

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»  
Кафедра электронных приборов

## **ВАКУУМНАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки

«11.03.04 – Электроника и наноэлектроника»  
Профиль: Квантовая и оптическая электроника

**Автор и составитель: Аксенов, Александр Иванович**

Вакуумная и плазменная электроника = Вакуумная и плазменная электроника: методические указания к практическим занятиям для студентов направлений подготовки: 11.03.04– Электроника и наноэлектроника (профиль Квантовая и оптическая электроника)

Томск 2018. - 61 с.

Материал пособия поможет в выполнении индивидуального задания и закреплении теоретических знаний, а также выработать навык в решении практических вопросов и задач.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	Введение.....	4
2.	Методическое пособие по решению задач.....	4
3.	Цели и задачи индивидуального задания.....	11
4.	Тематика индивидуального задания .....	11
5.	Структура индивидуального задания.....	13
6.	Календарный график выполнения индивидуального задания .....	13
7.	Катоды.....	14
7.1	Типы и параметры катодов.....	14
7.2	Прямокальные катоды.....	15
7.2.1	Чисто металлические катоды.....	15
7.2.2	Карбидно-ториевые катоды.....	16
7.3	Оксидные катоды.....	16
7.4	Импрегнированные катоды.....	17
7.5	Прессованные катоды.....	17
7.6	Катоды на основе оксидов иттрия.....	18
7.7	Металлосплавные катоды.....	18
7.8	Металлокерамические катоды.....	18
7.9	Гексаборидные катоды.....	19
8.	Расчет прямокальных катодов.....	20
9.	Расчет подогревный катодов.....	22
10.	Конструирование катодного узла.....	23
11.	Способы увеличения эмиссии с катода.....	24
	Рекомендуемая литература.....	25
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	27
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	36

## 1. Введение

В настоящее время электронные пучки широко используются в различных промышленных технологических установках для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления и физических исследований. Одним из основных элементов электронных пушек является источник электронов – катод. Существует большое количество различных типов катодов, отличающимися друг от друга используемыми материалами, структурой активного слоя, температурным режимом и способом нагрева.

Сравнение катодов и их эксплуатационных данных ведут по таким параметрам, как удельная эмиссия, удельная мощность накала, эффективность и долговечность (срок службы).

В данном методическом пособии обобщены вопросы классификации катодов для установок технологического назначения. Пособие будет полезно при выполнении курсовой работы по курсу «Вакуумная и плазменная электроника».

Пособие не претендует на полноту и всестороннее освещение всех вопросов выполнения индивидуального задания.

## 2. Методические указания по решению задач

Материал пособия должен помогать закреплению теоретических знаний, а также вырабатывать навык в решении практических вопросов и задач.

Прежде чем решить задачу или ответить на поставленный вопрос, надо понять их сущность, физический смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу.

Все аналитические решения следует проводить, используя общеизвестные физические законы, физические постоянные и физические системы единиц. Сначала надо написать исходные формулы, сделать, если это необходимо, соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а

затем подставить в эти формулы числовые значения и найти результат. Помните, что все физические величины в формуле должны быть в одной системе единиц. Не забывайте в ответе давать размерность полученной величины.

Ход всех преобразований и вычислений должен быть четко показан в решении задачи. Вычисления, как правило, достаточно делать до третьего знака, а в ряде случаев и до второго.

Полученный в виде числа ответ надо постараться проверить каким-либо способом. Полезно обратиться к справочной литературе и сравнить полученную величину с известными подобными величинами в справочнике. Если отличие в несколько порядков, то ищите ошибку своем решении.

Ответы на вопросы следует давать кратко, но ясно и точно.

Примеры решения задач по темам

### Термоэлектронная эмиссия

Задача 1. Определить плотность тока термоэмиссии (в  $\text{А/м}^2$ ), если материал термокатода имеет эффективную работу выхода  $\Phi_{\text{эфф}} = 1,5$  эВ, температура катода  $T_{\text{к}} = 900$  К, проницаемость потенциального барьера  $D = 0,95$ .

Решение. Плотность тока термоэмиссии можно определить, используя уравнение Ричардсона-Дэшмана:

$$j_{\text{Э}} = A_0 \cdot D \cdot T_{\text{к}} \cdot e^{-\frac{e\Phi_{\text{эфф}}}{k \cdot T_{\text{к}}}} = 120 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 900^2 \cdot e^{-\frac{1,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 900}} = 3,85 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2,$$

где  $A_0 = 120 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2 \text{град}^2}$  – универсальная постоянная термоэмиссии;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Задача 2. Определить эффективную работу выхода материала термокатода  $\Phi_{\text{эфф}}$ , если температура катода  $T_{\text{к}} = 900$  К, проницаемость потенциального барьера  $D = 0,95$ , а плотность тока термоэмиссии  $j_{\text{Э}} = 3,85 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup>. Определить ток эмиссии термокатода, если площадь катода  $S_{\text{к}} = 0,1$  см<sup>2</sup>.

Решение. Ток эмиссии термокатода можно определить из уравнения:

$$j_{\text{Э}} \cdot S_{\text{к}} = 3,85 \cdot 10^3 \cdot 10^{-5} = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ А} = 38,5 \text{ мА}.$$

Для определения  $\Phi_{\text{эфф}}$  используем уравнение Ричардсона-Дэшмана:

$$j_{\text{Э}} = A_0 \cdot D \cdot T_{\text{к}} \cdot e^{-\frac{e\Phi_{\text{эфф}}}{k \cdot T_{\text{к}}}}.$$

$$3,85 \cdot 10^3 = 120 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 900^2 \cdot e^{-\frac{\Phi_{\text{эфф}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 900}};$$

$$3,85 \cdot 10^3 = 205,2 \cdot 10^9 \cdot e^{-12,88 \cdot \Phi_{\text{эфф}}};$$

$$\Phi_{\text{эфф}} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,5 \text{ эВ}.$$

Постоянные смотри в задаче 1.

### Фотоэлектронная эмиссия

Задача 1. Найти максимальную энергию (в эВ), выходящих с поверхности фотокатода под действием монохроматического пучка света с длиной волны  $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$  м, если эффективная работа выхода фотокатода  $\Phi_{\text{эфф}} = 0,5$  эВ.

Решение. Фотон имеет энергию  $h\nu$  и, попадая на фотокатоду, всю энергию отдает электрону в кристалле. Электрон, получив энергию  $h\nu$ , покидает кристалл фотокатода, если этой энергии достаточно для выхода. При выходе из кристалла электрон теряет энергию, равную эффективной работе выхода кристалла ( $\Phi_{\text{эфф}}$ ).

Выйдя из кристалла фотокатода, электрон в вакууме имеет кинетическую энергию, равную  $\frac{mv^2}{2}$ . В результате можно записать уравнение:

$$\frac{mv^2}{2} \equiv h \cdot \frac{c}{\lambda} - \varphi_{\text{эфф}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} - 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 9,139 \cdot 10^{-19}$$

$$\text{Дж} = 5,7 \text{эВ},$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона;

$\nu = \frac{c}{\lambda}$  – связь между частотой и длиной волны кванта.

Если известна начальная энергия электрона в кристалле ( $\varphi_0$ ), то уравнение баланса энергий можно записать:

$$\varphi_0 + h\nu - \varphi_{\text{эфф}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Задача 2. Электрон фотокатода получил энергию кванта, покинул кристалл и имеет энергию в вакууме 5,7 эВ. Эффективная работа выхода фотокатода  $\varphi_{\text{эфф}} = 0,5$  эВ. Какой станет энергия электрона в вакууме (в эВ), если длину волны кванта увеличить в 5 раз.

Решение. Энергию кванта можно найти из уравнения:

$$h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{mv^2}{2} + \varphi_{\text{эфф}} = 5,7 + 0,5 = 6,2 \text{ эВ}.$$

При увеличении длины волны в 5 раз энергия кванта уменьшается в 5 раз и становится равной 1,24 эВ.

Теперь можно найти энергию электрона в вакууме:

$$h \frac{c}{\lambda} - \varphi_{\text{эфф}} = 1,24 - 0,5 = 0,74 \text{ эВ}.$$

## Электростатическая эмиссия

Задача 1. Определить плотность тока термоэмиссии (в  $\text{А/м}^2$ ), если температура катода  $T_{\text{к}} = 2000 \text{ К}$ , эффективная работа выхода материала катода  $\Phi_{\text{эфф}} = 2 \text{ эВ}$ , проницаемость  $D = 1$ , а напряженность электрического поля у поверхности катода составляет  $E = 8 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ .

Решение. Электрическое поле уменьшает потенциальный барьер у поверхности катода на  $\Delta\phi$ . Эту величину можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{e^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \sqrt{E} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^{\frac{3}{2}} \sqrt{8 \cdot 10^7}}{\sqrt{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = \frac{64 \cdot 10^{-30} \cdot 8,94 \cdot 10^3}{10,54 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 0,543 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,34 \text{ эВ}, \end{aligned}$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона;

$$\pi = 3,14;$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для определения плотности тока термоэмиссии используем формулу Ричардсона–Дэшмана:

$$\begin{aligned} j_{\text{Э}} &= A_0 \cdot D \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{e(\Phi_{\text{эфф}} - \Delta\phi)}{k \cdot T}} = 120 \cdot 10^4 \cdot 2000^2 e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} (2 - 0,34)}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2000}} = \\ &= 4,8 \cdot 10^{12} e^{-9,6} = 3,24 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2. \end{aligned}$$

## Вторичная эмиссия

Задача 1. Динод имеет коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma = 3,5$ . На этот электрод падает поток первичных электронов, и во внешней цепи электрода протекает ток  $I = 5 \text{ мА}$ . Каким станет этот ток (в мА), если  $\sigma = 2$ ?

Решение. Динод (вторичный электрод) в приборах предназначен для того, чтобы умножать ток первичных электронов. Первичные электроны падают на поверхность динода, выбивают вторичные электроны, которые все уходят на следующий динод. Ток в цепи динода можно записать:

$$I_g = I_{e2} - I_{e1}, \text{ а } I_{e2} = \sigma I_{e1};$$

$$I_g = I_{e1}(\sigma - 1), \quad 5 = I_{e1}(3.5 - 1);$$

$$I_{e1} = 2 \text{ мА}, \quad I_{e2} = \sigma I_{e1} = 7 \text{ мА},$$

где  $\sigma$  – коэффициент вторичной эмиссии;

$I_{e1}$  – ток первичных электронов;

$I_{e2}$  – ток вторичных электронов;

$I_g$  – ток динода.

Если  $\sigma = 2$ , то  $I_g = 2 \cdot (2 - 1) = 2 \text{ мА}$ .

Задача 2. Диод работает в режиме насыщения. На анод падает поток первичных электронов, то во внешней цепи анода  $I_a = 1 \text{ мА}$ , при этом коэффициент вторичной эмиссии материала анода  $\sigma = 3$ . Определить ток первичных электронов.

Решение. Диод – это прибор, в котором два электрода: катод и анод. Режим насыщения в диоде, когда все электроны, вышедшие из катода, ускоряются полем анода и приходят на анод, вызывая появление тока первичных электронов. Вторичные электроны, покинув анод, попадают в ускоряющее поле анода и захватываются им снова. Поэтому ток во внешней цепи анода будет определяться потоком первичных электронов:

$$I_a = I_{e1} = 1 \text{ мА}.$$

## Элементарные процессы в плазме

Задача 1. На анод диода подано напряжение  $U_a = 400 \text{ В}$ , расстояние между катодом и анодом (в м)  $d_{ka} = 0,5 \text{ см}$ . Какое расстояние должен пройти электрон в ускоряющем поле анода, чтобы приобрести скорость  $\bar{v} = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ?

Решение. Учитывая, что согласно условию задачи, между катодом и анодом нет пространственных зарядов (один электрон), напряженность электрического поля между электродами находим по формуле:

$$E = \frac{U_a}{d_{ka}} = \frac{400}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 8 \cdot 10^4 \text{ В/м.}$$

Зная скорость электрона, находим его энергию из уравнения  $\frac{mv^2}{2} = eU$  :

$$U = \frac{mv^2}{2 \cdot e} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 25,6 \text{ В,}$$

где  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Скорость  $3 \cdot 10^6$  м/с электрон приобретает, пройдя разность потенциалов 25,6 В.

Находим расстояние, на котором электрон будет иметь энергию 25,6 эВ:

$$\frac{25,6}{8 \cdot 10^4} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Задача 2. В диодный промежуток (см. задачу 1) напустили газ, потенциал ионизации которого  $U_i = 19$  В, а сечение ионизации электрона  $Q_{ei} = 8 \cdot 10^3$  1/м. Определить сможет ли электрон ионизировать атомы газа.

Решение. Сечение ионизации характеризует число ионизаций, совершаемых электроном на 1 м его пути. Эта величина обратно пропорциональна средней длине свободного пробега электрона  $\bar{\lambda}_e$ .

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{Q_{ei}} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Электрон, двигаясь в газе, набирает энергию на расстоянии равном средней длине его пробега. После взаимодействия с атомом изменяется и энергия электрона, и траектория движения. Определим какую энергию наберет электрон в электрическом поле анода на расстоянии равном  $\bar{\lambda}_e$ .

$$E \cdot \bar{\lambda}_e = 8 \cdot 10^4 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} = 10 \text{ В.}$$

Электрон в электрическом поле анода набирает на расстоянии  $\bar{\lambda}_e$  энергию 10 эВ, а чтобы ионизировать атом газа, нужна энергия 19 эВ. Электрон не сможет ионизировать атомы газа.

### **3. Цели и задачи индивидуального задания**

Индивидуальное задание является заключительным этапом изучением студентами курса «Вакуумная и плазменная электроника».

Целью индивидуального задания является:

- 1) Закрепление и расширение теоретических и практических знаний по данному курсу;
- 2) Применение полученных знаний для решения конкретных технологических задач;
- 3) Развитие навыков самостоятельной работы при проектировании конкретных устройств;
- 4) Освоение методов расчета и проектирования с применением вычислительной техники;
- 5) Получение навыков поиска и работы с научно – технической литературой.

Индивидуальное задание должно отражать достижения современной науки и техники, а принятые технические решения должны быть рациональными в технико-экономическом отношении.

Самостоятельный расчет данной курсовой работы облегчает выполнение курсового проекта по курсу «Вакуумные и плазменные приборы» и является важным этапом в формировании специалиста в области электронной техники.

### **4. Тематика индивидуального задания**

Индивидуальное задание по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника» посвящена большому разделу курса – эмиссионная электроника. Студентам предлагается широкий спектр тем по разработке катодных узлов для электроннолучевых установок технологического назначения.

Темы индивидуальных заданий должны удовлетворять следующим критериям:

- 1) Катодный узел должен быть рассчитан и спроектирован для определенного технологического устройства;
- 2) Катодный узел должен быть функционально законченным и иметь самостоятельное эксплуатационное значение;
- 3) Проектируемое устройство должно отвечать современным требованиям вакуумной техники;
- 4) Катодный узел должен иметь такую компоновку, которая позволяла бы быструю замену вышедших из строя деталей.

### **Варианты индивидуальных заданий**

#### **Вариант №1**

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии -  $400\text{мА}$ ;
- 2 Материал катода – вольфрам;
- 3 Режим работы – непрерывный.

#### **Вариант №2**

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии -  $1\text{А}$ ;
- 2 Материал катода – оксид;
- 3 Режим работы – непрерывный.

#### **Вариант №3**

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии -  $15\text{А}$ ;
- 2 Материал катода –  $\text{LaB}_6$ ;
- 3 Режим работы – импульсный.

## **5. Структура индивидуального задания**

Индивидуальное задание состоит из пояснительной записки и чертежа катодного узла. Пояснительная записка должна включать в указанной ниже последовательности следующие документы:

- 1) титульный лист;
- 2) задание;
- 3) содержание;
- 4) введение
- 5) выбор и обоснование катода;
- 6) основная часть;
- 7) заключение;
- 8) список использованных источников;
- 9) приложение.

## **6. Календарный график выполнения индивидуального задания**

Календарный график предназначен для рационального распределения времени студента в период выполнения индивидуального задания, самоконтроля студентом результатов своей работы и контроля хода проектирования руководителем. График составляется руководителем совместно со студентом. Продолжительность выполнения индивидуального задания составляет 18 недель. Для компенсации непредвиденных затрат времени при составлении календарного графика необходимо предусмотреть резерв времени 5 - 7 дней раньше указанного срока.

Примерный график выполнения индивидуального задания приведен в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Недели	Наименование этапа	Объём, %
3	Подбор и изучение литературы. Составление обзора по литературным источникам	10
9	Расчет идеального катода.	30
12	Расчет реального катода.	20
15	Разработка и компоновка сборочного чертежа катодного узла	20
16	Обзор способ увеличения эмиссии.	10
18	Написание пояснительной записки. Сдача проекта на проверку.	10

## 7. Катоды

### 7.1 Типы и параметры катодов.

Существует большое количество различных типов катодов, отличающихся материалами, структурой активного слоя, температурным режимом, способом нагрева и способом отбора тока.

По способам нагрева термоэлектронные катоды можно подразделять на прямонакальные, подогревный и с электронным подогревом.

В прямонакальном катоде ток накала проходит непосредственно по телу катода.

В случае подогревного катода нагрев осуществляется специальным подогревателем за счет излучения или теплопроводности изолированного покрытия подогревателя, через который пропускается ток накала.

Катод с электронным подогревом нагревается в результате бомбардировки его ускоренными в электрическом поле электронами. Для этого требуется дополнительный, обычно прямонакальный катод и значительная разность потенциалов между дополнительными и основными катодами.

По материалам и структуре активного слоя термоэлектронные катоды можно подразделить на четыре группы. К первой группе относятся чисто металлические катоды, выполненные из вольфрама, тантала, рения, ниобия и их сплавов. Вторая группа – это пленочные катоды, полученные, например, путем конденсации паров цезия, бария и тория на чистый вольфрам. Третью группу составляют толстослойные катоды (оксидные). В четвертую группу входят сложные катоды, синторповодные, импрегнированные (пропитанные) катоды из металлической губки и прессованные из спеченных смесей на основе оксидов (карбонатов) или тугоплавких солей.

### **Параметры катодов.**

Сравнение катодов и их эксплуатационных данных ведут по таким параметрам, как удельная эмиссия, удельная мощность накала, эффективность и долговечность. Удельная эмиссия (плотность тока эмиссии) – это величина тока электронной эмиссии катода, получаемая с  $1\text{см}^2$  поверхности катода. Плотность тока определяется эффективной работой выхода материала и температурой катода.

Подводимая к катоду мощность накала расходуется на излучение, отвод тепла к держателям катода и эмиссию электронов. Величину мощности накала, отнесенную к  $1\text{см}^2$  активной поверхности катода, называют удельной мощностью накала.

Отношение тока эмиссии катода к мощности, затрачиваемой на его нагрев, называют эффективностью катода. Она показывает какую эмиссию можно получить с катода на  $1\text{Ватт}$  мощности накала.

Время, в течение которого эмиссия катода падает незначительно и возможна нормальная работа катода, называют долговечностью (сроком службы) катода.

## **7.2 Прямокальные катоды**

### **7.2.1 Чисто металлические катоды.**

Металлы, как материал для катода должен иметь следующие свойства:

- 1) Низкая эффективность работы выхода;

- 2) Температура плавления значительно выше рабочей температуры;
- 3) Иметь малую скорость испарения при рабочей температуре;
- 4) Обладать достаточно высокой механической прочностью;
- 5) Способность обеспечивать устойчивую эмиссию при высоких ускоряющих напряжениях;
- 6) Способность обеспечивать устойчивую эмиссию при значительном давлении остаточных газов.

В технологии металлические катоды часто выполняются из вольфрама, тантала, ниобия и их сплавов.

### 7.2.2 Карбидно-ториевые катоды

Катоды с пленкой тория на предварительно науглероженной поверхности вольфрамового, молибденового или танталового катодов получили название карбидированные. Эти катоды имеет более низкую эффективную работу выхода и обладают повышенной чувствительностью к высоким ускоряющим напряжениям.

Пленки тория получают путем добавления в вольфрам оксида тория  $ThO_2$ . Доза водимого оксида является критической: при малом количестве мала эмиссия, а при большом велика хрупкость катода. Окись составляет от 1 – 2% .

Эффективная работа выхода линейно зависит от коэффициент покрытия поверхности катода пленкой тория.

Науглероживание поверхности катода происходит в результате прокаливании его в атмосфере какого-либо углеводорода, например нафталина, бензола, ацетилена или водорода в присутствии угля. Углерод поглощается вольфрамом, образуя карбид  $W_2C$ . Карбид вольфрама позволяет ускорить реакцию восстановления окиси тория на поверхности создать большой запас чистого тория.

### 7.3 Оксидные катоды

Большое распространение получили полупроводниковые катоды, выполненные из оксидов щелочноземельных металлов бария, стронция, кальция или тория – оксидные катоды.

При изготовлении оксидного катода на керн из никеля или вольфрама наносят углекислые слои бария, стронция и иногда кальция ( $BaCO_3, SrCO_3, CaCO_3$ ), которые при прокаливании распадаются на оксиды  $BaO, SrO, CaO$  и углекислый газ  $CO_2$ , который удаляется при откачке.

Оксидный катод обеспечивает большую плотность тока эмиссии в импульсном режиме (до  $150 \frac{A}{cm^2}$ ) при длительностях импульсов до 20 мкс.

Оксидно–ториевые катоды делают обычно прямонакальными на тугоплавких кернах из вольфрама, молибдена или тантала. Эффективная работа выхода Оксидно-ториевого катода составляет. Катод устойчив к высоким напряжениям и большим давлениям остаточных газов. Эти катоды нашли применение в СВЧ приборах.

#### 7.4 Импрегнированные катоды

Импрегнированные катоды имеют на керне напеченную губку из никелевого или вольфрамового порошка. Активное вещество состоит из смеси нормального и основного алюминатов бария, распределенной в парах тела катода. Долговечность катода определяется скоростью испарения бария, которая зависит от рабочей температуры катода, содержания кальция и оксида кремния в активной пропитывающей смеси.

Покрытие катода пленкой осмия толщиной менее 1 мкм увеличивает ток эмиссии в 6 – 8 раз.

#### 7.5 Прессованные катоды

Катоды изготавливают методом прессования. Они состоят из активных веществ в виде алюминатов или вольфраматов бария и кальция и тугоплавкого металлического порошка (например вольфрама). Прессованные вольфрамовые катоды состоят на 90% из вольфрамового порошка, 1% порошка алюминия и 9% вольфрамата бария, кальция. После запрессовки состава в керн катода производят спекание в атмосфере водорода, при котором образуется моноалюминат бария  $BaAl_2O_4$  и трехбариевый алюминат  $Ba_3Al_2O_6$ , который обеспечивает максимальное количество свободного бария при работе катода.

## 7.6 Катоды на основе оксидов иттрия

Оксиды редкоземельных элементов (лантана, лутеция, гадолиния и других лантанидов) устойчивые при высоких температурах и не восстанавливаются при электронной бомбардировке, имеют маленькую рабочую температуру. Катоды из оксида иттрия, при рабочей температуре  $\sim 1650K$  достигается плотность тока эмиссии  $j_e \approx 1.1 A/cm^2$ .

## 7.7 Металлосплавные катоды

Вводимый в сплав металл может взаимодействовать с основным металлом, изменяя структуру последнего. Если диаметры атомов сплавляемых металлов отличаются менее чем на 15%, то возможно образование неограниченного ряда твердых растворов.

Для вольфрама, молибдена тантала радиусы атомов соответственно равны 1,41:1,41,46Å, что позволяет получать непрерывный ряд растворов вольфрама с молибденом и танталом. Если количество тантала в сплаве меньше 25%, то эффективная работа выхода снижается достигая 3,8эВ. Интересные сплавы с торием осмия и рения, палладии и платины с барием. Сплавы имеют коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma > 1$ .

## 7.8 Металлокерамические катоды

Металлокерамические катоды (керметкатоды) по сравнению с губчатыми катодами имеют более гладкую поверхность, обладают большей теплопроводностью и поэтому меньше искрят. Кроме того они имеют значительный запас активного вещества, распределенного на большой глубине, и поэтому имеют большой срок службы.

Катоды изготавливают путем прессования с оксидами (тория, иттрия редкоземельных элементов) и последующего спекания в атмосфере водорода.

Эмиссионные свойства керметкатодов в непрерывном и импульсном режимах не одинаковы. Для импульсного режима возможно получение плотности тока эмиссии до  $15 A/cm^2$ , а для непрерывного -  $0,5 A/cm^2$ .

Коэффициент вторичной эмиссии изменяется от 3,5 до 2,5 в процессе работы.

### 7.9 Гексаборидные катоды

В этих катодах используют соединения бора с редкоземельными элементами – гексаборидами.

Катоды с гексаборидом лантана ( $LaB_6$ ) изготавливают путем нанесения на металлическую подложку или прессование.

При изготовлении губчатых катодов в качестве подложки используют тантал или молибден.

Прессованные катоды изготавливают из порошков  $LaB_6$  и вольфрама.

Катоды изготавливают из расплавленного гексаборида, который расплавляют плазменным методом. Механическую обработку осуществляют электроискровым методом с последующей химической очисткой. Необходимый контакт между изготовленной таблеткой и металлической подложкой производят пайкой с добавкой дисилицида молибдена.

Эмиссионные свойства катода, содержащего 90–95%  $LaB_6$  лучше, чем у чистого гексаборида лантана.

Максимальные значения плотности тока, которые были получены у гексаборидных катодов в непрерывном режиме  $j_{\text{э max}} = 200 \frac{A}{\text{см}^2}$ . Коэффициент вторичной эмиссии обычно равен единице.

У катодов, содержащих тантал, вольфрам, молибден и рений при ухудшении вакуума плотность тока эмиссии падает и восстанавливается при его улучшения без повышения температуры.

Гексаборидные катоды, содержащие осмий, иридий и платину, при малейшем ухудшении вакуума «отравляются» и не восстанавливают своих свойств.

## 8. Расчет прямонакальных катодов

К группе чисто металлических катодов в настоящее время относятся главным образом вольфрамовые катоды. Это катоды прямонакальные. Расчет вольфрамового катода должен состоять из следующих элементов:

- 1) Расчет идеального катода, т.е. катода, температура всех точек поверхности которого одинакова и равна температуре его среднего участка;
- 2) Расчет поправок на охлаждение концов катода или отдельных его участков держателями;
- 3) Расчет параметров реального катода.

Рассмотрим сначала расчет идеального катода. Взяв длину катода  $l_{\kappa}$ , а диаметр  $d_{\kappa}$  можно выразить мощность накала:

$$P = \eta \pi d_{\kappa} l_{\kappa} = P_1 d_{\kappa} l_{\kappa}, \quad (7.1)$$

сопротивление катода:

$$R = \rho \frac{4l_{\kappa}}{\pi d_{\kappa}^2} = R_1 \frac{l_{\kappa}}{d_{\kappa}^2}, \quad (7.2)$$

где  $P_1 = \pi \eta$  и  $R_1 = \rho \frac{4}{\pi}$  - соответственно мощность накала и сопротивление единичного катод, у которого длина равна 1 см, а  $\eta, \rho$  - соответственно удельная мощность излучения ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) и удельное сопротивление ( $\text{Ом} \cdot \text{см}$ ).

Из уравнений (7.1) и (7.2) можно получить уравнения для тока и напряжения накала:

$$I_n = \sqrt{\frac{P_n}{R_n}} = I d_{\kappa}^{3/2}, \quad (7.3)$$

и

$$U_n = \sqrt{P_n R_n} = U_1 \frac{l_{\kappa}}{d_{\kappa}^{1/2}}, \quad (7.4)$$

где  $U_1, I_1$  - соответственно ток и напряжение, являющиеся функциями только температуры катода.

Аналогично можно записать уравнение для значения электронной эмиссии идеального катода:

$$I_e = I_{e1} l_{\kappa} d_{\kappa}, \quad (7.5)$$

где  $I_{e1} = \pi j_e$  эмиссия с поверхности идеального катода.

Величину испарения вольфрама с поверхности накаливаемой нити:

$$M = M_1 l_{\kappa} d_{\kappa}, \quad (7.6)$$

где  $M = \pi m$  - скорость испарения вольфрама с поверхности единичного катода ( $\frac{\text{г}}{\text{сек}}$ ),  $m$  - удельная скорость испарения вольфрама ( $\frac{\text{г}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$ ).

Величины  $\rho, \eta, j_e, m, a$  также  $R_1, P_1, I_1, U_1, I_{e1}, M$  можно найти в таблицах любого чистого металла.

Задавшись рабочей температурой катода ( $T_{\kappa}$ ), а следовательно табличными значениями для единичного катода можно произвести расчет идеального катода на необходимое для расчета значение тока эмиссии  $I_e$ . Из таблицы можно определить меру накала,  $H_e$  - удельную эмиссию с поверхности идеального катода на единицу расходуемой на нагрев мощности:

$$H_e = \frac{I_e}{P_n} = f(T_{\kappa}). \quad (7.7)$$

Зная  $I_e, H_e$  определяем требуемую мощность накала:

$$P_n = \frac{I_e}{H_e}, \quad (7.8)$$

а так как напряжение накала имеет стандартное значение ( $5B, 6,3B, \dots$ ), то находим величину тока накала катода:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n}. \quad (7.9)$$

Полученные результаты расчета идеального катода требуют введение поправок на охлаждение концов нити вследствие отвода тепла держателями.

Влияние охлажденных концов катода на любой его параметр, ранее вычисленный для идеального катода, определяется или в виде множества, или поправок к параметрам на каждый охлажденный конец катода. Значение параметра  $H$  для реального катода оказывается меньше его значения для идеального катода. Напряжение накала идеального катода превышает напряжение накала реального катода.

### **9. Расчет подогревных катодов**

Подогревный катод представляет собой чаще всего металлический (никелевый, молибденовый или др. металлов) цилиндр, на торец которого наносится активное вещество. Подогрев до нужной температуры обеспечивается с помощью подогревателя, находящегося внутри цилиндра и изолированного от него. Подогреватели изготавливают из вольфрама или его сплавов с молибденом и изолируют слоем алунда, т.е. прокаленной окиси алюминия. Расчет подогревного катода состоит из определения активной поверхности катода, необходимой для получения заданного тока эмиссии, и теплового расчета мощности подогревателя, необходимой для достижения рабочей температуры катода.

Можно задаться экономичностью катода и вычислить мощность, необходимую для получения заданной эмиссии, а затем из теплового расчета определить размеры катода.

Мощность, излучаемая катодом, имеющим сложный активный слой (пленка, таблетка или губка), зависит от многих факторов, связанных с технологией его производства, со структурой и химическим составом слоя, материалом основания и примесями в нем, толщиной слоя. Однако с достаточной для практических целей точностью можно использовать табличные значения параметров.

Температура катода обеспечивается подогревателем. Так как, помимо нормального режима работы, подогреватель должен выдерживать более высокую температуру, необходимую для активировки активного слоя катода, то в качестве материала подогревателя применяют либо вольфрам, либо его

сплавы с молибденом, содержащем 20% или 50% вольфрама. Молибден улучшает механические свойства вольфрама.

Для изолирующих покрытий подогревателей применяется прокаленная окись алюминия – алунд.

Для заданных значений напряжений и тока накала подогревателя, выбрав материал подогревателя можно найти диаметр и длину проволоки подогревателя по формулам:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{4\rho}{\pi^2\eta} \cdot I_n^2} \quad (8.1)$$

и

$$l_n = \frac{U_n I_n}{\pi \eta d_n}, \quad (8.2)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление подогревателя;

$\eta$  - удельная мощность подогревателя.

Длина проволоки подогревателя должна быть больше на величину отрезка, необходимого для приварки его к держателям (обычно на 3 – 4 мм).

Необходимо посчитать баланс мощностей, с одной стороны подводимой к подогревателю, с другой уносимой с подогревателя.

Надо проанализировать какие из мощностей, уносимых с подогревателя, расходуются на нагрев активной поверхности катода. Если при найденной мощности накала, этих мощностей не достаточно для обеспечения нужной температуры активного слоя необходимо увеличивать температуру подогревателя.

## 10. Конструирование катодного узла

При конструировании катодного узла необходимо выполнить следующие требования:

- 1) Учитывая, что катодный узел предназначен для работы в электронной пушке, которую вы будите конструировать на 4 курсе, катод должен быть торцевым;

- 2) Все элементы катодного зла (катод, подогреватель, экраны) должны иметь электрически изолированные выводы;
- 3) Поскольку катодный узел предназначен для электронных пушек, рассмотреть конструкцию высоковольтных электрических выводов;
- 4) Конструкция катодного узла должна быть закреплена на вакуумном фланце;
- 5) Все элементы катодного узла (катод, подогреватель, экраны) должны иметь вакуумно-плотные выводы;
- 6) Рассмотреть вакуумно-плотное присоединение фланца к вакуумной системе;
- 7) Выбрать и обосновать материалы вакуумных умножителей;
- 8) Конструкция катодного узла должна быть рабочей;
- 9) При конструировании учесть температурный режим каждой детали катодного узла.

### 11. Способы увеличения эмиссии с катода

Уравнение Ричардсона – Дешмана определяет плотность тока термоэмиссии:

$$j = A_0 D T^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}}}{KT}} = AT^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}}}{KT}} \left( \frac{A}{\text{м}^2} \right),$$

где  $A_0 = \frac{4\pi me k^2}{h^3} = 120 \cdot 10^7 = \text{const}$  является универсальной постоянной,

$D$  - прозрачность потенциального барьера;

$U_{\text{эфф}}$  - работа выхода, выраженная в джоулях.

Уравнение Ричардсона – Дешмана показывает, что плотность тока термоэмиссии зависит от температуры катода и эффективной работы выхода материала катода.

При возрастании ускоряющегося электрического поля у поверхности катода поверхности его отобразить ток, больший тока термоэмиссии. Это происходит потому, что при возрастании ускоряющего электрического поля у

поверхности катода снижается потенциальный барьер и уменьшается эффективная работа выхода на величину:

$$\Delta U = \frac{e^{3/2}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \sqrt{E},$$

где  $e$  - заряд электрона;

$\epsilon$  - диэлектрическая проводимость;

$E$  - напряженность электрического поля.

Теперь можно определить плотность тока термоэлектронной эмиссии при наличии внешнего ускоряющего поля, взяв вместо  $U_{эфф}$  ( $U_{эфф} - \Delta\phi$ ).

$$j_{эн} = AT^2 e^{-\frac{U_{эфф} - \Delta\phi}{KT}} = AT^2 e^{-\frac{U_{эфф}}{KT}} e^{\frac{\Delta\phi}{KT}}.$$

Обозначив символом  $j_e$  плотность тока эмиссии в отсутствии поля и заменив  $\Delta\phi$  его значение, получим уравнение Шоттки:

$$j_{эн} = j_e \cdot e^{\frac{e^{3/2} \sqrt{E}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0} KT}}.$$

На практике при сильных электрических полях ток эмиссии возрастает быстрее, чем это следует из уравнения Шоттки. Причина расхождения расчета и эксперимента состоит в том, что при выводе уравнения учитывается понижение потенциального барьера и не учитывали его сужение. Между тем, заметное сужение потенциального барьера приводит к тому, что проявляется туннельный эффект «просачивания» сквозь барьер (не совершая работы) электронов с энергией меньше ( $\phi_{эфф} - \Delta\phi$ ). Это, в свою очередь, приводит к дополнительному увеличению плотности тока эмиссии.

### Рекомендуемая литература

- 1 Кацман Ю.А. Электронные лампы. - М.: Высшая школа, 1979г.- 303 с.
- 2 Царев Б.М. Расчет и конструирование электронных ламп. - М.: Энергия, 1967г.- 670 с.

3 Соболев В.Д. Физические основы электронной техники: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1979. – 448 с.

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

5 Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Том 1. – М.: Энергия 1962.

6 Ланис В.А., Левина Л.Е. Техника вакуумных испытаний. – М.: Энергия, 1963.

7 Аксенов А.И., Окс Е.М., Злобина А.Ф. Вакуумная и плазменная электроника. – Т.: 2005.

## Приложение 1

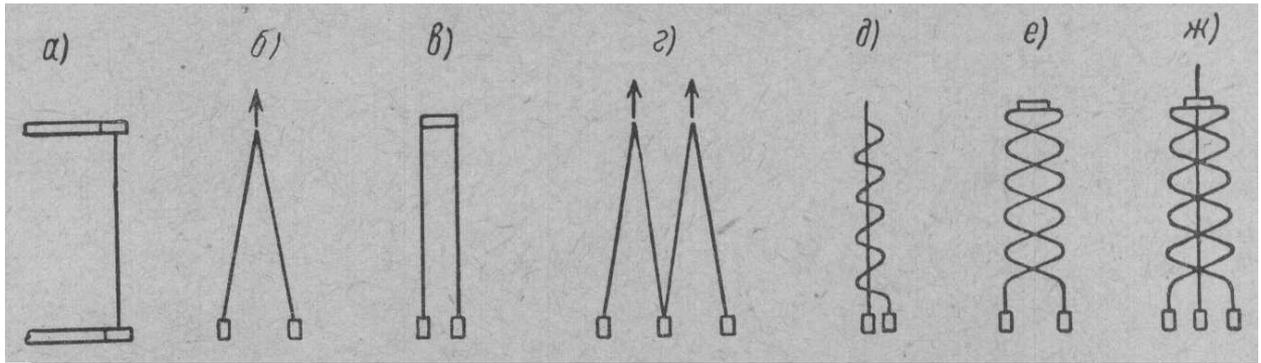


Рис. 1-9. Конструкции вольфрамовых прямоканальных катодов.

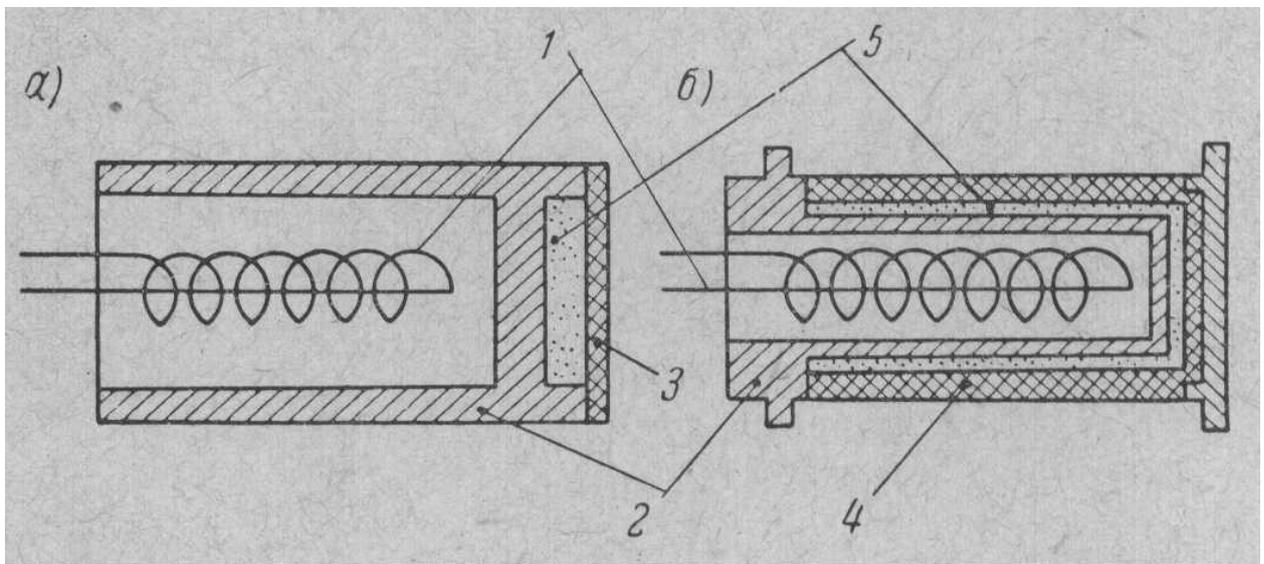


Рис. 1-13. Конструкция L-катода.

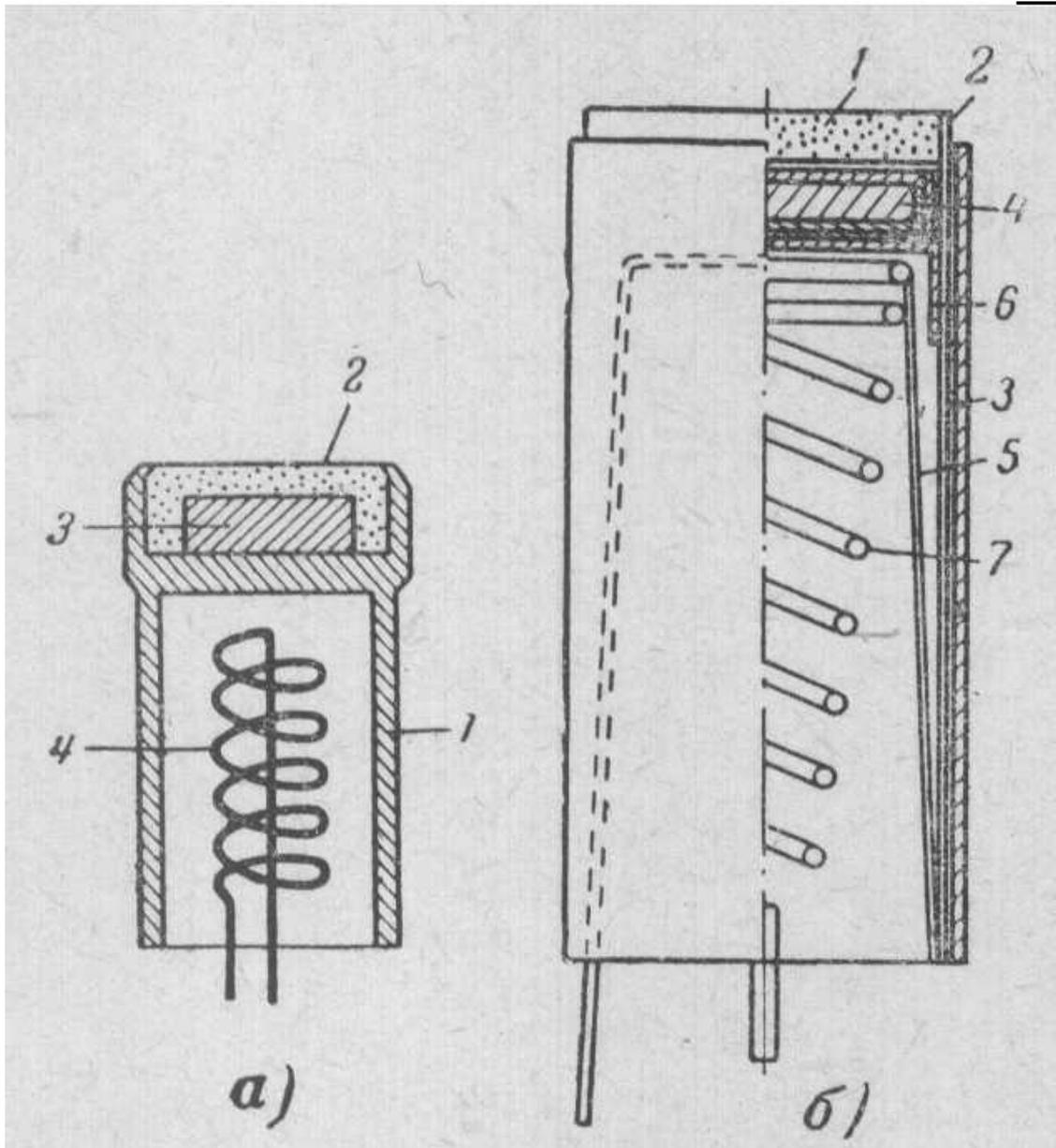


Рис. 9-5. Варианты бариево-вольфрамового металлопористого катода.

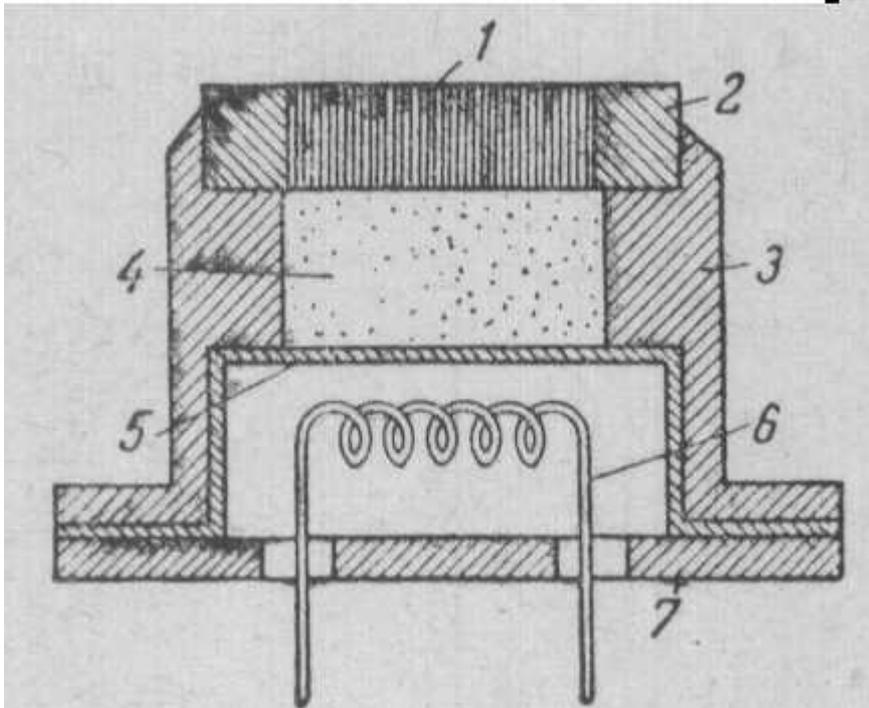


Рис. 9-6. Пучковый бариево-вольфрамовый металлопористый катод.

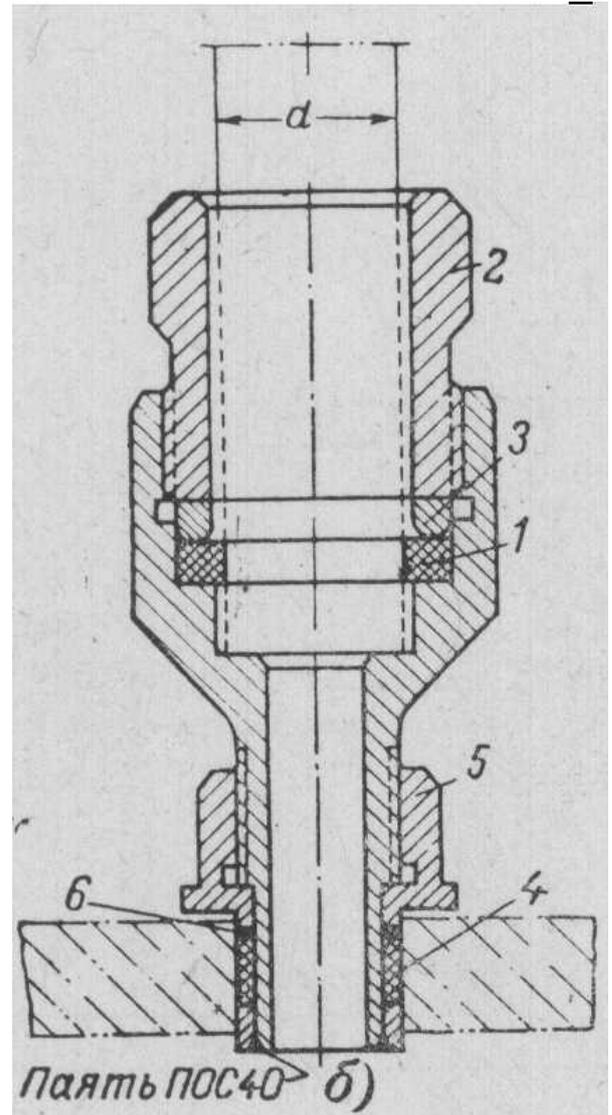
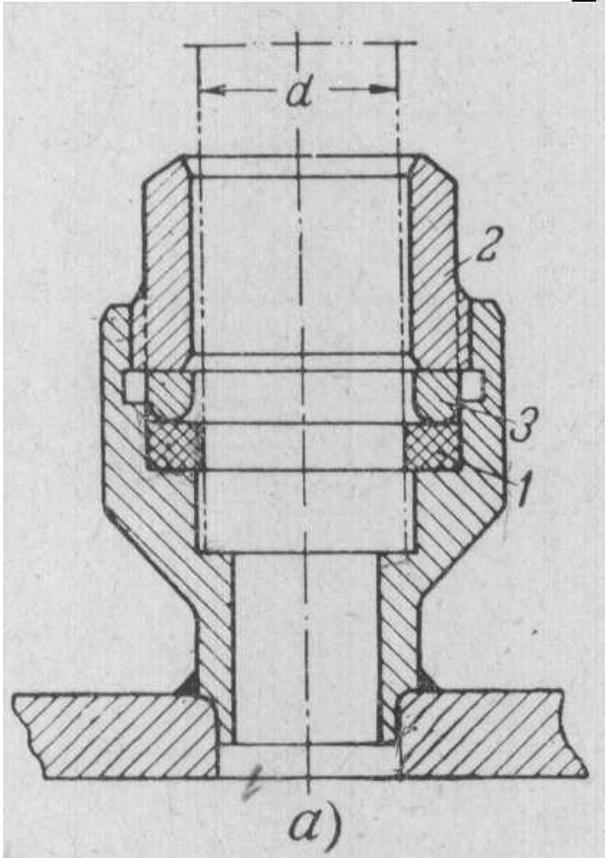


Рис. 5-8. «Грибковые» уплотнения



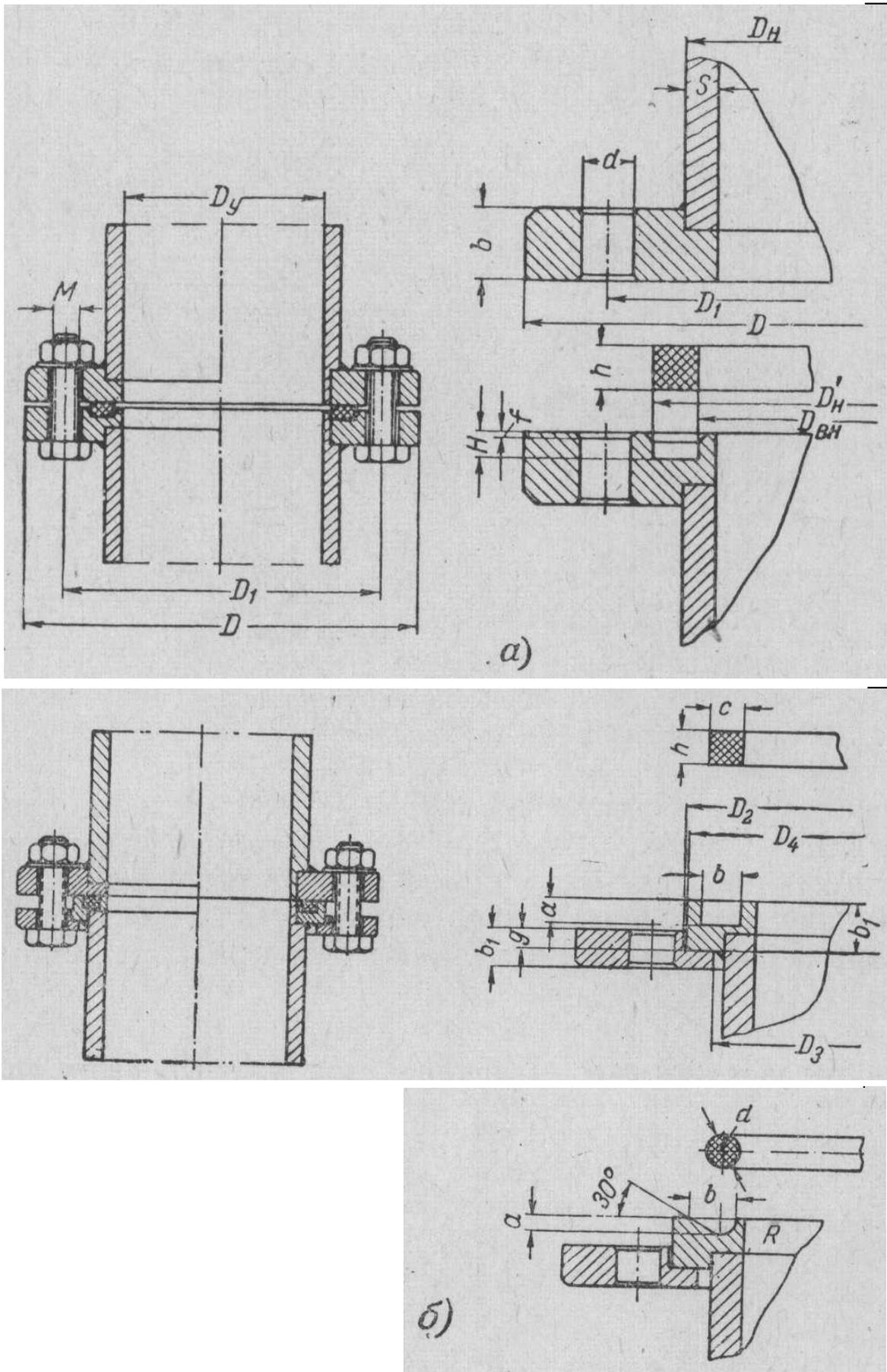


Рис. 5-9. Конструкции фланцевых уплотнений

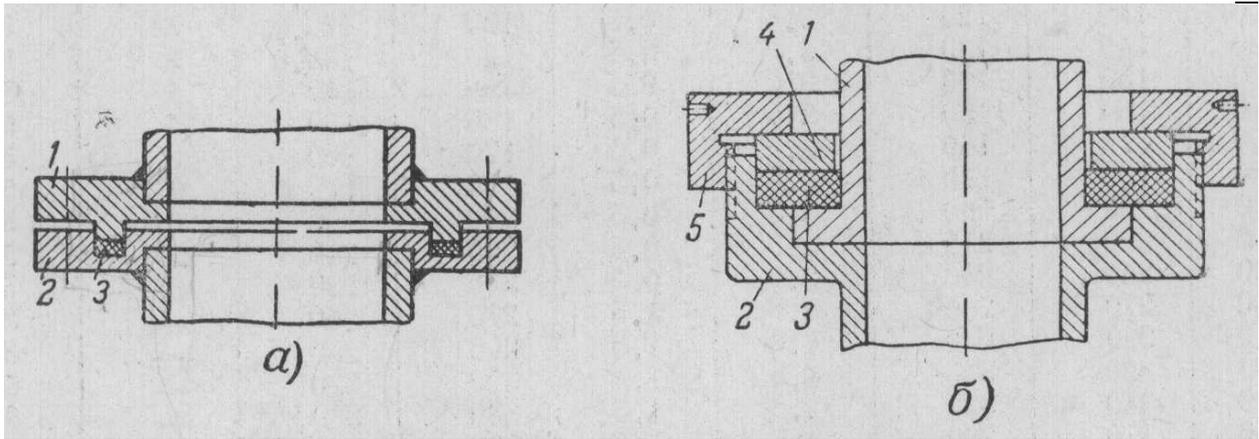


Рис. 5-10. Конструкции фланцевых соединений

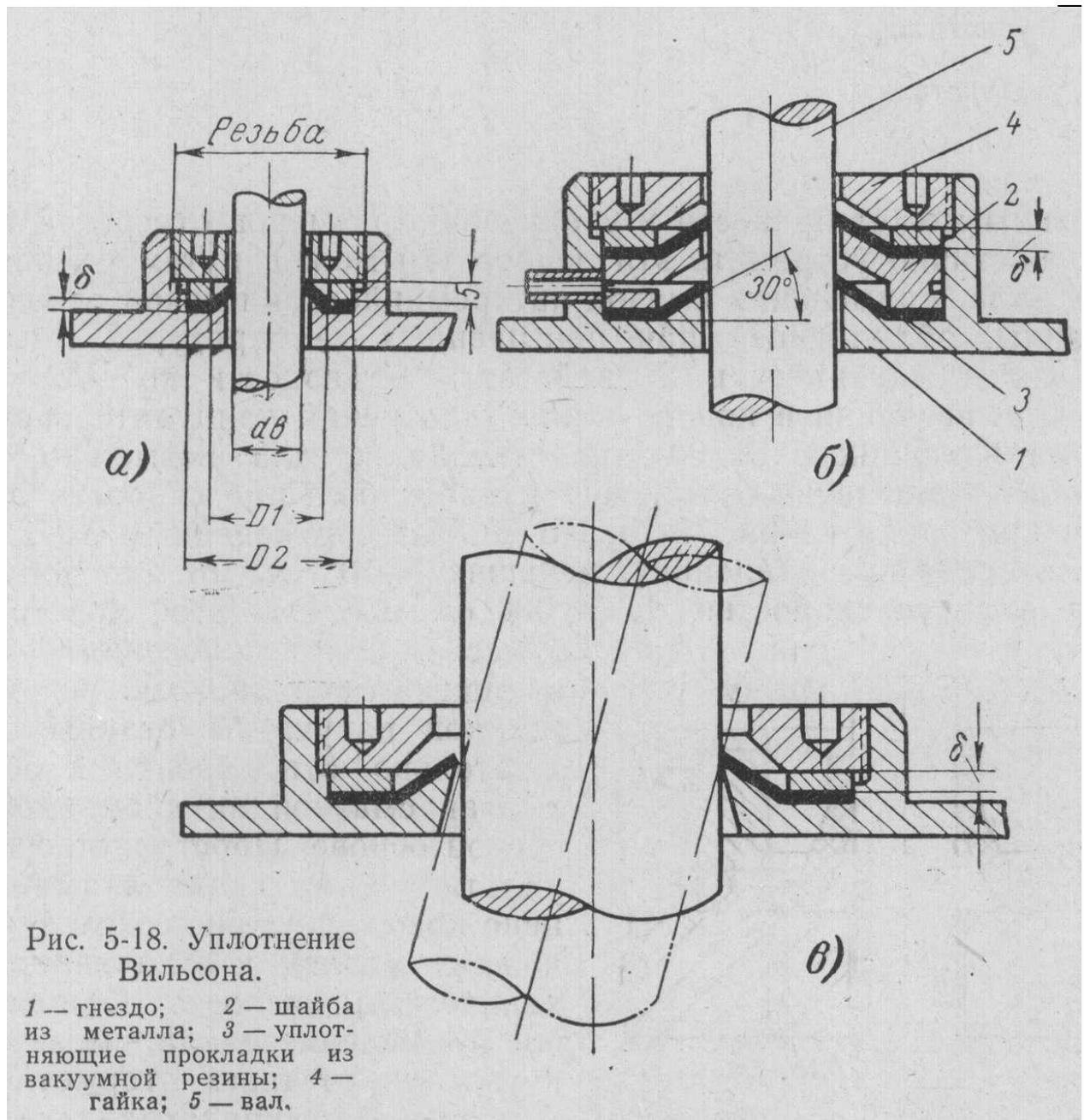


Рис. 5-18. Уплотнение Вильсона.

1 — гнездо; 2 — шайба из металла; 3 — уплотняющие прокладки из вакуумной резины; 4 — гайка; 5 — вал.

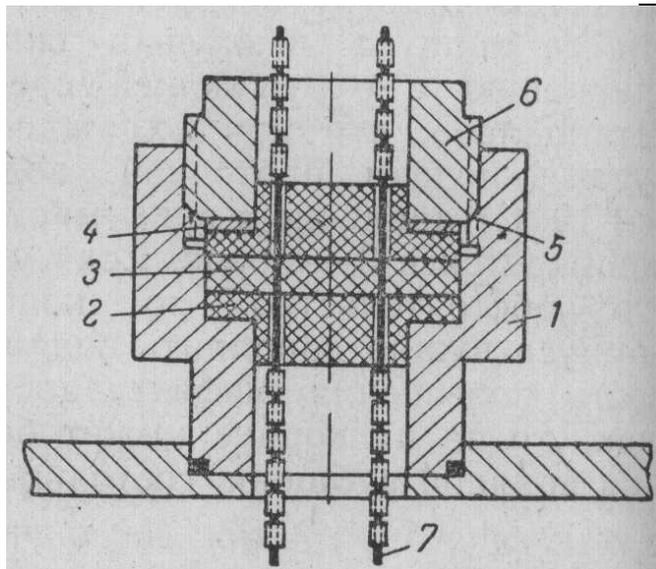


Рис. 5-40. Конструкции уплотнения нескольких электрических вводов малого диаметра

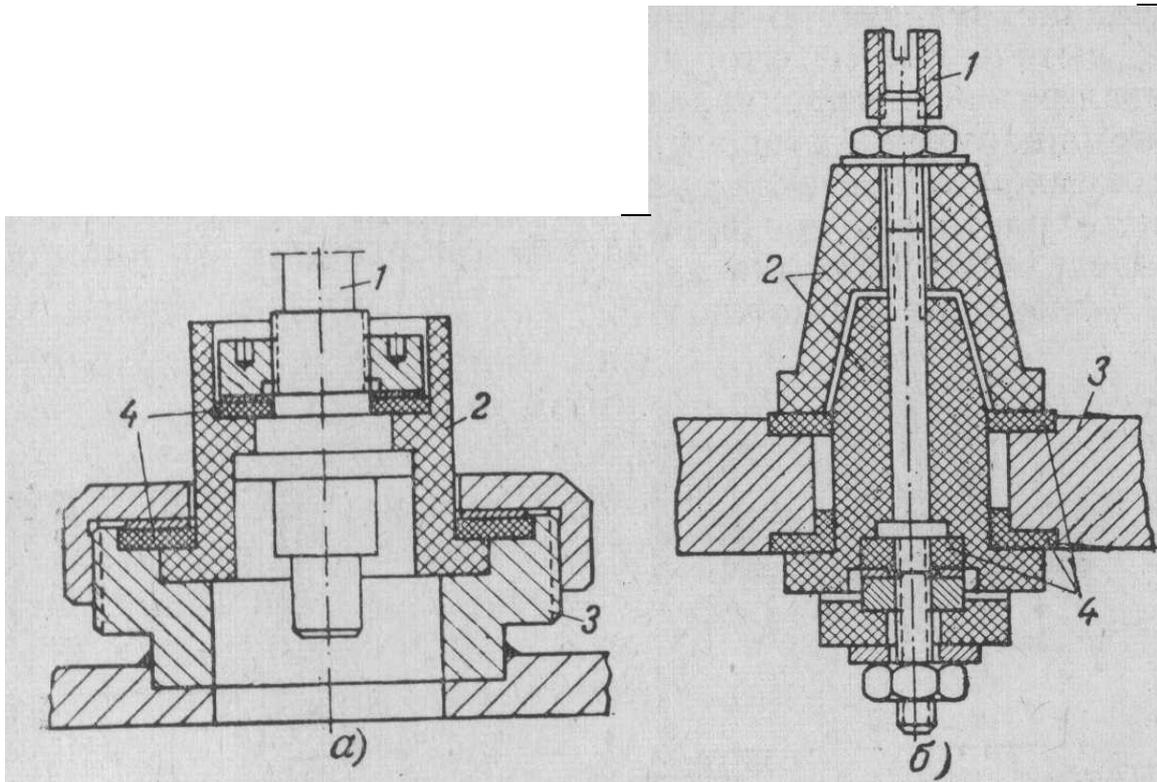


Рис. 5-42. Высоковольтные вакуумные вводы

Термоэлектронные катоды, применяемые в электронных лампах, и их свойства

Вид катода	Состав эмитирующего вещества катода	Эмиссионные постоянные		Рабочая температура катода, °К	Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup>	Плотность отбраковки тока эмиссии, а/см <sup>2</sup>		Эффективность, ма/вт	Срок службы, ч	Области применения
		%, ав	А, а/см <sup>2</sup> ·град <sup>2</sup>			в неравновесном режиме	в импульсном режиме			
1. Чистые металлические	Вольфрамовый	4,52	60	2 450—2 650	70—84	0,3—0,7	0,3—0,7	2—10	—	Мощные генераторные лампы То же
	Танталовый	4,12	37	2 000—2 400	35—60	0,5	0,5	6,5	10 000	
	Ниобиевый	3,96	—	2 370—2 300	55—50	0,17—0,65	0,5	2,5—12,7	10 000	
2. Металлопороды	LaB <sub>6</sub>	2,6	29	1 680—1 850	30—40	1,0	1,0	33	—	Генераторные лампы СВЧ диапазона Разборные лампы
	W—Th	2,63	3	1 800—1 900	14—19	0,3—0,8	—	35—50	1 000	
3. Пленочные	Торированный вольфрам	2,63	3	2 000	24	1—3	1—3	50—70	5 000	Электрометрические лампы Генераторные лампы Торцовые катоды СВЧ триодов То же
	Карбидированный, торированный вольфрам	2,1	100	950	4	1,5	—	375	8 000	
	Бариево-вольфрамовый металлопористый	—	—	1 350	—	10	—	—	Десятки	
	То же «прутковый»	—	—	1 600	—	—	—	—	—	
4. Полупроводниковые	ВаО + W на W	—	—	750—900	—	0,3—0,9	—	70—120	5 000	Усиленные лампы старых типов
	Оксидный (щелочно-земельный)	—	—	900—1 050	—	—	—	—	200 000	
То же на чистом никелевом керне	(Ba, Sr) O или (Ba, Sr, Ca) O на Ni или W	—	—	1 100	2,8	—	—	—	10 000—50 000	По оценке Метсона [Л. 9-23]
	Ториевооксидный	—	—	1 200	4,2	—	—	—	3 000	
5. Сложные	ThO <sub>2</sub> на W	—	—	1 950	25	—	—	—	—	Генераторные лампы То же
	ThO <sub>2</sub> на Ta	—	—	1 950	25	—	—	—	—	
Импрегнированный алюминитный	W + 3BaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12	—	—	—	—	—	—	—	По оценке [Л. 9-17а]
	W + 3BaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1/2 CaO	2,09	—	1 200	3,5	1,5	—	—	5 000	
Прессованные спеченные:	1) на основе солей бария:	—	—	—	—	—	—	—	—	По оценке [Л. 9-17а]
	W + Ba <sub>3</sub> WO <sub>6</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> W + Ba <sub>3</sub> WO <sub>6</sub> + WC 70% Ni + 29% BaCO <sub>3</sub> + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 70% Ni + 29% BaCO <sub>3</sub> + 1% Zr H <sub>4</sub>	—	—	1 050 1 200 950	6 8 3,3	1 4,5 6	—	—	—	
2) на основе оксидов тория или порошка металлического тория	W + 2% ThO <sub>2</sub> + 10% WC или W + 2% ThO <sub>2</sub> + 10% WC	—	—	1 270	3,0	1,5	—	—	9 000	
		—	—	1 950	25	—	20	—	1 000	

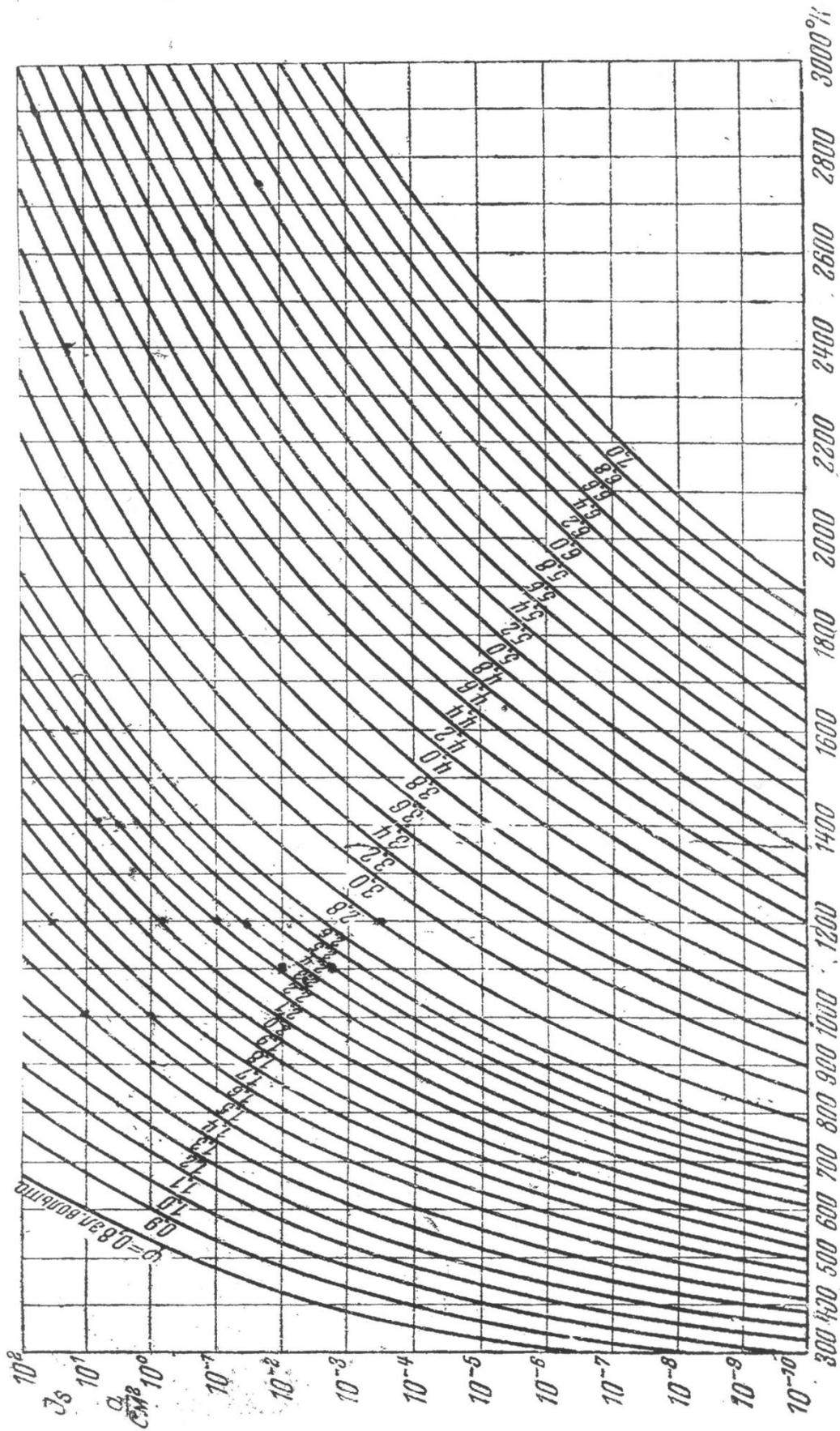


Рис. 13. Температурная зависимость тока насыщения  $J_s$  (параметр --- работа выхода  $\phi$ ).

1

В диоде  $T_k = 1700K$ . На анод подано напряжение  $U_a$  и ток в цепи анода  $I_a$  возрос в 1,2 раза ( $d_{ak} = 0.6см$ ).

Определить:

1. какое напряжение подали на анод;
2. как изменился потенциальный барьер;
3. как изменится ток  $I_a$ , если  $\sigma$  возрастает в 4 раза.

2

Термокатод работает при  $T_k = 1200K$ , имеет  $U_{эфф} = 2,2эВ$ . За счет электронного поля потенциальный барьер понижается на  $\Delta\varphi = 0,2эВ$ . Определить плотность тока термоэмиссии с электрическим полем и без него, величину этого поля.

3

В диоде  $T_k = 1800K$ ,  $S_k = 0.2см^2$ ,  $U_{эфф} = 1,6эВ$ ,  $d_{ak} = 0.2см$ ,  $\Delta\varphi = 0,1эВ$ ,  $\sigma = 1$ . Определить  $U_a$  и  $I_a$  при этом.

4

В диоде  $T_k = 1700K$ . На анод подано напряжение  $U_a$ , плотность тока с катода возросла на 10% ( $d_{ak} = 0.5см$ ).

Определить:

1. какое напряжение подали на анод;
2. как изменился потенциальный барьер после подачи напряжения;
3. как изменится ток  $I_a$ , если  $\sigma$  возрастает в 6 раз.

5

Оцените величину плотности термоэлектронного тока  $C_s$  – фотокатода при комнатной температуре  $T_k = 20^\circ C$ . Во сколько раз этот ток понизится, если фотокатод охладить до  $T_k = -23^\circ C$  ( $\varphi = 1,2эВ$ ).

6

Температура катода  $T_k = 1100K$  понизили температуру до  $T_k = 600K$ . Как изменилась плотность тока термоэмиссии, если  $\varphi_{эфф} = 1,2эВ$ .

7

Термокатод имеет плотность тока  $200 \frac{A}{M^2}$  при  $T_k = 1800K$ . Определите эффективную работу выхода  $\varphi_{эфф}$ ?

8

Катод с поверхностью  $0,1\text{см}^2$  имеет ток эмиссии  $0,5\text{А}$  при  $T_k = 1400\text{К}$  и  $1,9\text{А}$  при  $T_k = 1600\text{К}$ . Определить постоянные в уравнении термоэмиссии. Определить ток в цепи анода  $I_a$ , если  $\sigma = 3$ ,  $U_a = 200\text{В}$ . Весь ток с катода идет на анод.

9

Определить ток эмиссии термокатод, если  $T_k = 1500\text{К}$ ,  $S_k = 0,3\text{см}^2$ ,  $\varphi_{\text{эфф}} = 1,5\text{эВ}$ .

10

При какой напряженности электрического поля можно получить плотность тока эмиссии  $10^3 \text{А}/\text{м}^2$ , если  $T_k = 1800\text{К}$ , а  $\varphi_{\text{эфф}} = 2,8\text{эВ}$ . На сколько электрон-вольт изменится при этом работа выхода?

11

Термокатод имеет плотность тока  $10 \text{А}/\text{м}^2$  при  $T_k = 1000\text{К}$ . Определите эффективную работу выхода  $\varphi_{\text{эфф}}$ ?

12

Термокатод имеет плотность тока  $100 \text{А}/\text{м}^2$  при  $T_k = 1100\text{К}$  и эффективную работу выхода  $\varphi_{\text{эфф}}$ . Определить напряженность электрического поля при этом у поверхности анода и изменение работы выхода.

13

На фотокатод падает поток света с  $\lambda = 3000\text{А}$ ,  $\varphi_{\text{эфф}} = 2,34\text{эВ}$ . Определить скорость, вылетающих электронов? Определить  $\Delta\varphi$ , если к катоду приложено  $E = 10^5 \text{В}/\text{м}$ .

14

Какова работа выхода электрона из металла, если повышение температуры накала от  $2000\text{К}$  до  $2001\text{К}$  увеличивает ток эмиссии катода на 1%?

15

Какой процент электронов, находящихся в оксидном катоде при  $T_k = 1400\text{К}$ , может преодолеть потенциальный барьер  $0,8\text{эВ}$

16

Фотокатод имеет площадь  $S_k = 20 \text{ см}^2$ . Он обеспечивает при определенном освещении  $I_{\text{эл}} = 2 \text{ мкА}$ . При определенном напряжении на аноде ток становится  $3 \text{ мкА}$ . Рабочая температура  $23^\circ \text{C}$ . Определить изменение работы выхода катода при наложении электрического поля.

17

Ток эмиссии катода с площадью поверхности  $S_k = 0.1 \text{ см}^2$  равен  $0.5 \text{ А}$  при  $T_k = 1400 \text{ К}$ . Определить  $\varphi_{\text{эфф}}$ . Если все электроны, вышедшие с катода, достигают анод, какой ток протекает в цепи анода. Как он изменится, если  $\sigma$  анода увеличить в 8 раз?

18

Ток термоэмиссии  $I_{\text{т}} = 10 \text{ мА}$ , при  $T_k = 1200 \text{ К}$  ( $S_k = 3 \text{ мм}^2$ ). Между плоскими анодом и катодом приложили электрическое поле при этом потенциальный барьер изменился  $\Delta\varphi = 0.1 \text{ эВ}$ . Какое напряжение подали на анод, если  $d_{\text{ка}} = 0.1 \text{ см}$ ? А  $\sigma$  изменился и стал равен. Какой ток протекает в цепи анода?

19

Фотокатод обеспечивает термоток  $I_{\text{т}} = 10 \text{ мкА}$ , а в цепи анода протекает ток  $I_a = 14 \text{ мкА}$ ,  $\varphi_{\text{эфф}} = 0.8 \text{ эВ}$ ,  $T_k = 40^\circ \text{C}$ . Определить напряжение на аноде, если  $d_{\text{ка}} = 0.5 \text{ см}$  (электроды плоские). Каким станет ток в цепи анода, если  $\sigma$  уменьшить в 4 раза?

20

Какой процент электронов, находящихся в вольфрамовом катоде при  $T_k = 2600 \text{ К}$ , может преодолеть потенциальный барьер  $1 \text{ эВ}$ ?

21

При какой напряженности электрического поля у поверхности вольфрамового катода работа выхода уменьшится на 3%? Температура катода  $T_k = 2400 \text{ К}$ .

22

Максимальная скорость электронов в вольфрамовом катоде равна  $1.77 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . До какого значения должна быть повышена скорость электрона, чтобы он мог выйти из катода ( $\varphi_{\text{эфф}} = 3.52 \text{ эВ}$ )?

23

Как изменится эффективная работа выхода, если между катодом и анодом приложено напряжение 50кВ, а расстояние между катодом и анодом 0,5см? ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ )

Определить максимальную скорость электронов, вылетевших из металла при облучении фотокатода светом  $\lambda = 0,2 \text{ мкм}$ , если  $\varphi_{\text{эфф}} = 1 \text{ эВ}$ ?

24

Вычислить максимальную скорость электронов, выбиваемых с поверхности сурьмяно-цезиевого фотокатода под действием монохроматического пучка света с длиной волны 0,4мкм. Работа выхода катода равна 1,5эВ.

25

Фоточувствительная поверхность имеет  $\varphi_{\text{эфф}} = 2,5 \text{ эВ}$ . Какова энергия самых быстрых фотоэлектронов, если длина волны ультрафиолетового излучения составляет  $\lambda = 2536 \text{ \AA}$

26

Вычислить длину волны монохроматического пучка света, падающего на фотокатод, работа выхода которого равна 1эВ, если известно, что максимальная скорость электронов, выбиваемых с поверхности катода равна  $500 \text{ км/с}$ .

27

Чему равна энергия фотона с длиной волны:

1)  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$

2)  $\lambda = 0,5 \text{ \AA}$

28

На фотокатод с эффективной работой выхода 1,3эВ падает пучок света (монохроматический) под действие которого из фотокатода вылетают электроны со скоростью  $400 \text{ км/с}$ . Определить длину волны падающего света, какова будет эмиссия света, если  $\lambda$  увеличить в 5 раз?

Определить первый коэффициент Таунсенда при формировании самостоятельного разряда, если  $\alpha = 1$ ,  $d = 10 \text{ см}$ .

29

Какой разряд горит в индикаторном тиратроне? Перечислите способы управления моментом зажигания разряда в этом тиратроне. Между какими электродами горит разряд в режиме «память», «плазменный катод»?

30

Какой разряд горит в индикаторной панели переменного тока? Напишите условие записи и стирания информации в ячейки этой памяти. Что изменится в ячейки, если рабочий ток разряда уменьшить в три раза?

31

Определите минимальную скорость, необходимую электрону для того, чтобы ионизировать атом неона, если потенциал ионизации его 12,5В. Какое расстояние должен пройти электрон в поле с напряженностью  $100 \frac{B}{cm}$ , чтобы приобрести эту скорость?

32

Ток термоэмиссии с катода 10мА. Катод бомбардируют ионами ( $I_i = 2mA$ ). Каким должен быть  $\gamma$ , чтобы ток катода увеличился в 1,5 раз?

33

В ячейки индикаторной панели переменного тока горит тлеющий разряд, напряжение горения  $U_c = 95B$ , рабочий ток разряда  $I_p = 3mA$ . Как изменится  $U_c$ , если  $I_p = 6mA$ ?

34

В тиратроне горит тлеющий разряд при этом напряжение на сетке  $U_c = 120B$ , а напряжение горения на аноде  $U_a = 180B$ . Напряжение на сетке уменьшили на 120В ( $U_c = 0B$ ). Как при этом уменьшится напряжение горения? Как изменится ток разряда?

35

На анод тиратрона подали напряжение в виде синусоиды с амплитудой 200В. При токе в цепи сетки  $I_c = 0,3mA$  разряд загорается через  $\frac{1}{4}T$  синусоиды, после подачи напряжения. Чему равен потенциал зажигания разряда? (ответ дать в В)

36

При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если  $\gamma = 0.4$ ,  $\alpha = 5$ .

---

 37
 

---

В ячейки индикаторной панели постоянного тока светиться не весь катод, а только его половина. Какой параметр разряда изменили и как?

---

 38
 

---

Средняя длина свободного пробега электрона в неоне ( $U_i = 24B$ ) составляет  $8 \cdot 10^{-4} м$  при  $T = 300K$  и  $p = 133Па$ . Определить минимальную напряженность электрического поля при которой электрон сможет ионизировать, начальную скорость электрона принять равной нулю.

---

 39
 

---

В разрядной трубке  $d = 2,5м$ ,  $U_s = 200B$ ,  $\gamma = 0,04$ . Определить первый коэффициент Таунсенда  $\alpha$  и во сколько раз  $I_a$  больше  $I_k$ . Газ – аргон.

---

 40
 

---

В тиратроне с электростатическим управлением горит тлеющий разряд. Нарисуйте потенциальную диаграмму с 80В до 2В. Что изменится в диаграмме?

---

 41
 

---

В индикаторной панели со сканированием горит самостоятельный, тлеющий разряд. Напряжение зажигания  $U_s = 200B$ , напряжение горения  $U_g = 120B$ , ток разряда  $I_p = 1мА$ . Можно ли изменить напряжение зажигания, изменяя параметры?

---

 42
 

---

В тиратроне между анодом и катодом горит самостоятельный тлеющий разряд. Определить, как изменится ток в цепи анода  $\Delta I$ , если ток в цепи сетки первой уменьшится в 4 раза?

---

 43
 

---

В ячейки индикаторной панели постоянного тока светиться не весь катод, а только его половина. Какой параметр разряда надо изменить и как, чтобы светился весь катод?

---

 44
 

---

В ячейки индикаторной панели со сканированием горит самостоятельный, тлеющий разряд. Напряжение горения  $U_g = 150B$ , ток разряда  $I_p = 2мА$ . Как изменится напряжение горения, если ток разряда уменьшится в 2 раза? Какое расстояние должен пройти электрон в электрическом поле, если  $U_i = 20B$ ,  $U_a = 100B$ ,  $d_{ak} = 0.04м$ .

45

В ячейке ГИП  $I_{\min} = 5\text{мА}$ ,  $I_{\max} = 40\text{мА}$ . Рассчитать необходимое сопротивление ограничительного резистора, если напряжение на нагрузке

$U_n = 150\text{В}$ ,  $R_n = 10\text{кОм}$  и номинальное  $E_a$  в 1,5 раза больше напряжения на ячейке. Задачу решить для трех случаев:

- 1)  $E_a$  может уменьшиться и увеличиться;
- 2)  $E_a$  уменьшается;
- 3)  $E_a$  увеличивается.

46

Потенциал ионизации газа  $U_i = 21\text{В}$ , средняя длина свободного пробега

электрона  $\lambda = 0,3\text{м}$ . Определить напряженность электрического поля ( $e$   $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ ), при котором электрон сможет ионизировать газ.

47

Определить третий коэффициент Таунсенда ( $\gamma$ ) при формировании самостоятельного разряда, если  $\alpha = 1$ ,  $d = 20\text{см}$ .

48

Как изменится рабочая область на вольт - амперной характеристике тиратрона тлеющего разряда, если площадь катода уменьшится в 3 раза? Как при этом изменится потенциал зажигания, если электроды плоско – параллельные?

49

Нарисуйте вольт – амперную характеристику ячейки индикаторной панели переменного тока. Покажите рабочую точку на этой характеристике. Как запоминается сигнал?

50

Напишите условие зажигания индикаторной ячейки в панели с самосканированием, нарисуйте вольт – амперную характеристику и покажите рабочую точку.

51

Нарисуйте вольт – амперную характеристику ячейки газоразрядного индикатора. Покажите рабочую точку на этой характеристике.

52

Нарисуйте пусковую характеристику тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением. Нарисуйте потенциальную диаграмму для двух случаев, когда разряда нет, и когда он горит.

53

Нарисуйте пусковую характеристику тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением, выберите рабочую точку. Нарисуйте потенциальную диаграмму для данной точки, когда разряда нет, и когда он горит.

54

В тиратроне тлеющего разряда с электростатическим управлением нарисуйте потенциальную диаграмму для случая  $U_{c2} > U_a$  (разряд горит).

55

Какой минимальной скоростью должен обладать электрон для возбуждения молекулы аргона, имеющей потенциал возбуждения  $U_L = 11.6B$ .

56

Определите коэффициент газового усиления, если  $\alpha = 2,3\text{см}^{-1}$ ,  $d = 5\text{см}$ . Какой разряд горит в фотоэлементе?

57

В индикаторной ячейки панели разряд зажигается при  $U_s = 230B$ ,  $\alpha = 8,3\text{см}^{-1}$ ,  $d = 0,4\text{см}$ . Определить третий коэффициент Таунсенда, начертить потенциальные диаграммы для следующих случаев, когда есть разряд, и когда его нет.

58

В тиратроне с электростатическим управлением в момент зажигания горит «паразитный» разряд (между катодом-сеткой первой и между сеткой второй-анодом). Напряжение какого электрода и как надо изменить, чтобы зажегся основной разряд катод-анод?

59

Оцените:

- 1) Скорость электрона с энергией  $10^3 \text{эВ}$ ;
- 2) Протона с энергией  $10^6 \text{эВ}$ ;
- 3) Молекулы  $N_2$  при  $T = 1000K$ .

60

Начальная скорость электрона  $\mathcal{G}_0 = 0$ . Определите разность потенциалов, пройденную электроном, набравшем скорость  $\mathcal{G} = 4,8 \cdot 10^{10} \text{км/с}$ .

61

Между пластинами расстояние 2см и разность потенциалов 500В. Электрон начальной нулевой скоростью летит к положительной пластине. Определите скорость и энергию в момент удара о пластину.

62

---

Заряженная частица, движущаяся со скоростью  $0,8 \cdot c$ , обладает кинетической энергией 340кэВ. Что это за частица?

63

---

Ион имеет начальную скорость  $\mathcal{G}_0 = 0$  и массу  $m = 5 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ . Какую скорость будет иметь ион в плоскости анода, если  $U_a = 200 \text{ В}$ ?

64

---

За какое время электрон, прошедший разность потенциалов 1В, сможет преодолеть 100км?

65

---

Электрон с начальной скоростью  $\mathcal{G}_0 = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  влетает в область электрического поля и проходит в нем разность потенциалов 200кВ. определить скорость электрона в конце пути.

66

---

При каком ускоряющем напряжении масса электрона увеличивается в конце пробега на 15%?

67

---

Какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтоб его масса сравнялась с массой пули (9г)? А ион азота?

68

---

Определите:

- 1) Скорость электрона с энергией 10эВ;
- 2) Скорость протона с энергией  $10^4$ эВ.

69

---

Между пластинами расстояние 3см и разность потенциалов 2000В. Электрон начальной нулевой скоростью летит к положительно заряженной пластине. Определить:

- 1) Какой путь он пройдет прежде чем достигнет скорости  $\mathcal{G} = 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- 2) Какой разности потенциалов соответствует эта скорость;
- 3) Чему равна кинетическая энергия в конце пути.

70

---

За какое время электрон, прошедший разность потенциалов 1В, сможет преодолеть 10км, если после ускорения он движется с постоянной скоростью?

---

71

---

Электрон ускоряется разность потенциалов 1В. Начальная скорость его равна нулю. Определите конечную скорость электрона и его кинетическую энергию.

---

72

---

Электрон с начальной скоростью  $\mathcal{V}_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  влетает в область электрического поля и проходит в нем разность потенциалов 200кВ. Определить скорость электрона в конце пути. Нарисуйте потенциальную диаграмму.

---

73

---

Электрон с начальной скоростью  $\mathcal{V}_0 = 5 \cdot 10^7 \text{ м/с}$  в электронном поле проходит разность потенциалов 1кВ. Будет ли он ускоряться?

---

74

---

Какой разности потенциалов соответствует скорость электрона  $\mathcal{V} = 200 \text{ км/с}$ , если начальная скорость  $\mathcal{V}_0 = 0$ .

---

75

---

Электрон имеет скорость  $\mathcal{V} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . Определить потенциал анода, при котором электрон не сможет попасть на анод?

---

76

---

Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтоб его длина волны была равна  $1\text{Å}$ ?

Ион проходит ускоряющую разность потенциалов 50В, а потом движется в пространстве, где поле отсутствует, пролетая  $d = 5\text{см}$  за  $t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Найти массу иона.

---

77

---

Электрон, пройдя через сетку, потенциал которой  $U_c = 30\text{В}$ , попадает в поле анода  $U_a = 300\text{В}$ . Какую энергию имеет электрон в плоскости анода?

---

78

---

Электрон, прошедший в ускоряющем поле  $U = 1,3\text{кВ}$ , влетает в поперечное электромагнитное поле и движется по окружности с радиусом  $r = 2,5\text{см}$ . Определить индукцию магнитного поля.

В диоде на анод подают напряжение  $U_a = 150B$ . Включили в цепь анода сопротивление нагрузки  $R_H = 0,5R_0$  и ток в точке пересечения нагрузочной прямой с осью тока стал  $I = 60mA$ . Определите каким стал ток в цепи анода после включения  $R_H$ .

---

79

---

В диоде  $P_{Aгр} = 4Bm$ . При  $U_a = 80B$  мощность рассеивания анодом  $P_A$  составляет 25% от  $P_{Aгр}$ , а при  $U_a = 180B$   $P_A = 60%$  от  $P_{Aгр}$ . Определить  $S$  и  $R_i$ .

---

80

---

При изменении  $U_a$  на 2В анодный ток диода изменился на 4мА. Определить крутизну характеристики  $S$  и внутреннее сопротивление  $R_i$ .

---

81

---

В диоде определить  $S$  и  $R_i$ , если при  $U_a = 40B$   $R_0 = 2kOm$ , а при  $U_a = 50B$   $P_A = 2Bm$ .

---

82

---

Линия нагрузки диода с  $R_H$  пересекает ось  $I_a$  в точке, соответствующей 50мА. Определить  $R_H$ , если  $E = 200B$ .

---

83

---

Диод плоскими электродами работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом.  $I_a = 20mA$  при  $U_a = 100B$ . Определить:

- 1) Каков закон, связывающий  $I_a$  и  $U_a$ ;
- 2) При каком  $U_a$  анодный ток увеличится вдвое;
- 3) Чему равен  $I_a$ , если  $U_a = 200B$

---

84

---

В диоде, работающем в режиме пространственного заряда  $E_a = 180B$ ,  $I_a = 10mA$ , а половина напряжения падает на  $R_H$ . Какая мощность рассеивается на аноде? Чему будет равна эта мощность, если  $R_H = 0$ ?

---

85

---

В электронном фотоэлементе  $E_a = 350B$ , а  $K = 200 \frac{мкА}{лм}$ . Параллельно с сопротивлением нагрузки включен электронный ключ. Определить  $R_H$ , если порог срабатывания ключа 100В, а  $\Phi = 0,4лм$ .

---

86

---

Диод, работающий в режиме ограничения тока пространственным зарядом, при  $U_a = 100B$   $I_a = 8mA$ . Определить  $I_a$ , если  $P_a = 2Bm$ .

---

87

---

Нагрузочная прямая на анодной характеристике диода пересекает ось тока  $I_a = 20mA$  при  $U_{RH} = 150B$ . Определите  $R_n$  и  $R_0$ , если половина  $E_a$  падает между катодом и анодом.

---

88

---

Ток эмиссии катода  $10mA$ , все электроны достигают анод. Какой ток измеряем во внешней цепи если:

- 1)  $\sigma = 0$ ;
- 2)  $\sigma = 1$ ;
- 3)  $\sigma = 0,5$

---

89

---

В вакуумном фотоэлементе  $I_\phi = 15\mu A$ , при  $U_a = 60B$ ,  $I_a = 12\mu A$ . Каким станет  $I_a$  в  $\mu A$ , если  $U_a = 100B$ ?

---

90

---

В диодном промежутке ток эмиссии с катода  $I_\phi = 20mA$ , а при  $U_a = 50B$  ток  $I_a = 10mA$ . Определить  $I_a$  и  $P_A$ , если расстояние между катодом и анодом уменьшили в 4 раза.

---

91

---

В диодном вакуумном промежутке при  $U_a = 200B$ ,  $P_A = 2Bm$ . Расстояние между катодом и анодом уменьшили в 3 раза. Определить  $P_A$ .

---

92

---

В диоде  $I_a = 20mA$ ,  $P_A = 3Bm$ . Включить в цепь анода  $R_n$ , ток в точке пересечения нагрузочной прямой с осью стал  $60mA$ . Определить каким стал  $I_a$ , если половина  $E_a$  падает на  $R_n$ .

---

93

---

Диод, работающий в режиме ограничения тока пространственным зарядом, при  $U_a = 200B$   $I_a = 15mA$ . При каком  $U_a$  анодный ток увеличится вдвое? Чему равен  $I_a$ , если  $U_a = 100B$ ?

При какой продольной энергии электронов (в эВ) в области отклоняющих пластин в ЭЛТ предельная частота сигнал  $300MГц$ , если длина отклоняющих пластин  $20mm$ ?

---

94

---

В ЭЛТ определит при какой длине отклоняющих пластин в см можно наблюдать без искажения сигнал с предельной частотой  $f_{np} = 250 \text{ МГц}$ , если энергия электронов в луче  $2,5 \text{ кэВ}$ .

---

95

---

В ЭЛТ определить смещение пятна на экране в мм, если  $l = 10 \text{ мм}$ ,  $L = 15 \text{ см}$ ,  $d = 8 \text{ мм}$ ,  $U_{ni} = 32 \text{ В}$ , а  $U_{a2}$  изменяется от  $1 \text{ кВ}$  до  $2 \text{ кВ}$ .

---

96

---

В кинескопе  $U_{a2} = 8 \text{ кВ}$ . Определить во сколько раз надо изменить ток отклоняющей катушки, чтобы чувствительность к отклонению сохранялась прежней при  $U_{a2} = 2 \text{ кВ}$ .

---

97

---

ЭЛТ имеет чувствительность к отклонению  $0,2 \frac{\text{мм}}{\text{А} \cdot \text{вит}}$ , диаметр экрана  $40 \text{ см}$ , число витков в катушки  $200$ . Какой ток в амперах надо пропустить через катушку, чтобы луч переместился на расстояние равное радиусу экрана.

---

98

---

В ЭЛТ определить предельную частоту сигнала, если  $\varepsilon = 0,25 \frac{\text{мм}}{\text{В}}$ ,  $L = 28 \text{ см}$ ,  $d = 7 \text{ мм}$ ,  $l = 2 \text{ см}$ .

---

99

---

В ЭЛТ определить чувствительность к отклонению магнитной катушки, если амплитуда сигнала на экране  $5 \text{ см}$ ,  $n = 1000$ ,  $I = 250 \text{ мА}$ .

---

100

---

В кинескопе определить число витков в магнитной отклоняющей катушке, если  $I_k = 50 \text{ мА}$ ,  $\varepsilon = 0,5 \frac{\text{мм}}{\text{А} \cdot \text{вит}}$ , луч отклоняется при этом на  $10 \text{ см}$ .

В ЭЛТ определить энергию электрона в плоскости второго анода (в эВ), если  $l = 10 \text{ мм}$ ,  $L = 40 \text{ см}$ ,  $d = 5 \text{ мм}$ ,  $\varepsilon = 0,4 \frac{\text{мм}}{\text{В}}$ .

---

101

---

В суперортиконе электрон с фотокатода ускоряется на мишень. Во сколько раз усиливается видеосигнал на мишени, если коэффициент вторичной эмиссии мишени  $\sigma = 5$ ?

---

102

---

В ЭЛТ на все электроды поданы рабочие напряжения:

$U_{.m} = -5B, U_{.y} = 1,5кВ, U_{.a1} = 5кВ, U_{.a2} = 10кВ$ . Под электронным лучом

коэффициент люминофора  $\sigma < 1$ . До потенциала, какого электрода заряжается люминофор под лучом?

103

---

Как изменится видеосигнал, снимаемый с суперортикаона, если ток считывающего луча увеличить в 10 раз?

104

---

В ЭЛТ поданы рабочие напряжения на все электроды. Сигнал – синусоида с периодом  $T$ . какой сигнал надо подать по  $X$ , какова должна была быть длительность сигнала по  $X$ , чтобы на экране было 4 периода синусоиды?

105

---

В ЭЛТ на пластины, отклоняющие по оси  $X$  и  $Y$  поданы пилообразные напряжения, причем  $\tau_x = \tau_y$ . На экране виден один зубец пилы. Напряжение на модуляторе изменили от  $-10В$  до  $-7В$ . Как изменилась амплитуда сигнала?

106

---

В цветном кинескопе видео сигнал не пода, на катушку, отклоняющуюся по оси  $X$  подана пила, а по  $Y$  - синусоида, причем период синусоиды равен длительности пилы ( $T = \tau$ ). Что видим на экране?

107

---

В цветном кинескопе все электроды запитаны в рабочем режиме. Изменяя напряжение, на каких электродах, можно изменить яркость свечения экрана.

108

---

Как изменится видеосигнал, снимаемый с суперортикаона, если ток считывающего луча увеличить в 3 раза?

109

---

В суперортикаоне есть ФЭУ с параметрами:  $n = 9, \alpha = 0.8, \sigma = 4$ . Определить амплитуду видеосигнала с суперортикаона, если коэффициент вторичной эмиссии мишени  $\sigma = 1$ .

110

---

В цветном кинескопе изображение формируется за счет изменения изменении яркости свечения экрана от точки к точке. По какому закону изменяется коэффициент вторичной эмиссии люминофора при этом?

111

В ЭЛТ напряжение модулятора  $U_m = -10B$ , напряжение ускоряющего электрода  $U_{вэ} = 1,5кВ$ , проницаемость  $D = 0.01$ . Определить энергию электрона в плоскости модулятора эВ.

112

В ЭЛТ напряжение модулятора  $U_m = -20B$ , напряжение запираия  $U_{зп} = -50B$ , ток луча  $I_l = 600мкА$ . Как изменится ток луча, если повысить  $U_{вэ} = -5B$ , а  $U_m = -70B$ .

114

Определите напряжение запираия на модуляторе ЭЛТ, если  $U_{вэ} = 1,5кВ$ ,  $D = 0.02$ . Какова будет энергия электрона в плоскости модулятора (в эВ), если  $U_m = -10B$ .

115

В кинескопе при  $U_{вэ} = 2кВ$ ,  $D = 0.02$ ,  $U_m = -20B$  ток луча  $100мкА$ . Каков будет ток луча, если напряжение на модуляторе станет  $U_m = -40B$ ?

116

В кинескопе при  $U_{вэ} = 2кВ$ ,  $D = 0.02$  действующее напряжение  $U_o = 5B$ , определить потенциал модулятора. При напряжении на модуляторе то луча равен нулю?

117

В ЭЛТ между модулятором и ускоряющим электродом поставлены две короткофокусные магнитные фокусирующие катушки. Определить ток луча в мкА, если  $U_m = -10B$ ,  $U_{вэ} = 1,5кВ$ .

118

Определить коэффициент усиления ФЭУ – 24, если  $I_\phi = 18нА$ ,  $I_a = 160мкА$ .

119

В вакуумном фотоэлементе  $E_a = 200B$ ,  $R_a = 20Мом$ ,  $I_\phi = 5мкА$ . Определить мощность, выделяющуюся на аноде фотоэлемента.

120

Определить как изменится световой поток для ФЭУ – 9, если его интегральная чувствительность  $21 \frac{мкА}{лм}$ , а ток в цепи анода изменяется на  $148мкА$ .

121

Как изменится световой поток для ФЭУ с  $n = 13$ ,  $\Delta I_a = 4 \text{ мА}$ ,  $h = 100 \text{ мкА/лм}$ ,  $\sigma = 3,1$ ,  $\alpha = 0,9$ . Определить ток в цепи второго динода ФЭУ.

122

Как измениться ток в цепи четвертого динода ФЭУ, если  $\Delta I_a = 4 \text{ мА}$ ,  $\sigma = 2,8$ ,  $\alpha = 0,8$ ,  $\Delta \phi = 0,3 \text{ лм}$ ,  $K = 50 \text{ мкА/лм}$ . Сколько динодов у ФЭУ?

123

На фотокатод с интегральной чувствительностью  $K = 200 \text{ мкА/лм}$  падает световой поток  $\Phi = 0,2 \text{ лм}$ ,  $R_n = 800 \text{ кОм}$ . Сигнал с  $R_n$  снимается на усилитель, управляющий реле с током срабатывания  $5 \text{ мА}$ , при  $U = 200 \text{ В}$ . Определить коэффициент усиления по мощности и по напряжению.

124

Определить ток в мкА во внешней цепи анода и динода однокаскадного ФЭУ, если ток с фотокатода  $200 \text{ мкА}$ ,  $\sigma = 10$  напряжение на аноде  $20 \text{ В}$ , а напряжение на диноде  $300 \text{ В}$  (прибор работает в режиме насыщения).

125

Как измениться ток в цепи первого динода ФЭУ, если  $\Delta I_a = 4 \text{ мА}$ ,  $\sigma = 4,7$ ,  $\alpha = 0,8$ ,  $\Delta \phi = 0,4 \text{ лм}$ ,  $K = 50 \text{ мкА/лм}$ . Сколько динодов у ФЭУ?

126

Как измениться ток в цепи третьего динода ФЭУ, если  $\Delta I_a = 125 \text{ мА}$ ,  $\sigma = 10$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $\Delta \phi = 2 \text{ лм}$ ,  $K = 20 \text{ мкА/лм}$ . Сколько динодов у ФЭУ?

127

Как измениться световой поток, падающий на фотокатод ФЭУ, если  $n = 7$ ,  $\Delta I_a = 4 \text{ мА}$ ,  $\sigma = 5$ ,  $\alpha = 0,8$ ,  $K = 40 \text{ мкА/лм}$ . Сколько динодов у ФЭУ?

128

В девятикаскадном ФЭУ при изменении напряжения на аноде от  $2 \text{ кВ}$  до  $3 \text{ кВ}$  чувствительность по току анода возросла в  $10^3$  раз. Как изменился  $\sigma$  каждого каскада и коэффициент усиления ФЭУ, если коэффициент передачи тока изменился?

129

В ионном фотоэлементе при  $K = 50 \text{ мкА/лм}$ , а  $\Phi = 2 \text{ лм}$  на  $R_n = 100 \text{ кОм}$  выделяется мощность  $P_R = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$ , при этом  $R_0 = R_H$  в рабочей точке. Определить коэффициент газового усиления.

130

Чувствительность катода 6 – каскадного ФЭУ  $100 \text{ мкА/лм}$ , а анода  $72,9 \text{ мкА/лм}$ , при этом  $\alpha = 0,6$ . Определить коэффициент вторичной эмиссии каскада.

131

В ФЭУ чувствительность по катодному току  $10 \text{ мкА/лм}$ , по анодному току  $10 \text{ мкА/лм}$ ,  $I_\phi = 5 \text{ мкА}$  сопротивление в цепи анода  $R_n = 10 \text{ кОм}$ . Какое необходимо усиление по напряжению, чтобы сигналом с нагрузки засечь разряд  $U_3 = 250 \text{ В}$ .

132

В ионном фотоэлементе при  $K = 80 \text{ мкА/лм}$ , а  $\Phi = 0,5 \text{ лм}$  на  $R_n = 1 \text{ МОм}$  выделяется мощность  $P_R = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$  в рабочей точке. Определить коэффициент газового усиления в этой точке.

133

Какая будет выделяться мощность на аноде ФЭУ, если  $I_{o2} = 20 \text{ мкА}$ ,  $I_\phi = 5 \text{ мкА}$ ,  $n = 6$ ,  $U_a = 100 \text{ В}$ . Ответ дать в мВт.

134

Определить число каскадов ФЭУ, если выходной ток  $15 \text{ мА}$ ,  $I_\phi = 1,5 \text{ мкА}$ ,  $\sigma = 5,2$ ,  $\alpha = 0,89$ .

135

В ионном фотоэлементе коэффициент газового усиления  $K_{ry} = 8$ ,  $R_n = 700 \text{ кОм}$ ,  $\Phi = 1 \text{ лм}$  при чувствительности по катодному току  $K = 30 \text{ мкА/лм}$ . Какое необходимо усиление по напряжению, чтобы сигналом с нагрузки зажечь разряд в тиратроне с  $U_3 = 336 \text{ В}$ .

136

В электронном фотоэлементе напряжение источника питания  $E_a = 200 \text{ В}$ ,  $R_n = 500 \text{ кОм}$ ,  $K = 10 \text{ мкА/лм}$ . Параллельно с включен электронный ключ.

Определить световой поток, при котором откроется ключ, если порог его срабатывания 50В? Какое напряжение при этом между катода и анодом?

137

Чувствительность катода 4 – каскадного ФЭУ  $25 \text{ мкА/лм}$ , а анода  $102,4 \text{ мкА/лм}$ , при этом  $\alpha = 0,8$ . Определить коэффициент вторичной эмиссии для каждого каскада. Изменится ли  $\sigma$ , если световой поток увеличить в два раза?

138

Как измениться световой поток, падающий на фотокатод ФЭУ, если  $n = 3$ ,  $\Delta I_a = 72,9 \text{ мА}$ ,  $\sigma = 10$ ,  $\alpha = 0,9$ ,  $K_k = 40 \text{ мкА/лм}$ . Чему равен коэффициент усиления ФЭУ?

139

В ионном фотоэлементе при  $K = 120 \text{ мкА/лм}$ , а  $\Phi = 0,5 \text{ лм}$  на  $R_n = 0,3 \text{ МОм}$  выделяется мощность  $P_R = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$ , при этом  $R_i = 3R_n$  в рабочей точке. Определить коэффициент газового усиления в этой точке.

140

Напряжение на делителе 11 каскадного ФЭУ увеличили в 2 раза, при этом коэффициент усиления возрос в 50 раз. Определите как изменились  $\sigma$  и чувствительность по анодному току  $S$ .

141

Определить ток в цепи анода и динода однокаскадного ФЭУ, если  $I_{фэ} = 4 \text{ мА}$ ,  $U_a = 200 \text{ В}$ ,  $U_d = 50 \text{ В}$ ,  $\sigma = 2,8$ .

Определить величину фототока в ФЭУ - 25, если  $\sigma = 3,2$ , а ток в цепи четвертого динода 84 мкА.

142

Определить величину фототока в ФЭУ - 13, если  $\sigma = 1,85$ , а ток в цепи четвертого динода 243 мкА.

143

Определить величину фототока в ФЭУ - 24, если  $\sigma = 2,2$ , а ток в цепи четвертого динода 100 мкА.

144

Определить коэффициент вторичной электронной эмиссии, если ток фотокатода 4 мА, а ток в цепи первого динода 10 нА.

145

В вакуумном фотоэлементе напряжение источника питания  $E_a = 200B$ ,  $R_n = 300k\Omega$ ,  $I_\phi = 50\mu A$ . Определите мощность, выделяющуюся на аноде фотоэлемента.

146

В вакуумного фотоэлемента  $R_n = 25M\Omega$ ,  $I_\phi = 3\mu A$   $R_i = R_n$ . Определить величину напряжения источника питания.

147

В ЭЛТ отклоняющие пластины по  $Y$  имеют  $l = 8mm$ ,  $d = 3mm$ , амплитуда сигнала 2см, чувствительность к отклонению  $0,1\frac{mm}{B}$ .

- 1) определить горизонтальную составляющую энергии в эВ;
- 2) вертикальную составляющую энергии к моменту выхода из пластин;
- 3) предельную частоту.

148

Сколько зубцов пилы увидим на экране ЭЛТ, если на пластины, отклоняющие по  $X$  подать сигнал в виде пилы, время развертки  $\tau_x$ , а по  $Y$  - пила с  $\tau_y$ . Причем  $\tau_x = 3\tau_y$ .

149

На отклоняющие пластины ЭЛТ подано переменное напряжение (синусоида), а на экране видна прямая горизонтальная линия в центре экрана длина 5 см. Определите напряжение на пластинах и по  $X$  и по  $Y$ , если чувствительность отклонения обеих пар пластин  $0,4\frac{mm}{B}$ ?

150

В ЭЛТ определить в вольтах при каком напряжении на втором аноде  $U_{a2}$  с длиной отклоняющих пластин  $l = 20mm$  можно без искажения наблюдать сигнал с частотой  $f = 375MГц$ . Как уменьшится чувствительность к отклонению, если  $f_{сигнала} = 0,5f$  предельная.

152

При какой продольной энергии электронов (в эВ) в области отклоняющих пластин в ЭЛТ предельная частота сигнала 600 МГц, если длина отклоняющих пластин 15мм? Какова будет эта энергия, если длина пластин будет 30 мм.

В ЭЛТ на отклоняющие пластины по  $Y$  подан сигнал – прямолинейный импульс. Луч на экране вычертил прямую линии длиной 5 мм. Какой величины напряжение импульса, если чувствительность к отклонению  $2 \text{ мм}/\text{В}$ ? Какой формы и величины подано напряжение на пластины, отклоняющие по  $X$ ?

---

153

---

На экране осциллографа видна синусоида (один период), амплитуда 5 см, период 10 см. На обе пары пластин подан сигнал с напряжением 50 В. Определите чувствительность к отклонению обеих пар пластин, какой формы сигнал подан на пластины?

---

154

---

На сколько мм переместиться луч из центра на экране, если на вертикально отклоняющие пластины подано постоянное напряжение  $U_y = 100 \text{ В}$ , а на горизонтально отклоняющие пластины  $U_x = -40 \text{ В}$ , при этом чувствительность к отклонению по  $Y$   $0,3 \text{ мм}/\text{В}$ , по  $X$  -  $0,4 \text{ мм}/\text{В}$ ?

---

155

---

В кинескопе система магнитного отклонения имеет 2 катушки, которые соединены последовательно по 3000 витков каждая с током 5 мА. На экране в центре виден светящийся квадрат  $30 \times 15 \text{ мм}$  (30 мм по  $X$ ). Какой формы сигнал подан на катушки? Найти чувствительность к отклонению каждой катушки?

---

156

---

К кинескопе оксидный термокатод имеет температуру  $T_k = 900 \text{ К}$  и эффективную работу выхода  $\phi_{\text{эфф}} = 1,1 \text{ эВ}$ . Определить плотность тока термоэмиссии ( $\text{А}/\text{м}^2$ ), если  $D = 1$ .

---

157

---

В кинескопе определить чувствительность магнитной катушки к отклонению, если амплитуда сигнала 5 см, число витков катушке 500, а ток через катушку 0,1 А. Как изменится чувствительность к отклонению, если напряжение на модуляторе 3 раз?

---

158

---

В ЭЛТ определить напряжение второго анода и энергию электронов в плоскости второго анода, если чувствительность к отклонению  $0,2 \text{ мм}/\text{В}$ ,  $l = 20 \text{ мм}$ ,  $L = 300 \text{ мм}$ ,  $d = 10 \text{ мм}$ . Определить предельную частоту.

159

Определить запирающее напряжение на модуляторе ЭЛТ, если  $U_{\text{вэ}} = 2,5 \text{ кВ}$ ,  $D = 0,01$ . Какова будет энергия электронов в плоскости модулятора, если  $U_{\text{м}} = -5 \text{ В}$ ?

160

В ЭЛТ напряжение модулятора  $U_{\text{м}} = -15 \text{ В}$ , напряжение ускоряющего электрода  $U_{\text{вэ}} = 3 \text{ кВ}$ , напряжение запирающего электрода  $U_{\text{зм}} = -25 \text{ В}$ . Определить энергию электрона в плоскости модулятора и ускоряющего электрода в эВ.

161

В ЭЛТ действующее напряжение 7В, напряжение ускоряющего электрода 3,5В, проницаемость 0,004. Определить потенциал модулятора. При каком напряжении на модуляторе ток луча равен 0?

162

ЭЛТ с магнитной фокусировкой имеет потенциал запирающего электрода -40В при напряжении ускоряющего электрода 3 кВ, а при напряжении модулятора -10В ток луча 500мА. Как измениться ток луча, если  $U_{\text{вэ}} = 6 \text{ кВ}$ , а  $U_{\text{м}} = -50 \text{ В}$ .

163

В ЭЛТ начертите траекторию электронов от катода до экрана, если после модулятора поставлены две короткофокусные магнитные фокусирующие катушки затем ускоряющий электрод и остальные электроды. Чему равен ток луча?

164

Для ЭЛТ определить величину приложенного напряжения на отклоняющие пластины, если  $h = 0,3 \text{ мм/В}$ , а перемещение пятна на экране 20мм.

165

Определить длину отклоняющих пластин, если  $U_{\text{а2}} = 1,3 \text{ кВ}$ , а предельная частота сигнала на отклоняющие пластины 240МГц.

166

При каком  $U_{\text{а2}}$  предельная частота сигнала на отклоняющие пластины 500МГц, если длина пластины 1,4см.

167

Определить потенциал второго анода в ЭЛТ, если  $l = 11,5 \text{ мм}$ ,  $L = 238 \text{ мм}$ ,  $d = 7,3 \text{ мм}$ ,  $h = 0,17 \text{ мм/В}$ .

168

В кинескопе подано напряжение, и луч виден в виде точки в центре экрана. Как надо запитать электроды, чтобы получить на экране изображение.

169

В ЭЛТ какой параметр и как надо изменить, чтобы чувствительность к отклонению увеличилась в 1,5раз. (отклонение электростатическое).

170

В ЭЛТ определить  $l_2$ , если

$$l_1 = 11.1 \text{ мм}, L = 263 \text{ мм}, d_1 = 4.3 \text{ мм}, d_2 = 12.99 \text{ мм}, U_{a2} = 3121 \text{ В}, h = 0.16 \frac{\text{мм}}{\text{В}}.$$

171

Определить как измениться чувствительность к отклонению в ЭЛТ с электростатическим отклонением, если напряжение на пластинах увеличить в 2раза.

172

На экране кинескопа видна вертикальная линия. Какой сигнал подан на отклоняющие катушки по  $Y$  и  $X$ .

173

Какой величины и формы получим сигнал на выходном сопротивлении суперортикаона, если мишени коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma = 1$ .

174

В цветном телевизоре напряжение на втором аноде 25кВ. отклонение луча обеспечивают две магнитные катушки с чувствительностью по  $Y$   $2 \frac{\text{мм}}{\text{А} \cdot \text{вит}}$ , по  $X$  -  $1 \frac{\text{мм}}{\text{А} \cdot \text{вит}}$ . Определить продольную энергию электронов в момент входа в область отклонения в момент выхода из нее в эВ.

175

В фотоэлектронном умножителе суперортикаона 5 динодов. Коэффициент вторичной эмиссии динода увеличился в 2 раза, коэффициент передачи тока при этом не изменился. Как изменилась амплитуда видео сигнала на выходе прибора?

176

В кинескопе все электроды имеют рабочее напряжение, экран не покрыт  $Al$  пленкой. Какой потенциал устанавливается на экране, если  $\sigma > 1$ ? Что видим на экране? Что измениться, если потенциал модулятора изменить от -25В до -15В?

177

В цветном кинескопе по паспорту записаны все электроды, только не подан видео сигнал. Что видим на экране? Что изменится на экране? Подали сигнал на модулятор. Что видим на экране?

178

В кинескопе температура катода 1000К, напряжение модулятора -15В, проницаемость его 0,02, напряжение ускоряющего электрода 2кВ, напряжение второго анода 25кВ. найти энергию электрона при выходе из катода в плоскость модулятора (в эВ).

179

В кинескопе при напряжении на модуляторе -10В и на ускоряющем электроде 1500В при проницаемости 0,01, ток в луче рабочий (100мкА). Определить энергию электронов в плоскости модулятора в эВ? Каков ток луча, если напряжение на модуляторе -15В? Как изменится этот ток, если напряжение на  $A_3$  увеличится в 2раза?

180

В ЭЛТ определить при каком напряжении на втором аноде с длиной отклоняющей пластины 20мм можно без искажения наблюдать сигнал с частотой  $f = 375$ МГц. Если сигнал синусоида, какую часть периода электрон будет между отклоняющими пластинами?

181

При ускоряющем напряжении на электроде 1кВ запирающее напряжение -25В. Определить энергию электронов в плоскости модулятора и ускоряющего напряжения, если напряжение модулятора -5В.

182

В ЭЛТ определить смещение пятна, если  $U_{a2} = 1000В$ ,  $U_{m1} = 100В$ , длина пластин 2см, расстояние между ними 0,8см, расстояние до экрана 20см.

183

В осциллографе  
 $l_x = 6мм$ ;  $d_x = 3мм$ ,  $L_x = 300мм$ ,  $l_y = 7мм$ ,  $d_y = 3.5мм$ ,  $L_y = 320мм$ ,  $U_{a2} = 10кВ$ ,  
 экран  $50 \times 60$ мм. Рассчитать максимальную величину сигнала для каждой пары отклоняющих пластин.

184

Расстояние между пластинами отклоняющей системы ЭЛТ 1см, длина пластин 5см. Какое напряжение необходимо приложит между пластинами, чтоб луч с энергией 750эВ исчез с экрана?

185

В ЭЛТ отклоняющие пластины по  $Y$  имеют  $l = 14\text{мм}$ ,  $L = 170\text{мм}$ ,  $d = 6\text{мм}$ ,  $U_{a2} = 5\text{кВ}$ . Определить:

- 1) Горизонтальную составляющую энергии в эВ (в направлении экрана)
- 2) вертикальную составляющую энергии к моменту выхода из пластин;
- 3) предельную частоту.

186

Определить потенциал модулятора для ЭЛТ, если  $I_{\kappa} = 90\text{мкА}$ ,  $k = 3$ ,  $\gamma = 2$ ,  $U_{3M} = -60\text{В}$ .

187

В ЭЛТ поданы рабочие напряжения на все электроды, только не подан видео сигнал. Что видим на экране? Сигнал синусоида с периодом  $T$ . Как надо запитать электроды по  $X$ , чтобы на экране появилась синусоида, состоящая из 2 периодов.

188

Кинескоп запитан, но не подан видеосигнал, что видим на экране? На какой электрод подается видеосигнал? Видеосигнал необходимо усилить в 24раза, предложите способ, рассчитайте.

189

Видеосигнал, снимаемый с иконоскопа, необходимо усилить в 68раз. Предложите способ, рассчитайте.

190

Определить величину отклонения на экране кинескопа, если индукция магнитного поля  $5\text{мТл}$ , область действия магнитного поля  $0,3\text{см}$ , расстояние от катушки до экрана  $20\text{см}$ , начальная скорость электрона  $10^7 \text{ м/с}$ .

191

В ЭЛТ напряжение на втором аноде  $5\text{кВ}$ , длина отклоняющих пластин  $1\text{см}$ . На отклоняющие пластины подано синусоидальное напряжение. Определить предельную частоту трубки? Определить частоту, при которой электрон будет оставаться в пространстве между пластинами в течение одного полупериода?

192

Кинескоп имеет чувствительность к отклонению  $0,5\text{мм/А вит}$ , диаметр экрана  $200\text{мм}$ , число витков  $200$ . какой ток надо пропустить через катушку, чтобы луч переместился на расстояние равное радиусу экрана?

В ЭЛТ  $U_y = 60 \sin(2\pi \cdot 10^8 t)$ , если  $l_1 = 0.02 \text{ м}$ ,  $L = 0.16 \text{ м}$ ,  $d = 8 \text{ мм}$ ,  $U_{a2} = 1 \text{ кВ}$ .  
Каково отклонение электрона на экране.

---

193

---

Определить, как изменится скорость электрона, имеющего скорость  $1,5 \cdot 10^4 \text{ км/с}$  после того, как он пролетит между плоскопараллельными пластинами, имеющими разность потенциалов 25В и отстоящих друг от друга на расстоянии 2см. длина пластин 1,5см.

---

194

---

В ЭЛТ с магнитным отклонением электронный луч проходит расстояние 5см через область поперечного магнитного поля. Определить магнитную индукцию, необходимую для отклонения луча на  $17,5^\circ$ .

---

195

---

Трубка с электростатической фокусировкой имеет запирающее напряжение -50В при  $U_{a2} = 1500 \text{ В}$ . Каково будет запирающее напряжение при  $U_{a2} = 2100 \text{ В}$ .

---

196

---

В ЭЛТ отклоняющая катушка имеет 5000 витков, ток 40мА, величина отклонения луча 135мм. Определить чувствительность отклоняющей системы трубки.

---

197

---

Труба с магнитной фокусировкой имеет запирающее напряжение -50В при  $U_a = 2,5 \text{ кВ}$ . При напряжении модулятора -20В ток катода равен 600мкА. Как изменится ток катода, если повысить  $U_a = 5 \text{ кВ}$ , а  $U_m = -70 \text{ В}$ ?

---

198

---

Для ЭЛТ изобразить фигуру, получающую на экране, если к отклоняющим пластинам подведены синусоидальные напряжения одинаковой частоты, амплитуды фазы. Чувствительность обеих пар пластин считать одинаковой.

---

199

---

В ЭЛТ определить  $U_{a2}$ , при котором луч будет отклоняться от центра на экране на 2см, если напряжение пластин 50В. Расстояние между пластинами 0,4см, длина пластин 5см, расстояние до экрана 16см.

---

200

---

В ЭЛТ используются отклоняющие пластины длиной 2см, расстояние между пластинами 0,5см. Пластины вертикального отклонения удалены от экрана на 49см, горизонтального – 52см. какова чувствительность к отклонению пластин вертикального и горизонтального отклонения, если:

1)  $U_{a2} = 1кВ$ ;

2)  $U_{a2} = 1,5кВ$ .

---

201

---

Спираль, по которой движется электрон в однородном магнитном поле, имеет диаметр 80мм, шаг спирали 200мм, индукция магнитного поля 5мТл. Определить скорость электронов.