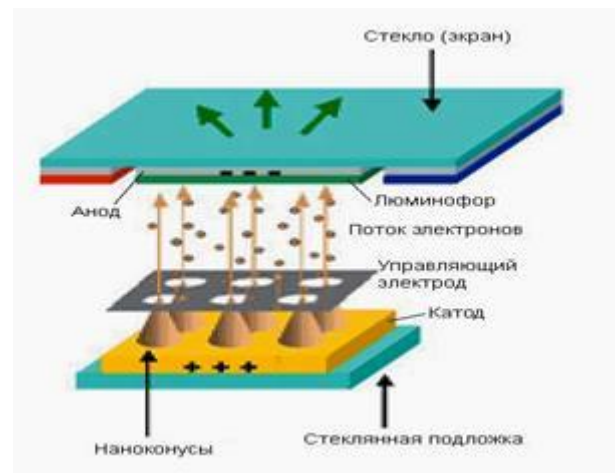
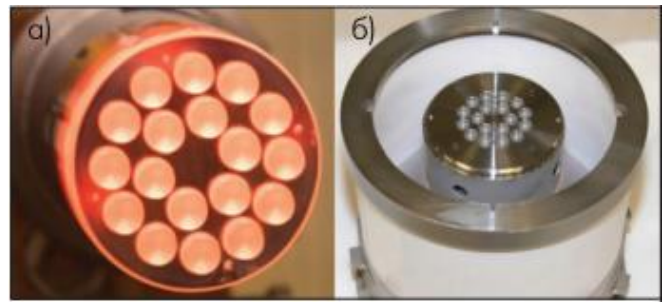


Т. Г. ШИКОВА

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие



Иваново

2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

Т. Г. ШИКОВА

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Иваново 2019

УДК 621.385

Шикова Т.Г.

Технология и оборудование производства изделий электронной техники: учеб. пособие / Т.Г. Шикова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2019.- 129 с.

В учебном пособии рассмотрены: классификация, свойства, области применения термоэлектронных катодов, способы их приближенного расчета. Подробно представлен ряд технологических операций производства вакуумных и газоразрядных приборов. На примере отдельных изделий электронной техники показан подход к составлению технологических схем и анализу технологии изготовления. В каждом разделе приведены задания для самостоятельной работы студентов. В приложениях представлены справочные данные по свойствам различных материалов, используемых в электровакуумной технологии, необходимые для выполнения самостоятельных заданий.

Предназначено для практических занятий и самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению 18.03.01 «Химическая технология», профиль «Технология материалов и изделий электроники и наноэлектроники».

Табл. 14. Ил. 60. Библиогр.: 27 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

начальник лаборатории АО "НПП "Исток" им. Шокина" Н.А. Кувшинова;

доктор технических наук, профессор В.К. Семенов (Ивановский государственный энергетический университет).

© Шикова Т.Г., 2019

© ФГБОУ ВО «Ивановский

государственный химико-

технологический университет», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения дисциплины «Технология и оборудование производства изделий электронной техники» являются изучение технологии и оборудования для производства вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых и других твердотельных приборов; способов управления технологическими процессами и качеством готового изделия; знакомство с основными направлениями совершенствования и развития технологии производства изделий электронной техники.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать базовые технологические процессы производства изделий электроники; конструкцию, принцип действия и технологию изготовления вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых и других твердотельных приборов; оборудование, используемое для проведения различных технологических процессов в производстве ИЭТ; основные направления развития и совершенствования технологии производства изделий электронной техники;

уметь проектировать технологический процесс изготовления детали, узла, прибора, электронного устройства в соответствии с его конструкцией и назначением; подбирать оптимальное оборудование для осуществления технологического процесса;

владеть навыками чтения и составления маршрутных карт производства ИЭТ; навыками выбора оборудования для решения конкретных технологических задач.

1. РАСЧЕТ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

1.1. Типы и свойства накаливаемых катодов. Области применения

Термокатоды, являющиеся источником электронов в большинстве электровакуумных приборов (ЭВП), можно разделить на следующие группы:

1. Катоды из чистых металлов.

Катоды этой группы являются неактивированными, поэтому они называются простыми или однородными. Из чистых металлов основное применение имеет вольфрамовый катод; в отдельных случаях применяют танталовые или ниобиевые катоды, а также их сплавы.

2. Пленочные катоды.

Катоды этой группы являются активированными. Пленочный катод можно представить как чисто металлический, на поверхности которого имеется пленка постороннего вещества, в значительной мере влияющего на работу выхода электронов.

К пленочным катодам относятся торированный и барированный вольфрам. В них работа выхода вольфрама снижается образованием поверхностной пленки атомов тория или бария на поверхности вольфрама.

3. Толстослойные катоды.

Как правило, толстослойные катоды состоят из металлической подложки и сравнительно толстого слоя активного вещества, который наносится на эту подложку. Здесь различают активные слои с металлической проводимостью – соединения типа боридов, карбидов, силицидов, нитридов металлов (тантала, молибдена, рения). Одной из особенностей этих катодов является сравнительно высокая рабочая температура (1800 – 2000 °С).

Второй группой являются катоды с активными слоями с полупроводниковым характером проводимости: окислы (окислы щелочно-земельных металлов, окислы редкоземельных металлов и тория), сульфиды (сульфиды бария и тория), тугоплавкие соли (алюминаты, вольфраматы, силикаты, танталаты и др.)

Наибольшее практическое применение нашли окислы щелочно-земельных металлов, окислы редкоземельных металлов и тория.

По рабочей температуре оксидные катоды могут быть условно разделены на две группы:

а) низкотемпературные катоды, в которых используются в качестве эмиссионного вещества смеси окислов щелочно-земельных металлов – бария, стронция и кальция. В зависимости от состава смеси, величины отбираемого тока и требуемой долговечности их рабочая температура может изменяться от 650 до 1000°С;

б) высокотемпературные катоды, в которых в качестве эмиссионного вещества в основном используются окислы иттрия и тория. Их рабочая температура лежит в пределах 1100 - 1650°С.

Основным видом полупроводникового катода является оксидно-бариевый катод, называемый оксидным.

4. Сложные эмиттеры.

К этой группе относятся металлизированные полупроводниковые слои, импрегнированные (пропитанные) активным веществом металлические и прессованные спеченные смеси. Полупроводниковые слои могут металлизироваться проволокой сеткой, добавлением химического порошка, химическим способом. Импрегнирование или пропитка металлических губок осуществляется окислами и, чаще всего, тугоплавкими слоями.

Сложными эта группа катодов называется потому, что эмиттеры могут иметь одновременно свойства, например, пленочного, металлического и полупроводникового типов катодов.

Наибольшее распространение получили четыре типа катодов: вольфрамовый, торированный карбидированный вольфрам, барированный вольфрам (L-катод) и оксидный.

На рис. 1 показаны сравнительные характеристики перечисленных катодов. Вертикальная пунктирная прямая в каждом случае указывает

приблизительную максимальную температуру, при которой долговечность работы прибора будет несколько сотен часов.

Из рисунка видно, что в импульсном режиме максимальная плотность тока эмиссии, которую можно получить с вольфрамового катода, не превышает 1 А/см^2 , с торированного вольфрама удается снимать до 2 А/см^2 , с барированного вольфрама выше 100 А/см^2 , с оксидного - около 50 А/см^2 .

Для того чтобы нагреть вольфрамовый катод до рабочих температур $2100\text{-}2300^\circ\text{С}$, при которых он дает плотность тока эмиссии от $0,1$ до $0,8 \text{ А/см}^2$, нужно затратить удельную мощность $50\text{-}90 \text{ Вт/см}^2$.

В результате экономичность вольфрамового катода при 2100°С оказывается 2 мА/Вт , а при 2400°С около 10 мА/Вт , но при этой температуре начинается заметное испарение вольфрама и долговечность катода не превышает нескольких сот часов. Температуру в 2400°С следует считать уже форсированным режимом работы.

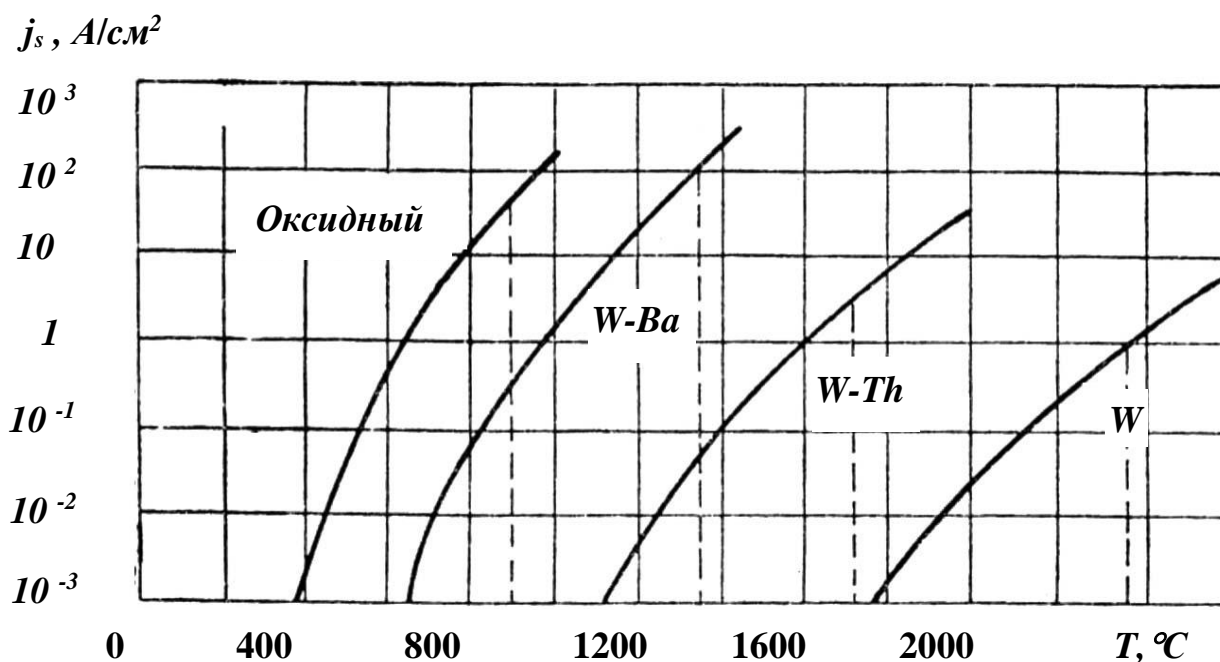


Рис. 1. Сравнительные эмиссионные характеристики разных катодов

Максимальная рабочая температура карбидированного W-Th катода - около 1700°С . Для достижения такой температуры ему надо сообщить

удельную мощность накала около 20 Вт/см². Экономичность катода в импульсном режиме достигает 50 - 70 мА/Вт. При длительной работе несколько нарушается атомный слой тория, и можно рассчитывать только на меньшую экономичность, примерно 20 мА/Вт.

Вольфрамовый катод с поверхностной пленкой бария имеет максимальную рабочую температуру около 1350⁰С, но при этом барий интенсивно испаряется с его поверхности. При температуре катода 1000 - 1200⁰С и удельной мощности накала 6 - 10 Вт/см² можно в течение длительного времени получать ток эмиссии от 1 до 15 А/см². Его экономичность при этом составляет 100 - 1000 мА/Вт.

Область рабочих температур оксидного катода заключена между 700 и 900⁰С. Для его нагревания расходуется удельная мощность 2 - 3 Вт/см². В импульсных режимах работы его экономичность может достигать 1000 - 10000 мА/Вт. В статическом режиме для увеличения долговечности лампы снижают снимаемый с катода электронный ток в 100 - 1000 раз, и рабочая экономичность колеблется от 10 до 40 мА/Вт.

В мощных генераторных приборах, рентгеновских трубках и других приборах, работающих при высоких анодных напряжениях, до сих пор еще продолжают использовать наименее экономичный вольфрамовый катод, так как он наиболее устойчив к бомбардировке ионами остаточного газа. Кроме того, в генераторных приборах нежелательно испарение бария из катода. Управляющая сетка имеет высокую температуру, и при напылении на нее бария термоток сетки становится слишком большим. Значение имеет также рост вторичной эмиссии сеток при напылении на них атомов бария или тория. Все это сильно затрудняет использование оксидного и W-Th катодов. Только в некоторых случаях изготовления мощных генераторных приборов удается катод из чистого вольфрама заменить карбидированным W-Th или ториево - оксидными катодами. В генераторных приборах средней мощности широко применяются катоды из карбидированного торированного вольфрама.

В приемно-усилительных, газоразрядных, телевизионных и многих других специальных приборах используют различные варианты оксидного катода. Этот катод имеет низкую рабочую температуру и высокую экономичность. Его недостаток - высокая чувствительность к кислороду и другим газам. В процессе работы катода наблюдается падение его эмиссии. При длительной работе с него нельзя отбирать больших плотностей электронного тока. В ряде случаев оксидный катод заменяют катодом из барированного вольфрама, который обладает большой механической прочностью, долговечностью, высокой эмиссионной способностью, стойкостью к отравлению и низкими шумовыми характеристиками. Он уступает оксидному катоду в отношении экономичности в импульсном режиме, но является особенно ценным, когда с небольшой поверхности плоского катода (например, в телевизионных приборах, клистронах и др.) надо снимать большие токи.

1.2. Характеристики термоэлектронного катода

Основное назначение термоэлектронного катода – поддержание необходимой концентрации электронов вблизи его поверхности и в пространстве взаимодействия с электрическим и магнитными полями в течение всего времени работы электровакуумного прибора. Поэтому термоэлектронный катод обычно характеризуют двумя основными параметрами: величиной тока эмиссии и временем, в течение которого он может работать (долговечностью).

1) *ток эмиссии (ток насыщения для металлического катода)* (I , $I_{нас}$) – наибольший ток, эмитируемый катодом при рабочей температуре.

Определяется уравнением Ричардсона – Дешмана:

$$I_{нас} = FAT^2 e^{-\frac{W_s}{kT}}, \text{ где}$$

F - эмитирующая поверхность катода, см²;

T – температура катода, К;

W_s - работа выхода электронов, эВ;

A - термоэлектронная константа, $A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$;

2) *удельная эмиссия* (j) – величина тока термоэлектронной эмиссии с 1 см^2 поверхности катода. Определяется температурой и работой выхода электрона эмитирующего вещества:

$$j = AT^2 e^{-\frac{W_s}{kT}}$$

3) *рабочая температура катода* (T) – температура, при которой обеспечивается величина тока термоэлектронной эмиссии, скорость испарения активного вещества и все другие параметры катода;

4) *мощность накала* (P_n) – величина, зависящая от температуры катода, коэффициента интегрального излучения поверхности катода, а также от его конструкции, так как она определяет потери мощности через рабочую и вспомогательные поверхности катода, потери на теплопроводность и др.

Если предположить, что вся подводимая мощность расходуется только на лучеиспускание через рабочую поверхность катода, то тогда мощность накала при температуре T будет равна:

$$P_n = F \varepsilon_T \sigma T^4, \text{ где}$$

F – поверхность катода, см^2 ;

ε_T - коэффициент интегрального излучения (полная излучательная способность вещества);

σ - постоянная Стефана – Больцмана:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} = 5,67 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

4) *удельная мощность накала* (p_n)– величина мощности накала, приходящаяся на 1 см^2 поверхности. Является характеристикой потребления тепловой энергии катодом:

$$p_n = \varepsilon_T \sigma T^4;$$

5) *эффективность катода* (η) – отношение тока эмиссии (насыщения) к мощности накала катода ($\eta = I_{\text{нас}} / P_{\text{н}}$):

$$\eta = \frac{I_{\text{нас}}}{P_{\text{н}}} = \frac{FAT^2 e^{-\frac{W_s}{kT}}}{F\varepsilon_i \sigma T^4} = \frac{A}{\varepsilon_i \sigma} T^{-2} e^{-\frac{W_s}{kT}} \quad - \text{ при допущении, что вся}$$

тепловая энергия, подаваемая на катод, расходуется на излучение.

η - зависит от природы металла и температуры;

б) *долговечность катода* (τ) - определяется довольно произвольно, например, в одном случае как уменьшение $I_{\text{нас}}$ на X %, в другом - как разрушение эмитирующего катода (прямого накала).

Долговечность катода тесно связана с процессом испарения активного вещества. При имеющемся запасе активного вещества в катоде конкретного типа его долговечность будет тем больше, чем ниже скорость испарения вещества, то есть, чем ниже рабочая температура катода. Между долговечностью катода τ и его температурой T существует определенное соотношение: $\tau = ae^{-bT}$, где a и b - положительные константы.

Долговечность катода экспоненциально уменьшается с возрастанием температуры.

1.3. Расчет вольфрамовых катодов

Вольфрамовые катоды изготавливают обычно в виде проволок. Рабочая температура обычно составляет 2500 К. Срок службы вольфрамового катода определяется испарением вольфрама.

Экспериментально установлено, что вольфрамовая нить разрушается, когда она в процессе работы теряет в своем весе в среднем 10%.

Обозначим через μ скорость испарения нити в граммах в секунду (дается в таблицах), а через m - начальный вес нити.

Между средней долговечностью τ и только что упомянутыми параметрами имеется, следовательно, соотношение:

$$\mu\tau = 0,1m ,$$

$$\text{откуда } \tau = \frac{0,1\pi d^2 l}{4\mu} \rho ,$$

где d - диаметр нити;

l - длина нити;

ρ - плотность металла.

Так как скорость испарения μ пропорциональна поверхности $F = \pi dl$ нити, $\tau = \alpha d$, откуда следует, что при одинаковых температурах (или, иначе, при одинаковых скоростях испарения с единицы поверхности) долговечность нити пропорциональна ее диаметру. Наоборот, при одной и той же долговечности более толстая нить может работать при более высокой температуре и, следовательно, термоэлектронные катоды из более толстой проволоки обладают большей эффективностью.

Вольфрамовую нить можно рассчитать, используя уравнение Дешмана - Ричардсона, но значительно быстрее это делать с помощью таблиц Джонсона и Ленгмюра, в которых представлены различные данные, относящиеся к единичной нити (имеющей диаметр 1 см и длину 1 см). Потерями на теплопроводность и конвекцию пренебрегают (прил.1).

В таблице также приведены формулы соответствия, позволяющие рассчитать ту же величину для нити любых размеров.

Примеры расчета

1. Рассчитать характеристики вольфрамовой нити диаметром 0,1 мм и длиной 10 см, работающей при температуре 2400 К.

Согласно таблице единичная нить диаметром 1 мм и длиной 1 см, работающая при температуре 2400 К, имеет следующие характеристики:

мощность накала, $P'_н$	181,2 Вт
ток накала, $I'_н$	1422 А
напряжение накала, $U'_н$	0,127 В
ток насыщения, $I'_{нас}$	0,364 А

$$\text{скорость испарения, } \mu' \quad 1,37 \cdot 10^{-9} \text{ г/см}^3.$$

Те же характеристики, относящиеся к реальной нити, работающей при той же температуре, определяются формулами, приведенными в третьей горизонтальной графе таблицы.

$$P_n = P_n' / l d = 181,2 \cdot 10 \cdot 0,01 = 18,12 \text{ Вт};$$

$$I_{\text{нас}} = I_{\text{нас}}' / l d = 0,364 \cdot 10 \cdot 0,01 = 36,4 \text{ мА};$$

$$\mu = \mu' / l d = 1,37 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 0,01 = 1,37 \cdot 10^{-10} \text{ г/сек};$$

$$\tau \approx 3000 \text{ ч.}$$

2. Вольфрамовый катод длиной 5 см и диаметром 0,16 мм имеет ток насыщения 15 мА. Какова его температура?

Решим задачу исходя из уравнения Дешмана - Ричардсона и для определения по нему температуры T используем метод последовательных приближений:

$$F = \pi d l = 3,14 \cdot 0,016 \cdot 5 = 0,25 \text{ см}^2.$$

$$\text{Так как } I_{\text{нас}} = F A \cdot T^2 e^{-\frac{W_s}{kT}},$$

$$\text{где } A = 60 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{град}^{-2} \text{ и } W_s = 4,52 \text{ эВ},$$

имеем

$$0,015 = 0,25 \cdot 60 T^2 e^{-(4,52 \cdot 11600)/T},$$

возьмем натуральный логарифм:

$$\ln 0,015 = \ln 15 + 2 \ln T - 52406/T;$$

$$52406 / T = 2 \ln T + 6,91;$$

$$T = 52406 / (2 \ln T + 6,91).$$

Для определения из этого уравнения величины T дадим второму члену в знаменателе какое-нибудь значение, лишь бы оно было допустимого порядка.

Например, $T = 2500 \text{ К}$.

$$\text{Тогда } T = 52406 / (2 \cdot 7,82 + 6,91) = 2324 \text{ К}.$$

Испробуем это новое значение:

$$T = 52406 / (2 \cdot 7,75 + 6,91) = 2338 \text{ К}.$$

Новое опробование дает:

$$T = 52406 / (2 \cdot 7,76 + 6,91) = 2337 \text{ К.}$$

Это и есть искомый результат, так как два последовательных приближения дают очень близкие значения.

Решить эту задачу, пользуясь таблицей Джонса и Ленгмюра.

$$I_{\text{нас}}' = I_{\text{нас}} / Id;$$

$$I_{\text{нас}}' = (15 \cdot 10^{-3}) / (5 \cdot 16 \cdot 10^{-3}) = 0,1875 \text{ А/см}^2.$$

По таблице находим $T \approx 2330 \text{ К.}$

1.4. Приближенный расчет и проектирование оксидных катодов

Величина эмиссии оксидного катода может колебаться в широких пределах в зависимости от данных керна и подогревателя, оксидного слоя, активирования и режимов использования. В табл.1 приведены соотношения между некоторыми характеристиками оксидных катодов, используемых в различных приборах.

Таблица 1

Род катода	Типы ламп	Средняя рабочая температура, Т, К	Удельная мощность, р _г , Вт / см ²	Допустимая плотность тока, j _о , mA / см ²
Подогревный катод с никелевым керном	Усилительные для выходных каскадов:			
	старые	1100 и выше	2,7 – 3,2	3 – 4
	новые	950 – 1050	2,0 – 2,7	5 – 10
	Выходные	1050 – 1150	2,0 – 2,5	20 – 30
	Генераторные	1050 – 1150	2,0 – 3,6	25 – 80
Катод прямого накала с вольфрамовым или никелевым керном	Выпрямительные	1100 – 1200	2,2 – 3,5	50 – 90
	Малогабаритные		2,5 – 4,0	10 – 12
	Входные	950 – 1100	1,5 – 2,3	20 – 100
	Выходные	1100 – 1200	2,0 – 3,0	60 – 120
	Выпрямительные	1100 – 1200	2,7 – 3,3	50 – 90

Проектирование катодов заключается в расчёте геометрических размеров керна и (или) подогревателя. Исходными данными могут являться типы ламп, среднее значение анодного тока и другие характеристики. Возможно также и решение обратной задачи.

1. **Катоды косвенного накала** представляют собой металлические цилиндры, покрытые эмиссионным слоем оксидов (рис.2 б, в) и нагреваемые изнутри электрически изолированной нитью, спиралью (подогревателем) (рис.3, 4,в).

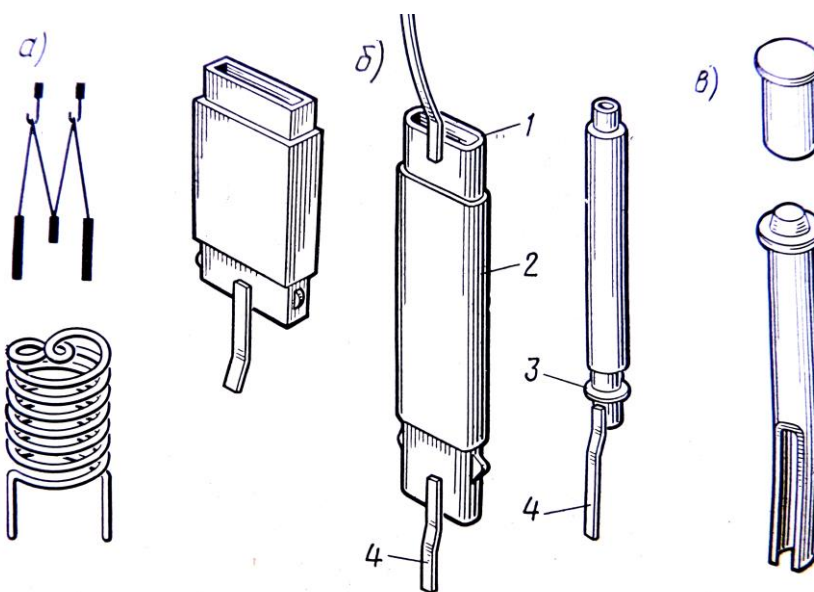


Рис.2. Катоды электровакуумных приборов:
а - катод прямого накала; б - оксидное покрытие нанесено на боковую поверхность керна; в - оксидное покрытие нанесено на торец катода
1-кern, 2-оксидное покрытие, 3-буртик, 4- приваренный вывод

У всех этих катодов эмиссионное оксидное покрытие наносится на наружную боковую поверхность цилиндра.

Применяются катоды и другой формы. В частности, катоды для ЭЛТ представляют собой короткий цилиндр, закрытый с одного из концов колпачком, на который и наносится оксидное покрытие.

Существует компромисс между простой геометрической формой катода и рабочими характеристиками лампы.

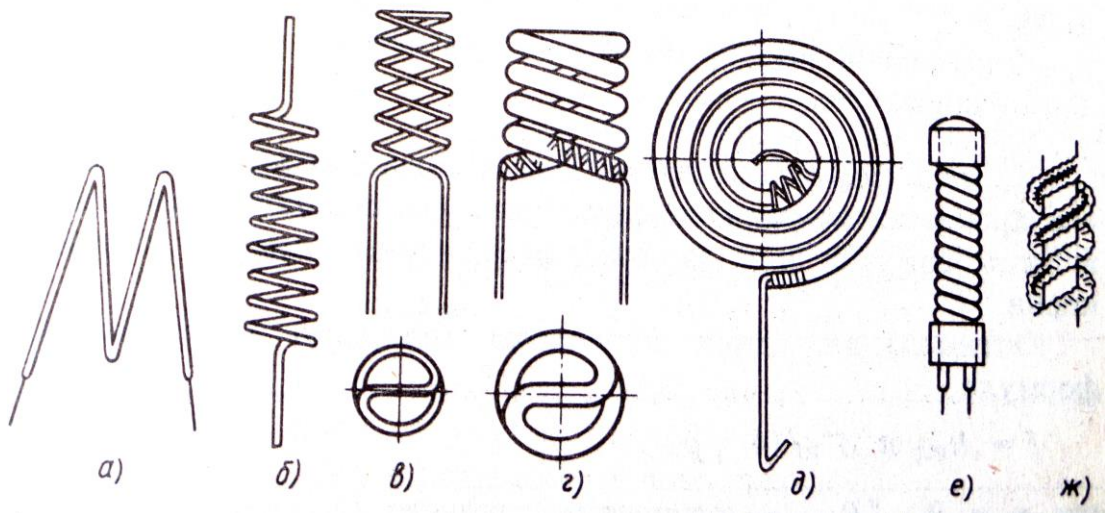


Рис.3. Конструкции подогревателей:

а - петлевой; б - монофилярный; в - бифилярный; г - монобифилярный; д - типа «улитки»; е, ж - с керамической вставкой

Катоды круглого сечения наиболее легки в изготовлении; они применяются главным образом с анодами круглого сечения в выпрямительных лампах или с овальными сетками в триодах и пентодах с нормальными характеристиками.

Для мощных низкочастотных усилительных ламп применяются катоды овального сечения с овальными сетками.

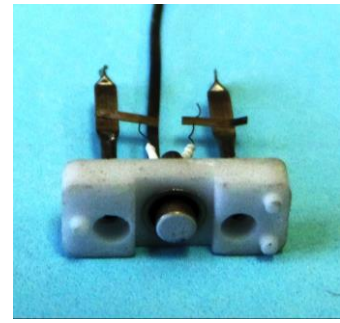
Наконец в лампах с улучшенными характеристиками применяются катоды прямоугольного сечения, допускающие более точное определение расстояния сетка – катод (рис.4, а).

У всех этих катодов эмиссионное оксидное покрытие наносится на наружную боковую поверхность цилиндра.

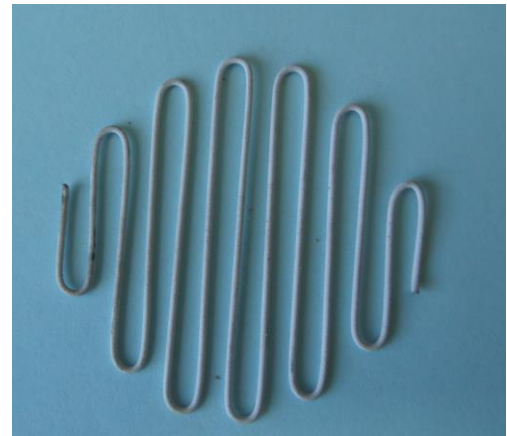
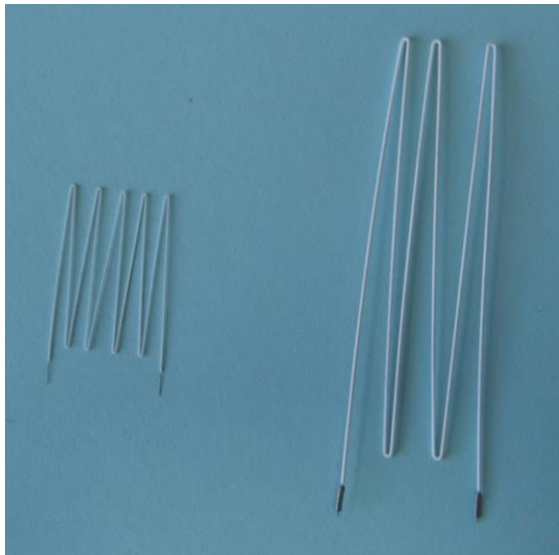
Применяются катоды и другой формы. В частности, катоды для ЭЛТ представляют собой короткий цилиндр, закрытый с одного из концов колпачком, на который и наносится оксидное покрытие (рис.4,б).



а)



б)



в)

Рис.4. Примеры катодов косвенного нагрева и подогревателей:
 а - катод прямоугольного сечения, оксидное покрытие нанесено на боковую поверхность керна; б - катодо-подогревательный узел ЭЛТ, оксидное покрытие нанесено на торец катода; в - петлевые подогреватели.

Если исходными данными для расчета являются среднее значение анодного тока I_0 и тип лампы, в которой используется катод, можно приблизительно установить величину активной (т.е. покрытой оксидом) поверхности катода F . Для этого, используя табл. 1, необходимо задаться величиной допустимой плотности тока j_0 . Тогда $F = I_0/j_0$. При расчете необходимо учитывать, что излучение поверхности, не покрытой оксидом, в 2 раза меньше, чем для поверхности, покрытой оксидом. Тогда вся мощность катода составит:

$$P_f = (F + 0,5F') p_f ,$$

где F – площадь, покрытая оксидом; F' - площадь, не покрытая оксидом. Если в исходных данных не приводится соотношение этих площадей, то можно принять F' 15 – 20% от F .

При расчетах катода косвенного нагрева необходимо помнить, что его нагрев осуществляется подогревателем. Поэтому характеристики катода будут также определяться свойствами материала подогревателя (табл. 2).

В качестве материала для подогревателей используют в настоящее время W и его сплавы с молибденом (50% W и 80% Mo). Применение этих сплавов имеет то преимущество по сравнению с чистым вольфрамом, что облегчает процесс изготовления подогревателей, снижает их хрупкость, и они оказываются более механически прочными при высоких температурах.

Зная мощность катода P_f , можно найти величину удельной мощности подогревателя p_f^n . Если l_n и d_n – длина и диаметр подогревателя, то

$$p_f^n = P_f / (\pi d_n l_n).$$

Величина удельной мощности подогревателя определяет его температуру. Диапазон значений рабочих температур подогревателей лежит примерно в пределах от 1300К до 1500К.

Таблица 2

Металл	Температура, К					
	1300		1400		1500	
	Удельное сопротивление, ρ , 10^{-6} Ом·см	Удельная мощность p_f^n , Вт/см ²	Удельное сопротивление, ρ , 10^{-6} Ом·см	Удельная мощность p_f^n , Вт/см ²	Удельное сопротивление, ρ , 10^{-6} Ом·см	Удельная мощность p_f^n , Вт/см ²
Вольфрам	34,1	2,57	37,2	3,83	40,3	5,5
Сплав $W - 50\%$ $Mo - 50\%$	35,7	3,8	38,7	5,2	41,0	6,8
Сплав $W - 20\%$ $Mo - 80\%$	33,7	-	36,7	-	-	-

При расчете могут быть использованы следующие выражения:

$P_n = I_n U_n$, где P_n – мощность накала, Вт; U_n , I_n – напряжение и ток накала, В, А. При этом следует учесть, что около 10% энергии, подаваемой для накала, теряется вследствие теплопроводности держателей.

$$R_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{\rho l_n}{\pi d_n^2} = \frac{4\rho l_n}{\pi d_n^2},$$

где R_n – сопротивление подогревателя, Ом;

ρ – удельное сопротивление подогревателя, Ом·см;

l_n , d_n – длина и диаметр подогревателя, см.

В ряде случаев, один из размеров катода или подогревателя выбирается произвольным, но нормализованным. Второй размер вытекает из значения поверхности и первого размера.

Пример расчета

Дан подогревный оксидный катод выходной лампы, выполненный из никелевой трубки диаметром 0,28 см и длиной 3,5 см, у которого часть длиной 2,3 см покрыта оксидом. Подогреватель из сплава W – 50%; Mo – 50%, длиной $l_n = 36$ см и диаметром $d_n = 0,0109$ см (катод лампы ТО – 2). Рассчитать напряжение (U_n) и ток (I_n) накала, ток катода (I_0).

Из табл.1 находим, что для выходных ламп с подогревным катодом можно взять $p_f = 2,5$ Вт/см² и $j_0 = 30$ мА/см². Площадь, покрытая оксидом, для нашего катода будет равна: $F = \pi \cdot 0,28 \cdot 2,3 = 2,02$ см², а не покрытая $F' = 0,28(3,5 - 2,3) \pi = 1,06$ см².

Ток катода $I_0 = F j_0 = 2,02 \cdot 30 = 60,6$ мА;

$$P_f = (F + 0,5F') p_f = (2,02 + 0,5 \cdot 1,06) 2,5 = 6,38 \text{ Вт.}$$

Зная P_f , определяем удельную мощность подогревателя:

$$p_f^n = P_f / (\pi d_n l_n) = 6,38 / (3,14 \cdot 0,0109 \cdot 36) = 5,17 \approx 5,2 \text{ Вт/см}^2.$$

Обращаясь к табл. 2, находим, что удельной мощности 5,2 Вт/см² для сплава W – 50%, Mo – 50% соответствует рабочая температура T = 1400⁰K и удельное сопротивление $\rho = 38,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

$$P_n = U_n \frac{U_n}{R_n} = \frac{U_n^2}{R_n} \Rightarrow U_n = \sqrt{P_n R_n} = \sqrt{P_n \frac{4\rho l_n}{\pi d_n^2}} = \frac{2}{d_n} \sqrt{P_n \rho l_n}.$$

Не учитывая потерь тепла, предположим, что вся мощность, подводимая к катоду, будет расходоваться на эмиссию электронов. Тогда $P_n = P_f$.

2. Катоды прямого накала представляют собой металлические подложки, непосредственно нагреваемые пропусканием тока и покрытые эмиссионным оксидным слоем. Чтобы увеличить поверхность, катоды прямого накала делают в виде петель или спиралей (рис. 2, а).

Сечение подложки катода может быть круглым (проволока) или прямоугольным (лента). Металл подложки может варьироваться в зависимости от электрических характеристик, которыми должен обладать катод.

Расчет катодов прямого накала ведется с учетом характеристик материала керна (табл.3), а также следующих обстоятельств:

- участок поверхности катода, покрытый оксидом, примерно на 20% меньше полной поверхности, т. к. с обеих сторон катода предусматриваются свободные от покрытия участки, дающие возможность крепить катод;
- мощность, рассеиваемая излучением, примерно на 20% меньше полной мощности, т. к. потери путем теплопроводности у катодов прямого накала сказываются относительно сильнее, чем у катодов косвенного накала.

Таблица 3

Материал керна	Точка плавления, К	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-6} Ом·см				
		293 К	900 К	1000 К	1100 К	1200 К
Чистый Ni	1728	8,3	42,6	45,7	48,8	51,9
Кремнистый Ni	1693	26,5	45,3	48,6	51,9	55,2
Вольфрам	3683	5,5	27,9	31,6	35,6	39,5

Пример расчета

Необходимо спроектировать оксидный прямонакальный катод с напряжением накала $U_H = 5$ В, обеспечивающий в кенотроне (диод в устройствах питания радиоаппаратуры) выпрямленный ток $I_0 = 125$ мА.

Для выпрямительной лампы с катодом прямого накала из табл. 1 можем взять рабочую температуру $T = 1100$ К, удельную мощность $p_f = 3,3$ Вт/см² и допустимую плотность постоянного тока $j_0 = 55$ мА/см². Выбирая далее в качестве керна проволоку из кремнистого никеля для температуры $T = 1100$ К, из табл. 3 находим $\rho = 51,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

$$F = \frac{I_0}{j_0} = \frac{125}{55} = 2,27 \text{ см}^2 - \text{площадь поверхности, покрытой оксидом};$$

$$F' = 2,27 \cdot 0,2 = 0,45 \text{ см}^2 - \text{площадь поверхности, не покрытой оксидом};$$

$$P_f = (F + 0,5F') p_f = (2,27 + 0,5 \cdot 0,45) 3,3 = 8,24 \text{ Вт} - \text{мощность катода};$$

$P_H = 8,24 \cdot 1,2 = 9,89 \text{ Вт}$ - мощность накала катода с учетом потерь на теплопроводность;

$$P_H = U_H I_H = \frac{U_H^2}{R}; \quad R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}; \quad F_K = \pi d l \Rightarrow l = \frac{F_K}{\pi d};$$

$$P_H = \frac{U_H^2 \pi d^2}{4\rho l} = \frac{U_H^2 \pi^2 d^3}{4\rho F_K} \Rightarrow$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{P_H 4\rho F_K}{U_H^2 \pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{9,89 \cdot 4 \cdot 51,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2,72}{5^2 \cdot 3,14^2}} = 0,028 \text{ см}.$$

F_K – полная поверхность катода. $F_K = F + F'$.

$$l = \sqrt[3]{\frac{U_H^2 \pi F_K^2}{P_H \pi^2 4\rho}} = \sqrt[3]{\frac{5^2 \cdot 2,72^2}{9,89 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 51,9 \cdot 10^{-6}}} = 30,61 \text{ см}.$$

У реального катода – кенотрона 5Ц3С – длина катода $l = 31$ см и диаметр $d = 0,0249$ см.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В каталоге RCA указывается, что триод с эмиссией 898 А имеет вольфрамовый катод, состоящий из трёх отдельных нитей (позволяющих нагревать катод трёхфазным током), из которых каждая потребляет ток 70 А при напряжении 33 В. Полный ток насыщения 54 А. Вычислить остальные характеристики катода. Задачу решить с помощью таблицы Джонса и Ленгмюра и уравнения Дешмана – Ричардсона.
2. Вычислить диаметр, длину, температуру и среднюю долговечность катода из чистого вольфрама, потребляющего ток 0,7 А при напряжении 4 В и дающего ток насыщения 20 мА. Тепловыми потерями пренебречь. Решить задачу с помощью таблицы Джонса и Ленгмюра и уравнения Дешмана – Ричардсона.
3. В триоде используют катод из торированного вольфрама, который при токе накала 15 А и напряжении накала 7,5 В дает ток насыщения 1,2 А.
 $W_s = 2,6$ эВ; $A = 3$ А·см⁻²·град⁻².
 - а) Каковы его характеристики?
 - б) Какие характеристики будет иметь катод из чистого вольфрама той же площади при том же напряжении накала, дающий тот же ток насыщения? Сравнить, в частности, мощность накала.
4. Дан оксидный катод прямого накала с керном из кремнистого никеля, используемый в выходной лампе (катод лампы УО-186). Напряжение накала $U_n = 4$ В, ток накала $I_n = 1$ А. Определить геометрические размеры катода и ток катода.
5. Вычислить характеристики катода прямого накала (плотность тока и геометрические размеры) триода большой долговечности (не менее 100000 ч). Ток эмиссии 30 мА, напряжение и ток накала $U_n = 6$ В, $I_n = 1,1$ А. Учесть потери от теплопроводности (20 %). Часть катода (20 %) выступает за анод с обоих концов и не покрыта оксидом.
6. Вычислить размеры оксидного катода прямого накала выходной лампы, напряжение и ток накала которой равны соответственно 11 В и 2,5 А. Электронный ток 200 мА. Определить металл для приготовления данного катода.
7. Дан катод косвенного накала, работающий в выходной лампе (рис.5).

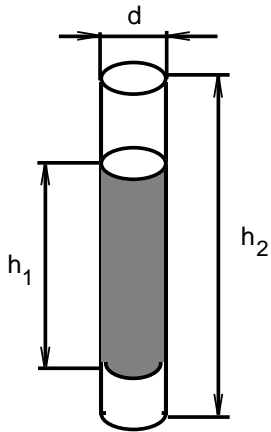


Рис. 5

Рассчитать размеры подогревателя, изготовленного из сплава W – Mo (50 : 50) для $U_H = 6,3$ В.

$d = 2,7$ мм; $h_1 = 30$ мм; $h_2 = 36$ мм.

Контрольные вопросы к разделу 1

1. Назовите основные группы термокатодов электровакуумных приборов. Приведите примеры катодов из каждой группы.
2. Сравните наиболее распространенные виды термокатодов по их эффективности. Назовите области применения этих катодов.
3. Назовите основные характеристики термокатодов.
4. Как определяется долговечность термокатода?
5. Назовите способы расчета вольфрамовых катодов.
6. Назовите основные виды оксидного катода по способу нагрева.
7. Какие виды подогревателей используются в катодах косвенного накала?
8. У какого типа оксидного катода потери мощности выше?

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

2.1. Технология изготовления приемно-усилительных ламп (ПУЛ) на примере лучевого тетрода 6ПЗ6С

Целью данного раздела является изучение технологических операций производства основных конструктивных элементов электровакуумных приборов на примере прибора с известной конструкцией – приемно-усилительной лампы 6ПЗ6С.

Лучевой тетрод 6ПЗ6С использовался в телевизионной аппаратуре в выходном каскаде строчной развёртки. В настоящее время подобные изделия не выпускаются, но основные детали внутренней арматуры и технологические операции, используемые для их изготовления, являются типичными для электровакуумных и ряда газоразрядных приборов.

Прибор содержит трубчатый оксидный катод (кern из никеля, покрытие – двойной карбонат BaCO_3 , SrCO_3), внутри которого размещён подогреватель (проволока из сплава W-Mo, покрытая алундовой изоляцией); две сетки (молибденовая проволока, подвергнутая золочению для уменьшения термоэмиссии); две лучеобразующие пластины из никеля и анод из триметалла Al-Fe-Ni, обладающего высокой излучательной способностью. Баллон прибора – стеклянный с выводами из молибдена. Внутри баллона находятся также вспомогательные детали арматуры (никелевые перемишки, слюдяные изоляторы, молибденовые траверзы и т. п.), необходимые для соединения основных узлов прибора (рис. 6).

При производстве тетрода можно выделить несколько характерных этапов. На первом этапе исходные материалы и полуфабрикаты (прокат, трубки, проволока и т. п.) подвергаются операциям формообразования, в результате которых получают конструктивные элементы прибора. На втором этапе полученные детали подвергаются очистке и термообработке для удаления

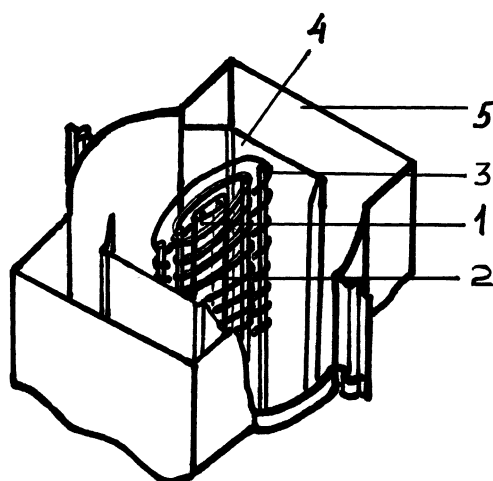


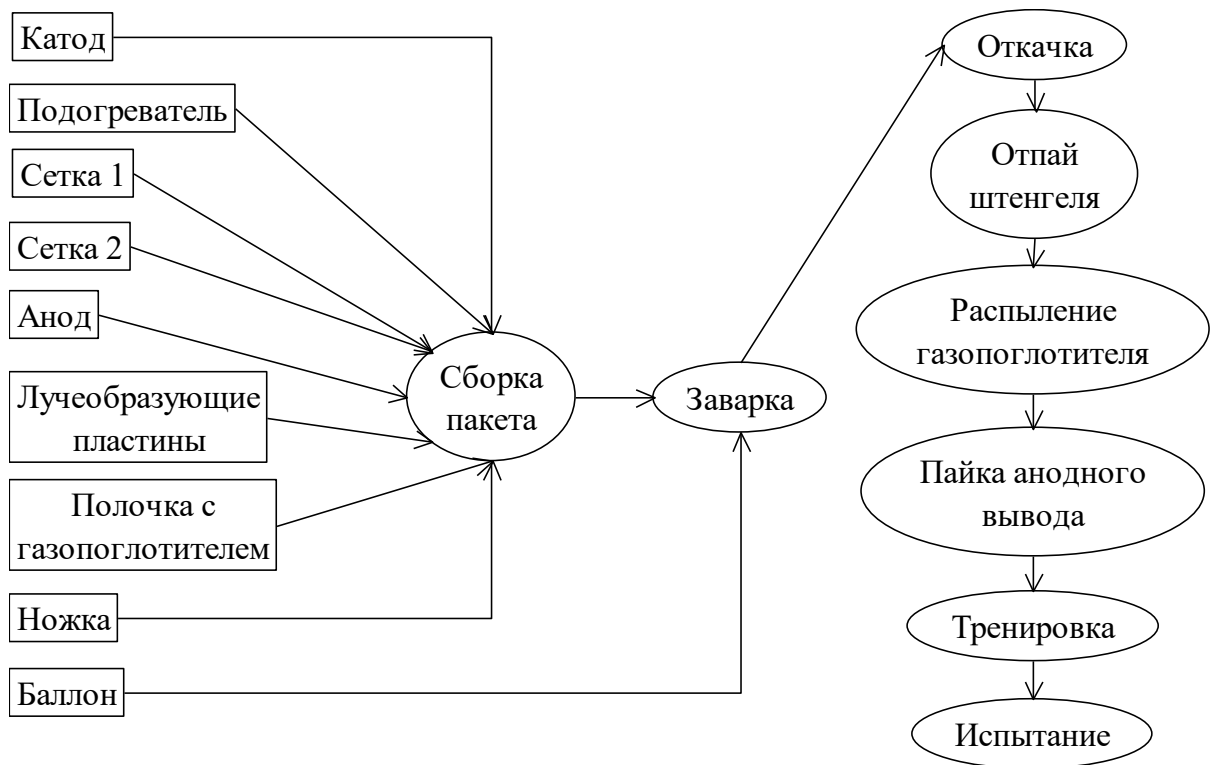
Рис. 6. Устройство лучевого тетрода:
1-катод; 2-управляющая сетка; 3-экранирующая сетка; 4-экран
(лучеобразующий электрод); 5-анод

механических и химических загрязнений и снятия внутренних механических напряжений. Кроме того, ряд деталей, например керн катода, анод, подвергаются вакуумному отжигу для обезгаживания и дополнительной очистки от загрязнений и оксидов. На третьем этапе очищенные детали поступают на сборку узлов первой ступени. Так, в рассматриваемом примере к трубчатому катоду приваривают никелевый вывод, слюдяные изоляторы армируют пистонами, сеточное полотно припаивают к никелевой рамке. На четвёртом этапе на отдельные детали и узлы наносят специальные покрытия. В данном случае на внешнюю сторону трубчатого катода наносят суспензию из карбонатных солей бария и стронция, подогреватель покрывают алундом, а сетки подвергают золочению. На пятом этапе происходит сборка всех узлов прибора (катодного, сеточного, и анодного) в единый пакет, который закрепляют на ножке прибора. На шестом этапе осуществляют заварку прибора, то есть присоединение стеклянного баллона к его ножке, после чего лампа поступает на вакуумную обработку, которую проводят в две стадии. На первой, откачке, производят прогрев и обезгаживание внутренних деталей и частичную активировку оксидного катода, при которой карбонаты бария и стронция разлагаются и переходят в оксиды BaO и SrO.

Далее производят окончательную герметизацию прибора, после чего лампу подвергают второй стадии вакуумной обработки – тренировке. На этой стадии катод подвергают перекалу, т.е. его нагревают до температуры выше рабочей, а также осуществляют токоотбор с катода на рабочие электроды лампы (анод, вторая сетка). При этом происходит окончательная активировка катода, стабилизируется его эмиссионная способность, а также происходит окончательная очистка и обезгаживание электродов лампы за счёт их прогрева и бомбардировки электронами. Выделяющиеся при этом газы поглощаются газопоглотителем, который заранее помещают внутри прибора при его сборке. Производство прибора завершается электрическими испытаниями.

Задание

Без начальных стадий структурная схема технологического процесса производства лучевого тетрода 6ПЗ6С может быть представлена следующим образом:



Составить полную технологическую схему изготовления катода, подогревателя, сеток, анода, ножки, баллона с указанием способов обработки и используемого оборудования. Рассматривая технологию изготовления плоской ножки, особое внимание обратить на получение металло-стеклянного спаев (справочные материалы см. в прил. 2.6 – 2.8). Основные особенности и конструкции спаев стекла с металлом рассмотрены ниже.

2.1.1. Соединение стекла с металлами

В производстве изделий электронной техники (внешних оболочек, ножек и других узлов приборов) применяют соединения разнородных материалов: металл – стекло, металл – керамика, керамика – стекло, кварц – металл и др.

Сцепление разнородных материалов осуществляется либо механическим путем за счет неровностей поверхностей, под действием поверхностных сил, либо за счет химического взаимодействия, сопровождаемого диффузией с образованием промежуточного переходного связующего слоя.

Существует несколько теорий, объясняющих природу соединения стекла с металлом. Наиболее широкое распространение получила гипотеза, согласно которой связь между металлом и стеклом осуществляется за счет растворения окисной пленки металла в соединяемых материалах и образования переходной зоны с плавным изменением концентрации растворенной окиси. Образование спаев в этом случае происходит в результате физико-химических процессов, приводящих к возникновению переходного слоя.

Другая – гипотеза механической связи, считает, что связь стекла с металлом осуществляется за счет простого механического зацепления в поверхностных неровностях и действия поверхностных сил. Согласно этой гипотезе расплавленное стекло удерживается в спае поверхностью металла благодаря охвату выступов и заполнению впадин и микронеровностей. Назначение окисной пленки состоит в придании поверхности металла желательной шероховатости.

Таким образом, при соединении металла со стеклом важным является наличие окисной пленки на поверхности металла, обеспечивающей химическую однородность в связующем слое. Однако хорошее сцепление получается только при тонком и сплошном окисном слое. Если образуется толстый окисный слой, то он обычно бывает рыхлым и пористым, не вступает во взаимодействие по всей толщине, при этом спай получается не прочным и не вакуумно-плотным. Поэтому чем меньше кислорода в окисле металла, т. е. ниже окисел, тем качественнее спай (Cu_2O лучше CuO ; $\text{MoO}_2 - \text{MoO}_3$; $\text{MnO} - \text{MnO}_2$).

В конструктивном отношении спаи стекла с металлом можно разделить на стержневые (сквозные) и полые (рантовые).

К **стержневым** (рис. 7, а) относят спаи, в которых металл впаивается в стекло в виде стержня, проволоки, ленты или плющенко. Стержневые спаи используют для герметизации и закрепления в стекле вводов тока (электродов). Часто применяют составные электроды (двух- и трехзвенные), в которых из впаиваемого металла изготавливают лишь небольшую часть электрода, проходящего через стекло (например, электроды платинит – никель, молибден – медь и т. д.). Составные части этих электродов сваривают друг с другом электро- или газовой сваркой. Узлы в месте сварки по возможности должны иметь меньший диаметр, в противном случае возле них образуются трещины.

В **полых** (рантовых) спаях стекло механически соединяет и одновременно электрически изолирует металлические детали и узлы прибора. Их подразделяют на трубчатые, гильзовые и дисковые. Трубчатый спай (рис. 7, б) обеспечивает соединение стеклянной и металлической трубок в торец. Гильзовый спай герметично скрепляет коаксиально расположенные кольцевые вводы (рис. 7, в). В дисковых спаях стеклом либо запаивается отверстие в металлической детали, либо спай производится по торцу диска (рис. 7, г).

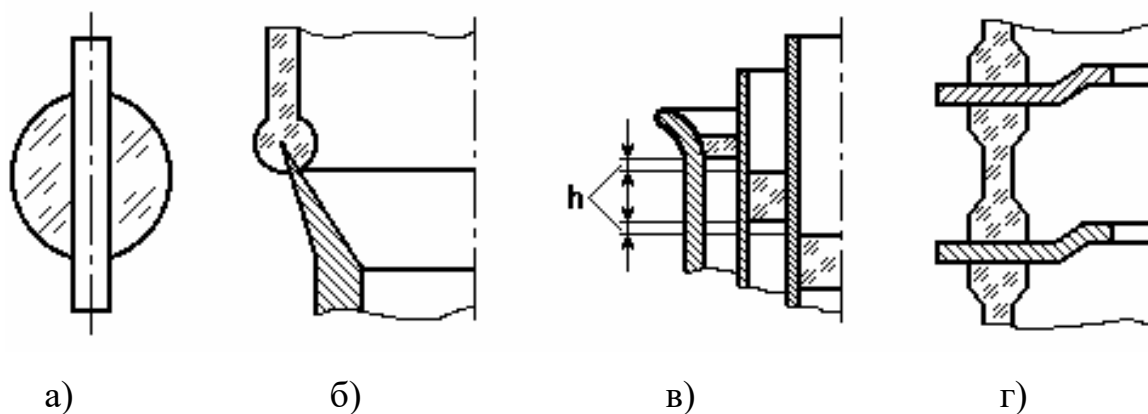


Рис. 7. Типовые конструкции спаев металлов со стеклом:
 а – стержневой спай; б – трубчатый спай; в – гильзовый спай;
 г – дисковый спай

Примеры спаев металла со стеклом приведены на рис.8.

При изготовлении спаев стекла и керамики с металлами из-за разницы температурных коэффициентов расширения (ТКР), теплопроводности, теплоемкости и других свойств спаиваемых пар в месте соединения возникают напряжения, которые могут привести к разрушению спая, если не принять соответствующих мер. Прежде всего, следует стремиться к тому, чтобы в рабочем интервале температур ТКР спаиваемых пар были бы приблизительно равны.

В тех случаях, когда невозможно подобрать материалы с близким ТКР, снижения опасных термических напряжений можно добиться за счет изменения конструкции спаиваемого узла.

Спаи металла со стеклом, используемые в производстве ЭВП, могут быть разделены на согласованные и несогласованные.

В согласованных спаях ТКР металла и стекла имеют примерно одинаковую величину при температуре, предельной по нагреву или охлаждению спая в процессе изготовления или эксплуатации прибора. При этом чем больше соответствие между величинами ТКР металла и стекла, тем меньшие напряжения возникают в спае в процессе его нагрева и охлаждения.



а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Примеры конструкций спаев металлов со стеклом:
а – стержневой спай; б – трубчатый спай; в, г – дисковый спай

К согласованным относятся, например, спаи:

– сплавов типа Н47ХР, Н47Д5, Н47Х3 ($\alpha \approx 90 \cdot 10^{-7}$ 1/град) со стеклами платинитовой группы (С90-1, С87-1, С89-1 и т. д., имеющими $\alpha \approx 90 \cdot 10^{-7}$ 1/град);

– молибдена ($\alpha \approx 55 \cdot 10^{-7}$ 1/град), кобальта ($\alpha = (46 - 52) \cdot 10^{-7}$ 1/град) со стеклами молибденовой группы (С49-1 и др., имеющими $\alpha \approx 49 \cdot 10^{-7}$ 1/град).

В несогласованных спаях ТКР металла и стекла имеют различные величины, поэтому в процессе изменения температуры расширение или сжатие стекла и металла в несогласованном спае происходит на разные величины. Это приводит к возникновению в спае опасных напряжений, способных разрушить стекло или оторвать его от металла.

В несогласованных спаях металл должен быть тонким и мягким, он должен деформироваться при напряжениях, меньших предела прочности стекла. Деформация металла в спае компенсирует наличие напряжений в стекле и предотвращает его разрушение. К несогласованным относят, например, лезвийные спаи меди ($\alpha = 167 \cdot 10^{-7}$ 1/град) со стеклами, имеющими $\alpha = (40 - 100)10^{-7}$ 1/град).

Край металла обычно выполняют в виде ножевого лезвия (рис. 4, б). Поэтому такую конструкцию спая часто называют лезвийным спаем. Применение меди для изготовления несогласованных спаев обусловлено ее высокой пластичностью, гибкостью и хорошим растеканием стекла по пленке закиси меди.

На практике часто применяют несогласованные спаи кварцевого стекла с вольфрамом, молибденом и танталом. По конструкции спаи кварцевого стекла подразделяют на лезвийные (ленточные), бусиновые и окошечные.

В несогласованном стержневом спае целесообразно, чтобы ТКР стекла был больше ТКР металла. В противном случае при охлаждении спая в стекле возникают радиальные растягивающие усилия, которые легко могут оторвать слой стекла от металла и послужить причиной образования каналов и воздушных прослоек в спае (т. е. нарушить его герметичность). При охлаждении спая, в котором ТКР стекла больше, чем ТКР металла, в стекле создаются сжимающие радиальные и растягивающие осевые и тангенциальные напряжения. Как известно, стекло имеет более высокую механическую прочность на сжатие, чем на разрыв, поэтому сжимающие радиальные

напряжения менее опасны (однако под действием осевых растягивающих напряжений стекло все же может растрескаться).

В несогласованном гильзовом спае целесообразно, чтобы ТКР стекла был меньше ТКР металла, так как при этом в стекле возникают сжимающие усилия, что обуславливает большие жесткость и прочность, чем при растягивающих. Если в этих спаях ТКР стекла больше ТКР металла, то в стекле возникают растягивающие напряжения, отрывающие стекло от металла.

Особое место занимают спай платинита со стеклом. ТКР платинита в радиальном направлении ($\alpha = 90 \cdot 10^{-7}$ 1/град) хорошо согласуется с ТКР стекол платинитовой группы, а ТКР платинита в осевом (продольном) направлении значительно меньше ($\alpha = 70 \cdot 10^{-7}$ 1/град). Поэтому участок спая стекла с платинитом не следует отжигать до полного исчезновения напряжений. В неполностью отожденном спае стекло остается в состоянии сжатия в осевом (продольном) направлении – впоследствии это сможет компенсировать растягивающие усилия, возникающие в спае при работе (нагреве) прибора. Несогласованность ТКР платинита и стекол в осевом направлении практически не позволяет применять для спаев платинитовую проволоку с диаметром более 0,8 мм. При диаметре платинитовой проволоки более 0,5 мм желательно предварительно ее остекловывать. Следует учитывать, что в бусинковом спае платинита осевые напряжения будут тем меньше, чем больше отношение диаметра стеклянной бусы к диаметру платинитовой проволоки.

Металл спая должен иметь хорошие тепло- и электропроводность – это способствует снижению температуры спая в процессе изготовления и работы прибора, а также позволяет пропускать через спай большие токи. Температура плавления металла должна быть выше температуры обработки (огневой) стекла.

Структура металла должна обеспечивать требуемую прочность, пластичность, отсутствие натекания по границам зерен и хорошее сцепление со стеклом. Внутри металла не должно быть трещин, капилляров и других

дефектов, ухудшающих его герметичность. В процессе механической и термической обработки не должны ухудшаться физико-химические характеристики металла, влияющие на качество спая.

Трудность механической обработки вольфрама и молибдена (ввиду повышенной твердости) обуславливает наличие в структуре этих металлов продольных трещин и каналов, по которым воздух может медленно проникать в прибор. Для удаления поверхностных трещин производят шлифование этих металлов.

Особые требования предъявляют к платинитовой проволоке. Она состоит из железоникелевого сердечника (сталь Н42 - 48 % Ni, 52 % Fe), покрытого слоем меди, на поверхности которого находится тонкая красная пленка окиси меди. Поверх окиси меди наносят слой буры. Медь придает проволоке хорошую электропроводность и защищает сердечник от окисления. Окись меди хорошо растворяется в меди и смачивается стеклом, что дает возможность получить надежный спай, постепенно переходя от спая к стеклу. Тонкий стекловидный спай буры (борнокислой соли калия или натрия) предохраняет пленку окиси меди от переокисления и превращения в окись меди, а также улучшает спаивание металла со стеклом. Сталь Н42 имеет $\alpha = 65 \cdot 10^{-7}$ 1/град, а медь $\alpha = 167 \cdot 10^{-7}$ 1/град. Соотношение диаметров железоникелевого сердечника и меди подбирают таким образом, чтобы результирующий поперечный ТКР был примерно равен $90 \cdot 10^{-7}$ 1/град. Требуемый ТКР в платините можно получить при содержании никеля 42 % и весе медного покрытия 21 – 30 % от массы стержня.

Платинит необходимо хранить в упаковке, защищающей его от действия влаги (пергаменте, фольге, герметичных коробках). Для обезвоживания пленки боратов и сплавления их в стекловидный слой желательно перед впаиванием платинит прогреть в печи при $t = 800 - 1000^\circ\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехмейстер, Е. И. Технология производства электровакуумных приборов / Е. И. Шехмейстер. – М. : Высш. шк., 1992.
2. Александров, Е.М., Технология и свойства материалов эмиссионной электроники: учеб. пособие / Е.М. Александров, Г.Д. Сироткин; Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново, 1979.
3. Технология и оборудование производства электровакуумных приборов / под ред. Ю.А.Хруничева. – М.: Высш. шк., 1979.
4. Никонов, Б.Л. Оксидный катод / Б.Л. Никонов. – М.: Энергия, 1979.
5. Пивоваров, Г.Я. Технологические процессы электровакуумного производства / Г.Я. Пивоваров. – М.: Энергия, 1975.

2.2. Технологическая схема производства металлостеклянных генераторных ламп (на примере ГУ-39А-1)

Генераторными лампами называют лампы, применяемые для генерирования высокочастотных колебаний в радиопередающих устройствах.

Лампа ГУ-39А-1 – мощный генераторный тетрод в металлостеклянном оформлении (рис. 9) с вольфрамовым торированным карбидированным прямонакальным катодом и наружным анодом с водяным принудительным охлаждением, предназначенный для усиления мощности в коротковолновых передатчиках стационарных устройств широкого потребления, с выходной мощностью до 13 кВт на частоте до 30 МГц.

Генераторный тетрод представляет из себя медный цилиндр, закрытый с одного конца, а другим, открытым концом, приваренный к стеклянному баллону. Две сетки (управляющая и экранирующая) укреплены на ножке лампы и входят вместе с катодом внутрь цилиндра (анода). Анод, являющийся одновременно и баллоном лампы, помещается в специальный кожух, внутри которого протекает охлаждающая вода. Ответственным моментом в такой лампе является место соединения медного анода со стеклом.

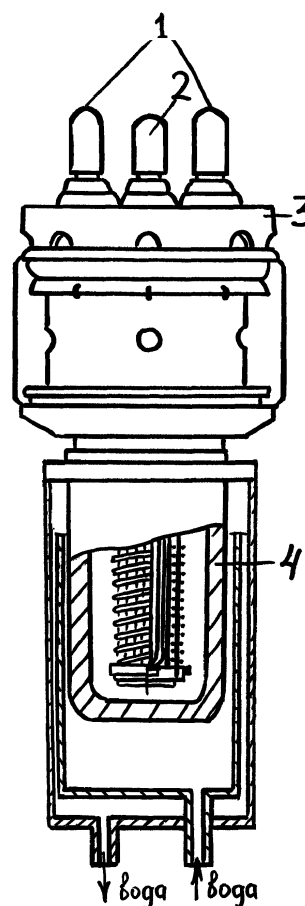


Рис. 9. Лампа ГУ-39А-1:
1-выводы катода; 2-выводы первой сетки; 3-кольцевой вывод второй сетки; 4-анод

В качестве катода используют карбидированный торированный вольфрамовый катод, который имеет 12 нитей, закрепленных на двух пластинах, которые, в свою очередь, соединены с выводами катода (рис. 10).

Сетки лампы изготовлены из молибденовой проволоки. Большое значение для их охлаждения имеет толщина траверз: большая толщина траверз позволяет лучше отводить тепло от сетки. Особенно недопустим нагрев управляющей сетки, которая получает значительный дополнительный нагрев от катода. При нагреве эта сетка может эмитировать электроны, и в ее цепи будет протекать ток обратного направления, вызывающий нарушение нормальной работы лампы. Для предотвращения перегрева сеток выбирают некоторое оптимальное расстояние "катод – управляющая сетка" и применяют ряд дополнительных мер:

- 1) покрывают сетки титаном, благодаря чему увеличивается их лучеиспускательная способность и одновременно облегчается поддержание высокого вакуума в лампе;

- 2) увеличивают толщину траверз;

- 3) для охлаждения экранирующей сетки применяют чернение внутренней поверхности медного анода.

Большие по размерам электроды лампы требуют специального крепления при помощи системы траверс и изоляторов.

Для нормальной работы лампы необходима высокая (10^{-6} мм рт. ст.) и постоянная степень вакуума. Это достигается использованием в качестве газопоглотителя титана. Он применяется в виде порошка также и для увеличения поглотительной способности.

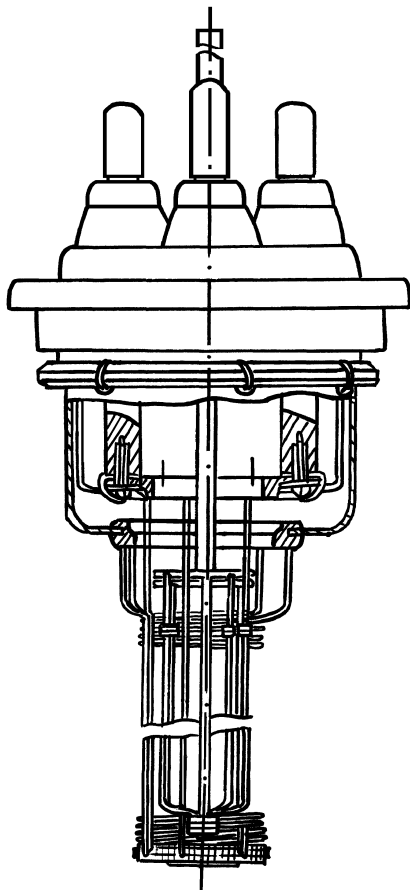


Рис. 10. Ножка собранная

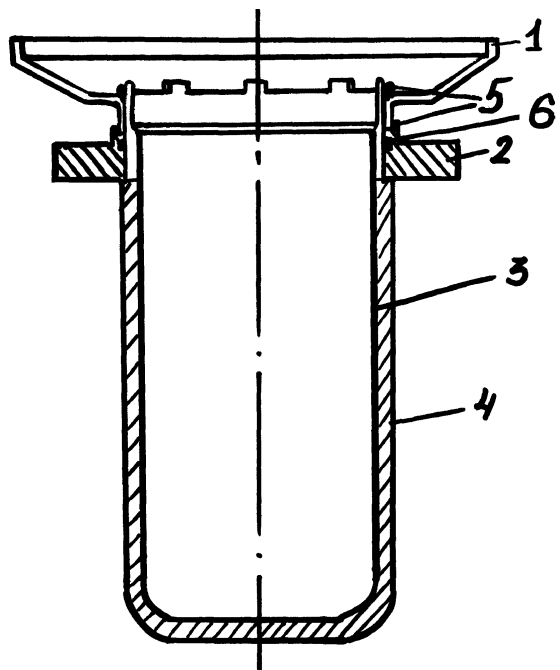
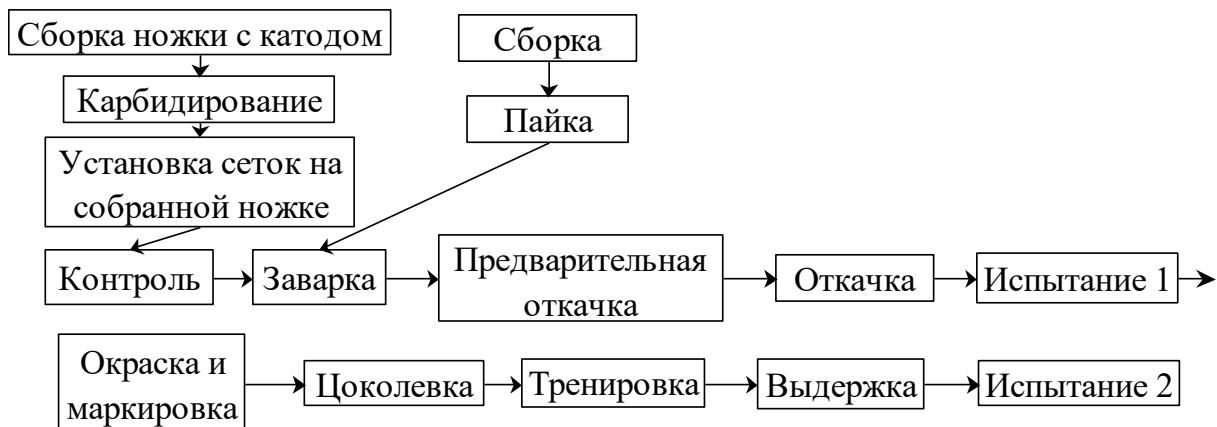


Рис. 11. Анод собранный:
 1-коваровое кольцо; 2-медный фланец;
 3-хромовое покрытие, ХЧ-1;
 4-анод медный, М1М; 5-шов вакуумный;
 6-шов водонепроницаемый

Технологическая схема производства генераторной лампы ГУ-39А-1



Рассматривая технологию производства лампы ГУ-39А-1, более подробно разберем операции по изготовлению катода, анода, различных способов пайки, заварки.

Задание

1. Составить технологическую схему изготовления карбидированного торированного вольфрамового катода.
2. Из рис. 9 видно, что герметичную конструкцию лампы ГУ-39А-1 получают путем образования металлостеклянных спаев. Составить технологическую схему операции заварка и дать более подробное описание собственного процесса спаивания деталей.
3. На рис. 11 представлен чертеж анода, где показаны все его составные части и места спаев. Составить технологическую схему изготовления анода: подготовка металлических деталей, выбор метода пайки, подбор припоев, описание технологии и оборудования для выбранного способа пайки. Справочные материалы приведены в прил. 2.1 и 2.2.

Некоторые особенности операции соединения металлических деталей путем пайки в производстве электронных приборов рассмотрены ниже.

2.2.1. Основные особенности операции пайка в производстве ЭВП

В качестве генераторов и усилителей сверхчастотных электромагнитных колебаний широко используют ряд электровакуумных приборов: магнетронов, клистронов, платинотронов, амплитронов, ламп бегущей и обратной волны и др. Все эти электровакуумные приборы представляют собой сложные металлостеклянные или металлокерамические конструкции с большим числом соединений самых различных материалов. Для осуществления таких соединений применяются различные виды сварки и пайки. Если в электровакуумных приборах со стеклянной оболочкой (в приемно-

усилительных лампах, электроннолучевых трубках, осветительных лампах, ионных приборах и др.) основным видом соединения является точечная сварка, то в указанных приборах сверхвысоких частот основным способом соединения является пайка.

Пайкой называется процесс соединения твердых материалов с помощью расплавленного металла или сплава (припоя), который, проникая в зазор между нагретыми поверхностями спаиваемых материалов, смачивает их и при затвердевании образует неразъёмное соединение.

От сварки пайка отличается тем, что соединяемые материалы при пайке находятся в твёрдом состоянии, при сварке же они доводятся до пластического или жидкого состояния.

Все виды пайки обычно подразделяют на мягкую и твёрдую, подразумевая под этим главным образом температуру плавления припоя.

Под мягкой пайкой обычно понимается пайка припоями, температура плавления которых не превышает 300-400 °С (прил. 2.1). При твердой пайке температура плавления припоя превышает 400-450 °С (прил. 2.2).

Пайка легкоплавкими припоями на основе алюминия, свинца, олова кадмия в электровакуумном приборостроении применяется в основном для соединения немногочисленных деталей внешней арматуры. Пайка же тугоплавкими припоями на основе меди, серебра, золота, никеля и т.п. применяется значительно более широко. В производстве СВЧ приборов на паяные такими припоями соединения приходится около 80-90 % от общего числа соединений.

Виды припоев

В зависимости от назначения припой изготавливают в виде слитков, прутков, проволоки, фольги, прутков с флюсом, биметалла, зерен и пасты.

Слитки применяют главным образом для лужения и пайки погружением. В виде прутков припой применяется чаще всего при пайке паяльником и горелкой.

При пайке в печах наиболее распространена проволока различного диаметра, из которой изготавлиются кольца припоя. Размеры и вес колец нормализованы, что значительно облегчает расходы припоя. Из фольги штампуют пластинки или кольца, которые перед пайкой укладываются внутри шва или вблизи него.

Хрупкие припои изготавливаются в виде порошка и зерен величиной 0,2 – 0,5 мм. Обычные пластичные припои (медь, серебряно-медная эвтектика, серебро) также иногда используют в виде пасты из порошка этого припоя, замешанного на спирте или на биндере.

Среды для пайки

С целью защиты поверхности от окисления и улучшения растекаемости припоя пайку производят в восстановительной или нейтральной среде.

Наиболее подходящим и широко распространенным газом для пайки в производстве ЭВП является водород. Во время пайки он поглощается металлом, вытесняя другие находящиеся в металле газы, и сравнительно легко удаляется сам при обезгаживании приборов, не оказывая при этом вредного воздействия на катод.

Крупным недостатком водорода является его взрывоопасность. Поэтому в печах с большим объёмом используется обычно взрывобезопасная смесь водорода с азотом (формиргаз).

В качестве восстановительной среды при пайке приборов с катодом применяется СО в смеси с азотом с целью предотвращения разрушения эмитирующего покрытия или деталей катодного узла, для которого часто используется тантал.

Весьма перспективной средой для пайки является вакуум. При пайке в вакууме одновременно осуществляется обезгаживание деталей.

Особенности конструкции паяных узлов электровакуумных приборов

Разнородность соединяемых материалов со значительной разницей коэффициентов линейного расширения и необходимость сохранения вакуумной плотности швов при многократных высокотемпературных прогревах в защитной среде и в воздухе являются основными обстоятельствами, которые определяют конструкцию вакуумно-плотных узлов. Пайка большинства вакуумных швов осуществляется в закрытых печах с восстановительной атмосферой, поэтому место соединения деталей в ходе процесса остается недоступным для оператора. Качество пайки в этом случае будет определяться в основном конструкцией шва.

Вопросы наиболее целесообразной конструкции соединения (взаимное расположение деталей, толщины стенок, высота шва и др.) решаются главным образом опытным путём. Для получения при температуре пайки оптимального зазора в соединении целесообразно деталь из материала с большим коэффициентом термического расширения располагать внутри, что позволит избежать посадок с натягом. При этом для уменьшения напряжений в шве должна быть предусмотрена возможность лёгкой, местной деформации одной из деталей. Обычно местные ослабления делают на деталях из более пластичного материала.

Этот технологический прием нельзя применять, не учитывая особенность конструкции в целом и технологии ее изготовления. Каждое изделие из разнородных материалов нужно рассматривать особо, учитывая в первую очередь условия его нагрева. Многие узлы представляют собой сложные паяные конструкции. В этом случае правильными следует считать такие конструкции узлов, которые позволяют паять все швы или большинство из них за один прием, не изменяя общего положения изделия. Однако в ряде случаев

паяные узлы вследствие технологических особенностей неоднократно нагреваются повторно для последующих паяк. Для осуществления этих последовательных паяк используют различные припои с последовательно уменьшающейся температурой плавления или диффузионно твердеющие припои (пайка меди припоем ПСр 72 В); применяют меры, препятствующие разогреву паяного ранее шва (экранировка, установка холодильников, помещение в менее нагретую зону печи и т.д.).

Количество припоя, его форма и расположение играют большую роль в получении доброкачественного шва. Припой всегда желательно располагать над паяемым швом, максимально используя не только капиллярность, но и проникновение припоя в зазор под действием силы тяжести.

В настоящее время наиболее полно изучены паяные соединения однородных металлов и влияние величины зазора между паяными деталями (т.е. посадки) на прочность соединения. Известно, что для каждого паяного соединения имеется своя оптимальная толщина прослойки припоя, выше и ниже которой прочность соединения падает. При слишком малом зазоре припой может не заполнить шов, и тем самым будет ослаблена прочность соединения; при большом зазоре величина капиллярных сил может быть недостаточной для втягивания нужного количества припоя в шов, и прочность шва также понизится.

Пайка в печах производится с предварительной укладкой припоя в местах соединений или вблизи от них. На качество пайки при этом большое влияние оказывает правильное дозирование припоя. При недостаточном количестве припоя зазор не будет заполнен до конца, и соединение спаиваемых деталей будет ненадежным. Нежелателен также избыток припоя, так как это приводит к разъеданию материала или к потекам по поверхности паяных деталей.

Оснастка для пайки

Важнейшие эксплуатационные параметры современных приборов сверхвысоких частот как, например, мощность, длина волны генерируемых или

усиливаемых электромагнитных колебаний, КПД и другие определяются точностью геометрических размеров узлов. Допуски на них у многих приборов не превышают 0,01 – 0,02 мм и должны обеспечиваться пайкой.

Крупносерийный и массовый характер производства многих ЭВП, простота и технологичность их узлов часто могут быть обеспечены только рациональной конструкцией оснастки для сборки и пайки.

По функциональному назначению различных видов оснастки классифицируют следующим образом:

- а) подставки;
- б) скрепляющие или сжимающие приспособления и грузы;
- в) приспособления, фиксирующие взаимное положение деталей с заданной точностью;
- г) тепловые экраны и холодильники;
- д) приспособления, препятствующие деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехмейстер, Е. И. Технология производства электровакуумных приборов / Е. И. Шехмейстер. – М. : Высш. шк., 1992.

2. Александров, Е.М. Технология и свойства материалов эмиссионной электроники: учеб. пособие / Е.М. Александров, Г.Д. Сироткин; Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново, 1979.

3. Гладков, А.С. Пайка деталей электровакуумных приборов / А.С. Гладков, О.П. Подвичина, О.В. Чернов. – М.: Энергия, 1967.

4. Ковалевский, Р.Е. Конструирование и технология вакуумно-плотных паяных соединений / Р.Е. Ковалевский, А.А.Чекмарёв. - М.: Энергия, 1968 .

5. Технология и оборудование производства электровакуумных приборов / под ред. Ю.А.Хруничева. – М.: Высш. шк., 1979.

2.3. Технология изготовления металлокерамической лампы СВЧ диапазона

Впервые вакуумно-плотная высокочастотная керамика для оболочек электронных приборов (электронных ламп) была применена при разработке маломощных приборов СВЧ (выходная мощность до нескольких ватт). Необходимость ее применения вызывалась несколькими причинами.

Во-первых, повышение рабочих частот триодов и переходов в область сантиметровых длин волн лимитировались временем пролета электронов в пространстве катод-сетка. Необходимые расстояния катод-сетка в несколько десятков микрон с высокой степенью точности оказалось весьма трудно выполнить с использованием стеклянных изоляторов. Здесь потребовались жесткие конструктивные элементы, которые, будучи выполнены с высокой степенью точности, сохранили бы свои размеры в процессе сборки, заварки и откачки прибора.

Во-вторых, новыми конструктивными решениями электронных ламп с целью максимального уменьшения их собственных ёмкостей и индуктивности вводов.

В-третьих, необходимостью снижения потерь высокочастотной энергии в диэлектрических элементах прибора и увеличения добротности колебательной системы, частью которой является вакуумная оболочка триодной лампы.

В прил. 2.3 приведено сравнение керамики и стекла по ряду характеристик.

В первых триодах СВЧ нашла довольно широкое применение стеатитовая керамика (прил. 2.4), так как она относительно проста в производстве – легко поддается формованию, обжигается при сравнительно высоких температурах и легко шлифуется.

Однако последующая практика применения показала, что как вакуумно-плотный материал стеатитовая керамика имеет существенные недостатки, а именно низкие:

- механическую прочность, что не позволяло создать на ее основе надежные спаи с металлами, несогласованными с ней по температурному коэффициенту линейного расширения, например медью;
- термическую стойкость как следствие недостаточно высокой механической прочности и плохой теплопроводности, из-за чего изделия из стеатитовой керамики нельзя было использовать в жестких условиях эксплуатации;
- вакуумную надежность, что приводило к потере вакуумной плотности в процессе службы из-за структурного старения, связанного с полиморфными превращениями кристаллической фазы керамики.

В результате этого в дальнейшем применение деталей из стеатитовой керамики в качестве вакуумно-плотных элементов электронных ламп было резко ограничено. Этому способствовали повышенные требования, которые были предъявлены к электронным лампам. Новые применения потребовали резкого уменьшения габаритов ламп, что влекло за собой повышение удельных тепловых нагрузок на ее элементы; условия работы ламп стали связаны с большими ускорениями, ударными и вибрационными нагрузками. К лампам были предъявлены жесткие требования по безотказной работе в сложных условиях. Поэтому в последующих разработках триодов СВЧ наиболее широкое применение нашли новые керамические материалы на основе окиси алюминия и форстерит, которые по комплексу технических свойств и надежности выгодно отличаются от стеатитовой керамики (прил. 2.5).

Форстеритовая керамика была применена в большой серии малогабаритных, так называемых титан – керамических, ламп с плоским расположением электродов.

Главная особенность форстеритовой керамики состоит в том, что ее температурный коэффициент линейного расширения в широком интервале температур почти идеально соответствует аналогичному параметру титана, обеспечивая согласованность спаев в лампе.

Для пайки форстеритовой керамики с титаном был разработан специальный метод, который технологически может быть совмещен с процессом откачки лампы. Этот метод основан на том, что припой, содержащие титан (активные металлы), хорошо смачивают и образуют прочное соединение с неметаллизированной поверхностью керамики в вакууме не хуже 10^{-4} мм рт. ст. Таким образом, пайка швов металл – керамика может быть осуществлена после сборки всей лампы. Применение высокотемпературных припоев на основе серебра или никеля предопределяет высокотемпературный прогрев и глубокое обезгаживание всех элементов лампы и получение хорошего вакуума в отпаянном приборе.

На основе разработанных материалов и технологических процессов была создана большая серия отечественных титано-керамических триодов различного применения – триоды типов 6С17К, ГС-4, ГС-6 и др.

Следующий этап в развитии электронных триодных ламп тесно связан с разработкой и освоением вакуумно-плотной алюмооксидной керамики с содержанием окиси алюминия от 95 до 99,9 %. За счет низких диэлектрических потерь в широком интервале температур и частот, высокой теплопроводности и механической прочности, хорошей термической стойкости (прил. 2.5) и превосходных вакуумных характеристик алюмооксидная керамика стала материалом, используемым в большинстве новых типов электронных приборов. Эта керамика обеспечила большее теплорассеяние, механически более прочные конструкции, расширила круг металлов, используемых для создания оболочек приборов.

Для алюмооксидной керамики были разработаны методы пайки как с помощью активных металлов в вакууме, так и посредством предварительной металлизации тугоплавкими металлами.

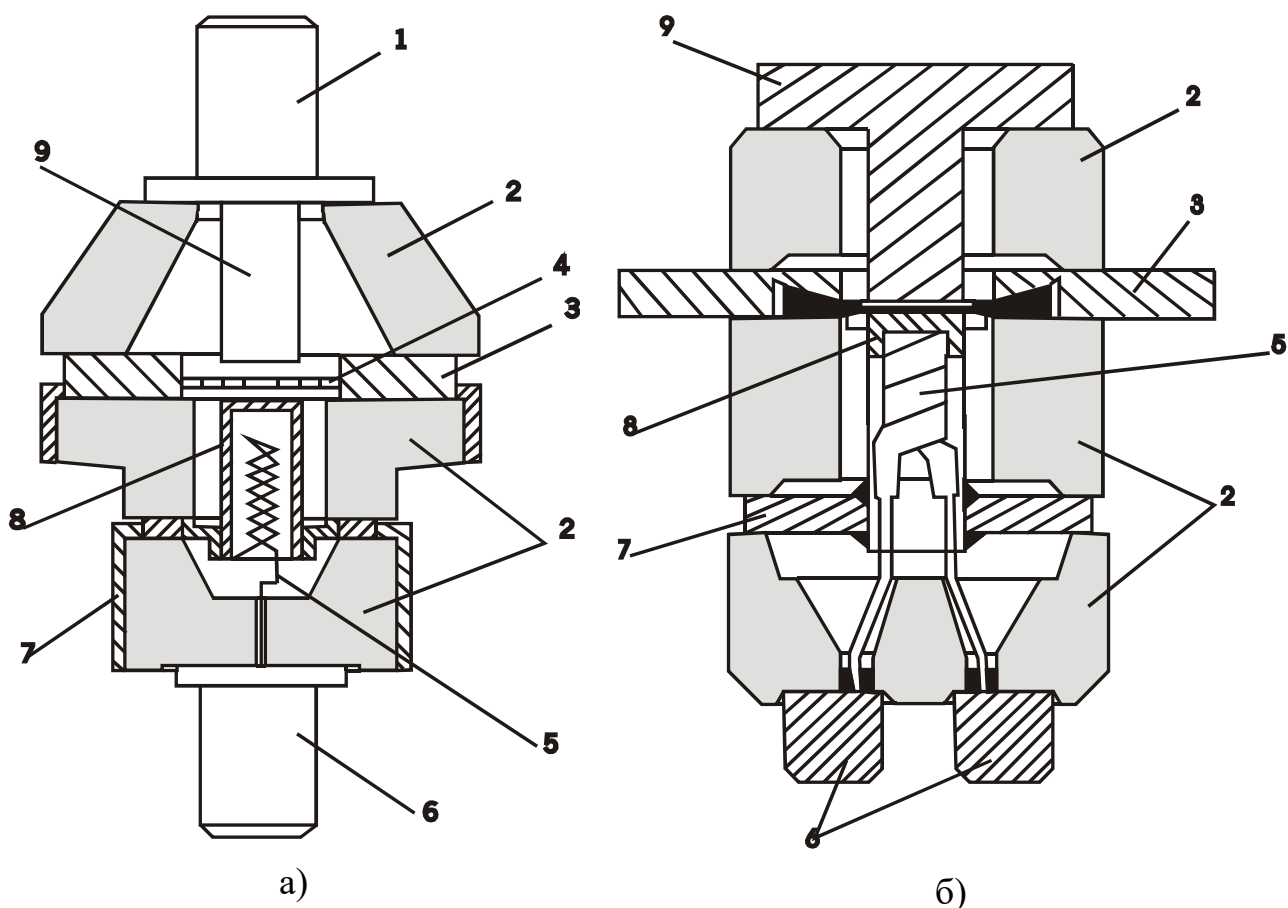


Рис. 12. Плоские металлокерамические триоды:

а – ГС-4; б – 7007:

1-ввод анода; 2-керамические элементы, спаянные с металлическими частями оболочки; 3-ввод сетки; 4-сетка; 5-подогреватель; 6-ввод подогревателя; 7-ввод катода; 8-катод; 9-анод

Задание

На рис. 12 приведены схемы титано-керамического триода ГС-4 и триода 7077, оболочка которого выполнена из алюмооксидной керамики. Составить технологическую схему изготовления данных триодов, включая операции по получению керамических деталей. Наиболее подробно рассмотреть операцию получения паяного соединения металл – керамика. Описывая технологию изготовления триода 7077, рассмотреть два вида пайки: с помощью активных металлов и посредством предварительной металлизации.

2.3.1. Особенности и конструкции металлокерамических спаев

Возможности практического применения вакуумной керамики неразрывно связаны с решением задачи получения прочных и надежных вакуумно-плотных спаев ее с металлами. Пути получения таких спаев во многом определяются характеристиками керамического материала.

Пайка керамики с металлами – один из наиболее сложных видов вакуумно-плотного сочленения деталей электровакуумных приборов - требует всесторонне продуманной технологии. Требования к припоям, так же как к подготовке поверхности деталей перед пайкой, к оборудованию, оправкам и газовым средам, в которых осуществляется пайка, остаются теми же, что при пайке металлических деталей электровакуумных приборов.

Наряду с удачным выбором и осуществлением способа изготовления вакуумно-плотного соединения металла с керамикой, на надежность работы металлокерамического узла огромное влияние оказывает конструкция паяного соединения. Конструкция спаев металлокерамического узла определяется не столько назначением этого узла, сколько физическими и механическими свойствами соединяемых материалов.

Важнейшим критерием оценки пригодности для пайки неорганических диэлектриков, металлов и сплавов является их коэффициент линейного расширения в интервале температур от -70 до $+900^{\circ}\text{C}$. На рис.13 показаны кривые изменения коэффициентов линейного расширения, широко применяемых в электровакуумном производстве керамических материалов и выпускаемые металлургической промышленностью сплавов, наиболее подходящих для пайки с этими материалами. Из приведенных кривых видно, что значения коэффициентов линейного расширения этих материалов редко совпадают во всем температурном интервале.

Отсутствие металлических материалов, согласованных по коэффициенту термического расширения с некоторыми керамическими материалами, чрезвычайно усложняет технологию пайки металла с керамикой и приводит в

производстве к большим материальным потерям из-за разрушения металлокерамических соединений по причине больших внутренних напряжений, возникающих при пайке.

При разработке конструкции паяных соединений керамики с металлом необходимо руководствоваться тем, что все керамические материалы отлично работают на истирание и на сжатие и очень плохо на растяжение и изгиб.

Наиболее характерные конструкции соединений металла с керамикой, используемых в различных классах электровакуумных приборов, показаны на рис.14. Их можно подразделить на три основные группы:

1) соединение, в котором металл охватывает керамическую деталь; цилиндрические (рис.14, а), как правило, согласованные. В случае разницы ТКР рекомендуется конический охватывающий спай (рис.14, б), в котором различное расширение элементов компенсируется перемещением металлической детали, что сохраняет необходимую величину зазора для припоя;

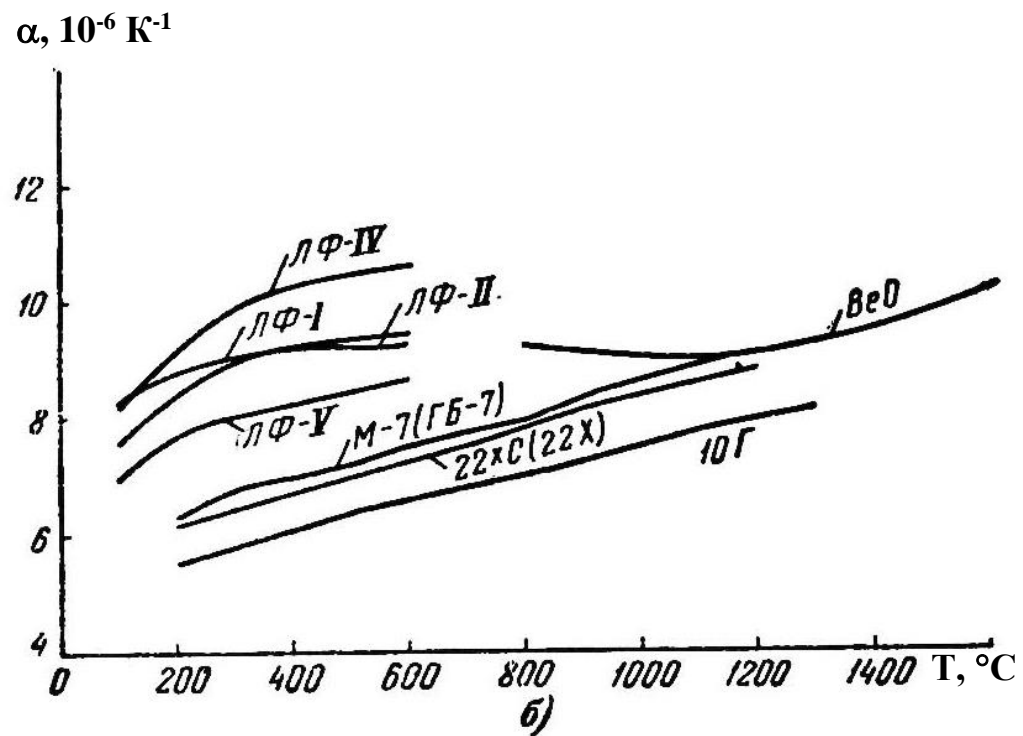
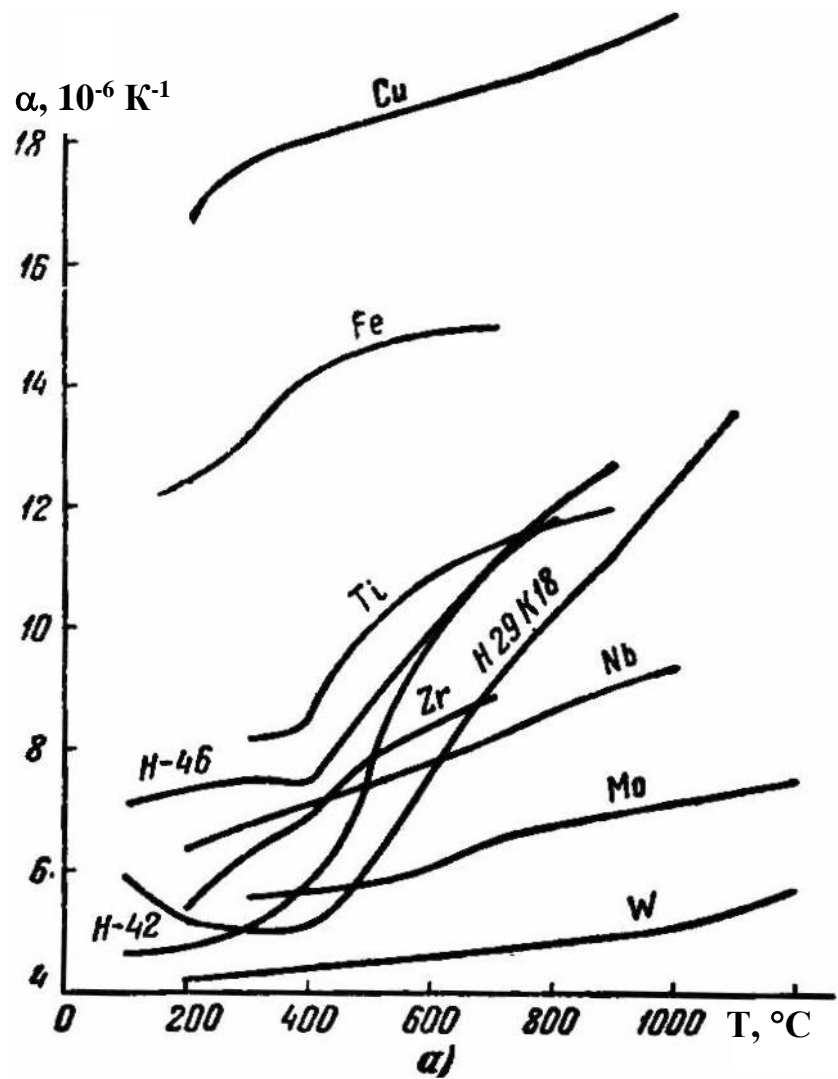


Рис. 13. Зависимость коэффициента линейного расширения металлов (а) и керамики (б) от температуры

2) соединение, в котором керамическая деталь охватывает металлическую (рис.14, в, г). Для охватываемых спаев необходима внутренняя шлифовка керамической детали. Это соединение в практике не получило распространения, так как оно менее надежно;

3) торцевой тип соединения, когда металлическая деталь сочленяется с керамической по торцу (рис.14, д). Такое соединение не получило широкого применения и используется лишь в лампах штабельной конструкции.

Одним из путей повышения надежности металлокерамических узлов является разработка сплавов с коэффициентом линейного расширения, согласующимся с коэффициентом линейного расширения керамики во всем температурном интервале.

При наличии таких сплавов все виды конструкций соединения металла с керамикой будут достаточно надежными, и их выполнение не будет вызывать серьезных осложнений в производстве.

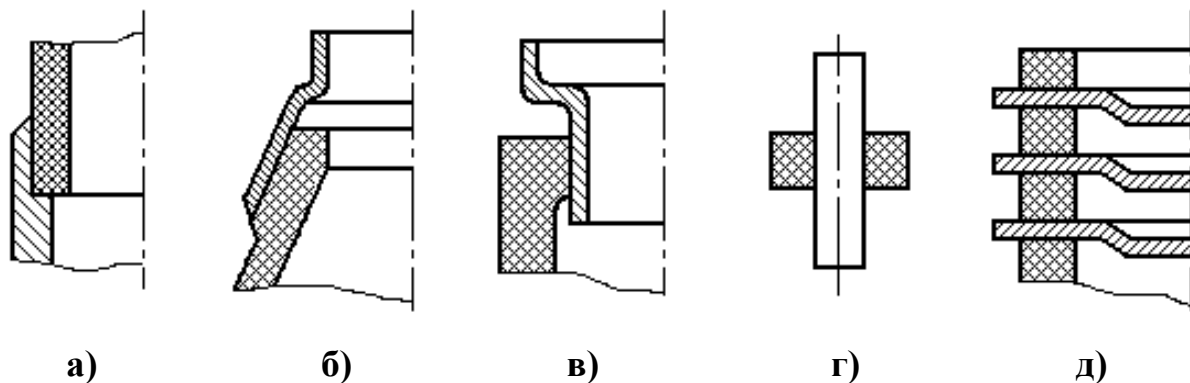


Рис.14. Типовые конструкции спаев металла с керамикой

В электровакуумном производстве в настоящее время применяются два метода получения вакуумно-плотных соединений керамики с металлами: пайка с помощью металлизации керамики различными соединениями тугоплавких металлов (многоступенчатая технология) и пайка без нанесения металлопокрытий на керамику (одноступенчатая технология).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин, В.Н. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами / В.Н. Батыгин, И.И. Метелкин, А.М. Решетников. – М.: Энергия, 1973.
2. Преснов, В.А. Керамика и ее спаи с металлом в технике / В.А.Преснов, В.А. Любимов М.Л. – М.: Атомиздат, 1969.
3. Ерошев, В.К. Металлокерамические вакуум-плотные конструкции / В.К. Ерошев. – М.: Энергия, 1970.
4. Гладков, А.С. Пайка деталей электровакуумных приборов / А.С. Гладков, О.П. Подвичина, О.В. Чернов. – М.: Энергия, 1967.
5. Ковалевский, Р.Е. Конструирование и технология вакуумно-плотных паяных соединений / Р.Е. Ковалевский, А.А. Чекмарёв. - М.: Энергия, 1968.
6. Технология и оборудование производства электровакуумных приборов / под ред. Ю.А.Хруничева. – М.: Высш. шк., 1979.

2.4. Технология изготовления мощных вакуумных СВЧ - приборов

В настоящее время человечество переживает подлинную революцию в области методов и средств информационного обмена.

На передний план выдвинуты цифровые технологии формирования и передачи информационных потоков, все большее развитие получают инженерно-технические решения, основанные на применении интегральных технологий, в том числе и микроволновых с использованием твердотельных электронных приборов сосредоточенного и распределенного типов.

Казалось бы, что впечатляющие достижения твердотельной электроники за последние сорок лет способствовали перенесению на второй план вакуумных электронных приборов сверхвысоких частот (СВЧ), однако это не так. По-прежнему остается актуальным использование этих приборов при решении огромного числа задач научно-технического прогресса.

Прежде всего, это задачи радиолокационного обнаружения, измерения координат и классификации различных целей, управления полетами ракет, дистанционного зондирования поверхности Земли с аэрокосмических носителей, радионавигации, включая задачи позиционирования с помощью глобальных навигационных систем, радиоастрономии, в том числе и исследования дальнего космоса и, конечно, дальнейшего развития телекоммуникационных систем и сетей, включая наземные и спутниковые системы связи, микроволновые телерадиоинформационные системы, сочетающие в себе микроволновые и радиовещательные технологии, и много других задач научно-технического прогресса.

Все они решаются с помощью систем и устройств, работающих в основном в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, в которых генерирование, усиление и преобразование сигналов большой мощности без вакуумной электроники СВЧ пока еще затруднительно. Сегодня вакуумной электронике СВЧ принадлежит также и немаловажная роль в развитии средств бытового и промышленного нагрева при сушке древесины,

производстве бумаги, мануфактуры, создании стекловолоконных линий передачи, сублимации продуктов и различных лекарственных средств, бытовых СВЧ-печей и др.

Что же сегодня определяется термином «СВЧ»?

В 1975 г. Международный консультативный комитет по радио (МККР) предложил систему разделения и наименования полос в спектре электромагнитных волн от 3 Гц до 3000 ГГц, в соответствии с которой весь спектр частот разделен на 12 диапазонов, четыре из которых специалисты в области радиоэлектроники относят к диапазону СВЧ. Это ультравысокие частоты (300 – 3000 МГц), сверхвысокие частоты (3 – 30 ГГц), крайне высокие частоты (30 – 300 ГГц) и гипервысокие частоты (300 – 3000 ГГц). Частоты выше 3000 ГГц обычно относят к так называемому оптическому диапазону, который включает инфракрасное и видимое излучения.

Таким образом, электронные приборы СВЧ – это приборы, которые предназначены для генерирования, усиления и преобразования электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 300 МГц до 3000 ГГц, т.е. в дециметровом, сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, а электроника СВЧ – это отрасль электроники, которая изучает вопросы взаимодействия электронных потоков с высокочастотными электромагнитными полями в приборах, в которых время пролета электронов соизмеримо с периодом колебаний этих полей.

Поскольку энергия сигналов E связана с частотой ω соотношением $E = \hbar\omega$, то повышение частоты сопровождается увеличением энергии. Поэтому можно сказать, что вакуумные СВЧ - приборы генерируют и обрабатывают мощные электрические сигналы.

Классификация: вакуумные СВЧ - приборы классифицируют по нескольким признакам, в частности по распределению параметров, способом введения электронов в рабочее пространство, способом управления потоком электронов, продолжительностью взаимодействия электронного потока с

электромагнитным полем, по направлению векторов скорости электронного потока и напряженности внешнего электрического или магнитного полей, по выполняемым функциям.

По распределению параметров вакуумные СВЧ - приборы делятся на имеющие элементы с сосредоточенными параметрами, когда геометрические размеры элементов $l < \lambda$ и приборы с элементами с распределенными параметрами, когда $l \geq \lambda$.

По способу введения электронов в рабочее пространство СВЧ - приборы разделяют на инжекционные, в которых электроны вводят в рабочее пространство с помощью электронной пушки, и эмиссионные, в которых электроны вводят в рабочее пространство с помощью термоэлектронной или электростатической эмиссии.

По способу управления потоком электронов СВЧ - приборы классифицируют на приборы с электростатическим управлением (вакуумные лампы СВЧ) и динамическим управлением (все остальные вакуумные СВЧ приборы).

По продолжительности взаимодействия потока электронов с электромагнитным полем вакуумных электронных приборов СВЧ (ВЭП СВЧ) разделяют на приборы с кратковременным взаимодействием (электронные вакуумные лампы СВЧ, клистроны и т.п.) и приборы с длительным взаимодействием (лампа бегущей волны, магнетроны и т.д.).

По направлению векторов скорости электронного потока и напряженности внешнего электрического или магнитного полей ВЭП СВЧ классифицируют на приборы О-типа, в которых ось электронного потока параллельна направлению внешнего электрического или магнитного поля, и приборы М-типа, в которых ось электронного потока перпендикулярна направлению внешнего магнитного поля. В приборах О-типа внешнее электрическое поле ускоряет электроны, а внешнее магнитное поле улучшает

их фокусировки. В приборах М-типа перпендикулярное магнитное поле сворачивает электронный поток в кольцо.

По выполняемым функциям ВЭП СВЧ делятся на генераторные (клистроны, магнетроны), усилительные (лампа бегущей волны).

К основным мощным вакуумным СВЧ - приборам относятся магнетрон, клистрон, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны (ЛОВ).

2.4.1. Конструкция и принцип работы вакуумных СВЧ приборов

Принцип действия всех вакуумных СВЧ - приборов заключается в преобразовании энергии электронного потока в энергию электромагнитного поля с помощью СВЧ-модуляции плотности электронного потока с последующим содержанием уплотнений в тормозной фазе внутреннего электромагнитного поля, благодаря чему электронный поток отдает энергию полю.

Важнейшим условием работы вакуумных СВЧ - приборов является условие синхронизма, то есть примерное равенство скорости электронного потока и фазовой скорости электромагнитных волн (приборы с длительным взаимодействием), или кратность периодов движения уплотнений электронного потока и периодов колебаний электромагнитного поля (приборы с кратковременным взаимодействием). Достичь синхронизма можно двумя способами:

- ускорением электронного потока;
- замедлением электромагнитных волн.

Ускорение электронов осуществляется электрическим полем, а замедление происходит в замедлительных системах. В двухрезонаторном клистроне входной резонатор модулирует скорость предварительно ускоренных электронов, а выходной — тормозит их, отнимая у них энергию. В лампах бегущей волны электроны фокусируются и ускоряются в электронном прожекторе, а затем попадают в замедлительную систему, в которой во время

синхронного движения электронов и электромагнитного поля происходит модуляция электронного потока, а на выходе из системы от модулированного электронного потока отбирается энергия. В магнетронах электроны, движущиеся по кругу, многократно взаимодействуют с электромагнитными полями резонаторов, в результате чего генерируются СВЧ-колебания, которые выводятся наружу.

Клистроны

Клистрон – это мощный вакуумный СВЧ-прибор, в котором преобразование кинетической энергии электронного потока в энергию СВЧ-колебание осуществляется при его движении вдоль оси прибора, при котором последовательно осуществляются:

- модуляция электронного потока по скорости;
- его дрейф, движение по инерции, при котором модуляция по скорости переходит в модуляцию по плотности с образованием СВЧ-тока;
- торможение модулированного конвекционного СВЧ-тока полем выходного резонатора.

Клистроны подразделяются на 2 класса: пролётные и отражательные.

В **пролётном** клистроне электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объёмных резонаторов. В простейшем случае резонаторов два: входной и выходной. Также существуют каскадные многорезонаторные клистроны, которые имеют один или несколько промежуточных резонаторов, расположенных между входным и выходным резонаторами для улучшения группировки электронного потока.

В **отражательном** клистроне используется один резонатор, через который электронный поток проходит дважды, отражаясь от специального электрода – отражателя.

Схема и принцип работы клистрона

Рассмотрим двухконтурный клистрон (рис.15). В клистроне имеются два объёмных резонатора с ёмкостными сеточными зазорами. Первый резонатор называют входным, или модулятором; второй — выходным. Пространство между ними называют пространством дрейфа или группирования.

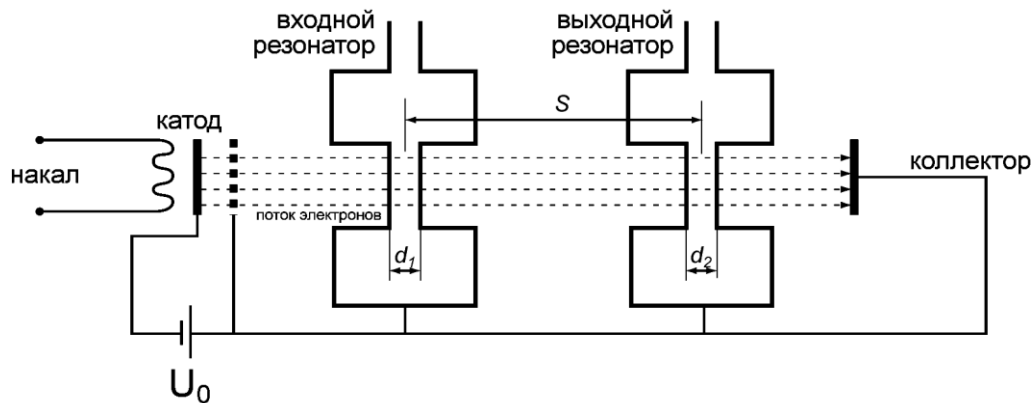


Рис. 15. Схема двухконтурного клистрона

Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются постоянным напряжением второго электрода и попадают в узкий сеточный зазор первого резонатора, в котором имеется продольное СВЧ - поле. Это поле периодически ускоряет и замедляет электроны, модулируя электронный поток по скорости.

Двигаясь далее в пространстве дрейфа, электроны постепенно образуют сгустки за счёт того, что быстрые электроны догоняют медленные. Этот поток попадает во второй резонатор и создает в нем наведённый ток той же частоты, что и частота входного модулирующего поля. В результате между сетками резонатора появляется высокочастотное электрическое поле, которое тормозит электроны. Кинетическая энергия электронов, полученная ими от источника ускоряющего напряжения, преобразуется в энергию СВЧ колебаний и поступает через вывод энергии в выходную нагрузку. Электроны, прошедшие второй зазор, оседают на коллекторе и рассеивают на нём в виде тепла оставшуюся кинетическую энергию.

Основные конструктивные элементы клистронов

Рассмотрим основные конструктивные элементы клистрона на примере двухконтурного пролетного клистрона (рис.16).

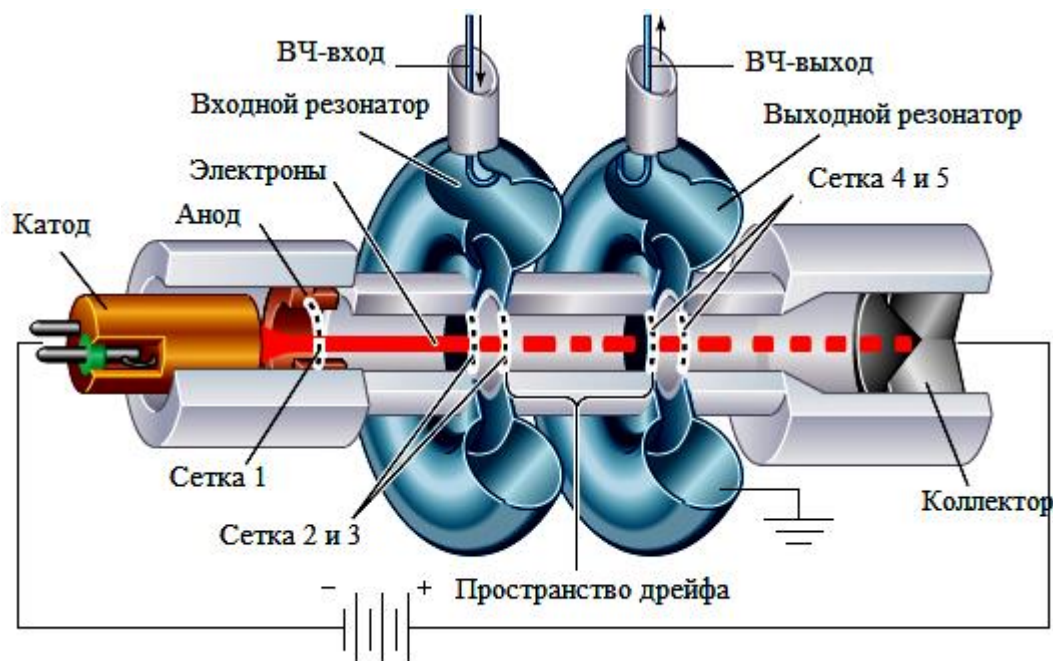


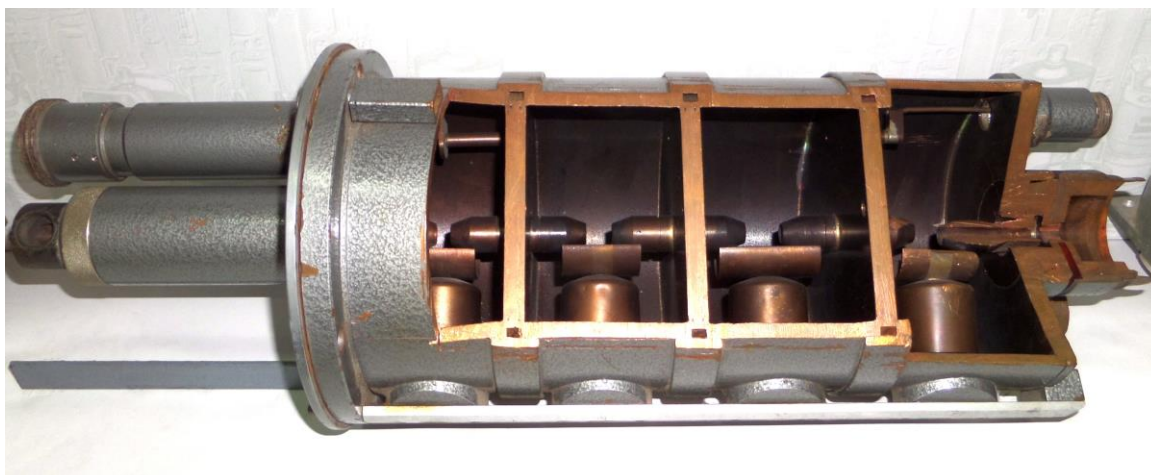
Рис. 16. Основные узлы двухконтурного клистрона

Резонаторы. Резонаторы клистронов выполняются из меди, т.к. медь обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, имеет хорошие свойства как материал для применения в вакууме, хорошо обрабатывается.

Клистроны делятся на две группы:

- клистроны с внутренними резонаторами;
- клистроны с внешними резонаторами.

Клистроны с внутренними резонаторами имеют контурную систему, размещённую в едином медном блоке, который является вакуумной оболочкой прибора (рис.17). Мощные клистроны имеют систему охлаждения всех резонаторов, обычно – жидкостную.



а)



б)

Рис. 17. Вид клистрона, изготовленного из меди, в разрезе:
а - внутреннее устройство клистрона; б - более крупное изображение вывода энергии и части коллектора

Для того чтобы избежать больших размеров контуров в приборах дециметрового диапазона, индуктивную часть контура отделяют и помещают

её вне вакуумной оболочки прибора (клинтроны с внешними контурами) (рис. 18).

Плюсы данной конструкции заключаются в возможности осуществлять перестройку приборов путём параметров индуктивной части «внешних» резонаторов или даже её замены.

Недостатком является необходимость осуществления хорошего контакта в месте сочленения индуктивной и ёмкостной частей контура. Контактные поверхности этого места выполняются с особой тщательностью, а иногда их покрывают золотом.



Рис. 18. Стекланный клинтроп 10-см диапазона без наружной части резонатора

Фокусирующие системы. Фокусирующие системы обеспечивают сохранение формы электронного потока, используемого в клинтронах. Фокусировка обеспечивается воздействием на поток магнитного поля параллельно оси прибора.

Фокусировка при помощи соленоида. Фокусировка осуществляется при помощи постоянного однородного магнитного поля, создаваемого соленоидом, по обмотке которого течёт ток (рис.19).

Преимущества:

- высокое качество фокусировки,

- простота конструирования и выполнения фокусирующей системы,
- возможность использования магнитных полей большой величины, совершенных электронных потоков.

Недостатки:

- затраты энергии на поддержание поля,
- большой вес и стоимость соленоида.

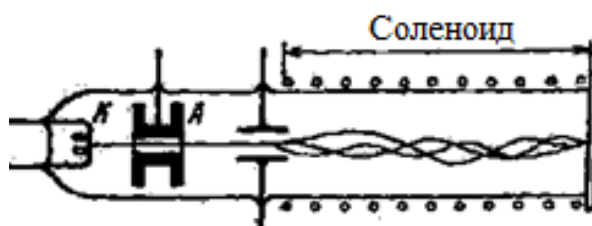


Рис. 19. Схематичное изображение фокусировки электронного пучка при помощи соленоида

Реверсная фокусировка. Эффективность метода в том, что рабочий промежуток клистрона разделён на участки при помощи полюсных наконечников, размещаемых между резонаторами и имеющих знакопеременное магнитное поле. Это поле обеспечивается внешними постоянными магнитами.

Преимущества:

- малый вес,
- отсутствие энергопотребления,
- удовлетворительное качество фокусировки.

Недостатки:

- усложнение конструкции прибора,
- ухудшение отвода тепла в области выходного резонатора за счёт замены части медных деталей железным магнитопроводом.

Электронные пушки. Пушка размещается на катодном изоляторе прибора, является узлом, наиболее критичным к внешним механическим и климатическим воздействиям.

По своей конструкции пушки делятся на два класса: обычные, в форме диода, имеющие два основных электрода – катод и анод (рис.20) и триодные, или пушки с сеткой, выполняющие функцию не только формирования, но и модуляции электронного потока.

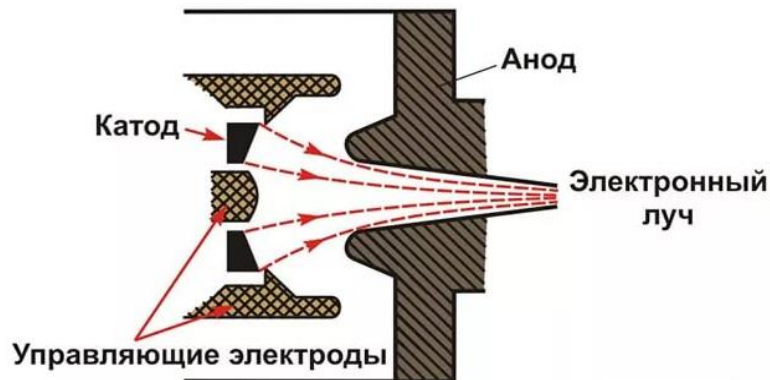


Рис. 20. Электронная пушка в форме диода

Коллекторы. Коллектор электронов – элемент приборов О - типа, выполняющий функцию приёма электронов, прошедших через прибор. Поскольку все приборы О - типа – это диоды, в полости анода которых происходит преобразование энергии электронного потока, то коллектор является поверхностью этого анода, воспринимающий электронный поток.

Энергия, не использованная для преобразования в СВЧ - колебания, выделяется на коллекторе. В клистронах, так же как и в других СВЧ - приборах часто используют коллекторы, выполненные в виде полого конуса (рис.21).

Полый конус выполнен монолитным из нитрида алюминия методом горячего прессования, металлические замкнутые проводники выполнены посредством сканирования лучом лазера внешней поверхности полого конуса в местах соответствующего их расположения на глубину, равную толщине полого конуса. При этом толщину полого конуса и ширину металлических замкнутых проводников определяют выходные параметры электровакуумного прибора.

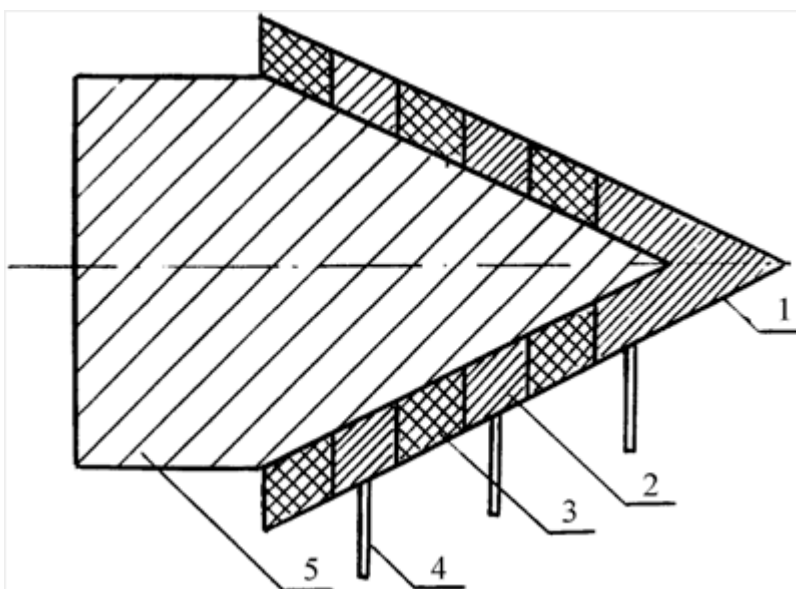


Рис. 21. Внешний вид коллектора: полый конус - 1, металлические замкнутые проводники - 2, изоляторы - 3, металлические выводы - 4, съемная втулка - 5.

Узел вывода энергии. Это отдельный узел мощного СВЧ – прибора, размещённый между электродинамической структурой, взаимодействующей с электронным потоком, контуром, ЗС и волноводом потребителя энергии. Одной из главных задач является обеспечение передачи СВЧ - энергии из вакуумной части прибора в волновод потребителя, находящийся под атмосферным или избыточным давлением.

Основными элементами вывода энергии являются элемент связи, трансформатор и диэлектрическое окно (рис.22):

- Элемент связи с выходным устройством. Это, например, петля связи в резонаторе, как в магнетроне, или щель в стенке резонатора, как в клистроне, ЛБВ и ЛОВ.

- Трансформатор. Размещается за элементом связи. Трансформация сопротивлений необходима для того, чтобы эквивалентное электрическое сопротивление, вносимое полезной нагрузкой, было бы таким, которое необходимо по условиям работы самого прибора.

- Диэлектрическое окно – отдельный самостоятельный узел вакуумного уплотнения. Выполняет функцию разделения вакуумной и не вакуумной частей прибора.

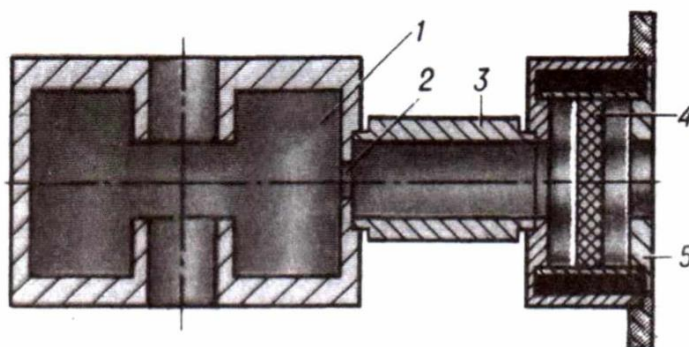


Рис. 22. Общая схема волноводного узла вывода энергии из выходного резонатора клистрона: 1-резонатор клистрона, 2-щель связи с резонатором, 3-трансформатор, 4-керамический диск «баночного» окна, 5-выходной фланец волновода

Окна вывода энергии для различных вакуумных СВЧ - приборов имеют следующие формы:

1. Окна в форме диска (рис.23). Преимущества: простота формы, технологичность, широкополосность. Недостаток: низкая стойкость к нагреву и внешнему давлению. Чаще всего применяются в клистронах, ЛБВ и ЛОВ.



Рис. 23. Гермофланец с запаянным в него керамическим диском

2. Окна в форме конуса. Преимущества: высокая стойкость к нагреву и внешнему давлению. Недостаток: уменьшенная, по сравнению с диском, широкополосность. Основной тип окна на самом высоком уровне мощности. Применяются в магнетронах.

3. Окно в форме колпака в коаксиально-волноводном переходе. Используется при большой длине рабочей волны, где остальные типы окон имели бы слишком большие габариты. Преимущества: простота формы, технологичность, широкополосность.

Окна выполняются из бериллиевой керамики, сапфира или CVD-алмаза и других материалов, они расположены между отрезками металлического волновода и герметично соединяются с ними по торцам с помощью металлических фланцев из сплава инконель сваркой через плоские кольца, выполненные из алюминия. Окно вывода энергии снабжено в области герметичного соединения с двух сторон от диэлектрической пластины плоскими компенсирующими элементами, выполненными в виде колец из молибдена, при этом они просто плотно прилегают к отрезкам металлического волновода.

Использование в качестве материала диэлектрической пластины из алмаза CVD позволяет значительно уменьшить диэлектрические потери окна вывода энергии СВЧ, в том числе потери СВЧ-мощности.

Магнетрон

Магнетрон – это вакуумный генератор, в котором преобразование энергии электронного потока в энергию СВЧ-колебаний происходит в процессе его движения в пространстве взаимодействия – в кольцевом зазоре между соосными цилиндрическими катодом и анодом, причём на поверхности анода размещена резонансная замедляющая система в форме полостей, а вдоль оси прибора приложено постоянное магнитное поле.

Особенностью магнетрона является то, что он имеет замкнутую замедляющую систему и замкнутый электронный поток, благодаря чему обеспечивается стопроцентная обратная связь.

Конструкции и принцип работы магнетрона

По своей принципиальной схеме магнетрон представляет собой двухэлектродную лампу (диод), помещённую в магнитное поле. Анод лампы — медный цилиндр, в центральной части которого высверлено круглое широкое отверстие (рис. 24). По периферии центрального отверстия высверлено несколько одинаковых цилиндрических отверстий меньшего диаметра, которые представляют собой камеры объёмных резонаторов. Каждый такой объёмный резонатор имеет щель, соединяющую его с центральным отверстием анода.

По оси центрального отверстия анодного блока расположен подогревательный катод с высокой эмиссионной способностью. Нить накала катода соединяется с источником питания специальными выводами. Предусмотрен также отдельный вывод для выхода энергии высокочастотных колебаний из камер объёмных контуров.

К торцам анодного блока магнетрона привариваются медные крышки. Внутри анода создаётся вакуум. Для лучшего охлаждения корпус блока имеет на внешней поверхности ребристые радиаторы.

Принцип действия магнетронного генератора основан на возбуждении колебаний в объёмных резонаторах. Для этого между анодом и катодом прибора прикладывается высокое напряжение, положительный полюс которого соединен с анодом. Кроме того, как уже отмечалось, весь блок в целом помещается в сильное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами.

Магнитное поле в пространстве взаимодействия создается двумя кольцевыми постоянными магнитами (рис.25) и магнитопроводом, в качестве которого служат корпус и фланец. Для более интенсивного охлаждения магнетрона анодный блок окружен радиатором. Для снижения паразитного

излучения в месте соединения магнетрона с внешней цепью имеется металлическая оплетка.

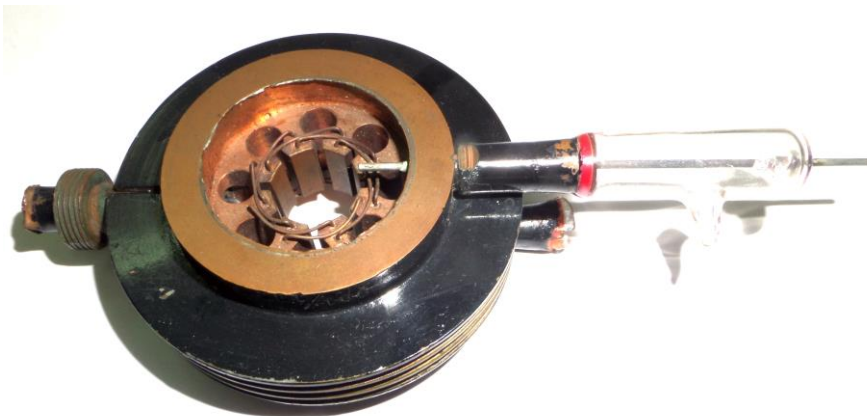
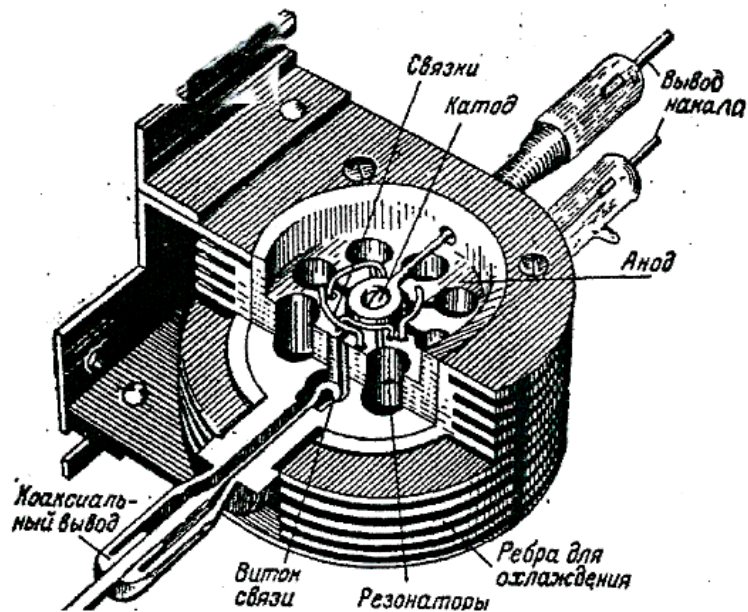


Рис. 24. Схема и вид многокамерного магнетрона в разрезе

В результате электроны, вылетающие из катода, находятся под воздействием двух сил: одна сила, обусловленная наличием электрического поля, заставляет электроны двигаться в радиальном направлении; другая, обусловленная наличием магнитного поля, заставляет электроны искривлять свою траекторию.

Подбирая величину электрического поля (изменением анодного напряжения) и величину магнитного поля (изменением силы магнита), можно добиться такого положения, когда электроны, вылетевшие с катода, описав окружность, будут проходить вблизи анода, после чего снова возвращаться на катод (рис. 26). При этом лишь незначительная часть излучённых электронов попадает на анод, в то время как большая их часть возвращается в область катода.

Около анода создаётся условие динамического равновесия, при котором возвращающиеся к катоду электроны заменяются вновь вылетевшими.

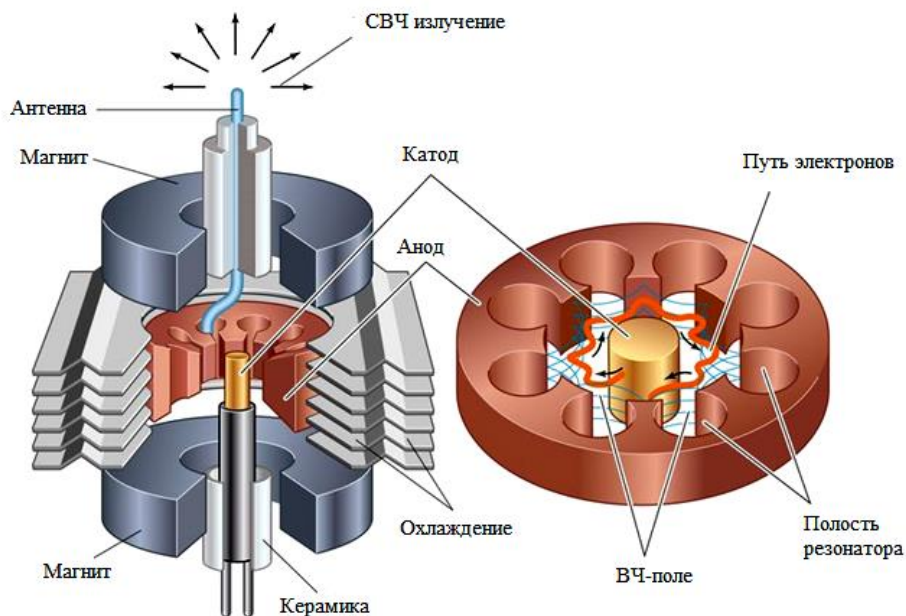


Рис. 25. Основные узлы многорезонаторного магнетрона

Так как электроны непрерывным потоком двигаются от катода к аноду, возле анода, около щелей объёмных резонаторов образуется вращающийся пространственный заряд кольцевой формы (рис. 25, 26). Двигаясь по окружности центрального отверстия анодного блока, электроны проходят около щелей объёмных резонаторов. Благодаря этому в каждом объёмном

резонаторе возбуждаются, а затем поддерживаются незатухающие высокочастотные колебания.

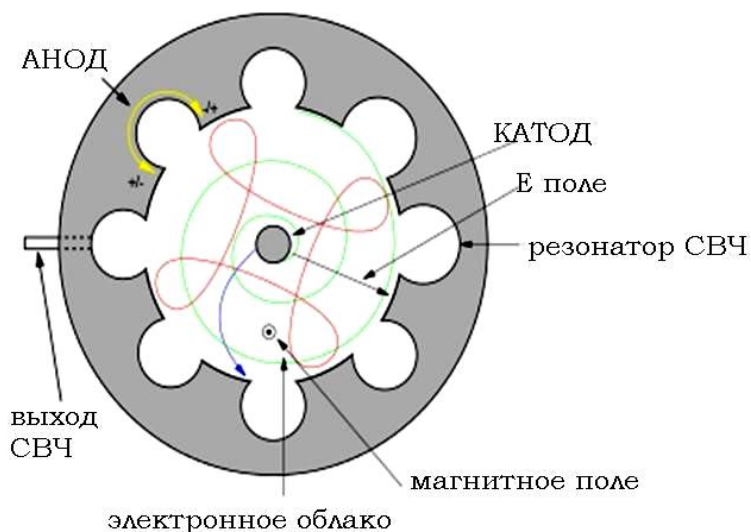


Рис. 26. Схема движения электронов внутри магнетрона

Энергию высокочастотных колебаний из магнетрона в большинстве случаев выводят при помощи витка провода (рис. 25), помещённого в полость одного из резонаторов. Другой конец витка соединяется с коаксиальной линией (или с волноводом), по которой энергия и передаётся в антенну.

Для отбора энергии вблизи одного из резонаторов подключена магнитная петля (петля связи, рис.27), представляющая из себя медную проволоку, которая через отрезок коаксиального волновода соединена с излучателем.

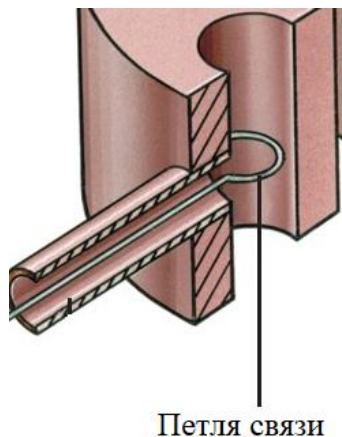


Рис. 27. Петля связи в магнетроне

Вывод СВЧ - энергии. Узел вывода энергии рассматривается в разделе «Клистроны». В магнетронах используется окна в форме конуса (рис. 28.).

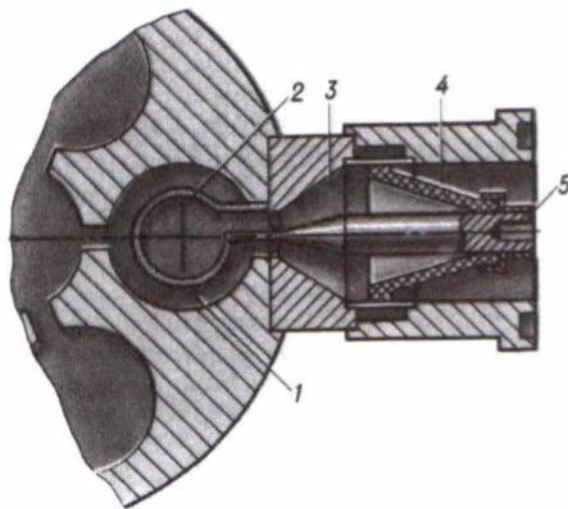


Рис. 28. Общая схема узла коаксиального вывода энергии магнетрона: 1-резонатор, 2-элемент связи с замедляющей системой, 3-трансформатор, 4-«окно» вывода энергии в виде конуса, 5-контакт с внешней нагрузкой

Так как связь между всеми резонаторами магнетрона очень сильная, то одного витка (в полости одного из резонаторов) вполне достаточно, чтобы отобрать энергию из всех резонаторов магнетрона.

Катод. Выпускаемые в настоящее время магнетроны можно условно разбить на две группы: а) магнетроны с накаливаемым термо-вторично-эмиссионным катодом; б) магнетроны с безнакальным запуском.

В магнетронах с накаливаемым катодом иницирование и поддержание генерации обеспечивается нагретым до рабочей температуры термо-вторично-эмиссионным катодом. В этих магнетронах, в зависимости от уровня выходной мощности, используются различные типы эффективных катодов (оксидные, металлопористые и металлосплавные (рис.29)).

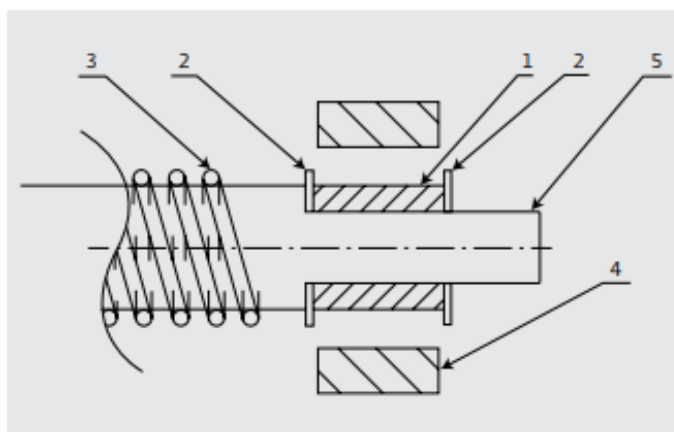


Рис.29. Конструкция катодного узла сверхмощного магнетрона 2-мм диапазона длин волн: 1 – металлосплавной катод из соединения иридия с лантаном; 2 – концевые экраны; 3 – подогреватель; 4 – анод; 5 – керн катода

В магнетронах с безнакальным запуском инициирование генерации обеспечивается током полевой эмиссии с автоэлектронных катодов (АЭК), а её поддержание - вторично-эмиссионными катодами (ВЭК) (рис.30). Катоды таких магнетронов состоят из чередующихся АЭК - колец из танталовой фольги толщиной около 4 микрон и ВЭК - втулок протяжённостью от долей до нескольких миллиметров, изготовленных из материала со стабильными вторично-эмиссионными свойствами. В этих магнетронах особая роль отводится вторично-эмиссионным катодам, которые, с одной стороны, должны сохранять свои свойства при воздействии на них различных дестабилизирующих факторов и, с другой стороны, должны являться стабильными и надёжными активаторами АЭК.

Магнетронные генераторы позволяют получить на волне 10 см мощность в импульсе более 3000 кВт, а на волне 3 см — свыше 500 кВт. Известны магнетроны, которые дают возможность создать колебания, длина волны которых 2 мм.

Существенным недостатком всех магнетронных генераторов является трудность изменения частоты генерируемых колебаний.

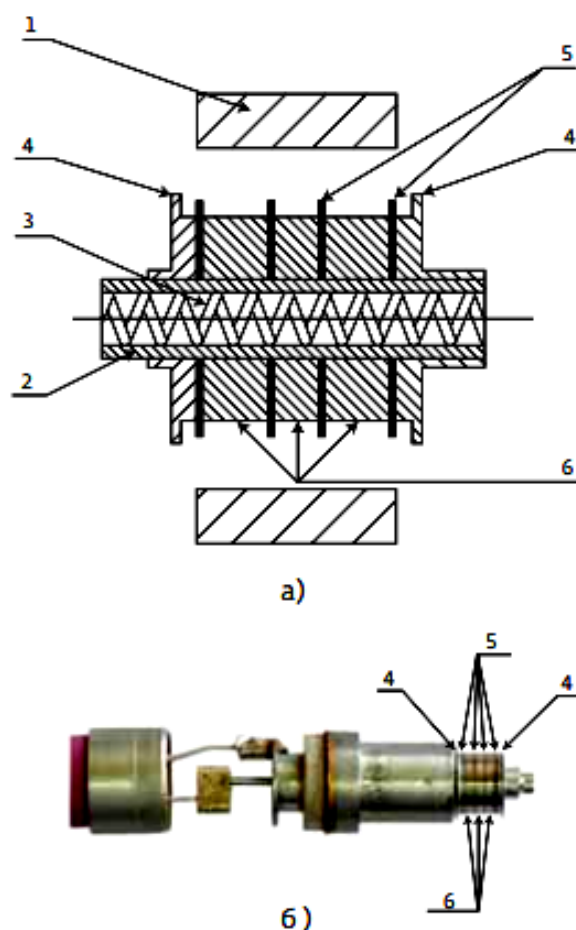


Рис. 30. Катодный узел магнетрона с безнакальным запуском: а - конструкция катода; б - реальный катодный узел: 1 – анод; 2 – kern катода; 3 – технологический подогреватель (во время эксплуатации не используется); 4 – концевые экраны; 5 – автоэлектронные катоды; 6 – вторично-эмиссионные катоды

Лампы бегущей и обратной волны

Всё большее применение находят генераторные приборы СВЧ, в которых протяжённый электронный поток взаимодействует с волнами, распространяющимися вдоль нерезонансных замедляющих систем. Эти приборы получили название *ламп с бегущими волнами* (ЛБВ).

ЛБВ включают лампы с прямой бегущей волной (ЛПБВ) и лампы с обратной бегущей волной (ЛОБВ) в зависимости от того, совпадает ли направление перемещения электронного потока с направлением бегущей волны или является встречным.

Лампа бегущей волны – приборы, в которых электронный поток взаимодействует с основной прямой замедленной волной.

Лампа обратной волны – приборы, в которых используется взаимодействие электронов с обратными волнами.

Отличительной особенностью ламп прямой волны является то, что направление движения электронов совпадает с направлением движения энергии по замедляющей системе. В лампах обратной волны электронный поток движется навстречу потоку энергии. Эти особенности определяют расположение входа и выхода СВЧ - сигналов. В лампах прямой волны вывод энергии расположен со стороны коллектора, в то время как в ЛОВ вывод энергии находится на конце замедляющей системы, обращённом к электронной пушке.

Лампы прямой и обратной волны подразделяют на две группы, различающиеся направлением и назначением постоянного магнитного поля. К первой группе так называемых приборов типа О относятся лампы с продольным магнитным полем, служащим только для целей фокусировки прямолинейного электронного пучка.

Вторая группа ЛБВ и ЛОВ называется приборами типа М и отличается тем, что постоянное магнитное поле является поперечным. Электроны в лампах М-типа двигаются в постоянных скрещённых электрическом и магнитном полях, как в обычных магнетронных генераторах.

Рассмотрим конструкцию и принцип работы ЛБВ на примере лампы прямой бегущей волны типа О.

Принцип работы лампы бегущей волны

Принцип действия ламп бегущей волны (ЛБВ) основан на механизме длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны. На рис.31 схематично представлено устройство ЛБВ.

Катод электронной пушки 1 испускает электроны, которые под воздействием напряжений на ускоряющих электродах 2, спирали 4 и коллекторе 8 образуют электронный поток, движущийся внутри спирали.

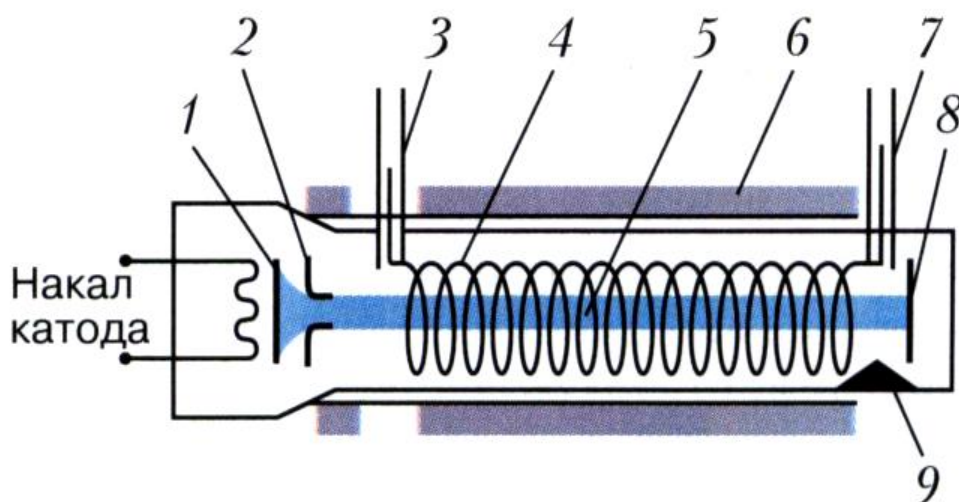


Рис. 31. Схема лампы бегущей волны: 1 – катод, 2 – анод, 3 – ввод СВЧ - энергии, 4 – замедляющая система, 5 – электронный поток, 6 – фокусирующая система (соленоид), 7 – вывод СВЧ - энергии, 8 – коллектор, 9 – поглотитель энергии СВЧ-колебаний

Входные сигналы с помощью элемента связи 3 возбуждают в замедляющей спирали 4 электромагнитную волну, которая, распространяясь к выходному концу, взаимодействует с электронным потоком и усиливается. Электромагнитная волна, возбуждаемая в замедляющей системе, распространяется вдоль системы к её выходному концу с замедленной скоростью. Замедление волны определяется соотношениями геометрических размеров системы, причем, чем меньше шаг и больше диаметр спирали, тем больше замедление. Начальная скорость электронов определяется величиной напряжения, приложенного между катодом и замедляющей системой. Требуемое для усиления условие превышения скорости электронов над скоростью волны благодаря применению систем с большим замедлением выполняется при сравнительно небольших величинах напряжения.

Фокусировка протяжённого электронного потока осуществляется соленоидом 6. Высокочастотные колебания выводятся из лампы через выходной волновод 7.

К настоящему времени разработано много промышленных типов этих ламп, которые применяются в усилительных каскадах приёмных устройств.

Широкое практическое применение ЛБВ объясняется их широкополосностью, низким уровнем шумов, большим коэффициентом усиления, а также простотой эксплуатации.

Конструкция ЛБВ

В ЛБВ основными узлами являются: электронная пушка, замедляющая система (чаще всего в виде спирали) и коллектор (рис.32). Они размещаются в металлостеклянном (рис.33) или металлическом баллоне, а фокусирующий соленоид располагается снаружи. Спираль крепится между диэлектрическими стержнями, которые должны обладать малыми потерями на СВЧ и хорошей теплопроводностью. Последнее требование важно, так как когда спираль нагревается из-за оседания электронов и нужно отводить это тепло, чтобы не было прогорания спирали.

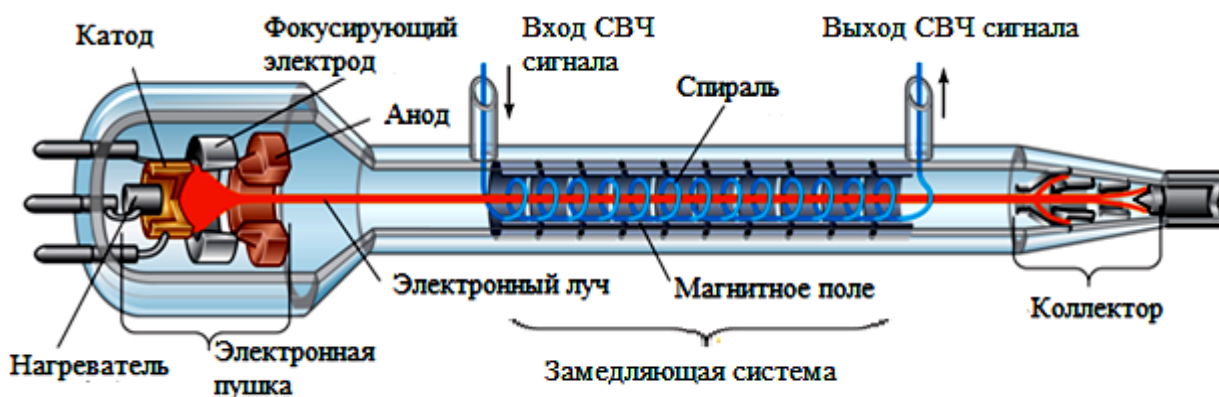


Рис. 32. Основные узлы спиральной лампы бегущей волны

На входе и выходе замедляющей системы есть специальные устройства для согласования её с линиями передачи. Последние могут быть либо волноводными, либо коаксиальными. На вход поступает СВЧ - сигнал, который усиливается в приборе и с выхода передается в нагрузку.



Рис. 33. Внешний вид ЛБВ в металлостеклянном корпусе

Трудно получить хорошее согласование во всей полосе усиления лампы. Поэтому есть опасность возникновения внутренней обратной связи из-за отражения электромагнитной волны на концах замедляющей системы, при этом ЛБВ может перестать выполнять свои функции усилителя. Для устранения самовозбуждения вводится поглотитель, который может быть выполнен в виде стержня из поглощающей керамики или в виде поглощающих плёнок.

Замедляющая система. Наибольшее распространение в технике СВЧ получили замедляющие системы, представляющие собой линии передачи с периодически повторяющимися неоднородностями. Некоторые из них представлены на рис. 34.

Широко используется замедляющая система в виде цилиндрической спирали (рис.34, 1). Обычно спираль изготовлена из немагнитного материала – вольфрамовой или молибденовой проволоки. Шаг спирали на обоих её концах плавно увеличивается для получения согласования

Фокусирующая система. Для фокусировки электронного потока в ЛБВ могут применяться те же средства, что и для клистронов, рассмотренные выше. Специфическим средством фокусировки в ЛБВ является магнитная периодическая фокусирующая система (рис.35).

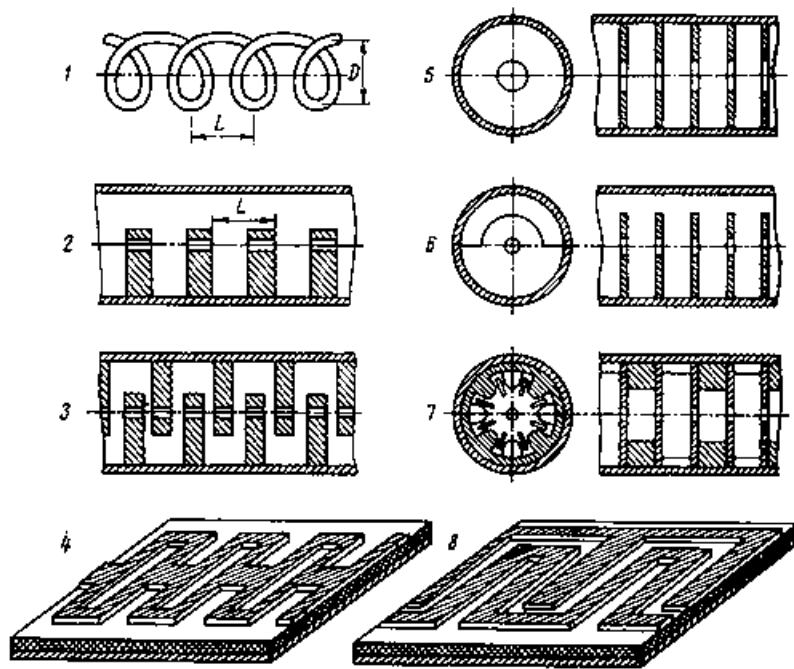


Рис. 34. Замедляющие системы: 1 — спираль, 2 — гребенка, 3 — встречные штыри, 4 — сдвоенный меандр на диэлектрической подложке, 5 — диафрагмированный волновод, 6 — диафрагмированный волновод с индуктивными щелями связи, 7 — “лист клевера”, 8 — меандр на диэлектрической подложке

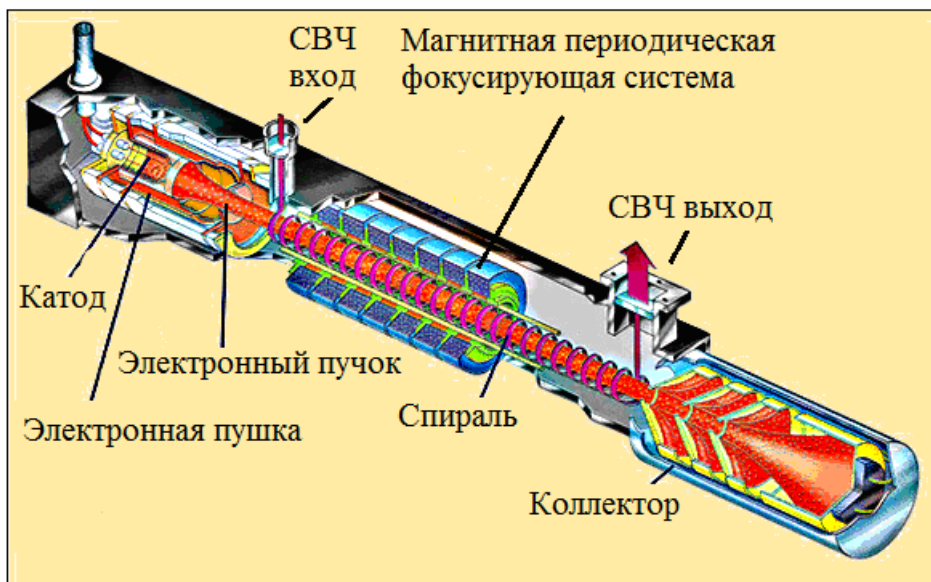


Рис.35. Конструкция ЛБВ с магнитной периодической фокусирующей системой

Электронные пушки. Специфическим для ЛБВ является широкое применение пушек с сеточным управлением или с управляющим электродом (рис.36).

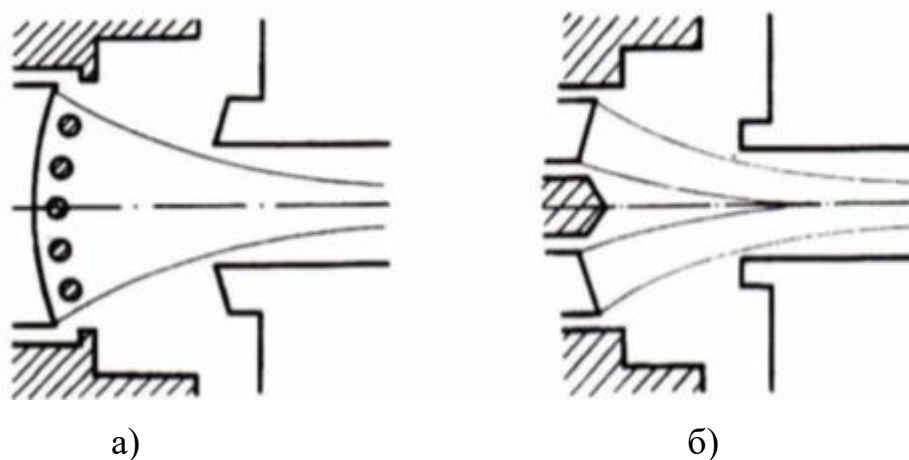


Рис. 36. Пушки многорежимных ЛБВ: а – пушка с управляющей сеткой; б – пушка с управляющим электродом

Коллекторы. Коллекторы, применяемые в ЛБВ, по своей конструкции аналогичны используемым у клистронов.

Узел вывода энергии. Вывод СВЧ - энергии осуществляется способом, аналогичным клистроноу. На рис.37 и рис.38 изображены различные конструкции баночных окон для лампы бегущей волны, встроенных в волноводный переход. Само диэлектрическое окно выполнено в форме диска.



Рис.37. Асимметричное баночное окно, встроенное в волноводный переход

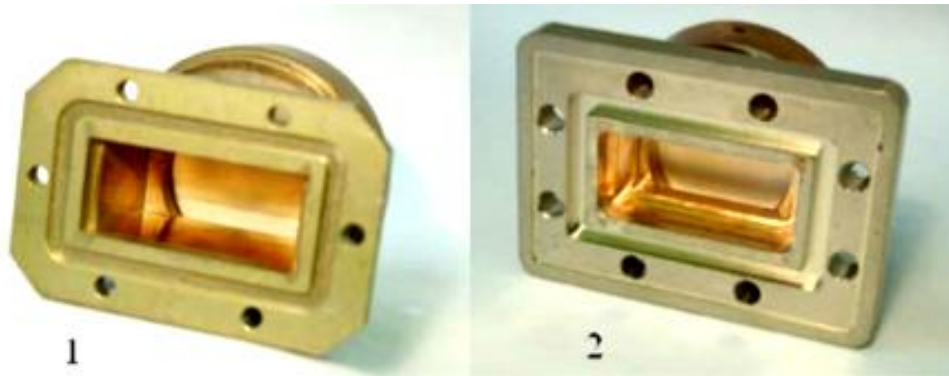


Рис. 38. Широкополосные асимметричные окна, вид со стороны присоединительного фланца: 1 – окно с индуктивной ступенькой в выходном волноводе; 2 – окно с короткой ступенькой в выходном волноводе

2.4.2. Изготовление резонаторов и замедляющих систем

В резонансных СВЧ – приборах (магнетронах и клистронах) для повышения эффективности взаимодействия электронов с высокочастотным полем применяют резонаторы, которые увеличивают амплитуду поля. На рис. 39 показаны разновидности резонаторных систем. Практически применяются резонаторы на основе волноводов, кольцевые и радиальные и т.д. Точность размеров резонаторов определяет КПД, воспроизводимость и малый разброс частот генерируемых ими электромагнитных колебаний.

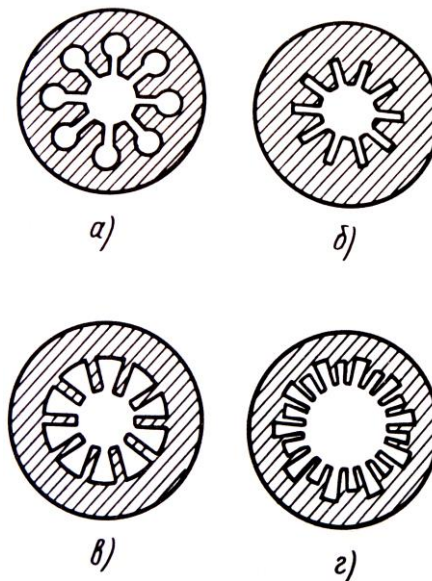


Рис. 39. Резонаторные системы:
а - щель-отверстие; б - щелевая; в - лопаточная; г - «восходящее солнце»

Основным методом изготовления щелевых резонаторных систем является механическая обработка: выдавливание заготовок, токарная обработка их торцевых поверхностей и анодного отверстия, рассверливание анодных отверстий, распиливание щелей, чистовая токарная обработка и обработка плоскости полученного блока и отверстия под вывод энергии. В последнее время щели в резонаторных системах изготавливают методом электроэрозионной обработки с помощью непрофилированного электрода-инструмента.

В нерезонаторных приборах, например ЛБВ, применяются замедляющие системы (рис.34 и рис.40). Замедляющие системы (ЗС) выполняются в виде ячеек той или иной формы, периодически повторяющихся в одном или нескольких направлениях.

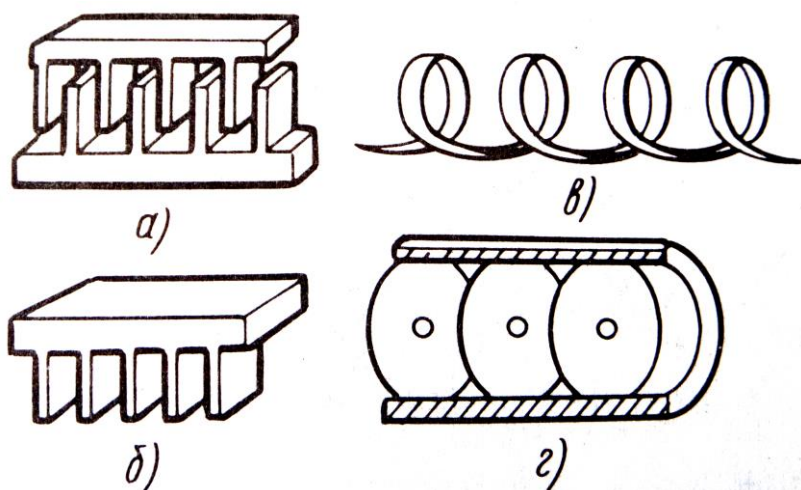


Рис.40. Замедляющие системы:

а - штыревая; б - гребенчатая; в - ленточная спиральная; г - диафрагмированный круглый цилиндрический волновод

Простейшим типом ЗС является спираль, навитая из проволоки или ленты. Замедляющие системы должны иметь хороший теплоотвод, что позволит работать при значительных плотностях потока мощности в электронном пучке и мелкую структуру (структура должна быть тем мельче, чем короче длина рабочей волны). Поэтому очень высокие требования

предъявляются к точности их изготовления. Обычно замедляющие системы изготавливают из меди фрезерованием, штамповкой, выдавливанием, электронно-лучевой, лазерной или электроэрозионной обработкой, а в некоторых случаях – фотокопированием или электролитическим осаждением.

В широкополосных усилителях и широкодиапазонных генераторах применяются замедляющие системы в виде одно-, двухзаходных и концентрических спиралей. Спирали изготавливаются из молибденовой или вольфрамовой проволоки диаметром 0,03 – 0,5 мм, которую иногда для повышения поверхностной электропроводности покрывают слоем серебра, сначала горячей металлизацией, а затем гальваническим путем.

2.4.3. Катоды вакуумных СВЧ - приборов

В современных приборах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона часто требуется плотность тока эмиссии в статическом режиме, равная нескольким амперам и более с одного квадратного сантиметра. Так как оксидные катоды не могут обеспечивать такую плотность тока, то разработка многих типов СВЧ - приборов стала возможным лишь после появления **металлопористого вольфрамо-бариевого камерного катода** или **L-катода**. L-катод является сложным катодом, в котором проявляются свойства пленочного катода. В нем пленка бария, активирующая поверхность вольфрама и разрушающаяся во время работы катода вследствие испарения, ионной бомбардировки и реакций с газами, выделяющимися из оболочки и деталей прибора, непрерывно возобновляется за счет поступления бария из специальной камеры с запасом активного вещества (рис. 41). L-катод обеспечен специальными карманами для активного вещества, которые находятся в вольфрамовой губке. Увеличенный запас активного вещества позволяет в широких пределах регулировать долговечность катода.

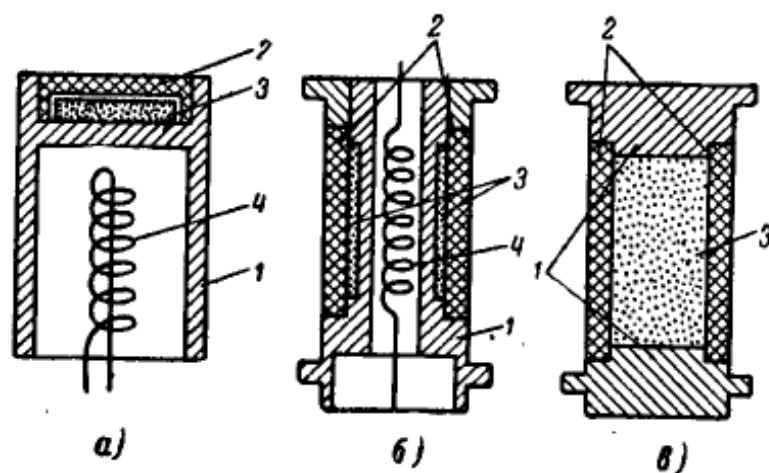


Рис.41. Различные конструкции L-катодов:
 а - плоский торцевой катод; б - цилиндрический катод косвенного накала;
 в - цилиндрический катод прямого накала; 1 - молибденовый корпус; 2 -
 вольфрамовая губка; 3 - активное вещество; 4 - подогреватель

В любом L-катоде имеется камера, заполненная активным веществом и закрытая пористой вольфрамовой стенкой (губкой), наружная сторона которой является эмитирующей поверхностью. Конструкция катода в значительной мере определяется формой губки, методом сочленения, способом крепления катодов к держателю. Губки могут иметь форму диска или колпачка с плоской или вогнутой-сферической торцевой поверхностью. Внешний вид металлопористого катода приведен на рис.42.



Рис.42. Внешний вид металлопористых катодов

Главным недостатком камерных катодов является значительное испарение бария, сложность и трудоемкость их изготовления, многочисленные технологические проблемы, такие как:

а) затруднительная откачка выделяющейся при разложении карбонатов двуокиси углерода;

б) окисление стенок пор в вольфрамовой губке двуокисью углерода и пассивация в связи с этим вольфрама;

г) затруднения, связанные с герметичностью соединения деталей из губчатого вольфрама с молибденовым керном;

д) затруднения, связанные с передачей тепла от подогревателя через сложную стенку, и обусловленные этим высокая рабочая температура подогревателя, а также неизотермичность эмитирующей поверхности.

В поисках решения этих проблем были созданы ***пропитанные (импрегнированные) и прессованные катоды***. Импрегнированные катоды сходны с камерными катодами как по принципу работы, так и по конструкции.

Пропитанные и прессованные катоды представляют собой пористую губку из тугоплавкого металла, поры которой заполнены активным веществом, причем у первого активным веществом пропитывается заранее изготовленная губка, а у второго губка спекается одновременно с активным веществом. Наиболее часто употребляют для изготовления губок тугоплавкие материалы – вольфрам, рений, молибден.

Активное вещество представляет собой химическое соединение окиси бария с кислотами или амфотерными окислами некоторых элементов.

По форме различают торцевые, прямоугольные и цилиндрические катоды. Эмитирующая поверхность может быть плоской, сферической или цилиндрической и иметь размеры от доли до нескольких десятков квадратных миллиметров. На рис. 43 показаны схемы конструкций различных типов прессованных и пористых катодов.

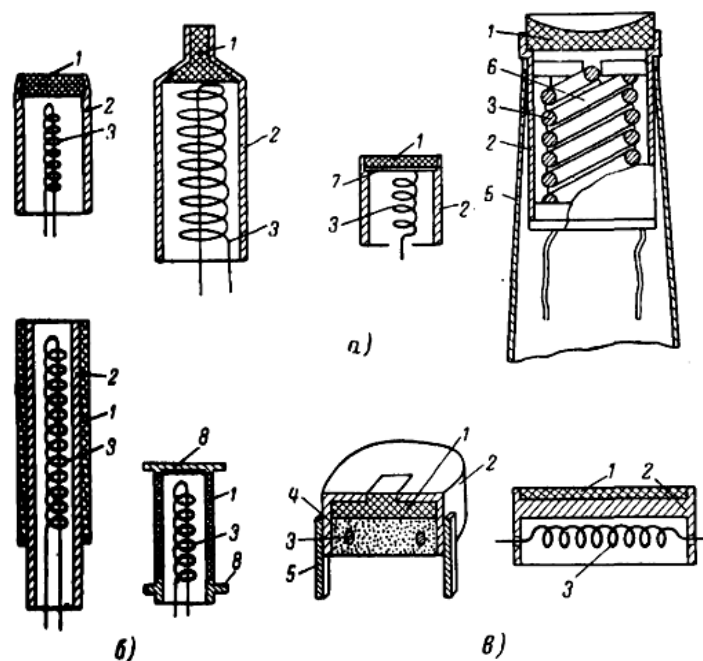


Рис.43. Схемы конструкций прессованных пропитанных катодов с плоской и сферической эмитирующей поверхностью:
 а - торцевой катод с плоской и сферической поверхностью; б - цилиндрические катоды; в - катоды с прямоугольной поверхностью; 1 - эмитирующая губка; 2 - корпус; 3 - подогреватель; 4 - наполнитель для подогревателя; 5 - крепление катода; 6 - алундовый стержень-фиксатор; 7 - молибденовая шайба; 8 - держатели

Как видно из рисунка, торцевой импрегнированный катод по конструкции сходен с камерным катодом, но значительно проще. Он может состоять принципиально всего из двух деталей: молибденового трубчатого керна катода и запрессованного или завальцованного в патрон диска из губчатого вольфрама, поры которого заполнены или пропитаны активным веществом, чаще всего алюминатом бария.

Корпус изготавливается из листового молибдена штамповкой толщиной 0,1-0,2 мм. Коэффициент расширения молибдена близок к коэффициенту расширения губки, что обеспечивает их прочное соединение. Соединение производится с помощью тантала толщиной 0,01-0,15мм.

В качестве изоляторов для крепления катода применяются керамические детали различной формы.

Для изготовления губки исходным материалом служат порошки вольфрама и молибдена марки ВЧ и порошки рения с соответствующим

размером зерна равным 0,5-2 мкм. Размер зерна оказывает влияние на скорость испарения бария с катодов и на их эмиссионную способность.

Для изготовления катодов применяются вещества марки ХЧ и ЧДА: карбонаты бария и калия, гидроксид алюминия, оксид алюминия, триоксид вольфрама и оксид кремния, средний размер зерен, которых не превышает нескольких микрон. Прессованные и пропитанные катоды хранятся в герметичных ампулах.

Внешний вид импрегнированных катодов показан на рис. 44.



Рис.44. Внешний вид пропитанных катодов.

Задание:

1. Рассмотреть технологию и оборудование электроэрозионной обработки деталей из меди при изготовлении вакуумных СВЧ - приборов.

2. Рассмотреть конструкцию и технологию изготовления металлопористого катода.
3. Рассмотреть конструкцию и технологию изготовления импрегнированного катода.
4. Рассмотреть конструкцию и технологию изготовления металлосплавного катода.
5. Перспективы развития катодов для мощных вакуумных СВЧ - приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехмейстер, Е. И. Технология производства электровакуумных приборов / Е. И. Шехмейстер. – М. : Высш. шк., 1992. – 544 с.
2. Александров, Е.М. Технология и свойства материалов эмиссионной электроники: учеб. пособие / Е.М. Александров, Г.Д. Сироткин; Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново, 1979.
3. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева [и др.]. – М.: «ЭНЕРГИЯ», 1966. - 369 с.
4. Некоторые аспекты использования углеродных материалов в автоэлектронных эмиссионных катодах / А.Ф. Бобков [и др.]. // Журнал технической физики. - 2001. - Том 71. - Вып. 6. - С. 95-103.
5. Физический механизм работы скандатных катодов СВЧ - приборов / В.И. Капустин [и др.]. // Журнал технической физики. - 2017. - Том 87. - Вып. 1. - С.106-116.

Контрольные вопросы к разделу 2

1. Назовите основные теории соединения стекла с металлом. Опишите их суть.
2. Нарисуйте типовые конструкции спаев металла со стеклом
3. По какому признаку спаи делят на согласованные и несогласованные?
4. Какую конструкцию должен иметь спай металла и стекла с сильно отличающимися значениями КТР?
5. Дайте определение пайки. По какому признаку пайку относят к мягкой или твердой? В каких случаях используют эти виды пайки?
6. В какой среде проводят пайку металл – металл и почему?
7. Назовите особенности конструкции паяных узлов металл – металл электровакуумных приборов.
8. В чем преимущество керамики перед стеклом при использовании в качестве оболочки электронных приборов?
9. Назовите одну из основных причин, усложняющих технологию пайки металла с керамикой.
10. Нарисуйте наиболее характерные конструкции спаев металла с керамикой.
11. Назовите основные признаки, по которым классифицируют вакуумные СВЧ – приборы.
12. Опишите принцип действия клистрона.
13. Назовите основные конструктивные элементы клистронов.
14. Опишите конструкцию и принцип работы магнетрона.
15. На какие группы делятся магнетроны по виду используемого катода?
16. Назовите виды ламп с бегущими волнами. Охарактеризуйте их особенности.
17. Опишите принцип работы лампы бегущей волны.
18. Назовите основные конструктивные элементы ЛБВ.
19. Нарисуйте основные разновидности резонаторных систем. Назовите основные методы их изготовления.
20. Нарисуйте основные виды замедляющих систем. Назовите основные методы их изготовления.
21. Опишите возможные конструкции и свойства L-катода.
22. Назовите основные недостатки камерных катодов.
23. Опишите возможные конструкции и свойства пропитанных катодов

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В последние годы в связи с развитием вычислительной техники и информационных систем, автоматизацией процессов производства и управления, тенденцией к миниатюризации аппаратуры, широким использованием электронных индикаторов в бортовой аппаратуре, внедрением электроники во все сферы человеческой деятельности, включая быт, все более широкое применение в качестве средств отображения информации находят знакосинтезирующие индикаторы.

Элементы индикации различают по физическим явлениям, используемым для получения изображения, среди которых основными являются:

- свечение нити накала при протекании тока (накальные индикаторы);
- свечение некоторых кристаллических веществ под воздействием электрического поля (электролюминесцентные индикаторы);
- свечение люминофорного покрытия при бомбардировке электронами (вакуумно-люминесцентные индикаторы и электронно-лучевые приборы);
- свечение газа при электрическом разряде (газоразрядные элементы индикации);
- излучение квантов света при рекомбинации носителей заряда в кристаллических веществах (полупроводниковые светодиодные элементы индикации);
- изменение оптических свойств вещества под воздействием электрического поля (жидкокристаллические индикаторы).

Эти классы индикаторов в настоящее время находятся на разных уровнях развития.

В данном разделе более подробно рассмотрим технологию изготовления электролюминесцентных, жидкокристаллических и современных вакуумно-люминесцентных индикаторов.

3.1. Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ)

3.1.1. Принцип работы электролюминесцентных индикаторных приборов

В электролюминесцентных индикаторах (ЭЛИ) используется явление предпробойной электролюминесценции кристаллофосфоров, возникающей в сильных электрических полях. Если для инжекционной электролюминесценции в полупроводниковых индикаторах достаточно нескольких вольт, то ЭЛИ работают при напряжениях порядка нескольких десятков вольт и выше, что является их принципиальным недостатком.

Высокое электрическое поле, близкое к пробивному, может возбуждать полупроводниковые кристаллы как благодаря туннельному переходу электронов из валентной зоны и центров люминесценции в зону проводимости, так и посредством разгона электронов в электрическом поле до энергий, достаточных для ионизации кристаллической решетки и центров люминесценции, – ударная ионизация. Кроме того, может происходить ударное возбуждение центров люминесценции.

Рекомбинация электронов с дырками как непосредственно, так и через центры люминесценции, а также возвращение в исходное состояние возбужденных центров люминесценции приводят к излучению света люминесценции. Такую люминесценцию принято называть предпробойной электролюминесценцией.

В результате помещения кристалла в электрическое поле происходит наклон энергетических зон, что приводит к сужению потенциального барьера и возможности перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости путем туннельного проникновения (рис. 45, переход 1). Этот эффект носит название эффекта Зинера.

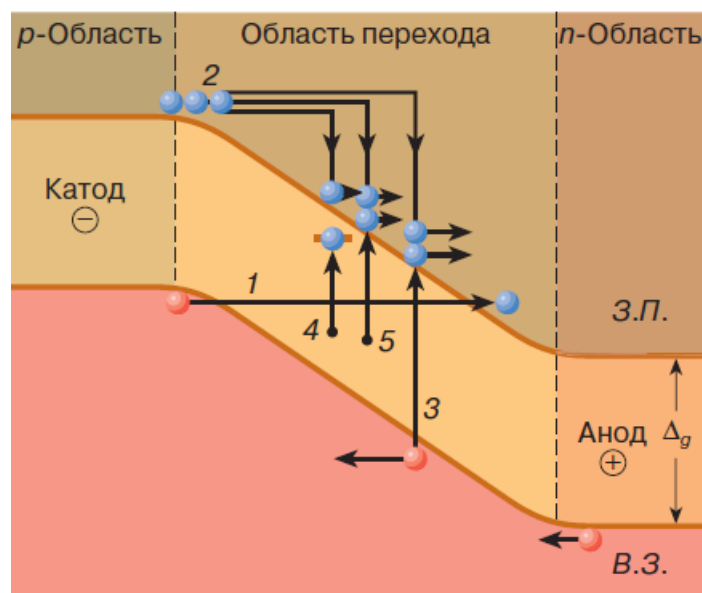


Рис. 45. Возможные электронные переходы, происходящие под действием сильного электрического поля в $p-n$ -переходе, включенном в обратном направлении

Схематически процессы ударной ионизации и ударного возбуждения в $p-n$ -переходе, включенном в обратном направлении, проиллюстрированы на рис. 45. В сильном электрическом поле электроны зоны проводимости ускоряются (переход 2), приобретая энергии, достаточные для выбивания электронов из валентной зоны в зону проводимости (переход 3). Наряду с этим происходят также возбуждение или ионизация центров люминесценции (переходы 4 и 5 соответственно). Аналогичные переходы происходят под действием ускоряемых дырок. Излучение возникает при переходах, обратных 4 (внутрицентровая люминесценция), а также 3 и 5 (межзонная рекомбинация электронов с дырками и рекомбинация через центры люминесценции соответственно). При некотором критическом значении напряженности электрического поля этот процесс приводит к столь резкому увеличению плотности тока, что происходит электрический пробой полупроводника.

Принято подразделять ЭЛИ на три типа:

- с порошковыми люминофорами, возбуждаемыми переменным током;
- с порошковыми люминофорами, возбуждаемыми постоянным током;
- с пленочными люминофорами, возбуждаемыми переменным и постоянным током.

3.1.2. Электролюминесцентные индикаторы с порошковыми люминофорами

Наиболее широко применимыми люминофорами являются соединения типа $A^{II}B^{VI}$, чаще всего ZnS , активированный некоторыми примесями для создания центров с высокой напряженностью поля (центров свечения).

Цвет свечения определяется материалом основы люминофора, природой и концентрацией вводимых примесей. Основным материалом для получения электролюминофоров является ZnS , легированный медью (люминофоры голубого и зеленого цветов свечения), марганцем (оранжево-желтое свечение). Люминесценция в красной области спектра получается при использовании в качестве основы люминофора полупроводниковых твердых растворов $Zn_{1-x}Cd_xS$ и $ZnS_{1-x}Se_x$. Примеры люминофоров, используемых в порошковых ЭЛИ переменного тока:

- синий – $ZnS : Cu, I$;
- зелёный – $ZnS : Cu, Br$;
- жёлтый – $ZnS : Mn, Cu, Br$;
- красный – $ZnS_{0,4}CdS_{0,6} : Cu, Br$.

Явление электролюминесценции порошкового люминофора $ZnS-Cu$ при подключении переменного напряжения к конденсатору, в котором он находится в смеси с диэлектриком, было открыто Дестрио (эффект Дестрио). Типичный источник света с порошкообразным люминофором состоит из стеклянной пластинки с прозрачным проводящим слоем двуокиси олова на ней, слоя (толщиной ~ 50 мкм) порошкообразного люминофора со средним размером частиц ~ 10 мкм, который распределен в диэлектрике

(полимеризующаяся смола, легкоплавкое стекло), изолирующего слоя и металлического электрода (слой алюминия). Подобные электролюминесцентные конденсаторы могут иметь площадь в десятки и даже сотни квадратных сантиметров и светиться при подведении к ним переменного напряжения величиной около 100 В. Хорошим электролюминофором является сульфид цинка, сильно легированный медью. В таком случае на поверхности его кристалликов образуются преципитаты (островки) фазы Cu_xS , $1 \leq x \leq 2$ с проводимостью р-типа. Эта фаза образует с полупроводником n-типа ZnS–Cu гетеропереход, который при обратном смещении является областью концентрации поля.

При наложении напряжения прикатодный гетеропереход смещается в обратном направлении и зона проводимости ZnS опускается ниже валентной зоны Cu_xS (рис. 46). В таком случае электроны из валентной зоны Cu_xS и из поверхностных центров (рис. 46, переходы 1 и 2 соответственно) способны туннелировать в зону проводимости кристаллика ZnS–Cu и затем разгоняться в сильном электрическом поле до энергий, необходимых для ударной ионизации кристаллической решетки или центров свечения. Возникающие при этом дырки захватываются центрами свечения, а электроны движутся к противоположному концу кристаллика, где происходит их рекомбинация с центрами свечения, ионизованными в предшествующий полупериод переменного напряжения, когда там было сильное поле.

Здесь предполагается наличие двух гетеропереходов, включенных так, что в каждый полупериод переменного напряжения возбуждение электролюминофора происходит только в одном из них. Одновременно у противоположного гетероперехода происходит рекомбинационное излучение, реализующее светосумму, запасенную в предыдущий полупериод напряжения.

Таким образом, свечение осуществляется по общепринятой двухстадийной модели: генерация свободных электронов и ионизация центров

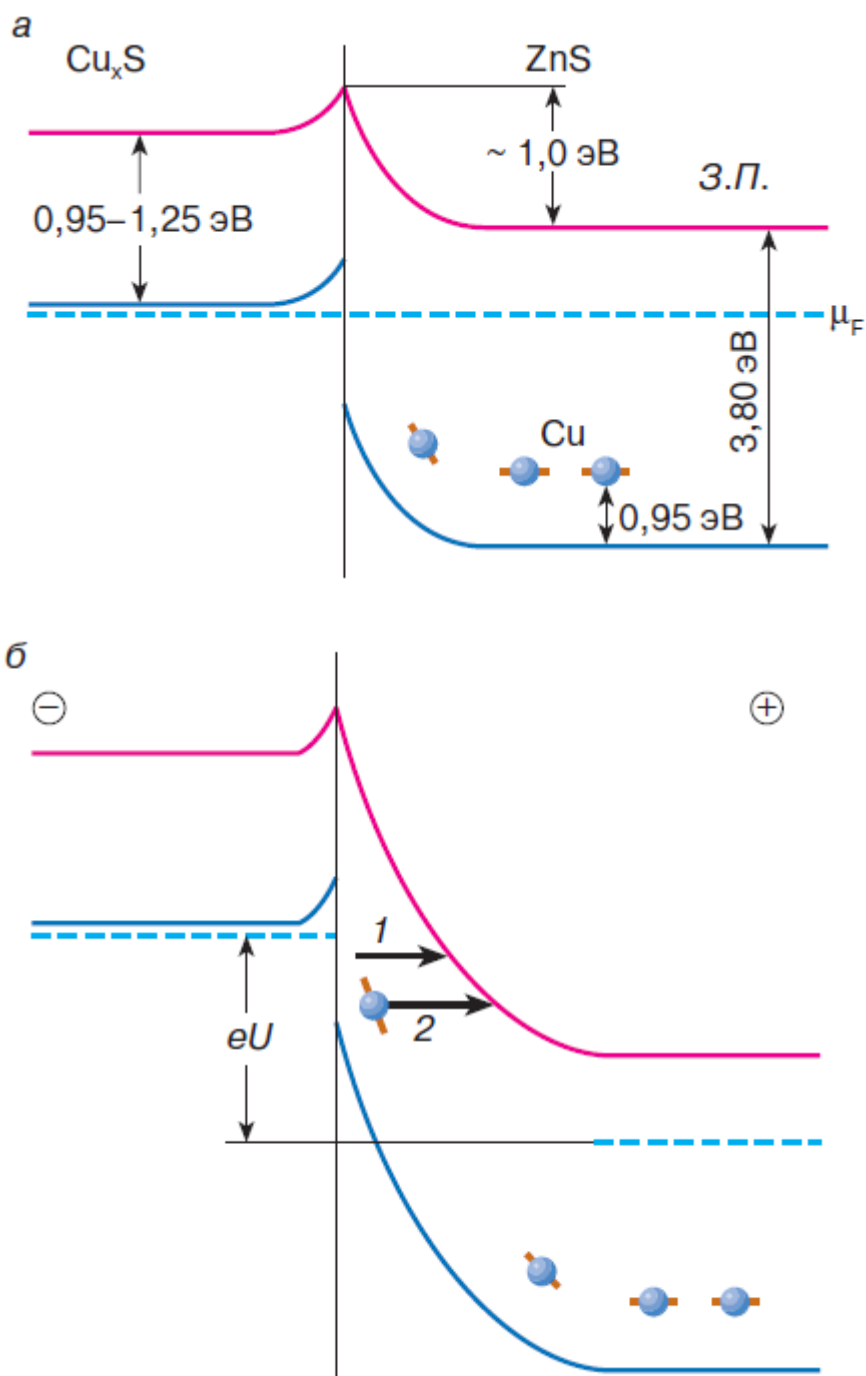


Рис. 46. Зонная схема гетероперехода $\text{Cu}_x\text{S} : \text{ZnS} : \text{Cu}$:
 а – при нулевом напряжении, б – при напряжении U в обратном направлении (штриховой прямой обозначен уровень минимальной энергии для выхода электрона из полупроводника в вакуум), μ_F – уровень Ферми

свечения в области сильного поля в прикатодной области и излучательная рекомбинация центров свечения в прианодной области, где напряженность поля мала.

Контраст ЭЛИ с порошковыми люминофорами при высокой внешней освещенности оставляет желать лучшего из-за сильного отражения люминофорного слоя.

При работе яркость люминофора снижается. При этом долговечность зелёных, красных и жёлтых люминофоров составляет несколько тысяч часов, только синий люминофор имеет очень низкий срок службы (приблизительно 100 часов).

Достоинство порошковых электролюминофоров состоит в том, что с их помощью легко готовятся плоские безвакуумные источники света сравнительно большой площади, которые нашли применение в светящихся панелях, табло, управляемых шкалах, мнемонических схемах, твердотельных экранах и т.д. Срок службы выпускаемых в настоящее время электролюминесцентных источников света на основе порошковых электролюминофоров ~ 3000 часов. Благодаря согласованию по спектральным характеристикам электролюминофоров с фотосопротивлениями создаются различные оптоэлектронные системы: приборы автоматики – оптроны, усилители и преобразователи изображения, например для рентгеноскопии.

ЭЛИ второго типа (с порошковыми люминофорами, возбуждаемыми постоянным током) реализованы на $ZnS:Mn$, излучающем желтый свет. Различные цвета можно получить, добавляя в ZnS ионы редкоземельных элементов и фтор, но в этих случаях эффективность по меньшей мере на порядок ниже, чем $ZnS:Mn$ (см. табл. 4). Для стабилизации параметров эти приборы после изготовления тренируются большими токами в течение нескольких десятков часов. Яркость ЭЛИ этого типа значительно снижается в процессе срока службы в статическом режиме (при постоянном токе), однако

долговечность может быть значительно повышена использованием импульсного режима.

Таблица 4

Порошковые люминофоры для ЭЛИ постоянного тока

Люминофор	Цвет свечения	Максимальная эффективность, %
ZnS:Mn	Жёлтый	0,5
Ba ₂ ZnS ₃ :Mn	Красный	0,001
CaS:Eu	Красный	0,001
CaS:Cl	Зелёный	0,08
SrS:Cl	Сине – зелёный	0,02
SrS:Mn	Жёлто – зелёный	0,013

3.1.3. Основные конструкции электролюминесцентных индикаторов с порошковым люминофором

В изготовлении электролюминесцентных приборов с порошковым люминофором существуют два основных технологических направления, определяемые природой и свойствами материалов, используемых в качестве связующего вещества при формировании ЭЛИ:

- 1) приборы с органическим связующим;
- 2) приборы на неорганической, стеклоэмалевой (керамической) основе.

Использование связующих веществ с резко отличными свойствами определяет специфику технологических процессов и эксплуатационные характеристики приборов. Конструктивно электролюминесцентные панели (индикаторы) могут выполняться на различных основаниях (рис. 47).

В зависимости от материала основания и типа связующего возможны различные варианты: приборы с органическим связующим выполняются на стеклянном (рис.47, а), органическом (рис.47, б) (жестком и гибком) основаниях, приборы с керамическим связующим – на металлическом (рис.47, в) и стеклянном (рис.47, г) основаниях.

Для защиты от влаги слоя электролюминофора в ЭЛИ с органическим диэлектриком в качестве связующего со стороны металлического электрода вводится защитное покрытие из органических герметиков. Кроме того, для

более надежной механической защиты и влагозащиты поверх герметика в некоторых конструкциях накладывают пластину стекла, органического материала или металла. Таким образом, суммарная толщина панели этого типа составляет 5-20 мм.

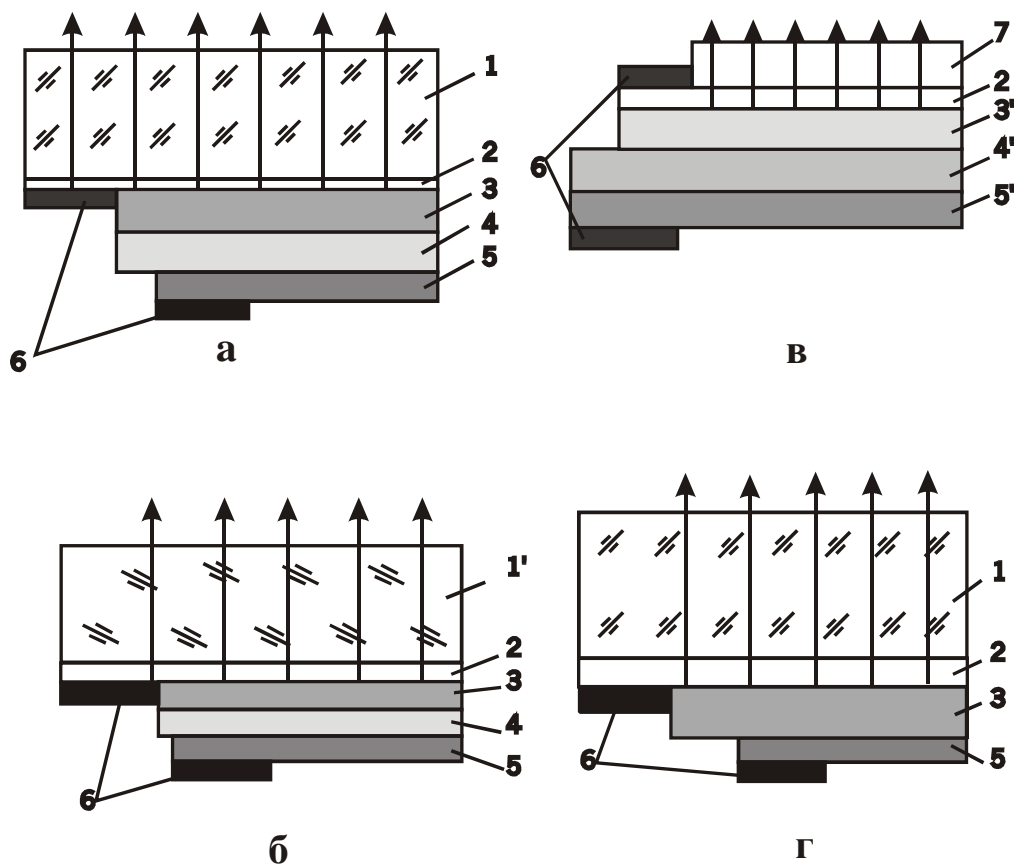


Рис. 47. Основные принципы конструктивно-технологического выполнения электролюминесцентных приборов разного назначения (а, б, в, г):

1 – стеклянная пластина – основание; 1' – прозрачное органическое основание; 2 – прозрачный электропроводящий слой; 3 – электролюминофор в органическом диэлектрике; 3' – электролюминофор в керамическом диэлектрике; 4 – защитный слой на органической основе; 4' – белый керамический грунт (защитный слой на керамической основе); 5 – металлический электрод; 5' – металлическая пластина – основание; 6 – контакты; 7 – защитное покрытие.

Величина начальной яркости керамических ЭЛИ примерно в 1,5-2 раза ниже (табл. 5), однако эти конструкции лишены ряда существенных недостатков, свойственных индикаторам с органическим диэлектриком. Они могут иметь суммарную толщину меньше 1 мм, не подвержены столь сильному

влиянию атмосферной влаги, вследствие чего стабильность яркости панелей становится более высокой. Кроме того, в ЭЛИ этого типа значительно снижена вероятность электрического пробоя, так как стеклоэмаль при нормальной температуре не имеет электрической проводимости.

ЭЛИ на органическом основании по эксплуатационным характеристикам уступают приборам на стеклянном и металлическом основаниях из-за пониженной влагостойкости. Области применения ЭЛИ на металлическом и органическом основаниях в настоящее время ограничиваются в основном осветительными устройствами (лампы, транспаранты, приборные доски и т.д.). В отечественной промышленности широкое распространение получили приборы на стеклянном основании с органическим связующим, перспективные для создания индикаторных устройств различного типа.

Таблица 5

Сравнительные характеристики ЭЛИ различных технологических исполнений

Тип связующего	Материал основания ЭЛИ	Характеристики ЭЛИ				
		Яркость начальная (зеленый цвет), кд/м ²	Время полуспада яркости, ч	Вес, г/дм ²	Толщина, мм	Максимальные габаритные размеры, мм
Керамическое	Стеклоанное	15-20	2000-3000	100	5-6	-
	Металлическое	15-20	2000-3000	50	до 1 мм	600×600
Органическое	Органическое гибкое	15-20	500-600	5	до 1 мм	300×300
	Органическое жесткое	15-20	500-800	60	5-7	750×7500
	Стеклоанное	30-40	800-1000	100-250	5-20	

3.1.4. Электролюминесцентные индикаторы с пленочными люминофорами (тонкопленочные электролюминесцентные излучатели)

Наряду с электролюминесцентными излучателями на порошковых люминофорах были созданы тонкопленочные электролюминесцентные излучатели (ТПЭЛИ). Такие излучатели позволяют получать яркость до 200 кд/м^2 . Эта яркость сравнима по величине с яркостью обычного телевизионного экрана.

ТПЭЛИ обладают некоторыми преимуществами по сравнению с излучателями на основе порошковых люминофоров. Они имеют большую яркость, стабильность, более высокую разрешающую способность и повышенный коэффициент нелинейности вольт-яркостной характеристики. Срок службы ТПЭЛИ на основе $\text{ZnS} : \text{Mn}$ достигает 20000 часов, что намного больше, чем у электролюминесцентных источников света на основе порошковых электролюминофоров. Цвет свечения таких образцов определяется излучением, возникающим при внутрицентровых переходах в возбужденных атомах Mn; длина волны этого излучения 585 нм (желто-оранжевая область спектра). Введение других активаторов (например, редкоземельных элементов) позволяет расширить диапазон передаваемых цветов. Диэлектрики в ТПЭЛИ переменного тока, так же как в случае электролюминесцентных индикаторов на основе порошковых электролюминофоров, играют роль стабилизатора, ограничивая величину тока, проходящего через активный слой (предохранение от пробоя). Они также формируют электронные состояния на границе раздела с люминофорным слоем. Туннельный переход электронов с этих состояний в зону проводимости полупроводниковой основы люминофорного слоя служит источником первичных электронов для ударной ионизации кристаллической решетки, а также ударной ионизации и ударного возбуждения центров люминесценции.

Особенности ТПЭЛИ дали возможность уже к настоящему времени создать на их основе плоскостные телевизионные экраны и дисплеи высокой яркости и контрастности, пригодные для промышленного внедрения.

Разработанная еще 30 лет назад технология электролюминесцентных дисплеев (EL) (рис. 48) остается актуальной и сегодня. Уникальные эксплуатационные качества и визуальные характеристики EL-дисплеев позволяют создавать решения, способные работать в тяжелых климатических условиях.



Рис.48. Примеры тонкопленочных электролюминесцентных дисплеев

За последние 20 лет качественные характеристики EL-дисплеев были значительно улучшены, увеличена яркость излучения люминесцентных пленок, а также контрастность изображения. Современная элементная база и технические решения, используемые в схемах управления, позволили увеличить долговечность дисплеев и значительно снизить энергопотребление. Применение современных материалов позволило уменьшить габариты дисплеев и повысить устойчивость к ударам и вибрации.

Возможности и преимущества EL-дисплеев:

- работа при низких температурах без использования

дополнительного обогрева;

- широкий угол обзора — свыше 160° ;
- быстрый отклик дисплея — менее 1 мс;
- компактный корпус и обрамление;
- конструкция, снижающая уровень электромагнитного излучения;
- надежная работа, долговечность;

Области применения:

- военная техника;
- транспорт;
- промышленность;
- медицина;
- государственная, общественная безопасность;
- морские применения.

EL-дисплей представляет собой твердотельную структуру, состоящую из пленки люминофора, сформированной между прозрачными слоями диэлектрика и матрицей электродов строк и столбцов (рис. 49). ЭЛИ с пленочными люминофорами, возбуждаемыми переменным током, содержат люминофор в виде пленки $ZnS:Mn$ (жёлтый свет свечения), изолированной от электродов тонкими пленками Y_2O_3 (возможно применение также пленок Al_2O_3 , Si_3N_4). Изолирующая пленка с тыльной стороны люминофора делается черной для улучшения контрастности. Толщина каждой плёнки $\sim 0,2 - 0,5$ мкм. Пленка люминофора прозрачна, и практически весь внешний свет поглощается черным покрытием, что обеспечивает высокий контраст.

Такое решение позволяет получить плоский, компактный, надежный и устойчивый к внешним механическим воздействиям дисплей с малым временем отклика.

При подаче напряжения на определенные электроды столбцов и строк, в местах пересечения электродов (столбца и строки), формирующих пиксель

изображения, происходит возбуждение люминофора и излучается свет с длиной волны 581,7 нм (рис. 50).

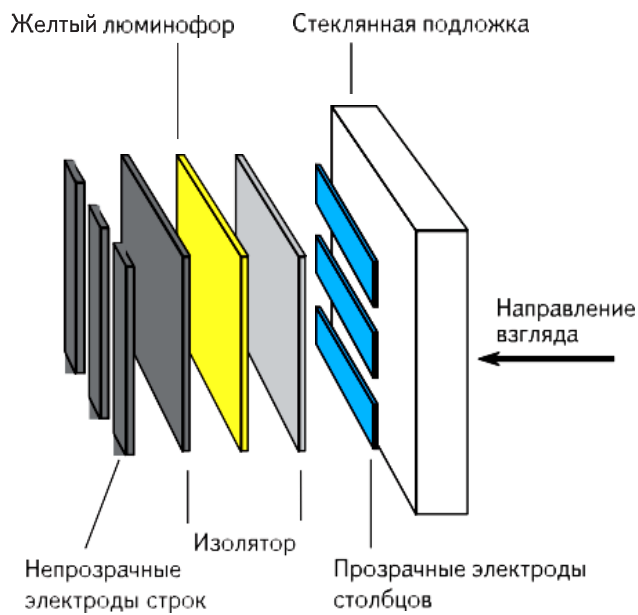


Рис.49. Схема устройства ТПЭЛИ

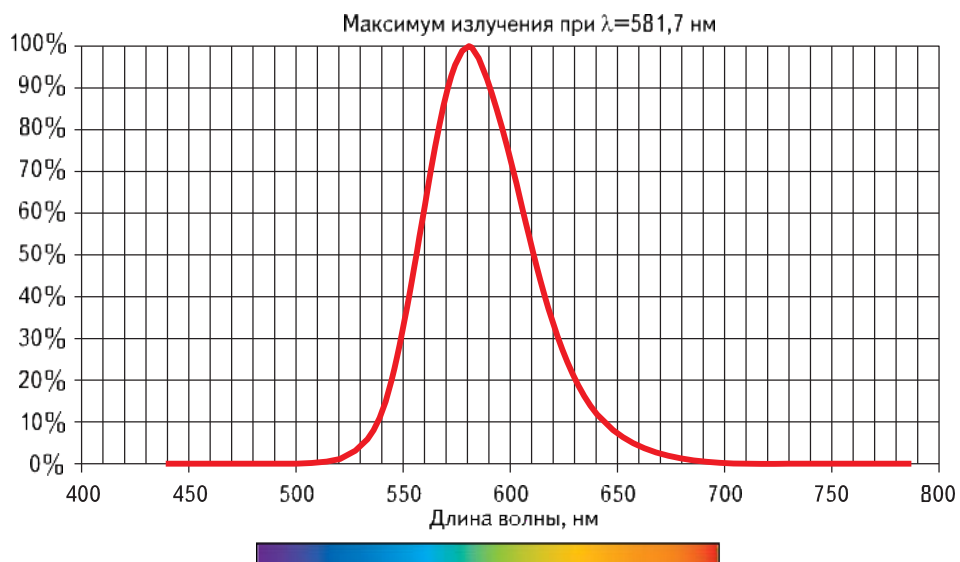


Рис.50. Спектр излучения пленочного люминофора ZnS : Mn

Задание

1. Составить технологическую схему изготовления тонкопленочного электролюминесцентного дисплея (рис. 51).

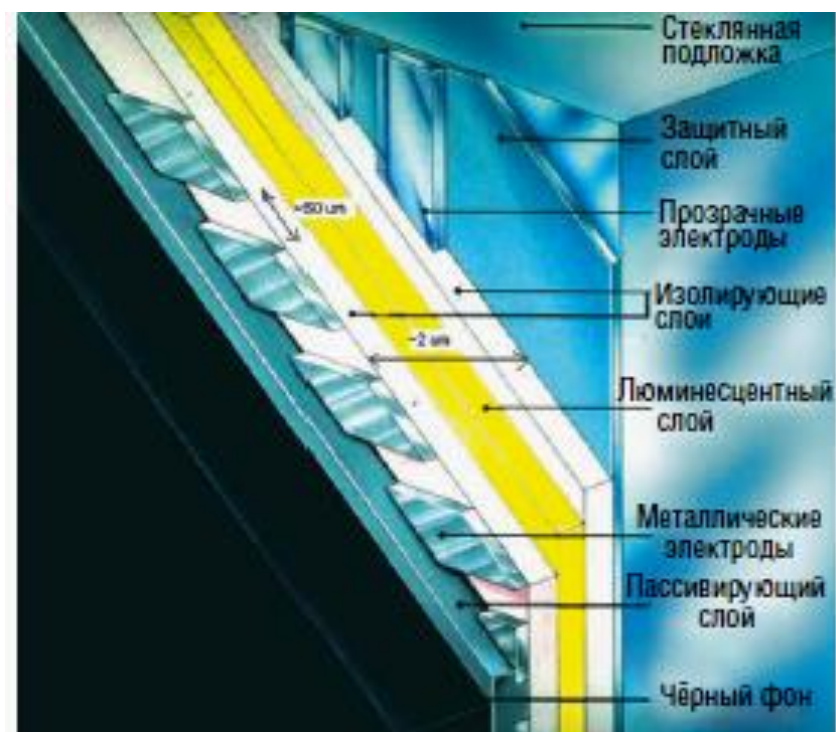


Рис. 51. Тонкопленочный электролюминесцентный дисплей в конфигурации матричного дисплея

2. Более подробно рассмотреть методы получения различных слоев и способы герметизации прибора.

3. Указать конструктивные и технологические особенности, области применения прозрачных электролюминесцентных дисплеев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электролюминесцентные источники света / под ред. И.К. Верещагина. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Прикладная электролюминесценция / под ред. М.В.Фока.- М.: Сов. радио, 1974.

3.2. Жидкокристаллические элементы индикации

Жидкокристаллическое состояние вещества является промежуточным между жидким и твердым его состояниями. Вещество, находящееся в жидкокристаллическом состоянии, обладает свойствами и жидкости (текучестью, способностью образовывать капли), и кристаллического тела (упорядоченным расположением молекул), благодаря чему ряд его физических свойств зависит от направления измерения. Общим признаком жидкокристаллических веществ служит удлиненная (сигарообразная) форма их молекул.

Способностью находиться в жидкокристаллическом состоянии чаще всего обладают органические соединения, причем это свойство проявляется лишь при определенном для каждого вещества диапазоне температур. За границами этого диапазона вещество принимает свойства либо твердого тела, либо изотропной жидкости. По характеру взаимной ориентации молекул различают три типа жидкокристаллических веществ: нематические, холестерические и смектические.

Интерес к жидким кристаллам (ЖК) для элементов индикации вызван изменением ориентации их молекул под воздействием электрического поля и связанным с этим изменением светопропускной способности (прозрачности) жидкокристаллических веществ. В таких индикаторах используются нематические и холестерические ЖК. Смектические жидкокристаллические вещества из-за высокой вязкости широкого применения здесь не нашли. Ориентация молекул в нематическом и холестерическом ЖК в отсутствие электрического поля показана на рис. 52.

В жидких кристаллах наблюдается большое количество электрооптических эффектов, влияющих на светопропускную способность. Они могут вызываться либо проводимостью ЖК, либо электрическим полем (полевые эффекты). Из электрооптических эффектов, обусловленных проводимостью, наибольшее применение для элементов индикации нашло

динамическое рассеяние света, а из полевых эффектов – скручивание нематической фазы.

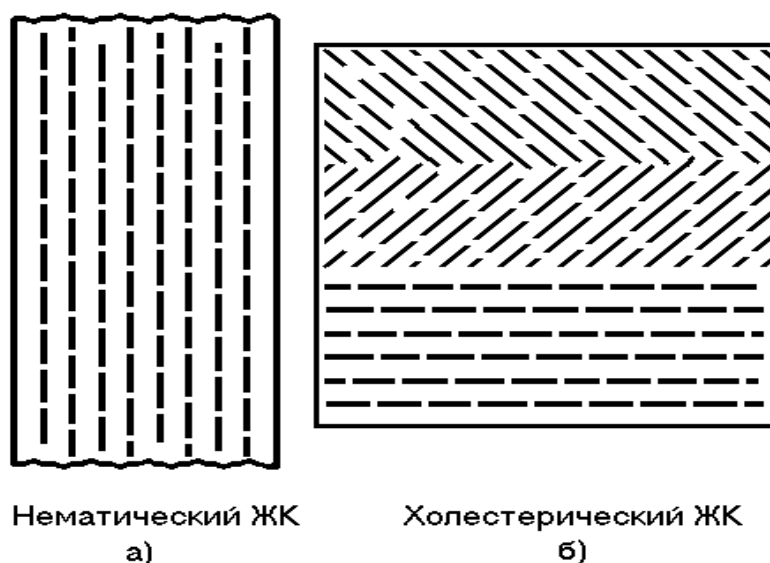


Рис. 52. Ориентация молекул в нематическом (а) и холестерическом (б) жидких кристаллах

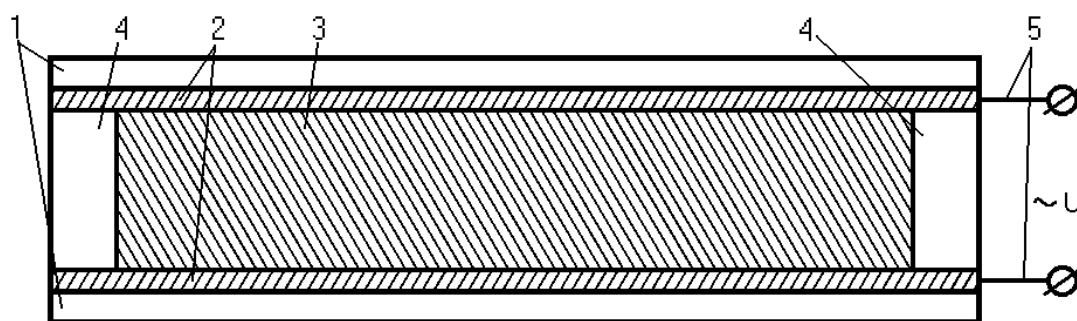


Рис. 53. Конструкция ЖК-индикатора: 1 – стеклянные пластины; 2 – электроды из окиси олова; 3 – слой жидкого кристалла; 4 – уплотнительные прокладки; 5 – внешние выводы

Простейший ЖК-индикатор, основанный на эффекте динамического рассеяния света (рис. 53), состоит из двух параллельных стеклянных пластин 1 с нанесенными на внутренней поверхности прозрачными электродами 2 из окиси олова (при работе «на просвет») и слоя жидкокристаллического вещества 3 между ними. При работе в режиме отражения света один из электродов

выполняется зеркально отражающим (алюминий, никель). Толщина слоя жидкого кристалла составляет 10 – 25 мкм. Уплотнительные прокладки 4 изолируют объем и определяют зазор между пластинами. Проводящие электроды связаны с внешними выводами 5 прибора. Индикатор требует внешнего освещения или подсвета.

В индикаторах с эффектом динамического рассеяния света в нематический ЖК вносится добавка небольшого количества ионных соединений (электролита). При отсутствии напряжения ориентация вытянутых молекул ЖК упорядочена. Молекулы располагаются перпендикулярно плоскостям обоих электродов (рис. 54, а) или имеют относительно них некоторый наклон. В исходной ориентации молекул слой ЖК прозрачен.

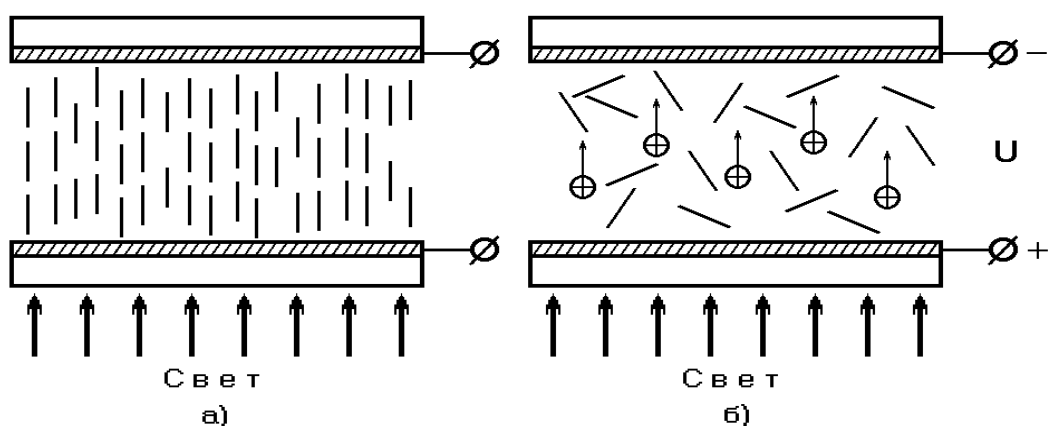


Рис. 54. Ориентация молекул в ЖК-индикаторе при отсутствии (а) и наличии (б) напряжения

С приложением напряжения возникает движение ионов электролита в направлении электродов (на рис. 54, б показано направление движения только положительных ионов), вызывающее беспорядочное перемещение молекул жидкого кристалла (турбулентное движение) и его перемешивание. Создается динамическая неустойчивость ориентации молекул ЖК, и их упорядоченная ориентация нарушается. Молекулы создают сильное рассеивающее действие падающему свету, ЖК теряет прозрачность, и цвет его становится молочно-белым. При снятии напряжения питания молекулы ЖК возвращаются в исходное состояние ориентации, прозрачность слоя восстанавливается.

Присутствие ионов в ЖК обуславливает проводимость индикаторов с динамическим рассеянием света и протекание через жидкий кристалл тока при наличии напряжения. Вследствие ионной проводимости создается опасность электролитического распада жидкокристаллического вещества, особенно при питании от источника постоянного напряжения. Для повышения срока службы индикаторов их питание осуществляют от источников переменного напряжения (обычно прямоугольной формы) с частотой 25 – 200 Гц. Амплитуда рабочих напряжений равна 15–30 В. Изменение оптических свойств наступает при пороговом напряжении 5–10 В. Время изменения оптического состояния после подачи или снятия напряжения питания составляет 50 – 300 мс. Максимально достигаемая контрастность равна 20 – 40. Потребляемый ток лежит в пределах 5 – 25 мкА/см², а мощность – 50 – 550 мкВт/см². Срок службы достигает 10 тыс. ч.

В индикаторах со скручиванием нематической фазы («твист» - эффектом) исходному состоянию отвечает скрученная структура молекул нематического ЖК в межэлектродном промежутке (рис. 55, а). По мере удаления от одной плоскости электрода к другой угол поворота молекул увеличивается и достигает 90°. Одним из методов создания такой ориентации молекул является полировка внутренних поверхностей стеклянных пластин в одном направлении и затем установка их с поворотом на 90° относительно направления полировки. При работе «на просвет» на внешние поверхности стеклянных пластин наносят поляризационные пленки. Плоскости поляризации поляризаторов взаимно перпендикулярны (скрещены). Если индикатор должен работать в режиме отражения, то за вторым поляризатором помещают отражатель.

На рис. 55, а приведена модель ЖК-ячейки, помещенной между двумя поляризаторами со скрещенными направлениями поляризации (показаны стрелками). В отсутствие возбуждающего напряжения плоскополяризованная световая волна, образованная первым поляризатором, поворачивается на 90° при прохождении слоя жидкого кристалла. Ее пропускает второй поляризатор, поскольку плоскость световой волны, прошедшей ЖК, будет совпадать с

плоскостью поляризации этого поляризатора. ЖК-ячейка оказывается светлой и прозрачной.

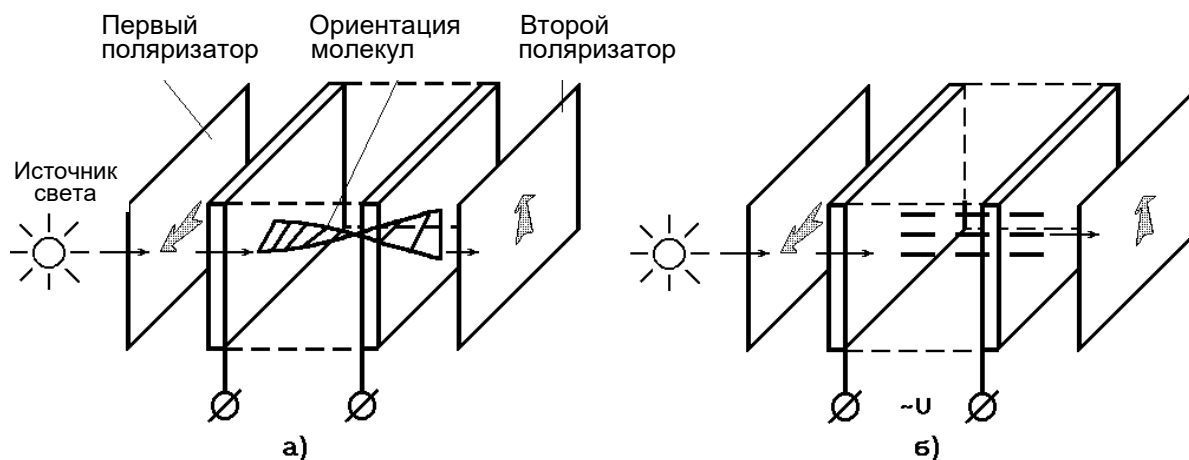


Рис. 55. Ориентация молекул в ЖК-индикаторе со скручиванием нематической фазы при отсутствии (а) и наличии (б) напряжения

Приложенное к индикатору напряжение (рис. 55, б) вызывает поворот молекул и установку их параллельно вектору электрического поля. Скрученная структура молекул исчезает. Слой ЖК не создает поворота плоскополяризованной световой волны. Проходящий через ЖК поляризованный свет не пропускается вторым поляризатором. ЖК-ячейка становится темной и непрозрачной. При снятии возбуждающего напряжения скрученная структура молекул восстанавливается. Второй поляризатор пропускает свет, и ячейка вновь становится светлой.

Эффект скручивания нематической фазы в отличие от эффекта динамического рассеяния света является чисто полевым. Для его реализации пропускать ток через ЖК-ячейку не нужно, что дает существенный выигрыш в энергопотреблении.

Управление индикатором также производят переменным напряжением. Рабочие напряжения составляют 5 – 10 В, а пороговое напряжение – 0,9–1,5 В. Время изменения оптического состояния то же, что и в индикаторах с динамическим рассеянием света. Максимально достигаемая контрастность значительно выше (30 – 100). Потребляемый ток и мощность существенно меньше (1 – 10 мкА/см² и 5 – 50 мкВт/см²). Срок службы достигает 50 – 100 тыс. ч.

Жидкокристаллические индикаторы работают в ограниченном температурном диапазоне. Это обуславливается, во-первых, ограниченным диапазоном температур, при котором вещества проявляют свойства жидких кристаллов: температура от -5 до -30°C определяет их точку плавления, температура от $+60$ до $+80^{\circ}\text{C}$ соответствует точке «просветления». Во-вторых, в области отрицательных температур существенно увеличивается время изменения оптического состояния (индикаторы становятся недопустимо инерционными). Типичный температурный диапазон индикаторов составляет от 0 до $+50^{\circ}\text{C}$. При отрицательных температурах окружающей среды осуществляют подогрев индикаторов.

Элементы индикации на основе жидких кристаллов отличаются от индикаторов других типов наименьшим потребляемым током. По электрическим параметрам они согласуются с интегральными МДП-микросхемами. Таким образом, ЖК-индикаторы позволяют создавать устройства отображения информации с минимальной потребляемой мощностью (например, наручные часы). Вместе с тем при создании устройств отображения информации приходится считаться с такими недостатками ЖК-индикаторов, как необходимость внешнего освещения или подсветки, узкий температурный диапазон применения, наименьшее из всех индикаторов быстродействие.

Задание

Составить технологическую схему и пооперационное описание процесса изготовления жидкокристаллического индикатора на эффекте динамического рассеяния и "твист" - эффекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Индикаторные устройства на жидких кристаллах / под ред. З. Ю. Готры. – М.: Сов. радио, 1980.

3.3. Вакуумные люминесцентные индикаторные приборы

В сегменте приборов отображения информации происходит бурное развитие дисплеев, предназначенных для использования в различных областях потребительского рынка: персональных компьютерах, цифровых развлекательных центрах и мобильных устройствах. Телевизоры и мониторы с диагональю в десятки дюймов и миниатюрные устройства позволяют нам наслаждаться просмотром изображений или работать с документами. Такие решения основаны, как правило, на использовании ЖК панелей с тонкоплёночными транзисторами, но появляются модели, выполненные на базе OLED технологии. Однако дисплеи, используемые во многих других областях, например, промышленной автоматике, измерительной технике, автомобильной электронике и бытовой технике, отображают текстовые сообщения и несложные пиктограммы. Основу таких дисплеев составляют вакуумно-люминесцентные технологии (VFD).

Главными преимуществами вакуумно-люминесцентных индикаторов (ВЛИ) являются высокая яркость изображения, хороший контраст и широкий угол обзора. Кроме того, VFD дисплеи прекрасно работают в расширенном диапазоне температур $-40 - +85^{\circ}\text{C}$, что делает их идеальными как для промышленных, так и специальных применений. В силу особенностей технологии текстовые VFD дисплеи имеют более высокую яркость по сравнению с графическими дисплеями. Поэтому, когда отчётливость сообщений является важнейшим требованием, текстовые дисплеи являются самым подходящим решением.

Основными достоинствами вакуумно-люминесцентных дисплеев являются:

- высокая яркость (до 1250 кд/м^2) и возможность управления яркостью;
- широкий диапазон рабочих температур (от -40 до 85°C);

- большой срок службы, достигающий 30000 часов (снижение на 50% яркости дисплея с яркостью 700 кд/м²);
- высокая устойчивость к вибрации;
- широкий угол обзора (около 150°).

VFD дисплеи имеют более высокое потребление, по сравнению с ЖК-дисплеями. Поэтому они не могут использоваться в портативных приборах с батарейным питанием. Технология изготовления индикаторов довольно дорогая, поэтому этот вид дисплеев и модули на их основе достаточно дорогие.

3.3.1. Структура и технология VFD дисплеев

VFD представляет собой массив вакуумных триодов с тремя электродами: накального электрода (катода), управляющей сетки и анода с нанесенным на него слоем люминофора. Массив индикаторных триодов размещен в конструкции плоского вакуумного баллона. На рис. 56 показана типовая конструкция VFD индикатора.

В технологии используются стандартные операции фотолитографии, шелкографии, травления и напыления.

На заднем стекле индикатора нанесено темное фоновое покрытие для обеспечения лучшего контраста изображения.

Для управления индикаторами требуется четыре источника напряжения: анодное, питания накала, смещения катода и напряжение управления сеткой.

Типовые напряжения питания электродов:

Напряжение накала – типовое 1,7 В

Анодное напряжение – типовое 12 В

Сеточное напряжение – 12 В

Ток накала катода составляет от 70-200 мА в зависимости от размера рабочего поля и площади анодов. Типовая яркость индикаторов — 500кд\ м² и зависит от цвета люминофора.

Типовое потребление VFD модулей с питанием от 5В составляет 700-800мА.

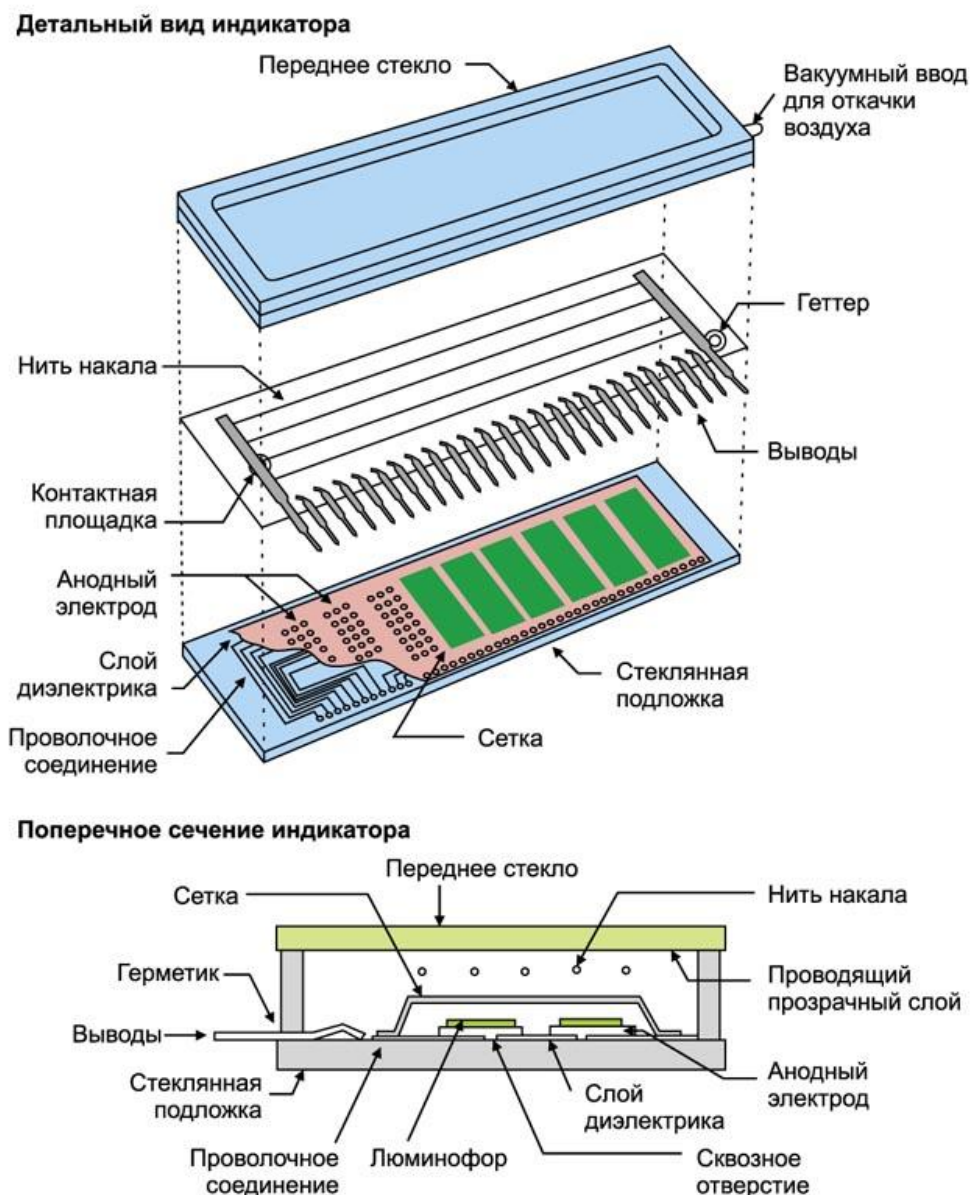


Рис. 56. Стандартная конструкция катодолюминесцентного индикатора

Основные сектора применения VFD дисплеев – промышленная автоматика, бытовая техника (часы, калькуляторы, дисплеи панелей управления приборами, электронные весы), мультимедийная аппаратура, автомобильные приборные дисплеи (рис. 57), информационные табло (в том числе с бегущей

строкой). Высокая яркость и контраст, а также широкий угол обзора обеспечивают отличную читаемость изображения при наличии высокой внешней освещенности. В этом отношении они значительно превосходят ЖК-дисплеи.

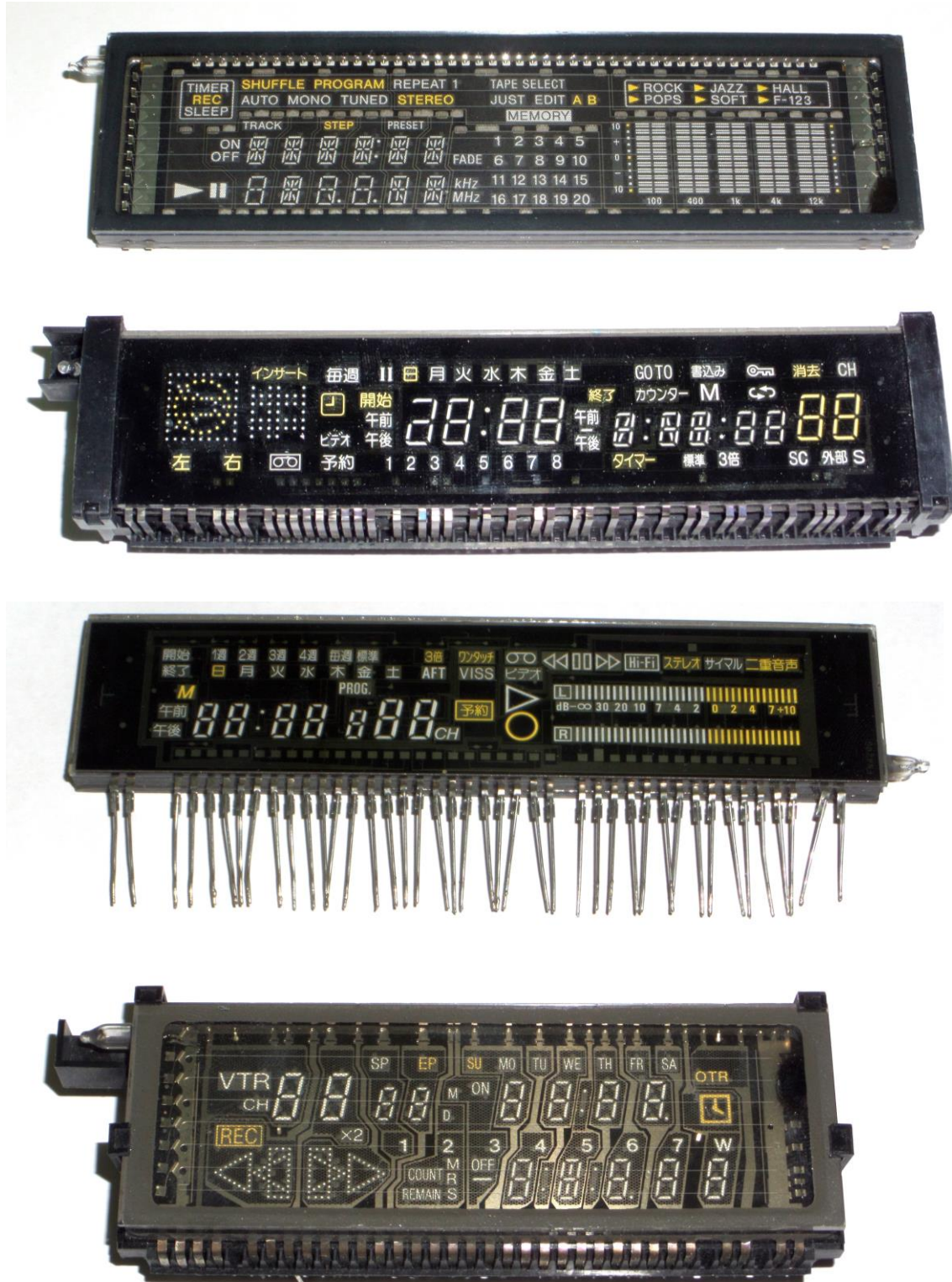


Рис. 57. Примеры вакуумных люминесцентных индикаторов

3.3.2. Полевые эмиссионные дисплеи FED (*field emission display*)

Использовать технологии вакуумных люминесцентных индикаторов (или VFD дисплеев) для создания плоских телевизионных экранов, конкурентных с ЖК или плазменными дисплеями, сложно. Желание совместить достоинства дисплеев разных типов требует, чтобы напротив каждой ячейки с люминофором размещался собственный микроскопический источник электронов (катод), а не общий, как показано на рис. 56. Использование традиционного термокатода в плоской панели исключено. Во-первых, изготовить миллионы микроскопических катодов с одинаковыми эмиссионными характеристиками (иначе не добиться однородности свечения экрана) практически невозможно. Но даже если решить эту задачу, все равно добиться приемлемой яркости изображения не удастся ввиду низкой эмиссии и сложности управления электронными пучками.

Решить эту задачу оказалось возможным с использованием автоэмиссионных катодов. Автоэлектронная эмиссия (иначе – полевая эмиссия электронов, *Field Emission*) возникает на границе проводящего материала (катода), например, металла, и вакуума при большой разности потенциалов между катодом и вытягивающим электродом (*gate* – затвором). Исследования автоэлектронной эмиссии привели к созданию нескольких вариантов дисплеев. Дисплеи на основе автоэлектронной эмиссии ("холодных" катодов) разрабатываются уже почти 20 лет. К середине 90-х годов прошлого столетия были созданы и изучены два основных варианта холодных катодов:

- острый (катоды Спиндта), представляющий собой сформированную на проводящей подложке систему, состоящую из тонкого острия (кремниевого или молибденового) диаметром менее 1 мкм и вытягивающего электрода, расположенного на расстоянии нескольких десятых долей микрометра от острия ;

- лезвийный – пленочный электрод, с обеих сторон которого сформированы вытягивающие электроды. Электроны испускает край пленки, подобный лезвию бритвы.

Пример фрагмента дисплея с катодами Спиндта (Spindt FED) приведен на рис. 58.

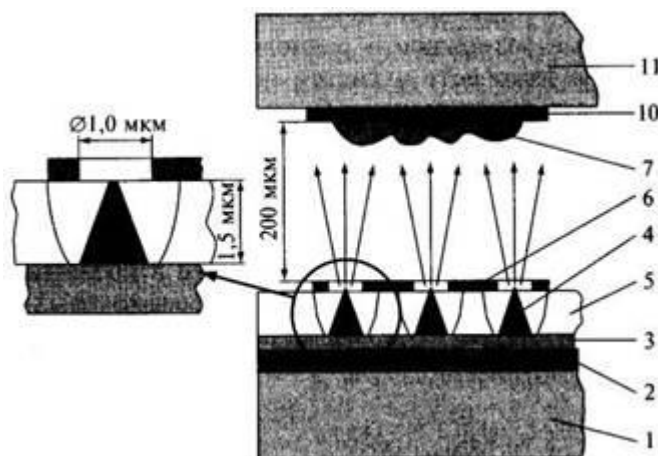


Рис.58. Схема фрагмента конструкции пикселя дисплея на полевой эмиссии с острыми катодами:

1 — катодная пластина (стекло); 2 — адресуемые катодные шины — строки; 3 — резисторный слой (аморфный кремний); 4 — субмикронные автоэмиссионные катоды; 5 — диэлектрическая пленка; 6 — адресуемые шины — столбцы; 7 — люминофор (красный); 8 — люминофор (зеленый); 9 — люминофор (синий); 10 — адресуемые анодные шины (прозрачная проводящая пленка) — столбцы; 11 — анодная пластина (стекло)

Конструктивно такие дисплеи не очень сложны, если не учитывать технологию выращивания острых катодов. Как и у любого люминесцентного дисплея, они состоят из анодной и катодной стеклянных пластин толщиной 1,1 мм каждая (рис.59). Поскольку размер спейсеров между пластинами 0,6 мм, суммарная толщина дисплея получается 2,8 мм. Фокусирующий и управляющий электроды напыляются из ниобия (Nb), а материалом катода выбрали молибден (Mo).

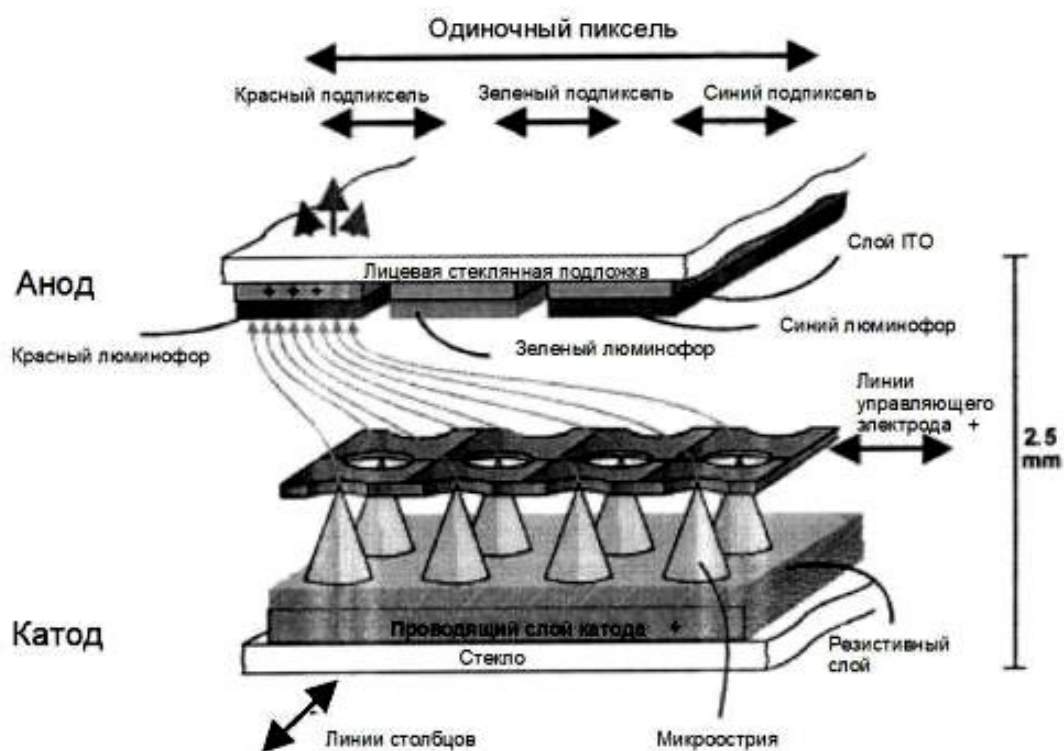


Рис. 59. Конструкция полевого эмиссионного дисплея с катодами острейного типа

Интенсивность электронного потока контролируется изменением напряжения между катодными и управляющими электродами. Важным конструктивным элементом дисплеев этого типа является фокусирующая матрица, представляющая собой перфорированную металлическую пластину с отверстиями диаметром 0,9 мм точно напротив катодов. Она выполняет примерно ту же функцию, что и теневая маска в цветном кинескопе - препятствует засветке "чужих" люминофоров. Рабочие напряжения дисплея около 3 кВ на аноде и 40 В на управляющих электродах.

Другим типом автоэмиссионных эмиттеров являются углеродные наноструктурированные материалы, в частности катоды на углеродных нанотрубках, которые способны обеспечивать эмиссию на 2 - 3 порядка более высокую, чем катоды из "обычного" углерода. Дисплеи с автоэмиттерами на углеродных нанотрубках называют Carbon Nanotube FED (или сокращенно CNT FED) дисплеи (рис.60).

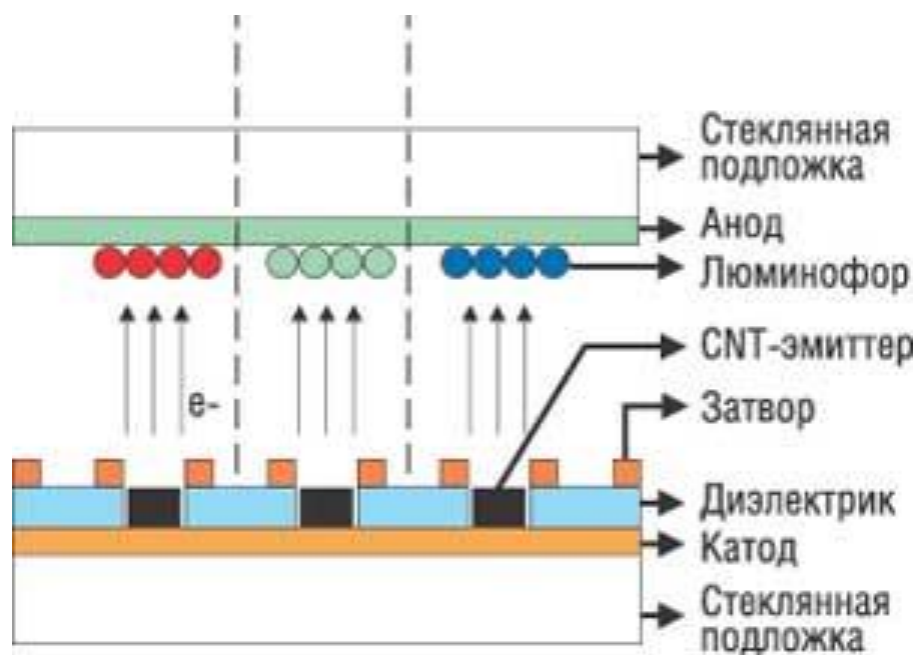


Рис.60. Схема CNT FED дисплея

Задание

1. Рассмотреть принцип работы автоэмиссионных катодов.
2. Составить технологическую схему и описать технологию изготовления металлических катодов Спиндта.
3. Составить технологическую схему и описать технологию изготовления кремниевых острых катодов.
4. Описать технологию изготовления автоэммиттеров на углеродных нанотрубках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татаренко, Н.И. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе / Н.И.Татаренко, В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2006. – 192 с.
2. Острые эмиттеры электронов микроприборов и конструктивно-технологические особенности их изготовления / Н.Н. Балан [и др.] // Вестник науки Сибири. Сер. Инженерное дело. – 2012. - №3(4). - с. 89-98.

3. Огурцов, О. Полевые эмиссионные дисплеи / О. Огурцов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 1997. - №5. - С.25 – 30.

Контрольные вопросы к разделу 3

1. Какие физические явления лежат в основе работы средств отображения информации?
2. Опишите механизм предпробойной электролюминесценции кристаллофосфоров.
3. Назовите основные типы ЭЛИ.
4. Опишите основные конструкции ЭЛИ с порошковым люминофором.
5. Какими преимуществами обладают ТПЭЛИ по сравнению с излучателями на основе порошковых люминофоров?
6. Опишите конструкцию и назовите преимущества электролюминесцентных дисплеев.
7. Назовите свойства жидких кристаллов, характерные для жидкости и кристаллического вещества.
8. В чем состоит эффект динамического рассеяния света жидким кристаллом?
9. Опишите суть эффекта скручивания нематической фазы в жидком кристалле.
10. Назовите основные виды автоэмиссионных катодов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Характеристики единичной вольфрамовой нити (длиной 1 см и диаметром 1 см)
 (Потери тепла путем теплопроводности считаются пренебрежительно малыми)

Температура	Мощность накала	Сопротивление	Ток накала	Разность потенциалов на зажимах	Ток насыщения	Скорость испарения	Отношение сопротивлений в горячем и холодном состояниях	Эффективность термоэлектродного катода
T	$P'_H = P_H/l_d$	$R' = Rd^2/l$	$I'_H = I_H/d^{3/2}$	$U'_H = U_H d^{1/2}/l$	$I'_{нас} = I_{нас}/ld$	$m' = m/l_d$	$R'_T/R'_{293} = R_T/R_{293}$	$\eta = I'_{нас} / P'_H = I_{нас} / P_H$
K	Вт·см ⁻²	10 ⁻⁶ Ом·см	А·см ^{-3/2}	10 ⁻³ В·см ⁻²	А·см ⁻²	г·см ⁻² ·с ⁻¹		мА/Вт
273	-	6,37	-	-			0,911	
293	0	6,99	0	0			1,00	
300	0,0001	7,20	3,727	0,0268			1,03	
400	0,00624	10,26	24,67	0,2530			1,467	
500	0,0305	13,45	47,62	0,6404			1,924	
600	0,0954	16,85	75,25	1,268			2,41	
700	0,240	20,49	108,2	2,218			2,93	
800	0,530	24,19	148,0	3,581			3,46	
900	1,041	27,94	193,1	5,393			4,00	
1000	1,891	31,74	244,1	7,449	$3,36 \cdot 10^{-15}$	$1,16 \cdot 10^{-33}$	4,54	
1100	3,223	35,58	301,0	10,71	$4,77 \cdot 10^{-13}$	$6,81 \cdot 10^{-30}$	5,08	
1200	5,210	39,46	363,4	14,34	$3,06 \cdot 10^{-11}$	$1,01 \cdot 10^{-26}$	5,65	
1300	8,060	43,40	430,9	18,70	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$4,22 \cdot 10^{-24}$	6,22	
1400	12,01	47,37	503,5	23,85	$2,08 \cdot 10^{-8}$	$7,88 \cdot 10^{-22}$	6,78	
1500	17,33	51,40	580,6	29,85	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$7,42 \cdot 10^{-20}$	7,36	
1600	24,32	55,46	662,2	36,73	$2,91 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-18}$	7,93	
1700	33,28	59,58	747,3	44,52	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$1,31 \cdot 10^{-16}$	8,52	

Температура	Мощность накала	Сопротивление	Ток накала	Разность потенциалов на зажимах	Ток насыщения	Скорость испарения	Отношение сопротивлений в горячем и холодном состояниях	Эффективность термоэлектродного катода
T	$P'_H = P_H / ld$	$R' = Rd^2 / l$	$\Gamma'_H = I_H / d^{3/2}$	$U'_H = U_H d^{1/2} / l$	$\Gamma'_{нас} = I_{нас} / ld$	$m' = m / ld$	$R'_T / R'_{293} = R_T / R_{293}$	$\eta = \Gamma'_{нас} / P'_H = I_{нас} / P_H$
K	Вт·см ⁻²	10 ⁻⁶ Ом·см	А · см ^{-3/2}	10 ⁻³ В·см ⁻²	А·см ⁻²	г·см ⁻² ·с ⁻¹		мА/Вт
1800	44,54	63,74	836,0	53,28	1,40·10 ⁻⁴	2,97·10 ⁻¹⁵	9,12	0,0031
1900	58,45	67,94	927,4	63,02	7,15·10 ⁻⁴	4,62·10 ⁻¹⁴	9,72	0,0122
2000	75,37	72,19	1022	73,75	3,15·10 ⁻³	5,51·10 ⁻¹³	10,33	0,042
2100	95,69	76,49	1119	85,57	1,23·10 ⁻²	4,95·10 ⁻¹²	10,93	0,128
2200	119,8	80,83	1217	98,40	4,17·10 ⁻²	3,92·10 ⁻¹¹	11,57	0,348
2300	148,2	85,22	1319	112,4	1,28·10 ⁻¹	2,45·10 ⁻¹⁰	12,19	0,864
2400	181,2	89,65	1422	127,5	0,364	1,37·10 ⁻⁹	12,83	2,01
2500	219,3	94,13	1526	143,6	0,935	6,36·10 ⁻⁹	13,47	4,26
2600	263,0	98,66	1632	161,1	2,25	2,76·10 ⁻⁸	14,12	8,56
2700	312,7	103,22	1741	179,7	5,12	9,95·10 ⁻⁸	14,76	16,4
2800	368,9	107,85	1849	199,5	11,11	3,51·10 ⁻⁷	15,43	30,02
2900	432,4	112,51	1961	220,6	22,95	1,08·10 ⁻⁶	16,10	53,1
3000	503,5	117,21	2072	243,0	44,40	3,04·10 ⁻⁶	16,77	88,2
3100	583,0	121,95	2187	266,7	83,0	8,35·10 ⁻⁶	17,46	142,4
3200	671,5	126,76	2301	291,7	150,2	2,09·10 ⁻⁵	18,15	224
3300	769,7	131,60	2418	318,3	265,3	5,05·10 ⁻⁵	18,83	345
3400	878,3	136,49	2537	346,2	446,0	1,12·10 ⁻⁴	19,53	508
3500	998,0	141,42	2657	375,7	732,0	2,38·10 ⁻⁴	20,24	734
3600	1130	146,40	2777	406,7	1173	4,86·10 ⁻⁴	20,95	1039
3655	1202	149,15	2838	423,4	1505	7,15·10 ⁻⁴	21,34	1252

Приложение 2.1

Составы мягких припоев, применяемых в ЭВП.

Марка или название припоя	Состав, мас. %						Интервал плавления, °С	
	Sn	Pb	Zn	Bi	Ag	Остальные	начало	конец
Сплав Вуда	14	24		5,0		Cd-12	70	74
Сплав Ньютона	15,5	32		52,5			95	
ПОС-61	59-61	39-40				Sb-0,8	183	185
ПОС-40	39-40	58-59,5				Sb-1,5-2	183	235
Олово	100						232	
ПОС-30	29-30	68-69,5				Sb-1,5-2	183	256
П250	80		20				198	280
ПОСр10	90				10		300	
ПСр3Кд			0,5-1,5		2,5-3,5	Cd-95-97	300	325
ПСр1,5	82,2-84,8	14-16			1,2-1,8		265	370

Приложение 2.2

Составы твердых припоев, применяемых в ЭВП

Марка или название припоя	Состав, мас. %						Интервал плавления, °С	
	Au	Ag	Cu	Pd	Ni	Остальные	начало	конец
-		60	20			Sb-20	480	
ПСр60л17		60	23			Sn-17	600	
ПСр15		15	90			P-5	640	704
ПСр72		72	28				779	
ПСр65П15		65	20	15			850	900
ПЗл75СрМ	75	12,5	12,5				880	910
ПЗл82	82				18		950	
Серебро		100					960	
ПЗл50МН	50		50				955	970
ПЗл35МН	35		62		3		980	1020
ПМН10П2			88	2	10		900	990
Золото	100						1063	
Медь МВ			100				1083	
-		80		20			1080	1120
ПМН15			85		15		1120	1180
ПНПД60				60	40		1237	
-			55		45		1220	1290
-		40		60			1340	1390

Сравнительные характеристики стекла и керамики

Материал	Керамика	Стекло
Прочность при изгибе, кгс/мм ²	15-50	8-20
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°С	(50-100)10 ⁻⁷	(30-130)10 ⁻⁷
Коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·°С)	0,006-0,5	0,001-0,006
Удельное электрическое сопротивление при 300°С, Ом·см	10 ¹² -10 ¹³	10 ⁷ -10 ⁸
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ⁶ -10 ¹⁰ Гц	(0,5-20)10 ⁻⁴	(20-100)10 ⁻⁴
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ⁶ -10 ¹⁰ Гц	5-11	4,5-5,5
Электрическая прочность при постоянном напряжении, кВ/мм	30-60	150-250
Температура кратковременного нагрева, °С	1000-1800	450-650
Температура длительной эксплуатации, °С	800-1700	150-250
Температура размягчения, °С	1200-1900	490-700

Состав различной керамики

Наименование керамики	Марки материалов	Основные окислы в составе материала	Минералогическая основа	
			Наименование	Формула
Магнезиально-силикатная: стеатитовая	ВК-92, К-1, С-4А, С-14	SiO ₂ , MgO, BaO	Клиноэнстатит	MgO·SiO ₂
форстеритовая	Ф-17, ЛФ-11, КВФ-4	MgO, SiO ₂	Форстерит	2MgO·SiO ₂
Алюмосиликатная	102	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , BaO, CaO	Корунд, муллит	Al ₂ O ₃ , 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂
Алюмооксидная	22Х, 22ХС, А-995, ВГ-IV, ГМ, М-7, сапфирит, поликор	Al ₂ O ₃	Корунд	Al ₂ O ₃
Оксинобериллиевая	Брокерит-9	BeO	Бромеллит	BeO

Свойства различной керамики

Керамика	Количество газов, 10^{-3} л·мм.рт.ст/см ²	Теплопроводность, 10^{-3} кал/(см·сек·°С)	Относит. диэлектрич. прониц., ϵ	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	Модуль упругости, кгс/мм ²
Стеатитовая	3,6	4-6	5,6÷6,3	7÷15	$0,7 \cdot 10^4$
Форстеритовая	3,0	8-10			
Алюмосиликатная	2,0	10-20			$1,4 \cdot 10^4$
Алюмооксидная	0,6÷3,8	20-60	9,3÷9,8	1÷9	$(2,5 \div 3,8) 10^4$
Окиснобериллиевая		200-600			$3,2 \cdot 10^4$

Состав основных стекол, кварца и эмали, применяемых в электровакуумной промышленности

Категории и марки стекол	Состав, %									Спаивается с металлом или со стеклом
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	PbO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	
Легкоплавкие										
Платиновые: известковые: С-90-1	69,5	12,5	4	5,5				3,5	5	Платинит, феррохром, платина
С-89-2	71,9	16,1	1	5,5				3,5	2	
С-82-36	71,5	11,5	1,2	14			1,8			
свинцовое: С-88-4	55,3	3,8	9,2		30	1,7				
Тугоплавкие										
Молибденовые : С-47-46	68,5	6,8			ZnO 5,0	17,2	2,5			Молибден, ковар.
С-48-8	66,5	3,7	3,8			23	3,0			
С-49-5	67,5	8,7				20,3	3,5			
С-54-35	63,0	9,1	1,5			24,9	1,5			
Вольфрамовые: С-39-17	73	3	1,5		PbO 6,0	16,5				Вольфрам
С-37-40	57,7		2	7,4			25	0,8		
С-35-9	68,8	2,44	0,5			26,5				
П-15(пирекс)	78,5	3	1,5			15	2,0			
Кварцевое стекло	98,8			0,1			0,1			
Эмаль	5	1			78	15	1			Легкоплавкие стекла и керамика

**Физические свойства основных стекол, применяемых в
электровacuумной промышленности**

Категории и марки стекла	КТР, 10^{-7} K^{-1} при 20- 200 $^{\circ}\text{C}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$				Теплопро- водность кал/(см·с·град)	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при 20 $^{\circ}\text{C}$ и частоте 6 МГц
		размяг- чения	обра- ботки	отжига			
				нача ло	конец		
Платиновые:							
С-88-4	88	490	980	360	450	0,0016	20
С-90-1	90	550	490	400	505		45
С-89-2	89	550	1000	110	520		80
С-82-36	82	610	-	425	545		62
Молибденовые:							
С-47-46	47	590		420	555	0,0021	57
С-48-8	48	555	1100	360	500		32
С-49-5	49	590		410	540		85
С-54-35	54	590		440	555		63
Вольфрамовые:							
С-39-17	39,5	640	1220	410	540	0,003	22
С-37-40	37,5	806		580	750		45
С-35-9	35,5	575			490	0,00217	28
П-15	33,4	600			560		
Кварцевое стекло	5,8	1500	2000			0,0033-0,006	3
Эмаль	90	410					

**Физические характеристики и применение металлов, сплавов и
некоторых других материалов, используемых для изготовления ЭВП**

Материал	Темпе- ратура плавле- ния, $^{\circ}\text{C}$	Температур- ный коэффициент расширения, 10^{-6} K^{-1} при 300 К	П р и м е н е н и е
Алюми- ний	660,24	23,3	Тонкие проводящие пленки на стеклянной или слодяной подложке (производство фотоэлементов); покрытия на железе электролитическим способом (изготовление анодов)
Бериллий	1287	9,2	Сплавы с медью
Висмут	217,4	14,2	Пленки серебряно-висмутово-цезиевых фотоэлементов

Продолжение прил. 2.8

Материал	Температура плавления, °С	Температурный коэффициент расширения, 10^{-6} K^{-1} при 300 К	П р и м е н е н и е
Вольфрам	3420	4,6	Нити накала в осветительных лампах; подогреватели для катодов косвенного накала в приемно-усилительных лампах; держатели металлов, подвергаемых испарению в вакууме; изготовление сеток; получение герметичных токоподводящих вводов в колбы (со стеклом типа "пирекс")
Железо	1538	12,0	Аноды приемно-усилительных ламп, экранов, лент, вспомогательные детали и т. п.
Сплавы Fe			
Ковар 54 % Fe, 29 % Ni, 17 % Co	1400-1410	4,5	Спайка больших поверхностей с тугоплавкими стеклами; аноды; выводы сетки; детали
Нержавеющие стали 74 % Fe, 18 % Ni, 8 % Cr	1480-1500	10-15	Применяют для изготовления электродов электровакуумных приборов
Феррохром 70 % Fe, 30 % Cr	1500	8,5	При изготовлении малогабаритных ЭВП применяется для получения токоподводящих вводов через стекло
Золото	1063,4	14,0	Золочение молибденовой проволоки для подавления термоэлектронной эмиссии путем электролиза в фотоэлементах для поглощения избыточного цезия
Иридий	2447	6,4	Электропроводящие прозрачные для света пленки на окна передающих телевизионных трубок
Марганец	1245	22,8	То же что иридий, но после нанесения подвергаются окислению, т.к. марганец поддается термическому испарению
Медь	1083	16,7	Аноды генераторных ламп, выводы сетки, сетки (при замене никеля); объемные резонаторы магнетронов, клистронов и т.д.; изготовление поверхностей, обладающих вторичной электронной эмиссией в фотоумножителях; изготовление пружин, контактных полос и т.д.

Материал	Температура плавления, °С	Температурный коэффициент расширения, 10^{-6} K^{-1} при 300 К	П р и м е н е н и е
Сплавы Cu			
Томпак 72 % Cu, 28 % Zn	710-730	19,7	Гибкие (гофрированные) трубки и мембраны; применяют в качестве материала для отпаянных ЭВП (для системы внутренних объемных резонаторов клистронов)
Константан 60 % Cu, 40 % Ni	1260	16	Изготовление немагнитных электродов
Молибден	2620	5,27	Аноды генераторных ламп небольшой мощности; стержни и пластины для спайки с тугоплавким стеклом при изготовлении токоподводящих вводов; тонкие нити (от 20 мкм) для изготовления спиральных сеток; "лодочки", в которые помещают небольшие детали для прокаливания в вакууме и водороде; сплавы с вольфрамом используют для изготовления катодов косвенного накала
Никель	1455	13,2	Аноды маломощных ламп, экранов; держатели для газопоглотителей, траверсы сеток, опорные стержни для электродных систем; катоды косвенного накала с примесью 0,1 % Mg; подложки катодов прямого накала с примесью Co, Fe, Ti; примесь алюминия используют только для изготовления катодов прямого накала.
Сплавы Ni			
Хромель 80 % Ni, 20 % Cr	1435	12,8	Изготовление нагреваемых сопротивлений
Тофет С 60 % Ni, 28 % Fe, 12 % Cr	1400	12,5	
Нихром 60 % Ni, 28 % Fe, 16 % Cr	1390	12,5	

Материал	Температура плавления, °С	Температурный коэффициент расширения, 10^{-6} K^{-1} при 300 К	П р и м е н е н и е
Олово	231,97	23,0	Запайка оболочек ЭВП
Палладий	1554	9,5	Служит микрозатвором для водорода
Платина	1772	9,5	Токоподводящие вводы через стекло и контакты на колбах, химически инертные тигли; электрические сопротивления больших значений, получаемые путем осаждения платины в виде тонкой пленки на стеклянных пластинах
Ртуть	-38,89	182	В парортутных насосах, газоразрядных приборах, вакуумных затворах и прерывателях
Серебро	960,5	18,9	Тонкие проводящие пленки; серебряно-цезиевые пленки в фотоэлементах
Сурьма	630,5	16,2	В сочетании с цезием служит для изготовления пленок фотоэлементов, чувствительных к излучению в видимой и близкой ультрафиолетовой части спектра
Тантал	2996	6,6	Аноды маломощных генераторных ламп с естественным охлаждением; некоторые катоды
Титан	1608	8,3	Нераспыляемый газопоглотитель; металл для спая с керамикой
Углерод	Сублимация	26,7	Аноды маломощных радиоламп и тиратронов; для получения проводящего покрытия на внутренних стенках колб ЭВП
Фосфор	44,1	124,5	Газопоглотитель; P_2O_5 прекрасный осушитель газов
Цирконий	1852	6,3	Нераспыляемый газопоглотитель; в некоторых ЭВП (генераторные лампы средней мощности) аноды и сетки в виде покрытия на молибденовых деталях
Щелочные металлы	Li-180 Na-97,9 K-63,5 Rb-39,4 Cs-28,5	47,1 71,5 79,6 90 97	Создание светочувствительных слоев фотоэлементов, получение тяжелых положительных ионов
Щелочноземельные металлы	Be-1287 Ba-727 Mg-650 Sr-768 Ca-842	12 19 27 22,45 18,5	Газопоглотители (Ba, Mg, Ca); изготовление оксидных катодов (оксидный слой состоит из окислов бария, стронция, кальция)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Расчет термоэмиссионных катодов.....	4
1.1. Типы и свойства накаливаемых катодов. Области применения.....	4
1.2. Характеристики термоэлектронного катода.....	8
1.3. Расчет вольфрамовых катодов.....	10
1.4. Приближенный расчет и проектирование оксидных катодов.....	13
Задачи для самостоятельной работы.....	21
Контрольные вопросы к разделу 1.....	22
2. Технологические схемы производства отдельных электровакuumных приборов.....	23
2.1. Технология изготовления приемно-усилительных ламп (ПУЛ) на примере лучевого тетрода 6ПЗ6С.....	23
2.1.1. Соединение стекла с металлами.....	26
Список литературы.....	33
2.2. Технологическая схема производства металлокерамических генераторных ламп (на примере ГУ-39А-1).....	34
2.2.1. Основные особенности операции пайки в производстве ЭВП.....	37
Список литературы.....	42
2.3. Технология изготовления металлокерамической лампы СВЧ диапазона.....	43
2.3.1. Особенности и конструкции металлокерамических спаев.....	47
Список литературы.....	51
2.4. Технология изготовления мощных вакуумных СВЧ - приборов.....	52
2.4.1. Конструкция и принцип работы вакуумных СВЧ приборов....	55
2.4.2. Изготовление резонаторов и замедляющих систем.....	79
2.4.3. Катоды вакуумных СВЧ - приборов.....	81
Список литературы.....	86
Контрольные вопросы к разделу 2.....	87
3. Технология изготовления средств отображения информации.....	88
3.1. Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ).....	89
3.1.1. Принцип работы электролюминесцентных индикаторных приборов.....	89
3.1.2. Электролюминесцентные индикаторы с порошковыми люминофорами.....	91
3.1.3. Основные конструкции электролюминесцентных индикаторов с порошковым люминофором.....	95
3.1.4. Электролюминесцентные индикаторы с пленочными люминофорами (тонкопленочные электролюминесцентные излучатели).....	98
Список литературы.....	102

3.2. Жидкокристаллические элементы индикации	103
Список литературы	108
3.3. Вакуумные люминесцентные индикаторные приборы.....	109
3.3.1. Структура и технология VFD дисплеев.....	110
3.3.2. Полевые эмиссионные дисплеи FED (field emission display) .	113
Список литературы	116
Контрольные вопросы к разделу 3	117
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	118

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 12.03.03. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.

У сл. печ. л. 7,44. Уч.-изд.л. 8,26. Тираж 50 экз. Заказ

Ивановский государственный химико-технологический университет
Отпечатано на полиграфическом оборудовании редакционно-
издательского центра ФГБОУ ВО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 7