напряжении тренировки

Исследованиями парциальных давлений газов в процессе откочки и отпайки ЭВП установлено, что причиной появления CO/CO_2 (по крайней мере, в первоначальный период тренировки) в составе остаточной атмосферы при возникновении пробоев не всегда являются реакции углерода и кислорода, но может стать наличие CO_2 в углублениях между кристаллами металлов. Выход CO_2 при возникновении пробоев при этом задерживается по причине нахождения его примерно в средней части углублений и может быть осуществлен только после обеспечения необходимых условий выхода, то есть спустя несколько пробоев после очистки от других газов верхней части углубления, и возможностей десорбции газа из нижележащих слоев.

Такой вывод был сделан на основании теплоты адсорбции различных газов и противоречия в их выделении в процессе отпайки прибора. Изменения парциальных давлений в процессе отпайки приведены на рис. 18, где показаны возможности выхода CO_2 и других газов при расширении промежутков между кристаллами материалов (при проведении эксперимента исполь-

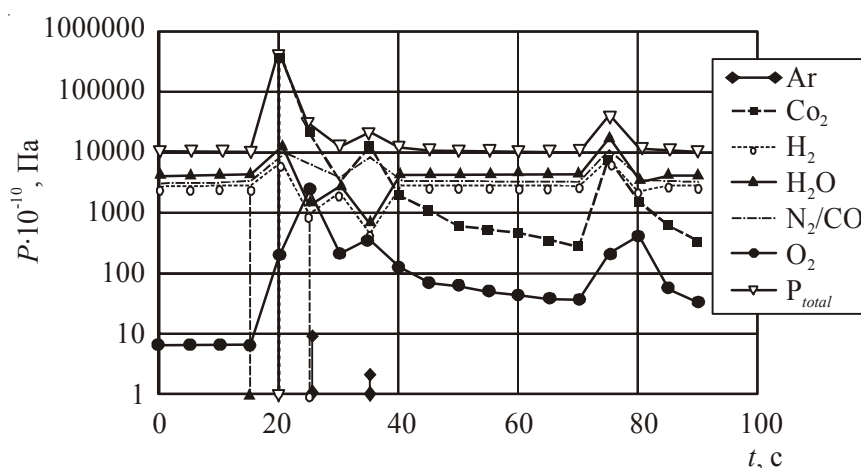


Рис. 18. Изменение парциальных и общего давлений газов P в вакуумной системе откачного поста со средствами откачки, свободными от паров масла, в процессе отпайки ЭВП

зовались безмасляные средства откачки ЭВП, как форвакуумного, так и высоковакуумного насосов, парциальные давления измерялись масс-спектрометром QMS-200M1).

Представляет интерес определение роли влияния как объемного, так и поверхностного газосодержания приборов на частоту возникновения электрических пробоев и причин наличия объемного и поверхностного газосодержания, а также возможностей изменения газосодержания с целью снижения вероятности возникновения пробоев в процессе откачки и термовакuumной обработки прибора.

Газосодержание исследовалось при высоковольтной тренировке отпаянного ЭВП с тремя электродами (катод, сетка, анод) дозированными емкостными разрядами (величина емкости – 0,05 мкФ, сопротивление в цепи заряда конденсатора – 10 МОм, а в цепи разряда – 30 кОм). Тренировка проводилась в следующей последовательности:

- 1) промежуток сетка – корпус (корпус выполняет роль анода) при отрицательной, положительной полярности и повторно при отрицательной полярности сетки;
- 2) промежуток сетка – катод при отрицательной, затем положительной полярности и повторно при отрицательной полярности сетки;
- 3) промежутки сетка – катод и сетка – корпус с одновременной подачей отрицательного напряжения на сетку и положительного напряжения на корпус относительно катода;
- 4) промежуток сетка – катод при отрицательной полярности сетки с одновременной подачей номинального напряжения накала катода;
- 5) промежутки сетка – катод и сетка – корпус с одновременной подачей отрицательного напряжения на сетку и положительного напряжения на корпус относительно катода.

Выбор последовательности тренировки обусловлен необходимостью обеспечения максимального коэффициента запаса по величине напряжения пробоя по известному эффекту повышения электрической прочности при тренировке промежутка в прямой и обратной полярности [11, 12]. При этом первые два этапа служат для подготовки последующих этапов, отражающих в более полной форме реальные условия эксплуатации прибора.

Первые два этапа и четвертый этап тренировки производились при включенном встроенном МЭН, с помощью которого можно не только контролировать величину давления газов в ЭВП [15], но и проследить динамику этого давления. Это позволяло определить величину газовой выделенности при возникновении как отдельных пробоев, так и всей их совокупности, а также проследить динамику изменения газовой выделенности по мере тренировки прибора, в том числе и с подачей напряжения накала катода.

Третий и пятый этапы тренировки не могут быть проведены при включенном насосе, так как величина напряжения корпуса прибора много больше величины напряжения на выводе насоса. Поэтому тренировка велась при отключенном МЭН. Откачка выделенных при пробоях газов проводилась периодически с помощью МЭН при выключенных напряжениях на электродах пушки. В процессе откачки измерялась величина давления газов по величине тока МЭН.

При реализации третьего и пятого этапов во время тренировки с каждым пробоем добавляется новая порция газа, поэтому происходит накопление и соответственно увеличивается давление газов в ЭВП. Следовательно, используя это явление, можно определить зависимость частоты пробоев от величины давления в ЭВП, а из анализа этой зависимости или независимо от нее определить влияние вакуумных условий на величину газовой выделенности при очередном пробое. Таким образом, появляется возможность связать как объемное, так и поверхностное содержание газов в ЭВП с точки зрения их влияния на физические процессы, происходящие во время высоковольтной тренировки, то есть процессы, связанные с газосодержанием в вакуумном объеме и на поверхности этого объема, с вероятностью или частотой возникновения пробоев.

Это позволило снять соответствующие зависимости (рис. 19 и 20). Ясно, что подобные характеристики дают возможность не только определить влияние объемного газосодержания на характеристики пробоев, но и их динамику, а также прогнозировать возможное направление развития процессов.

Из рис. 19 видно, что частота пробоев увеличивается с ростом давления газов в ЭВП, то есть с ростом объемной концентрации газа. Полочка при 800...1000 мкА характеризует изменение степени участия промежутков сетка – корпус и сетка – катод в пробое. Вероятно, что при ухудшении вакуума в приборе пробой в ЭВП полнее захватывает оба промежутка: и сетка – катод, и сетка – анод, что способствует повышению газовой выделенности во время пробоя, и на характеристике появляется полочка, которая подтверждается данными работы [17]. Следует отметить, что стабилизация частоты пробоев на этой полочке соответствует тому, что превалирующий механизм пробоя по газовой выделенности при этом остается прежним. Общая тенденция в увеличении частоты пробоев, а не величины напряжения пробоя в зависимости от давления газов становится очевидной.

Из рис. 20 следует, что газовой выделенности в расчете на один пробой при тренировке двух промежутков одновременно (сетка – катод и сетка – корпус) увеличивается с ростом давления. При этом увеличение давления в 12 раз для исследуемого ЭВП приводит к увеличению газовой выделенности в расчете на один пробой примерно в три раза. Это свидетельствует о том, что газы объема ЭВП, участвующие в пробоях, также влияют на газовой выделенности при пробоях. Поэтому важной особенностью высоковольтной тренировки является то, что и объемные, и поверхностные газы с ростом их количества приводят к росту числа пробоев; эти процессы взаимно дополняют и усиливают друг друга (во всяком случае в области рассматриваемых давлений).

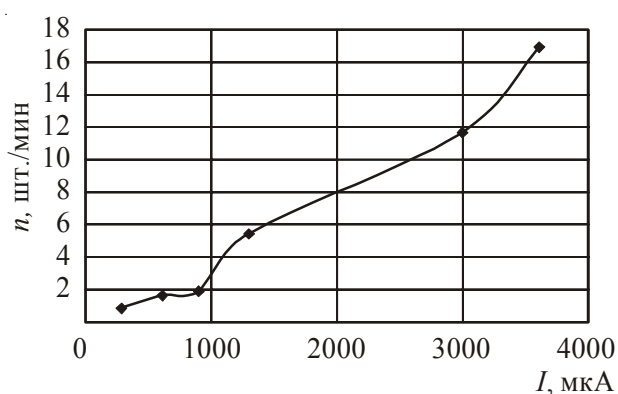


Рис. 19. Зависимость частоты пробоев в процессе одновременной тренировки промежутков сетка – корпус и сетка – катод от величины давления в ЭВП ($P = kI$ – давление, пропорциональное току МЭН, Па; $k = 5,32 \cdot 10^{-6}$ Па/мкА; I – в мкА)

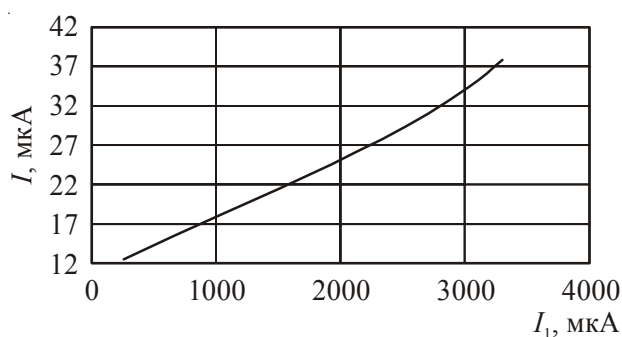


Рис. 20. Зависимость среднего повышения давления за один пробой в процессе одновременной тренировки промежутков сетка – корпус и сетка – катод от величины давления в ЭВП ($P = kI$ – давление, пропорциональное току МЭН, Па; $k = 5,32 \cdot 10^{-6}$ Па/мкА; I – в мкА)

Следовательно, повышение газовыделения приводит и к увеличению частоты пробоев, и к последующему увеличению газовыделения, если не принять меры к удалению газа из разрядного промежутка. Таким образом, возникает необходимость удаления газа из разрядного промежутка. Практически это означает, что в местах интенсивного газовыделения следует принять меры по связыванию выделяющихся газов, что снизит вероятность возникновения пробоев.

Рассмотренные выше проблемы высоковольтной тренировки и откачки показывают тесную связь явлений, происходящих на поверхностях электродов приборов на различных этапах технологического процесса изготовления высоковольтного ЭВП.

5. ВЫВОДЫ

1. Технология откачки и обезгаживания ЭВП должна разрабатываться с учетом особенностей работы прибора в аппаратуре потребителя и особенностей работы отдельных конструктивных элементов при повышенных температурах.

2. Процессы газовыделения при обезгаживании ЭВП отличаются сложностью и неоднозначностью. Для успешного обезгаживания прибора следует обеспечить молекулярное течение газа в процессе откачки прибора. Количество механизмов газовыделения для одних и тех же приборов – непостоянная величина (зафиксировано изменение количества для одних и тех же ЭВП на единицу), что свидетельствует о качестве подготовки ЭВП и вакуумной системы откачного поста к процессу откачки.

3. Минимально необходимое время обезгаживания ЭВП определяется процессами десорбции газов и уменьшается с повышением температуры обезгаживания. Рекомендуемое время обезгаживания нормально подготовленных к откачке металлокерамических ЭВП без учета других технологических обработок обезгаживаемого прибора составляет: для температуры 400 °С – 15 ч, 450 °С – 11 ч, 500 °С – 8 ч, 550 °С – 6 ч.

4. Превышение удельной мощности, рассеиваемой поверхностями пушки, значения 0,24 Вт/см², что соответствует 120 °С на корпусе пушки в номинальном режиме накала катода отпаянного ЭВП, может привести к невозможности качественного одновременного обезгаживания катода и корпуса прибора без риска увеличенного газовыделения в процессе тренировки ЭВП, если максимальная температура обезгаживания выбрана 500 °С

5. Основным источником выделения СО и СО₂ в процессе возникновения электрических пробоев, по крайней мере, в первоначальный период высоковольтной тренировки является поверхностно адсорбированный СО₂ в углублениях щелей и пор поверхностей электродов, участвующих в пробоях.

6. Максимум газовыделения в процессе высоковольтной тренировки при фиксированной величине напряжения между электродами, как правило, не соответствует первому пробую после установления нового значения напряжения тренировки.

7. Обеспечение в отпаянном ЭВП давления остаточных газов $(3...5) \cdot 10^{-6}$ Па не является гарантией низкого газовыделения в процессе высоковольтной тренировки дозированными пробоями. Основной причиной повышенного газовыделения в процессе высоковольтной тренировки пробоями является повышенное поверхностное газосодержание.

8. В высоковольтном электровакуумном приборе с мощным источником накала катода в процессе откачки и термовакуумной обработки катода при одновременном обезгаживании прибора может происходить увеличение поверхностного газосодержания ЭВП до 3 порядков относительно прибора с малой мощностью накала катода. Рост поверхностного газосодержания обусловлен существенным возрастанием температуры корпуса пушки по сравнению с температурой обезгаживания корпуса прибора.

9. Вероятность пробоев возрастает при создании благоприятных условий миграции газов на очищенные поверхности электродов, участвующих в электрических пробоях. Частота пробоев и средняя величина газовыделения за один пробой увеличиваются с ростом давления газов в ЭВП. Для снижения вероятности пробоев необходимо снижать температуру обезгаживания прибора ниже 500 °С, если одновременно обезгаживается катод, а температура корпуса пушки превышает 120 °С в нормальных условиях эксплуатации прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. – М.: Советское радио, 1967.
2. Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. – М.: Советское радио, 1973.
3. Schittko F.J. Gasabmessungen von festen oberflächen // Vakuuum-Technik. – 1963. – Bd. 12, N. 5. – S. 24.
4. Сытник А.Я. Газовыделение и активировка металлопористого катода в условиях откачки электровакуумного прибора // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 12. – С. 27-30.
5. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1988.
6. Корепин Г.Ф., Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Определение источника газовыделения в процессе высоковольтной тренировки ЭВП // Научные технологии. – 2005. – Т. 6, № 5. – С. 47-50.
7. Волчеквич А.И. Некоторые особенности работы магниторазрядного насоса в области давлений $\leq 10^{-10}$ торр // Вакуумная наука и техника: материалы конф. МИЭМ, сентябрь 2005. – С. 87-88.
8. Корепин Г.Ф., Полевич А.И. Динамика коэффициента компрессии форвакуумного насоса по водороду // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14, № 3. – С. 139-147.
9. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники; пер. с англ. – М.: Мир, 1964.
10. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. – Л.: Машиностроение, 1975.
11. Татарникова Н.В. Влияние процессов в порах поверхностей электродов на вакуумную электроизоляцию: дисс. д. ф-м. н. – М.: МИФИ, 1998.
12. Корепин Г.Ф., Киселев А.Б. Моделирование процессов термовакуумной обработки мощных СВЧ приборов с целью повышения их электрической прочности // Участие молодых ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий: сб. научн. докл. 4 междунар. научно-практ. конф. – М., 2003. – С. 224 – 232.
13. Латан Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. Электрический пробой и разряд в вакууме / И.Н. Сливков, В.И. Михайлов, Н.И. Сидоров, А.И. Настюха. – М.: Атомиздат, 1966.
15. Зильберман М.М., Когель М.Л. Вакуумный пробой в высоковольтном триоде с оксидноникелевым катодом // Вакуумная наука и техника: материалы конф., Крым, 2002. – С. 331-333.
16. Корепин Г.Ф. Критическое время обезгаживания ЭВП СВЧ // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 167-175.
17. Корепин Г.Ф. Термовакуумная обработка электронной пушки и вероятность электрических пробоев высоковольтных ЭВП // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т. 17, № 2. – С. 123-130.

Статья поступила 9 октября 2007 г.

УДК 621.372.852.029.64

СВЧ-ФИЛЬТРЫ НА ПОЛУСОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ЕМКОСТНЫМИ И ИНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

И. Н. Дутьшев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработаны СВЧ-фильтры дм-диапазона на полусосредоточенных элементах с емкостными и индуктивными связями. Приведены методики расчета и экспериментальные характеристики фильтров.

Decimeter-range microwave filters on semi-lumped elements with capacitance and inductivity connections have been developed. The calculation methods and experimental characteristics of the filters are shown.

КС: фильтр, полусосредоточенный элемент, емкостная связь, индуктивная связь

1. РАСЧЕТ ФИЛЬТРА С ЕМКОСТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Рассмотрим конструкцию фильтра с емкостными связями (рис. 1). Фильтр имеет n контуров, которые состоят из индуктивностей L_k , образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением, и емкостей C_k с низким волновым сопротивлением. Длина

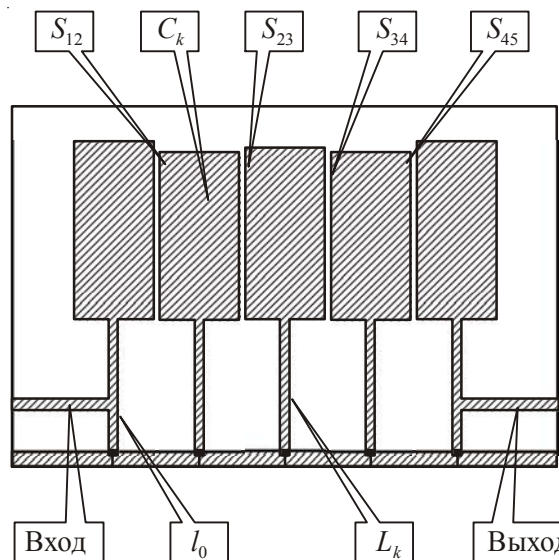


Рис. 1. Топология фильтра на полусосредоточенных элементах с емкостными связями

каждого элемента фильтра меньше четверти длины волны на средней частоте полосы пропускания. Один конец индуктивности короткозамкнутый, а другой – соединен с емкостью. Емкости связи $C_{k,k+1}$ созданы за счет краевых полей между соседними емкостными отрезками. Длина области связи $-l_{cb} = l_{kc}$. Ширина зазора в области связи $-S_{k,k+1}$. Нагрузка и генератор подключены к части крайних индуктивных отрезков. Длина от короткозамкнутого конца до места подключения нагрузки и генератора $-l_0$. Коэффициент включения $-k = l_{1L}/l_0 = l_{5L}/l_0$.

Для расчета такой конструкции можно воспользоваться эквивалентной схемой, показанной на рис. 2.

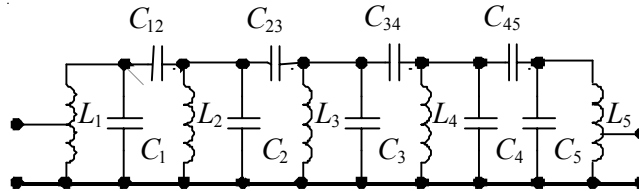


Рис. 2. Эквивалентная схема фильтра

Расчет элементов эквивалентной схемы (рис. 2) ведется по формулам [1] с учетом частичного включения генератора и нагрузки.

$$C_{r1} = C_{r2} = C_{r3} = C_{r4} = C_{r5} = \frac{G_1}{(\omega_2 - \omega_1)k^2 R_H}, \quad (1)$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = \frac{1}{\omega_0^2 C_{r1}}, \quad (2)$$

$$C_{12} = C_{45} = \frac{\omega_0}{\omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{(\omega_2 - \omega_1)C_{r2}}{k^2 R_H G_1}}, \quad (3)$$

$$C_{23} = C_{34} = \frac{\omega_0 (\omega_2 - \omega_1)}{\omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{C_{r2} C_{r3}}{G_2 G_3}}, \quad (4)$$

$$C_1 = C_5 = C_{r1} - C_{1,2}, \quad (5)$$

$$C_2 = C_4 = C_{r2} - C_{1,2} - C_{2,3}, \quad (6)$$

$$C_3 = C_{r3} - C_{2,3} - C_{3,4}, \quad (7)$$

где ω_2, ω_1 – верхняя и нижняя граничные частота полосы пропускания; k – коэффициент включения в контур; $C_1 \dots C_5$ – емкости параллельных контуров; $L_1 \dots L_5$ – индуктивности параллельных контуров; $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$ – центральная частота полосы пропускания фильтра.

Расчеты и эксперименты показали, что минимальные габариты при удовлетворительных характеристиках могут быть получены для фильтров на полусосредоточенных элементах с емкостными связями для полос пропускания от 3 до 25 %. Однако расчет элементов фильтров по методикам [1, 2] приводит к существенным различиям расчетных и экспериментальных характеристик, вследствие трудностей получения требуемых номиналов элементов и учета паразитных связей между элементами. Для того чтобы получить реализуемые геометрические разме-

ры элементов фильтра, автором была разработана методика расчета с частичным включением генератора и нагрузки в контур [3]. Суть методики заключается в том, что оптимальный коэффициент включения находится из минимума целевой функции. Целевая функция включает в себя отношения оптимальных номиналов элементов фильтра (емкостей, индуктивностей, резонансных контуров и емкостей связи) к их расчетным значениям при коэффициенте включения, равном единице. Если ограничиться только членами целевой функции, которые влияют на емкости параллельных контуров (далее покажем, что в этом случае габариты индуктивных элементов получаются в допустимых пределах), тогда будем иметь следующее выражение для целевой функции:

$$F(k) = \sum \delta_k \frac{C_k}{C_k^1 k^2} + \sum \beta_k \frac{C_k^0 k^2}{C_k} \quad (8)$$

Полагая, что

$$C_k^1 = C_k^0 = \frac{\sqrt{e_{эф}} l_{kC}}{Z_0^C v_0} \quad (9)$$

($l_{kC} = \alpha\lambda$ – длина емкостного отрезка), и подставив в (8) выражение (9) и значение $C_k = C_{r1}$, из выражения (1) при $k = 1$ получим

$$F(k) = n \frac{G_1 Z_0^C}{2\rho\delta\Delta\psi R_n k^2} + n \frac{2\rho\delta\Delta\psi R_n k^2}{G_1 Z_0^C},$$

где Z_0^C – волновое сопротивление емкостного отрезка; $\Delta\omega$ – относительная полоса пропускания.

Найдем минимум целевой функции. Для этого продифференцируем выражение для целевой функции и производную приравняем к нулю. В результате получим

$$k^2 = \frac{G_1 Z_0^C}{2\rho\delta\Delta\psi R_n} \quad (10)$$

Для волнового сопротивления в (10) подставим приближенное выражение:

$$Z_0^C = \frac{300}{\sqrt{e} \left(1 + \frac{W}{h_0}\right)} \quad (11)$$

При этом будем считать, что ширина емкостного отрезка W равна βl_{kC} . Тогда имеем

$$Z_0^C = \frac{300}{\sqrt{e} \left(1 + \frac{2\rho\beta v_0}{h_0 \psi_0 \sqrt{e_{эф}}}\right)} \quad (12)$$

Подставляя волновое сопротивление из последнего выражения в (10), получим для коэффициента включения

$$k^2 = \frac{300 G_1}{2\rho\delta\Delta\psi R_n \sqrt{e} \left(1 + \frac{2\rho\beta v_0}{h_0 \psi_0 \sqrt{e_{эф}}}\right)} \quad (13)$$

Оценим длину индуктивного элемента фильтра при найденном коэффициенте включения, для чего определим: $l_{kL} = \gamma\lambda$. Найдем γ , используя формулы (1), (2) и выражение

$$L_k = (Z_0 \sqrt{\epsilon_{эф}} l_{kL}) / v_0 : \quad \Gamma = \frac{Z_0^C}{4p^2 Z_0^L \delta} \quad (14)$$

При минимальных габаритах фильтра $\alpha + \gamma = \min$, что достигается, согласно (14), при $\alpha = \gamma$. Тогда

$$\Gamma = \delta = \frac{\sqrt{Z_0^C / Z_0^L}}{2p}$$

Волновое сопротивление емкостного отрезка много меньше волнового сопротивления индуктивного, что заранее нами было оговорено, тогда $\gamma = \alpha < 1/2\pi$. Таким образом, длина индуктивного отрезка $l_{kL} < \lambda/2\pi$, что вполне удовлетворяет требованию: $l_{kL} < \lambda/4$.

Для определения зазоров связи можно воспользоваться зависимостью [2], приведенной на рис. 3 для подложки с $\epsilon = 9,5$ (h_0 – толщина подложки; $C_{k,k+1}$ – емкость связи, пФ; $l_{св}$ – длина области связи, см). Длины емкостных и индуктивных отрезков вычисляются из (15), (16).

$$l_{kC} = \frac{C_k Z_0^C v_0}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \quad (15)$$

$$l_{kL} = \frac{L_k v_0}{Z_0^L \sqrt{\epsilon_{эф}}} \quad (16)$$

Таким образом, для расчета фильтра на полусосредоточенных элементах с емкостными связями необходимо выполнить следующие вычисления.

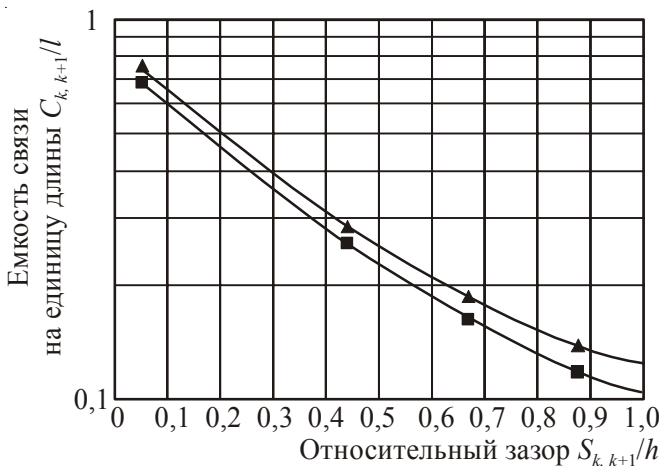


Рис. 3. Зависимость для определения зазоров связи:

—□— $W/h = 2$; —△— $W/h = 9$

1. Находится коэффициент включения из формулы (13).

2. По формулам (1) – (7) рассчитывается эквивалентная схема фильтра с учетом коэффициента включения.

3. По формулам (15), (16) определяются геометрические размеры элементов фильтра. При этом волновое сопротивление емкостных отрезков рассчитывается по формуле (12), а индуктивных берется в пределах 50...80 Ом. Рассчитывается длина отрезка индуктивности l_0 от короткозамкнутого конца до места подключения нагрузки и генератора по формуле: $l_0 = l_{kL}/k$.

4. По зависимости рис. 3 находят зазоры связи.

Примечание. При расчете фильтра следует увеличить полосу пропускания на 20 %, т. к. резонаторы на микрополосковых линиях имеют низкую добротность, а это приводит к уменьшению коэффициента прямоугольности и сужению полосы пропускания. Для выбора оптимального коэффициента включения можно воспользоваться зависимостью рис. 4, составленной на основе экспериментальных данных. Зависимость приведена для подложки толщиной 0,5 мм; $\epsilon = 9,5$; $\alpha = 1/14$; $\beta = 1/3$.

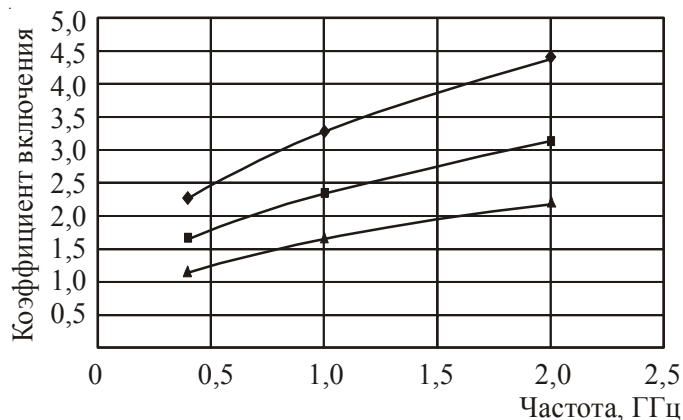


Рис. 4. Зависимость для расчета оптимального коэффициента включения нагрузки в контур:

—◆— полоса пропускания 5 %; —◻— полоса пропускания 10 %;
—▲— полоса пропускания 20 %

Приведем пример расчета пятизвенного фильтра.

Параметры: центральная частота – 950 МГц, полоса пропускания – 30 МГц по уровню 1 дБ. Следуя приведенной выше методике расчета, выполняем п. 1...4 с учетом примечания:

а) по формуле (10) находим коэффициент включения. При этом выбираем $\alpha = 1/21$, $W_c = 4,5$ мм. В результате получаем $k = 5,1$;

б) рассчитаем по формулам (1) – (7) элементы эквивалентной схемы фильтра (табл. 1) с найденным коэффициентом включения;

Таблица 1

Номер резонатора	C , пФ	L , нГн	$C_{k,k+1}$, пФ
1	4,97	5,5	0,13 0,11 0,11 0,13
2	4,86	5,5	
3	4,88	5,5	
4	4,86	5,5	
5	4,97	5,5	

в) по формулам (15), (16) рассчитаем геометрические размеры элементов фильтра. Волновое сопротивление индуктивной полоски выбираем равным 75 Ом, что соответствует ширине по-

лосковых линий 0,2 мм, рассчитанной по приближенной формуле: $W = h_0 \left(\frac{300}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right)$. Волновое сопротивление емкостного отрезка Z_0^C составляет 9,75 Ом;

г) для определения зазоров воспользуемся зависимостью рис. 3. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер резонатора	l_C , мм	W_C , мм	l_L , мм	W_L , мм	$S_{k,k+1}$, мм
1	5,6	4,5	8,5	0,2	0,26
2	5,48	4,5	8,5	0,2	
3	5,5	4,5	8,5	0,2	
4	5,48	4,5	8,5	0,2	
5	5,6	4,5	8,5	0,2	

На рис. 5 представлена топология рассчитанного фильтра. На рис. 6 – его фотография. На рис. 7 приведена АЧХ экспериментального образца фильтра.

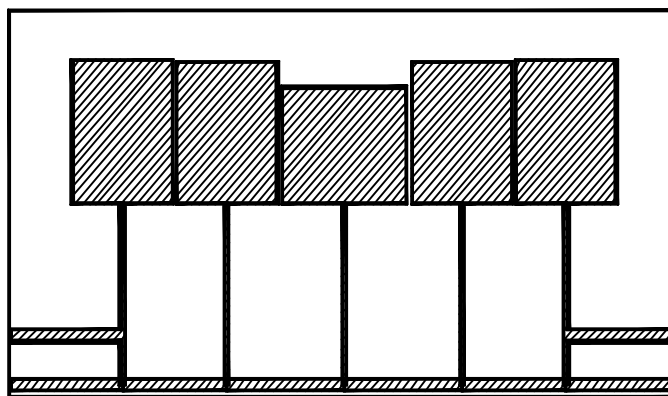


Рис. 5. Топология рассчитанного фильтра

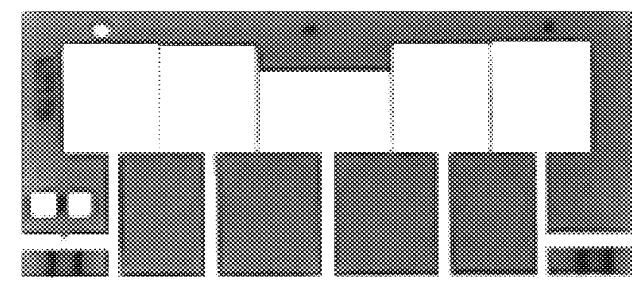


Рис. 6. Фильтр с емкостными связями

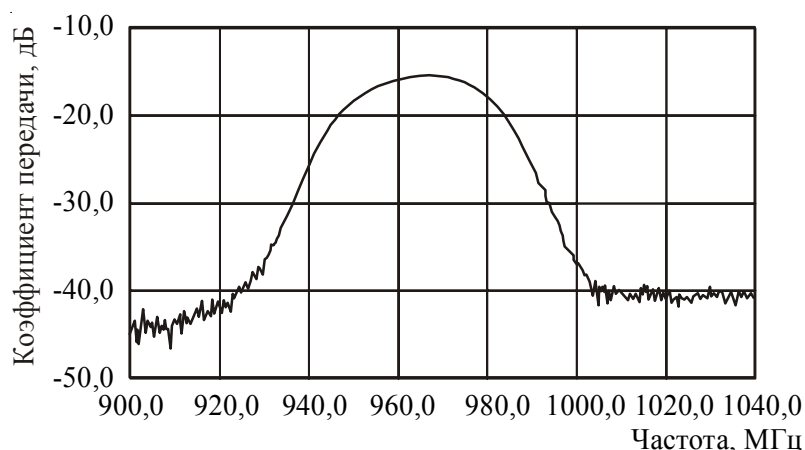


Рис. 7. АЧХ экспериментального образца фильтра

Сравнивая заданные параметры с экспериментальными значениями, можно сделать следующие выводы: заданная полоса пропускания – 30 МГц, экспериментальное значение – 28 МГц; заданная центральная частота – 950 МГц, экспериментальное значение – 965 МГц; точность расчета фильтра составляет около 1,5 %.

Подстройку фильтра рекомендуется выполнять следующим образом. Для увеличения центральной частоты на индуктивные отрезки микрополосковой линии вблизи заземления припаиваются пластинки из тонкой фольги одинакового размера, размер пластинок подбирается экспериментально. Для уменьшения центральной частоты при помощи пластинок увеличиваются контурные емкости. Увеличения полосы пропускания можно достичь за счет наложения пластинок из диэлектрика с высоким ϵ на область связи, уменьшения полосы пропускания – только путем коррекции топологии (увеличения зазоров). Отметим также, что после подстройки при помощи пластинок фильтр будет иметь большие потери из-за неоднородностей, возникших в местах пайки настроечных пластин.

2. РАСЧЕТ ФИЛЬТРА С ИНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

При разработке фильтров с полосой пропускания более 20 % целесообразно использовать в качестве связи между контурами индуктивные отрезки длиной менее $\lambda/4$, что будет показано ниже.

Конструктивно фильтр выполняется в виде n контуров, которые состоят из индуктивностей L_k , образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением, и емкостей C_k с низким волновым сопротивлением (рис. 8). Длина каждого элемента фильтра меньше четверти длины волны на средней частоте полосы пропускания. Один конец индуктивности короткозамкнутый, а другой – соединен с емкостью. Связь между контурами осуществляется за счет включения между ними последовательных индуктивностей $L_{k,k+1}$. Нагрузка и генератор подключены к части крайних индуктивных отрезков. Длина от короткозамкнутого конца до места подключения нагрузки и генератора – l_0 . Коэффициент включения – $k = l_{1L}/l_0 = l_{2L}/l_0$.

Для расчета такой конструкции можно воспользоваться эквивалентной схемой, приведенной на рис. 9.

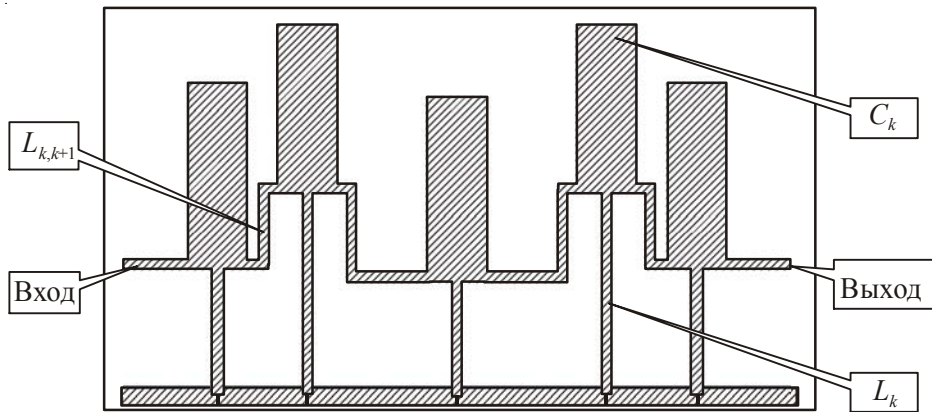


Рис. 8. Топология фильтра на полусосредоточенных элементах с индуктивными связями

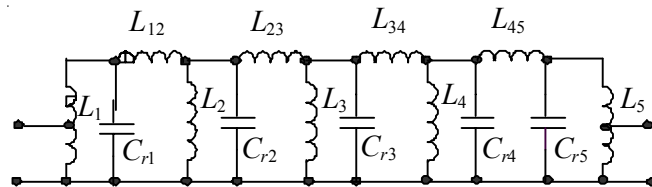


Рис. 9. Эквивалентная схема квазиполиномиального фильтра с индуктивными связями

Элементы эквивалентной схемы фильтра будут вычисляться по формулам [1]:

$$C_{r1} = C_{rk} = \frac{G_1}{(\omega_2 - \omega_1)k^2 R_H}, \quad (17)$$

$$L_{r1} = L_{rk} = \frac{1}{\omega_0^2 C_{r1}}, \quad (18)$$

$$L_{1,2} = L_{n-1,n} = \sqrt{\frac{k^2 R_H G_1 L_{r1}}{(\omega_2 - \omega_1)}}, \quad (19)$$

$$L_{k,k+1} = \frac{\omega_0}{(\omega_2 - \omega_1)} \sqrt{G_k G_{k+1} L_{rk} L_{rk+1}}, \quad (20)$$

$$L_1 = L_n = \frac{L_{r1} L_{12}}{L_{12} - L_{r1}}, \quad (21)$$

$$\frac{1}{L_k} = \frac{1}{L_{rk}} - \frac{1}{L_{k-1,k}} - \frac{1}{L_{k,k+1}}, \quad (22)$$

где ω_2, ω_1 – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания; $C_{r1} = C_{rk} = C_{rn}$ – емкости параллельных контуров; L_1, L_k, L_n – индуктивности параллельных контуров; k – коэффициент включения

ния в контур (находится из условия минимума целевой функции, см. выражение (10)). Учитывая, что $L_{\text{св}} < \frac{Z_0^{\text{св}} \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}{\nu_0} \times \frac{\pi}{4}$, где $L_{\text{св}}$ – индуктивность связи между резонаторами, подставляем в последнее неравенство выражение (19) для $L_{\text{св}}$ и заменяем $\lambda/4$ на $\nu_0 / (4f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}})$. После преобразования с использованием (17), (18) получим

$$\frac{pZ_0^{\text{св}}}{2R_{\text{н}}} > k^2 \geq 1, \quad (23)$$

где $Z_0^{\text{св}}$ – волновое сопротивление индуктивности связи.

Из последнего неравенства, учитывая выражение (10) для коэффициента включения, получим ограничение для полосы пропускания:

$$\Delta\omega > \frac{Z_0^{\text{св}} G_1}{p^2 b Z_0^{\text{св}}}.$$

При типичных значениях ($Z_0^{\text{св}} = 15$ Ом, $Z_0^{\text{св}} = 80$ Ом, $\alpha = 1/8$, $G_1 = 1,5$) получим: $\Delta\omega > 22,5$ %.

Таким образом, для расчета фильтра на полусосредоточенных элементах с индуктивными связями необходимо выполнить следующие вычисления:

1. Находится коэффициент включения из формул (10) или (13).
2. По формулам (17) – (22) рассчитывается эквивалентная схема фильтра с учетом коэффициента включения.
3. По формулам (15), (16) рассчитываются геометрические размеры элементов фильтра. При этом волновое сопротивление индуктивных отрезков выбирается в пределах 50...80 Ом, емкостных – вычисляется по формуле (12). Ширина микрополосковых линий определяется по формуле:

$$W = h_0 \left(\frac{300}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right).$$

4. Рассчитывается длина отрезка индуктивности от короткозамкнутого конца до места подключения нагрузки и генератора l_0 по формуле $l_0 = l_{\text{кл}}/k$.

5. Для коэффициента включения проверяется неравенство (23).

Приведем пример расчета пятизвенного фильтра.

Параметры: центральная частота – 600 МГц; полоса пропускания – 240 МГц; неравномерность в полосе пропускания – 1дБ. Фильтр должен быть выполнен на подложке из материала поликор с $\epsilon = 9,5$, толщиной 0,5 мм.

Выбираем эквивалентную схему фильтра (рис. 8). Для расчета фильтра выполняем п. 1...5 вышеприведенной методики:

- а) находим коэффициент включения: $k = 1$;
- б) рассчитаем по формулам (17) – (22) элементы эквивалентной схемы фильтра с коэффициентом включения $k = 1$. Результаты расчета сведены в табл. 3;

Таблица 3

Номер резонатора	C_r , пФ	L , нГн	$L_{k,k+1}$, нГн
1	16,8	5,8	15,66
2	16,8	8,2	
3	16,8	7,4	
4	16,8	8,2	
5	16,8	5,8	

в) волновое сопротивление емкостных отрезков – 10 Ом, для индуктивностей связи – 80 Ом, для контурных индуктивностей – 50 Ом. Результаты расчета геометрических размеров представлены в табл. 4.

Таблица 4

Номер резонатора	l_C , мм	W_C , мм	l_L , мм	W_L , мм	$l_{k,k+1}$, мм	$W_{k,k+1}$, мм
1	6	4,4	13,5	0,5	22,2	0,12
2	6	4,4	19,1	0,2		
3	6	4,4	17,2	0,2		
4	6	4,4	19,1	0,2		
5	6	4,4	13,5	0,5		

На рис. 10 показана фотография фильтра. Фильтр выполнен на подложке из материала поликор с $\epsilon = 9,5$, толщиной 0,5 мм, размеры подложки – 48 × 36 мм.

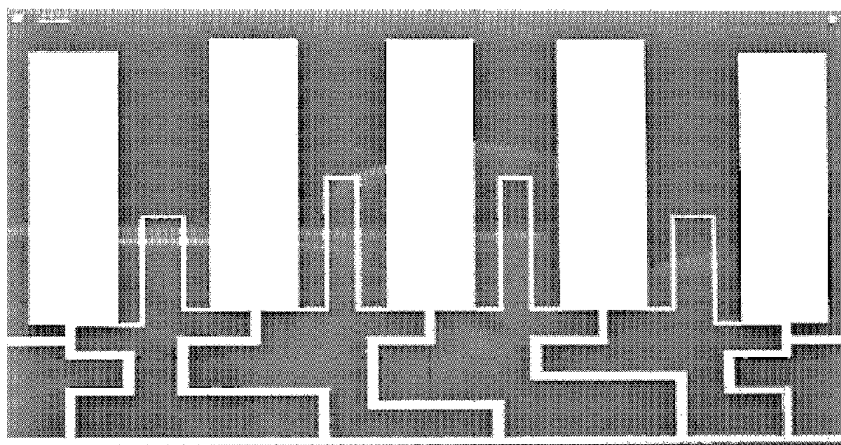


Рис. 10. Фильтр с индуктивными связями

Измерения АЧХ фильтра (рис. 11) проводились на измерителе КСВН. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы: заданная неравномерность в полосе пропускания – 1 дБ, экспериментальное значение – 1,5 дБ; заданная полоса пропускания – 240 МГц, экспериментальное значение – 260 МГц; заданная центральная частота – 600 МГц, экспериментальное значение – 540 МГц. При расчете топологии фильтра не учитывались неоднородности в Т-соединениях, краевые емкости емкостных отрезков, связи между микрополосковыми линиями и их добротности. Однако при всех перечисленных недостатках методики расчета получились достаточно хорошие результаты (точность выхода на частоту – около 10 %).

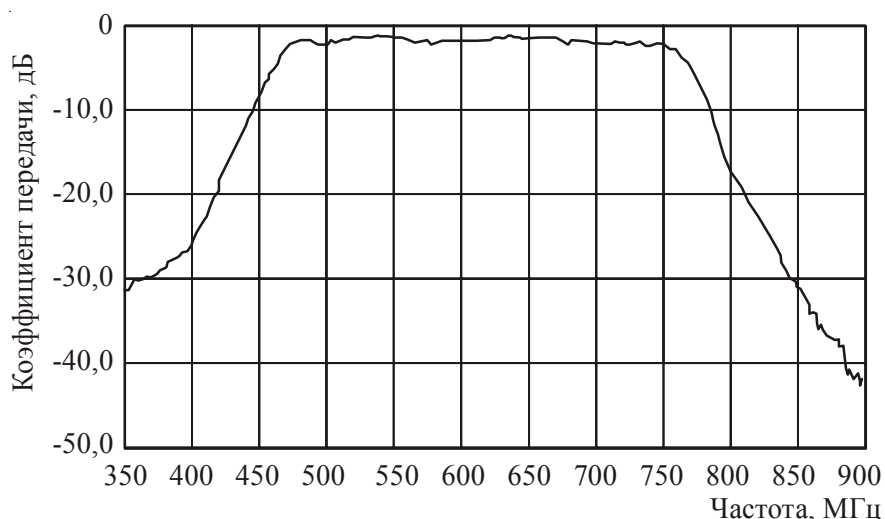


Рис. 11. АЧХ экспериментального образца фильтра после подстройки

Подстройка фильтра выполнялась следующим образом. Для увеличения центральной частоты уменьшались емкости параллельных контуров путем их стравливания. В качестве сравнения приведем параметры широкополосного фильтра, известного из литературы [4]: центральная частота – 2,5 ГГц; полоса пропускания по уровню 3 дБ – 60 %; вносимые потери – 0,9 дБ; размеры – 22 × 24 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров: пер. с англ. В.А. Старостина; под редакцией Е.А. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974.
2. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазенева, В.П. Мещанов и др.; под редакцией А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979.
3. Дутьшев И.Н., Левитин В.И. Полосовые фильтры дециметрового диапазона на гибридных интегральных микросхемах // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 2 (326).
4. Compact wide-band bandpass filter using microstrip to slotline broadside-coupling / M.K. Mandal et al. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2007. – Vol. 17, No 9. – P. 640-642.

Статья поступила 22 мая 2008 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Белая книга по нанотехнологиям: Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации (по материалам Первого Всероссийского совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий) / В.И. Аржанцев, С.Е. Шишов и др. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 344 с.: ил.

Белая книга подготовлена по итогам Первого Всероссийского совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий «Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации» и результатам опроса ведущих специалистов по нанотехнологии. Она представляет собой сборник аннотаций проводимых работ и перечень организаций России на май 2006 года, работающих в области исследования наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов и практической реализации наноматериалов. В Белой книге беспристрастно и объективно каталогизированы работы ведущих научных школ Российской академии наук, государственных образовательных учреждений, производственных корпораций и предприятий малого и среднего бизнеса.

В книге систематизированы работы по пяти основным направлениям исследований – химия, физика, биология наноразмерного состояния, образование (подготовка специалистов высшей квалификации и среднего звена в области нанотехнологий), производство и применение наноматериалов в России.

Книга предназначена для научных сотрудников, предпринимателей, государственных служащих, студентов и аспирантов, специализирующихся в данной отрасли.

Ч. ПУЛ – мл., Ф. ОУЭНС. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с., ил.

Первое руководство на русском языке, описывающее структуру и свойства наноматериалов от твердотельных до биологических объектов. Исчерпывающе изложены технологии изготовления и методы исследования наноструктур, разнообразные применения – от оптоэлектроники до катализа и биотехнологий.

Третье издание дополнено новыми материалами по методическим аспектам «индустрии наносистем» и применению нанотехнологий.

Учебник-монография адресован широкому кругу научных работников, инженеров-электронщиков, специалистов в областях химических и биотехнологий.

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 публикации (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 Wordе 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.

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. 7,5	Формат 60×88 ^{1/8}
30.12.2008 г.	Уч.-изд. л. 8	Тираж 500
Заказ № 418	Индекс 36292	3 статьи

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