

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич

***РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ***

Практикум
для студентов специальности
«Электронно-оптические системы и технологии»
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 2

Оборудование для электронно-лучевой обработки

Минск БГУИР 2011

УДК 621.9.048+621.791.72:621.373.826(075.8)

ББК 31.29-5я73

Б76

Р е ц е н з е н т:

профессор кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
доктор физико-математических наук, профессор И. И. Абрамов

Боженков, В. В.

Б76 Расчеты и проектирование оборудования для электрофизической обработки : практикум для студ. спец. «Электронно-оптические системы и технологии» всех форм обуч. В 2 ч. Ч. 2: «Оборудование для электронно-лучевой обработки» / В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич. – Минск : БГУИР, 2011. – 42 с. : ил.

ISBN 978-985-488-634-3 (ч. 2).

Вторая часть практикума включает 3 практических занятия по темам дисциплины, относящимся к методике проектирования и проведению конструкторских расчетов узлов электронно-лучевых систем технологического назначения.

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, полученных на лекциях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины, а также приобретения практических навыков проектирования технологического оборудования для электрофизической обработки, включая работы по тематике курсового проектирования.

Часть 1-я издана в БГУИР в 2009 г.

УДК 621.9.048+621.791.72:621.373.826(075.8)
ББК 31.29-5я73

ISBN 978-985-488-634-3 (ч. 2)

ISBN 978-985-488-396-0

© Боженков В. В., Шахлевич Г. М., 2011

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Основы геометрической электронной оптики	4
Практическое занятие №7	4
Эмиссия термоэлектронная. Катоды	18
Практическое занятие №8	18
Системы отклонения электронного луча	31
Практическое занятие №9	31
Приложение А	41
Приложение Б.....	41
Литература	42

Библиотека БГУИР

ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

Практическое занятие №7

Теоретические сведения

Основные понятия электронной оптики

Электронная оптика является разделом физики, в котором рассматриваются вопросы движения заряженных частиц (электронов и ионов) в электрических и магнитных полях, формирования и фокусировки потоков заряженных частиц, и получения изображений при помощи электронных и ионных пучков. Между движением заряженных частиц в электрических и магнитных полях и распространением световых лучей имеется аналогия, позволяющая во многих случаях использовать известные положения обычной (световой) оптики при решении электронно-оптических задач.

Электронную оптику, так же как и световую оптику, можно разделить на две части – геометрическую электронную оптику и волновую электронную оптику. Геометрическая электронная оптика изучает вопросы движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях, методы нахождения траекторий электронов и ионов, способы фокусировки и получения изображений без учета волновых свойств движущихся частиц. Волновая электронная оптика рассматривает движущийся электрон как волну де Бройля и изучает такие чисто волновые явления, как дифракция и интерференция волн. Длина волны де Бройля

$$\lambda = h/(mv), \quad (7.1)$$

где h – постоянная Планка;

m – масса;

v – скорость электрона. Даже для сравнительно медленных электронов последняя весьма велика.

Поэтому при рассмотрении физических процессов, происходящих в большинстве электронно-лучевых приборов и систем, волновые свойства электронов можно не учитывать. Только в некоторых отдельных случаях, например, при оценке теоретического предела разрешающей способности электронного микроскопа необходимо использовать методы волновой оптики. Рассматривая движение электронов в электронно-оптических системах (ЭОС), во многих случаях можно прибегать к уравнениям классической механики, т. е. использовать соотношение сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \quad (7.2)$$

где U – разность потенциалов на пути, пройденном электроном в электрическом поле (предполагается, что при $U = 0$, $v = 0$, т. е. электрон начинает движение в электрическом поле без начальной скорости).

Изучая основы геометрической электронной оптики, будем оперировать такими понятиями, как «поток электронов», «электронный пучок» и «электронный луч».

Наиболее общим является понятие «**электронный поток**» – совокупность движущихся примерно в одном направлении электронов, причем в ряде случаев поток можно рассматривать без учета граничных условий или вообще считать его неограниченным.

Электронный пучок – это оформленный поток с вполне определенными внешними границами, как правило, являющийся длинным, т. е. имеющим протяженность вдоль одной из координатных осей значительно большую, чем вдоль двух других осей. Поэтому можно говорить о конфигурации пучка, рассчитывать граничные траектории, фокусировать пучки.

Электронный луч – это настолько тонкий электронный пучок, что сечение его можно считать сколь угодно малым, а след луча на экране – точкой. Реальные электронные пучки можно считать совокупностью множества электронных лучей. Приблизительно электронным лучом часто называют узкий сфокусированный пучок электронов, имеющий хотя бы в одном месте очень малое сечение.

При рассмотрении геометрической электронной оптики предполагается, что электрические и магнитные поля, определяющие характер движения заряженных частиц, являются чисто внешними, т. е. создаются внешними электродами с заданными потенциалами, а также катушками, обтекаемыми токами или магнитами. В то же время электрон, являясь заряженной частицей, создает собственное электрическое поле, а движущийся заряд – и собственное магнитное поле. Поэтому, строго говоря, электрические и магнитные поля, действующие на электронные потоки, следует рассматривать как суперпозицию полей, создаваемых внешними электродами и магнитами, и полей, создаваемых самим электронным потоком.

Заметное действие собственного электрического поля электронов начинает проявляться при сравнительно больших плотностях пространственного заряда в пучке и при небольших скоростях электронов. Заметное действие собственного магнитного поля электронного потока начинает проявляться лишь при скоростях электронов, близких к скорости света, т. е. в релятивистском случае.

С точки зрения влияния пространственного заряда и, следовательно, собственного поля заряженных частиц электронную оптику можно разделить на две части – оптику электронов без учета влияния пространственного заряда и

оптику интенсивных пучков, в которых влияние пространственного заряда накладывает существенные ограничения на возможности фокусировки.

В первом случае возможна фокусировка, получение качественных изображений, и вполне могут использоваться методы расчета, основанные на аналогии электронной и световой оптики. Во втором случае фокусировка в полном смысле этого слова, т. е. сведение электронных траекторий в одну точку, становится принципиально невозможной, невозможно и получение удовлетворительных изображений. В данном разделе будем рассматривать методы расчета и исследования электронно-оптических систем без учета влияния пространственного заряда электронов пучка.

Движение электронов в электрических и магнитных полях

Рассмотрим движение электронов в электрическом и магнитном полях. На электрон в электрическом и магнитном полях действует сила Лоренца:

$$F = -e \left\{ \vec{E} + [\vec{v} \vec{B}] \right\}, \quad (7.3)$$

где E – вектор напряженности электрического поля;

B – вектор магнитной индукции.

В случае только электрического поля уравнения движения электронов в декартовой системе координат (для нерелятивистских электронов) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -eE_x; \\ m\ddot{y} &= -eE_y; \\ m\ddot{z} &= -eE_z, \end{aligned} \quad (7.4)$$

где E_x , E_y и E_z – составляющие напряженности электрического поля.

Рассмотрим движение электронов в однородном электрическом поле ($E_y = \text{const}$, $E_x = E_z = 0$) (рисунок 7.1). Допустим, что электрон влетает в поле вдоль оси OZ с начальной скоростью v_{z0} ($v_{x0} = v_{y0} = 0$).

Интегрирование системы уравнений (7.4) приводит к выражениям:

$$v_z = v_{z0} = \text{const}, \quad z = v_z t, \quad (7.5)$$

$$v_y = \frac{e}{m} E_y t, \quad (7.6)$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_y t^2. \quad (7.7)$$

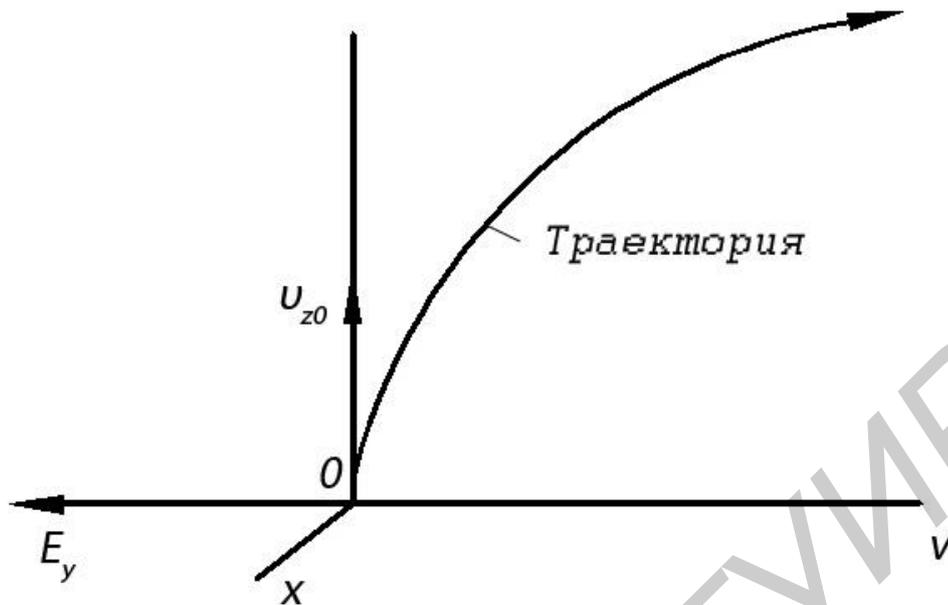


Рисунок 7.1 – Движение электрона в однородном электрическом поле

Исключив t из правых частей, получим уравнение траектории движения электрона:

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_y \frac{z^2}{v_z^2}. \quad (7.8)$$

Таким образом, траекторией электрона в однородном электрическом поле является парабола. Практический интерес представляет определение угла отклонения траектории от первоначального направления. Дифференцируя (7.8) по z , найдем

$$\frac{dy}{dz} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{e}{m} E_y \frac{z}{v_z^2}. \quad (7.9)$$

В случае магнитного поля уравнения движения электронов (в декартовой системе координат) имеют вид

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -e(v_y B_z - v_z B_y), \\ m\ddot{y} &= -e(v_x B_z - v_z B_x), \\ m\ddot{z} &= -e(v_x B_y - v_y B_x). \end{aligned} \quad (7.10)$$

Видно, что в магнитном поле сила, действующая на электрон, всегда перпендикулярна к направлению скорости. То есть в магнитном поле величина скорости (а следовательно и энергия) электрона остается неизменной, меняется

только направление движения. В действительности, работа, производимая силой, равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости и согласно (7.3) можно записать

$$W = \vec{F}\vec{v} = -e[\vec{v}\vec{B}]\vec{v} = -e[\vec{v}\vec{v}]\vec{B} = 0. \quad (7.11)$$

При движении электрона в однородном поперечном ($V \perp B$) магнитном поле (рисунок 7.2) сила Лоренца является центростремительной и электрон описывает круговую траекторию, радиус которой может быть определен из соотношения

$$\frac{mv^2}{R} = evB, \quad (7.12)$$

откуда

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (7.13)$$

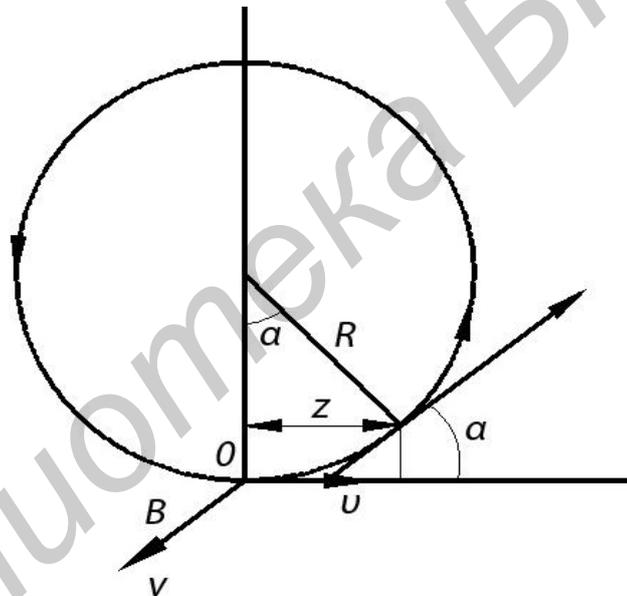


Рисунок 7.2 – Движение электрона в однородном магнитном поле

Определим угол отклонения траектории электрона в поперечном магнитном поле (рисунок 7.2):

$$\sin \alpha = \frac{z}{R}. \quad (7.14)$$

Подставляя значение R из (7.13) и полагая для малых углов $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$, получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{eBz}{mv}. \quad (7.15)$$

Таким образом, для нахождения траектории электронов, движущихся в электрическом и магнитном полях, необходимо решить системы дифференциальных уравнений (7.4) и (7.10). Решение системы (7.4) возможно, если напряженность электрического поля или потенциала заданы в виде функций координат:

$$U = U(x, y, z), \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

В пространстве, свободном от заряда, электрический потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \Delta U = 0. \quad (7.16)$$

Решение уравнения Лапласа с заданными граничными условиями позволяет найти потенциал U как функцию координат, а, следовательно, и составляющие напряженности поля. Точное аналитическое решение уравнения Лапласа возможно лишь в некоторых простейших случаях, поэтому при решении электро-оптических задач широко используются приближенные и экспериментальные методы нахождения распределения потенциала.

Для решения системы (7.10) необходимо знать распределение магнитной индукции $B = B(x, y, z)$. Индукция магнитного поля определяется векторным потенциалом A согласно соотношению

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (7.17)$$

Векторный потенциал в ряде случаев может быть рассчитан аналитически, но при использовании несимметричных магнитных полей или при наличии в поле ферромагнетиков это затруднительно и приходится прибегать к экспериментальным методам исследования магнитных полей.

Примеры решения задач

1 Две пластины, напряжение между которыми 2000 В, удалены друг от друга на расстояние 3 см. Электрон начинает двигаться от отрицательно заряженной пластины с начальной скоростью, равной нулю. Определить:

а) через какое время электрон достигнет скорости $1 \cdot 10^7$ м/с; б) какой путь он пройдет, прежде чем достигнет такой скорости; в) какой разности потенциалов соответствует эта скорость; г) насколько увеличится кинетическая энергия электрона в конце пути?

Решение: для решения задачи воспользуемся рисунком 7.1 и введем соответствующие обозначения:

а) как следует из (7.6) время, через которое электрон достигнет скорости $1 \cdot 10^7$ м/с будет равно

$$t = \frac{mv_y}{eE_y} = \frac{mv_y d}{eU_y} = \frac{9,106 \cdot 10^{-31} \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^3} \approx 8,6 \cdot 10^{-10} \text{ с,}$$

где $U_y = 2000$ В – напряжение между пластинами;

$d = 0,03$ м – расстояние между ними;

б) путь, который он пройдет, прежде чем достигнет такой скорости, в соответствии с (7.7) составит

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_y t^2 = \frac{eU_y}{2md} t^2 = \\ = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 9,106 \cdot 10^{-31}} \left(8,5 \cdot 10^{-10} \right)^2 = 4,24 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

в) разность потенциалов, которой соответствует скорость $1 \cdot 10^7$ м/с, находится из выражения (7.2):

$$U = \frac{mv_y^2}{2e} = \frac{9,106 \cdot 10^{-31} \cdot (1 \cdot 10^7)^2}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 284 \text{ В;}$$

г) кинетическая энергия электрона в конце пути будет равна

$$\frac{mv_y^2}{2} = eU = \frac{9,106 \cdot 10^{-31} \cdot (1 \cdot 10^7)^2}{2} = 4,55 \cdot 10^{-17} \text{ Дж.}$$

2 Электронный луч проходит через поперечное магнитное поле с индукцией $6,5 \cdot 10^{-4}$ Тл, действующее на расстоянии 6 см в направлении распространения луча. Определить ускоряющее напряжение, если луч отклонился на 15° .

Решение: в соответствии с (7.15)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{eBz}{mv} = \frac{eBz}{m\sqrt{2eU/m}},$$

откуда

$$U = \frac{eB^2 z^2}{2m \operatorname{tg}^2 \alpha} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} (6,5 \cdot 10^{-4})^2 (6 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 9,106 \cdot 10^{-31} \operatorname{tg}^2 15^\circ} = 1858 \text{ В.}$$

Задачи для аудиторных занятий и домашних работ

Везде, где это специально не оговорено, подразумевается движение электронов в однородном поле и в вакууме.

1 Электрон проходит ускоряющую разность потенциалов 1 В. Начальная скорость электрона равна нулю. Определить конечную скорость электрона и его кинетическую энергию.

2 Доказать, что время пролета электрона между пластинами плоскопараллельного конденсатора

$$t = \frac{2d}{5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U}}, \text{ (с)},$$

где U – разность потенциалов между пластинами, В;

d – расстояние между пластинами, м.

Считать, что начальная скорость электрона равна нулю.

3 Расстояние между анодом и катодом плоскопараллельного диода $d = 4$ мм, напряжение анода $U_a = 20$ В, анодный ток равен 10 мА. Требуется определить: а) число электронов, попадающих ежесекундно на анод; б) скорость электронов в момент удара об анод; в) силу, действующую на электрон в пространстве между анодом и катодом; г) время пролета от катода до анода. Считать, что электроны покидают катод с нулевой начальной скоростью.

4 Три металлические пластины A , B и C расположены параллельно друг другу (рисунок 7.3). В пластине B имеется отверстие.

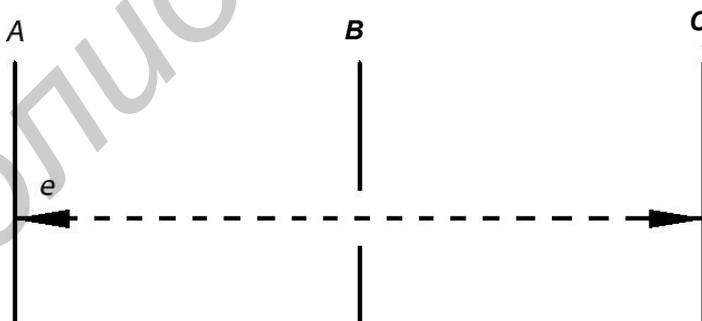


Рисунок 7.3 – Конфигурация системы электродов

Потенциал прорези принять равным потенциалу пластины и пренебречь краевыми эффектами. Электрон, начиная движение от пластины A , через прорезь в пластине B попадает на пластину C . Определить время пролета электрона от пластины A до прорези и от последней до пластины C . Определить также скорость, с которой электрон проходит через отверстие и с которой он ударяет-

ся о пластину C , если: а) пластины равноудалены друг от друга на 1 см, их потенциалы равны соответственно 0, +100 и +400 В, а начальная скорость электрона равна нулю; б) пластины равноудалены друг от друга на 2 см, их потенциалы равны соответственно 0, +100 и +300 В и электрон обладает начальной энергией 20 эВ.

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

6 Электрон с начальной энергией 50 эВ начинает движение по нормали к плоскости пластин (рисунок 7.4). Определить: а) на каком расстоянии от нижней пластины электрон полностью затормозится; б) через какое время электрон возвратится к нижней пластине; в) какую энергию сообщит электрон нижней пластине при возвращении; г) какова должна быть начальная энергия, чтобы электрон мог достичь верхней пластины.

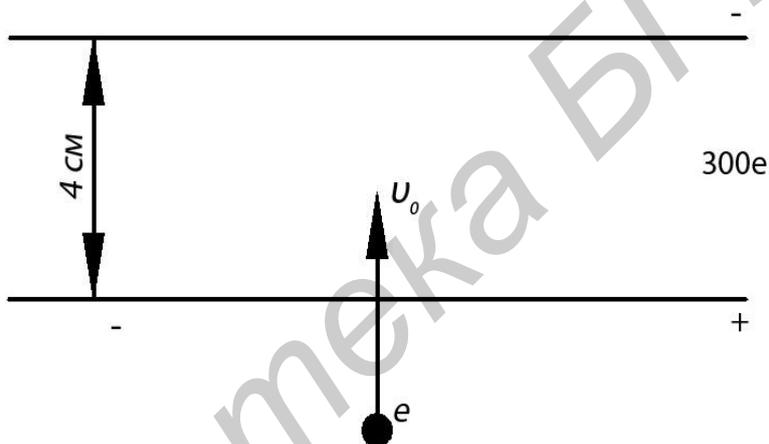


Рисунок 7.4 – Движение электрона в однородном поле

7 Две параллельные металлические пластины расположены горизонтально на расстоянии 2 см одна от другой. Потенциал верхней пластины +500 В относительно нижней. Электрон с нулевой начальной скоростью летит из центра нижней пластины. Определить: а) скорость и энергию в момент удара о пластину; б) время пролета.

8 Как только электрон (см. задачу 7) пройдет расстояние 1 см, потенциал на пластинах изменит свой знак и станет равным 300 В. Определить: а) какого электрода достигнет электрон; б) конечную скорость; в) общее время пролета; г) максимальную энергию электрона до изменения знака потенциала и энергию, отданную электроду.

9 Потенциалы катода, сетки и анода равны соответственно 0, -4, +50 В. Определить: а) чему будет равна кинетическая энергия электрона, когда он до-

стигнет сетки; б) чему будет равна его кинетическая энергия, когда он достигнет анода; в) какое напряжение надо приложить к сетке, чтобы электроны с энергией 5 эВ не достигли сетки.

10 На две плоскопараллельные пластины, расположенные на расстоянии 1 см, подается напряжение прямоугольной формы с амплитудой и частотой 100МГц (рисунок 7.5, а, б). В момент времени $t = 0$ потенциал пластины B равен +1 В относительно пластины A , поэтому электрон, находящийся у поверхности пластины A , получает ускорение в направлении пластины B .

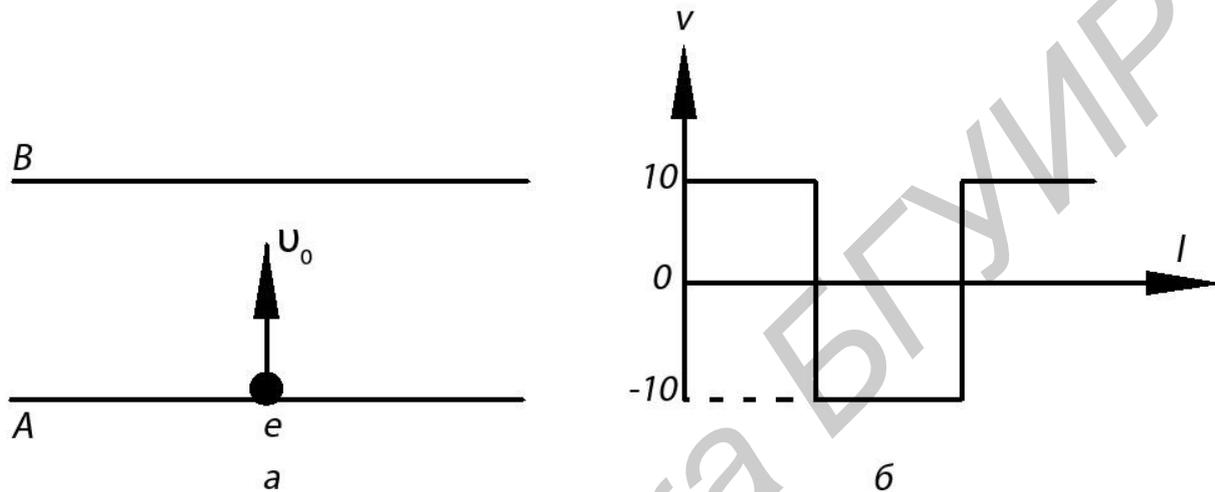


Рисунок 7.5 – К задаче 10

Определить: а) скорость электрона и расстояние от пластины A в двух случаях: в конце полупериода и в конце периода; б) на каком электроде электрон закончит свой путь.

11 Две плоскопараллельные пластины отстоят друг от друга на расстоянии в 1,5 см. На них подается напряжение прямоугольной формы с амплитудой 1000 В, причем полярность меняется на обратную через 10^{-9} с. В момент времени $t = 0$ электрон находится на пластине с меньшим потенциалом и начинает двигаться ко второй пластине. Требуется определить: а) на какой пластине электрон закончит свой путь; б) кинетическую энергию, которую приобретет электрон за время своего ускорения.

12 Электрон, имеющий нулевую начальную скорость, движется от нижней из двух параллельных пластин, расстояние между которыми 1 см. С момента начала движения электрона потенциал верхней пластины начинает равномерно увеличиваться от 0 со скоростью 10^5 В/с. Покажите, что расстояние, проходимое электроном, будет пропорционально кубу времени от момента начала движения. Какой путь пройдет электрон через 0,1 мкс и с какой скоростью он ударится о верхнюю пластину?

13 Генератор прямоугольных импульсов в задаче 12 заменен импульсным генератором пилообразного напряжения (рисунок 7.6). Определить: а) какой путь пройдет электрон за 40 мкс; б) какова его скорость в конце этого пути; в) за какое время электрон достигнет пластины В и с какой скоростью. Амплитуда импульса напряжения 10 В.

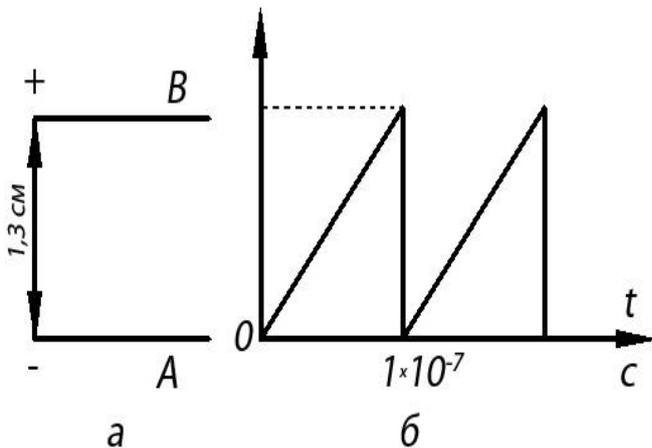


Рисунок 7.6 – К задаче 13

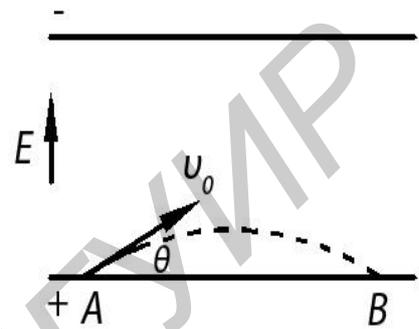


Рисунок 7.7 – К задаче 14

14 Электрон с начальной энергией 100 эВ влетает в однородное электрическое поле напряженностью 10^4 В/м под углом θ (рисунок 7.7). Электрон достигает точки В за 4,77 нс. Найти расстояние АВ и угол θ .

15 Электрон с начальной энергией 50 эВ в момент времени $t = 0$ влетает в электрическое поле между параллельными пластинами под углом 60° к направлению, перпендикулярному пластинам. Расстояние между пластинами 1 см. Напряжение, приложенное к пластинам, изменяется по закону $U = 100 \exp(0,5 \cdot 10^9 t)$. Определить: а) время движения электрона до верхней пластины; б) скорость и энергию электрона при ударе о верхнюю пластину.

16 Посередине между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью 10^6 м/с, направленной нормально к вектору напряженности электрического поля. На какой угол α отклонится электрон от первоначального направления, если расстояние между пластинами $d = 1,2$ см, длина пластин $l = 5$ см и напряжение на пластинах $U = 15$ В?

17 Электроны, образующие электронный луч, приобрели свою скорость под действием разности потенциалов в 500 В, приложенной между источником электронов и ускоряющим анодом. Определить разность потенциалов, которую необходимо приложить между двумя отклоняющими пластинами длиной 3 см и расположенными на расстоянии 1 см друг от друга, чтобы отклонить луч на 20° .

18 Y-пластины электронно-лучевой трубки имеют длину 1,8 см, удалены одна от другой на 0,4 см, расстояние от центра пластин до экрана 28 см, напряжение второго анода $U_{a2} = 1500$ В. Требуется определить: а) горизонтальную составляющую скорости электронов; б) время пролета электрона между пластинами; в) вертикальную составляющую скорости электронов, если к пластинам приложено напряжение 30 В; г) величину отклоняющего напряжения для получения максимального отклонения луча.

19 Внутри цилиндрического конденсатора в вакууме движется электрон. Движение начинается с поверхности внутреннего цилиндра без начальной скорости. Какую скорость разовьет электрон, пройдя расстояние x внутри конденсатора? Радиусы обкладок R и r . Между обкладками создана ускоряющая разность потенциалов U .

20 Электронный луч, ускоренный разностью потенциалов 1000 В, входит в поперечное магнитное поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Определить: а) чему равен радиус траектории; б) повторить вычисления для пучка протонов, если заряд протона равен $+e$, масса его в 1838 раз больше массы электрона.

21 Электронный луч проходит через поперечное магнитное поле, действующее на расстояние 18 см в направлении луча. Луч входит в поле с начальной энергией 500 эВ. Индукция магнитного поля 0,001 Тл. Определить угол отклонения электронного луча.

22 Электронный луч проходит через область поперечного магнитного поля протяженностью 15 см в направлении распространения луча. Какой должна быть индукция магнитного поля, чтобы вызвать при выходе из магнитного поля отклонение луча на 2 см? Луч входит в поле с начальной энергией 1000 эВ.

23 Электрон, ускоренный электрическим полем, был направлен под прямым углом в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,001$ Тл. Каким должно быть ускоряющее напряжение, чтобы он (электрон) вращался по окружности радиусом 1 см? Сколько оборотов в секунду он совершит?

24 Электрон с начальной энергией 1000 эВ входит в поперечное магнитное поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Требуется определить; а) радиус пути электрона; б) каким будет путь электрона, если угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции будет составлять 5° .

25 Электрон влетает в точку А магнитного поля со скоростью 10^7 м/с в направлении, лежащем в плоскости страницы (рисунок 7.8). Угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля 30° . При каком значении индукции магнитного поля электрон пройдет через точку В, если расстояние $AB = 10$ см?

26 Электрон с начальной энергией 1000 эВ проходит в поперечное электрическое поле посередине между двумя плоскопараллельными пластинами (рисунок 7.9). Определить расстояние x , на котором электрон ударится о пластину. Какова должна быть индукция B магнитного поля, чтобы препятствовать отклонению электрона между пластинами?

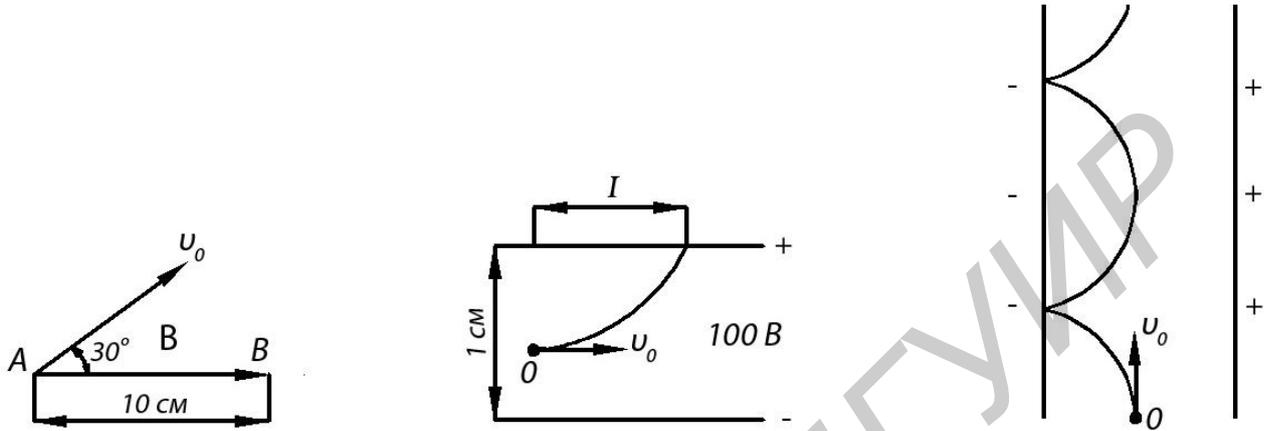


Рисунок 7.8 – К задаче 25 Рисунок 7.9 – К задаче 19 Рисунок 7.10 – К задаче 28

27 К двум плоскопараллельным пластинам длиной 6 см и удаленным друг от друга на 2 см приложено напряжение 300 В. Электрон отклоняется на выходе из этой системы на 5,37 мм. Отклонение электрона будет равно нулю, если одновременно с электрическим полем между пластинами действует поперечное магнитное поле с индукцией $B = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Не пользуясь электронными константами, определить: а) скорость электрона; б) отношение заряда электрона к его массе.

28 Электрон с начальной скоростью v_0 вылетает из точки O , расположенной посередине между пластинами плоскопараллельного конденсатора (рисунок 7.10). Расстояние между пластинами равно 1 см, а приложенное напряжение 100 В. Определить: а) какое по величине и направлению магнитное поле заставит электрон двигаться в указанной на рисунке циклоиде? Учесть, что электрон имеет нулевую скорость в точке поворота на отрицательно заряженной пластине; б) чему должна быть равна величина v_0 , чтобы электрон двигался по этому пути?

29 Покажите, что во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях положение электрона, имеющего пулевую начальную скорость, в любой момент времени описывается выражениями:

$$z = (E / B\omega) \times (1 - \cos \omega t); \quad x = (E / B\omega) \times (\omega t - \sin \omega t),$$

где $\omega = Be/m$,

E – напряженность электрического поля;

B – индукция магнитного поля;
 ось x направлена вдоль электрического поля, ось z – по нормали к векторам B и E .

Ответы к задачам практического занятия №7

- 1 $v = 5,93 \cdot 10^5$ м/с; $W = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- 3 а) $n \approx 6,25 \cdot 10^{16}$; б) $v = 2,67 \cdot 10^6$ м/с; в) $F = 8 \cdot 10^{-16}$ Н; г) $t = 3 \cdot 10^{-9}$ с.
- 4 а) $t_{AB} \approx 3,37 \cdot 10^{-9}$ с; $t_{BC} \approx 1,12 \cdot 10^{-9}$ с; $v_B \approx 5,93 \cdot 10^6$ м/с; $v_C = 1,2 \cdot 10^7$ м/с;
 б) $t_{AB} = 4,37 \cdot 10^{-9}$ с; $t_{BC} = 2,3 \cdot 10^{-9}$ с; $v_B \approx 6,5 \cdot 10^6$ м/с; $v_C = 1,06 \cdot 10^7$ м/с.
- 5 $U = 7,2 \cdot 10^4$ В.
- 6 а) $s = 6,7 \cdot 10^{-3}$ м; б) $t = 6,4 \cdot 10^{-9}$ с; в) $W = 8,0 \cdot 10^{-18}$ Дж; г) $W = 4,8 \cdot 10^{-17}$ Дж.
- 7 а) $v = 13,3 \cdot 10^6$ м/с; $W = 8 \cdot 10^{-17}$ Дж; б) $t = 3 \cdot 10^{-9}$ с.
- 8 а) электрон достигнет верхнего электрода; б) $v = 5,93 \cdot 10^6$ м/с;
 в) $t = 3,43 \cdot 10^{-9}$ с; г) максимальная энергия электрона до изменения знака потенциала $W = 4 \cdot 10^{-17}$ Дж; энергия, отданная электроду, $W = 1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж.
- 10 а) $v_{T/2} = 8,8 \cdot 10^4$ м/с; $s_{T/2} = 2,2 \cdot 10^{-4}$ м; $v_T = 0$; $s_T = 4,4 \cdot 10^{-4}$ м; б) электрон закончит свой путь на пластине B .
- 11 а) электрон закончит свой путь по второй пластине; б) $W = 6,12 \cdot 10^{-17}$ Дж.
- 12 Расстояние, проходимое электроном, определяется выражением $s = 2,93 \cdot 10^{17} t^3$; через 0,1 мкс электрон пройдет путь $0,293 \cdot 10^{-3}$ м; электрон ударяется о верхнюю пластину со скоростью $v = 9,25 \cdot 10^4$ м/с.
- 13 а) $s = 1,25 \cdot 10^{-2}$ м; б) $v = 9,4 \cdot 10^5$ м/с; в) $t = 4,25 \cdot 10^{-8}$ с; $v = 10,6 \cdot 10^5$ м/с.
- 14 2 см; $\angle \theta = 45^\circ$.
- 15 а) $t \approx 4 \cdot 10^{-10}$ с; б) $v = 7,94 \cdot 10^6$ м/с; $W = 2,87 \cdot 10^{-17}$ Дж.
- 16 $\alpha = 6^\circ$.
- 17 $U = 121$ В.
- 18 а) $v_T = 22,9 \cdot 10^6$ м/с; б) $t = 7,86 \cdot 10^{-10}$ с; в) $v_B = 1,04 \cdot 10^6$ м/с; г) 147 В.
- 19 $v = \sqrt{2a \ln x / r}$, где $a = \frac{eU}{m \ln R / r}$.
- 20 а) $R = 1,07 \cdot 10^{-2}$ м; б) $R = 0,46$ м.
- 21 $13^\circ 40'$.
- 22 $B = 1,86 \cdot 10^{-4}$ Тл.
- 23 $U = 8,8$ В; $n = 2,8 \cdot 10^7$ об/с.
- 24 а) $R = 1,07$ см; б) винтовая линия, радиус 0,093 см, шаг 6 см.
- 25 $B = 3,1 \cdot 10^{-3}$ Тл.
- 26 а) $x = 0,047$ м; $B = 5,34 \cdot 10^{-4}$ Тл.
- 27 а) $v = 3 \cdot 10^7$ м/с; б) $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.
- 28 а) $B = 3,1 \cdot 10^{-3}$ Тл; б) $v = 4,2 \cdot 10^6$ м/с.

ЭМИССИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ. КАТОДЫ

Практическое занятие №8

Теоретические сведения

Катод служит источником электронов. По способу возбуждения катоды делят на два класса: **термоэлектродные** (эмитирующие электроны при нагревании) и **холодные**, не имеющие специального подогрева (в том числе автоэлектронные, фотокатоды, вторичные эмиссионные и т. д.). В технологических электронных пушках используют термоэлектродные катоды. Достижимая плотность тока эмиссии этих катодов $j_e T$. Плотность тока насыщения j зависит от температуры согласно закону Ричардсона–Дэшмана:

$$j_{eT} = AT^2 \exp(-b_0/T), \quad (8.1)$$

где A – постоянная Ричардсона;

$b_0 = e \phi_0 / k$ – параметр, характеризующий работу выхода электронов $e \phi_0$;

e – заряд электрона;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Работой выхода A электрона из металла называется работа, которую нужно совершить при удалении электрона из металла в вакуум. Работа A совершается против сил притяжения со стороны избыточного положительного заряда, возникающего в результате удаления электрона. Кроме того, необходимо преодолеть силы отталкивания со стороны ранее вылетевших электронов, если они не удалены и образуют вблизи поверхности проводника электронное «облако». Работа выхода имеет величину порядка нескольких эВ и зависит от рода металла и состояния его поверхности – загрязнения, следы влаги и прочее изменяют ее. В квантовой теории твердого тела работа выхода отсчитывается от верхнего занятого электронами уровня Ферми:

$$W_F = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3N}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (8.2)$$

где N – концентрация электронов в металле;

h – постоянная Планка;

m – масса покоя электрона.

В результате вылета из металла наиболее быстрых электронов образуется недостаток отрицательного заряда в проводнике и избыток его в окружающем пространстве. Проявляется это в очень тонком слое по обе стороны от поверхности проводника (толщиной в несколько межатомных расстояний). Считается, что поверхность металла представляет собой **двойной электрический слой**

(контактный слой), подобный весьма тонкому конденсатору. Разность потенциалов ϕ_0 , характеризующая электрическое поле двойного слоя, называется **поверхностным скачком потенциала или контактной разностью потенциалов** между металлом и вакуумом: $\phi_0 = A/e$. Электрическое поле вне двойного слоя отсутствует, и потенциал вне металла за двойным слоем равен нулю. Внутри металла потенциал положителен и равен $\Delta\phi$. Потенциальная энергия электронов проводимости отрицательна $-e\phi_0 = -A$. Весь объем металла является для электронов потенциальной ямой, глубина которой равна работе выхода. Параметры A и b_0 зависят от температуры. Для материалов, используемых в пушках (вольфрам, тантал, гексаборид лантана LaB_6), их значения известны. На рисунке 8.1 приведены зависимости плотности тока насыщения для этих материалов от температуры катода. Верхняя граница используемого диапазона плотности тока эмиссии зависит от термостойкости и скорости испарения материала при высокой температуре. Например, для вольфрама она составляет $1-10 \text{ A/cm}^2$. В особых случаях, когда допустим короткий срок службы, плотность тока можно повысить до $15-20 \text{ A/cm}^2$.

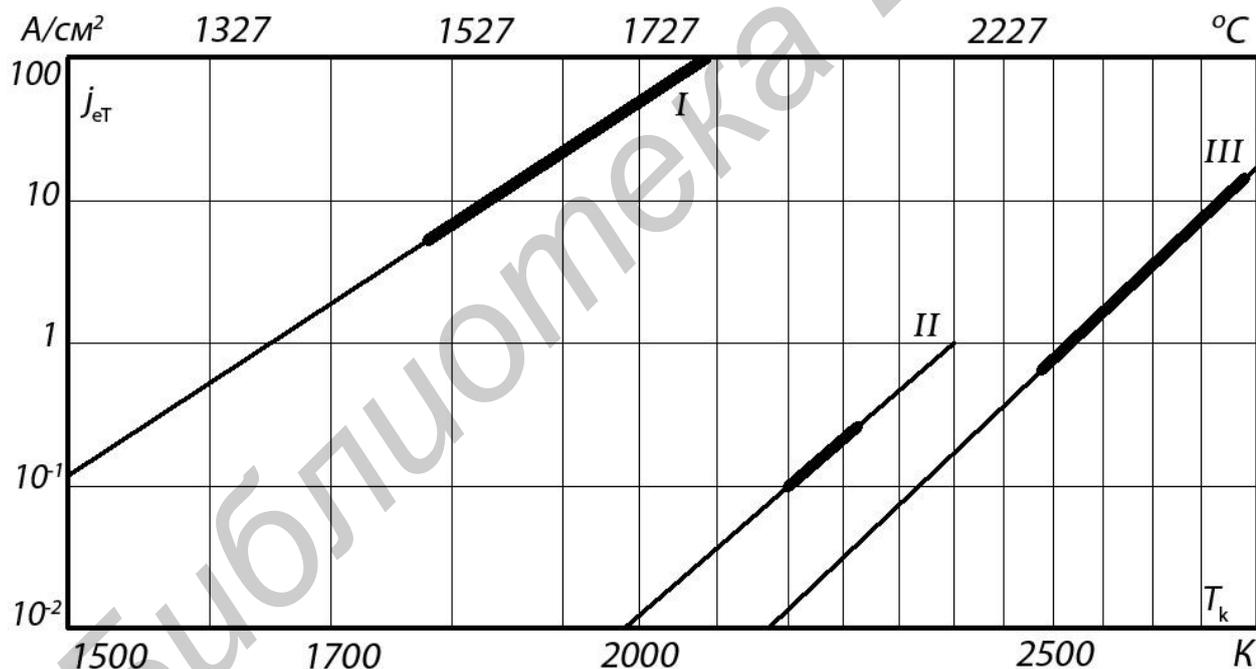


Рисунок 8.1 – Плотность насыщения j_{eT} у наиболее часто применяемых материалов катодов в зависимости от температуры катода T_k ; I – LaB_6 на науглероженном тантале; II – массивный танталовый катод; III – массивный вольфрамовый катод

Попытки использовать для катодов другие материалы, например LaB_6 и активированные материалы, объясняются стремлением добиться как можно бо-

лее высокого значения плотности тока эмиссии при возможно меньших температурах катода. Активированные катоды обычных электронно-лучевых трубок в условиях электронно-лучевых пушек технологического назначения оказываются неработоспособными, так как в этих условиях остается нерешенной проблема отравления катода. Активированный катод разрушается при рабочем вакууме установок, при прорывах газов, металлических паров и периодических напусках воздуха в пушку. Гексаборид лантана гораздо более стоек к этим воздействиям, его применение ограничивается другими факторами, например, неудовлетворительной длительной стабильностью свойств и малой стойкостью к сменам температур. Поэтому важнейшим материалом для катодов пушек электронно-лучевых технологических установок остается вольфрам; наряду с ним находят применение тантал, LaB_6 и вольфрам, легированный элементами, повышающими его эмиссионную способность.

В зависимости от назначения катоды могут иметь различные размеры площади поверхности и различные конструкции. Их можно подразделить на почти точечные, катоды с малой и большой поверхностью эмиссии. Нагрев катодов может быть прямым или косвенным, например, посредством электронной бомбардировки. С точки зрения конструкции основными типами катодов являются проволочные, ленточные (или фольговые) и массивные.

Особенности конструкции катодов

На рисунке 8.2 показаны конструктивные исполнения катодов. Одним из наиболее распространенных является петлевой катод прямого накала из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3–0,1 мм, а в особых случаях – большего диаметра. После нагрева до температур эмиссии вольфрам становится хрупким. Механическая коррекция положения катода может привести к его обрыву. Поэтому для катодных проволок иногда применяют ковкие вольфрам-кремниевые сплавы. Катоды рассматриваемого типа работают при плотностях тока эмиссии до 5 А/см^2 . Для увеличения эмитирующей поверхности им придают форму спиралей или лент. Прямонакальные катоды характеризуются высокой экономичностью и малым временем разогрева. Их недостатком является **неэквипотенциальность** – неравномерное распределение потенциала по длине катода из-за падения напряжения, создаваемого протекающим током.

Подогревные катоды имеют одинаковый потенциал по всей поверхности, т. е. являются эквипотенциальными, имеют большую массу и, следовательно, тепловую инерцию. Конфигурация катода определяется геометрией электронного пучка (ленточные, круглые, точечные). К недостаткам относят большее время разогрева и меньшую эффективность, чем у прямонакальных катодов.

Особой разновидностью петлевых катодов являются игольчатые, у которых к вершине петли прикреплено проволочное острие, радиус кривизны которого может составлять менее 1 мкм. У острия создается поле чрезвычайно большой напряженности. Применяя такие заострения, удастся за счет автоэмиссионного эффекта при тех же температурах значительно повысить плотности тока эмиссии. При напряженности электрического поля 10^7 – 10^8 В/см эмиссия становится чисто автоэлектронной, а плотность тока возрастает до 10 А/см². Однако игольчатые катоды весьма чувствительны к условиям эксплуатации и потому применяются только в пушках для нетермической обработки микроструктур в сверхвысоком вакууме.

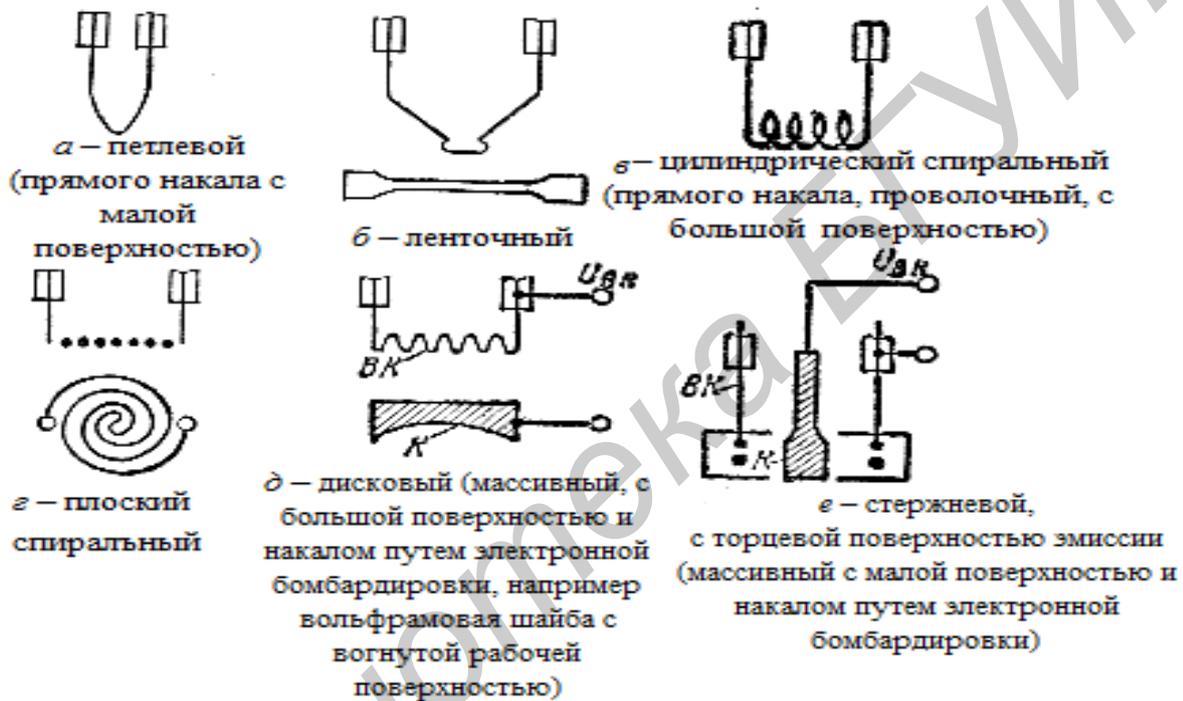


Рисунок 8.2 – Катоды (схемы исполнений): ВК – вспомогательный; К – основной катоды; U_{bk} – напряжение между вспомогательным и основным катодами ($U_{bk} = 300$ – 3000 В)

Катоды с малой поверхностью эмиссии, т. е. с диаметром эмитирующего участка в пределах 0,5–5,0 мм, чаще выполняются в виде стержневых (массивных) катодов. Благодаря своей форме и более высокой, чем у петлевых катодов рабочей температуре стержневые катоды обладают большей по размерам и более четко очерченной поверхностью эмиссии и позволяют получать более высокие плотности тока эмиссии. Кроме того, у стержневых катодов отсутствует присущий петлевым катодам астигматизм. Для нагрева стержневых катодов обычно применяют электронную бомбардировку. Узел их нагрева сложнее и дороже, чем у катодов прямого накала.

Четко очерченной поверхностью эмиссии обладают также ленточные катоды. Ленты, изготовленные чаще всего из вольфрама, нагревают прямым пропуском тока. Лишь для нагрева лент большой ширины применяют электронную бомбардировку. По площади эмиссионной поверхности ленточные катоды занимают промежуточное положение между катодами с малой поверхностью и катодами с большой поверхностью эмиссии. Особой их разновидностью являются ленточные катоды прямого накала с напаянным на ленту эмиттером из гексаборида лантана. В качестве припоя применяют, например, дисилицид молибдена.

Диаметры эмитирующих участков катодов с большой поверхностью эмиссии могут достигать 5–50 мм. Такие катоды выполняются в виде цилиндрических или плоских спиралей из проволоки или напряженной фольги, или в виде массивных дисков. Простые катоды в виде цилиндрических спиралей можно применять только тогда, когда к форме поперечного сечения электронного пучка не предъявляется особых требований. Катоды в виде плоских бифилярных спиралей имеют приблизительно круговую поверхность эмиссии. Из-за неизбежных зазоров между соседними нитками плотность тока эмиссии цилиндрических и плоских спиральных катодов, усредненная по всей поверхности, невелика и не превышает 30 % плотности тока массивных катодов. Цилиндрические спиральные катоды, особенно при нарушенной центровке, легко выходят из строя в результате распыления материала ионной бомбардировкой. В большинстве случаев их применяют в качестве вспомогательных для нагрева массивных катодов электронной бомбардировкой.

Дисковый катод представляет собой изготовленный из вольфрама массивный катод с вогнутой рабочей поверхностью. Нагрев таких катодов производится электронной бомбардировкой. При плотности тока около 5 А/см^2 и диаметрах дисков 30...40 мм катоды развивают токи эмиссии до 40 А.

Потребная для нагрева катода мощность зависит от его размеров, формы, температуры и тепловых потерь, главным образом потерь теплопроводностью и излучением. Для катодов прямого накала и для массивных катодов необходимо учитывать потери теплопроводностью через элементы их крепления к конструкции пушки.

Коэффициентом полезного действия нагрева катода η_n принято считать отношение тока эмиссии I_e к мощности, потребной для нагрева. Для достижения максимального КПД нагрева необходимо добиваться максимума отношения эмитирующей поверхности катода ко всей его нагретой поверхности. Проволочные и ленточные катоды прямого накала с большой поверхностью эмиссии уже при сравнительно низких плотностях тока эмиссии имеют весьма высокий КПД.

Катодные системы с нагревом электронной бомбардировкой из-за дополнительного расхода энергии на нагрев вспомогательных катодов обладают при равных температурах более низкими КПД нагрева. КПД катодов косвенного накала намного выше. Для обеспечения высокого КПД катодов необходимо снижать их тепловые потери и повышать плотность тока эмиссии.

В таблице 8.1 приведены значения токов эмиссии и КПД нагрева для некоторых типичных конструкций катодов.

Наряду с плотностью тока эмиссии важнейшим эксплуатационным показателем катода является срок его службы. В принципе срок службы катода ограничивается процессами распыления и испарения его материала.

Пучок электронов порождает на своем пути ионы, которые движутся в направлении, обратном направлению движения электронов, и ускоряются в электрическом поле между катодом и анодом. Обладая большими энергиями, налетающие на поверхность катода ионы распыляют его материал. Интенсивность распыления в первую очередь зависит от тока пучка и от давления остаточных газов в пушке. В пушках с токами пучков 30–40 А унос материала с поверхности катода вследствие распыления может составить 0,01...0,10 мм/ч. Деформация поверхности катода вследствие ионного распыления изменяет распределение плотности тока в пучке и уменьшает поверхность эмиссии.

Меры борьбы с влиянием распыления включают в себя снижение давления газов в пушке, изгиб траектории пучка или параллельное смещение пучка, применение ионных ловушек, которые препятствуют проникновению ионов в область ускорения, воздействие на направление движения электронов и выполнение в центре катода отверстия, сквозь которое большая часть ионов могла бы свободно пролетать в закатодное пространство.

Осуществить первые две из перечисленных мер едва ли возможно технически. Случаи, когда давление в пушке можно выбирать произвольно, весьма редки. Реализовать изгиб пучка технически сложно; такой изгиб связан также с рядом вредных побочных явлений. Выполнение в катодах отверстий, напротив, нашло широкое распространение, в особенности для массивных катодов с большой поверхностью эмиссии. Например, центральное отверстие, диаметр которого составляет около 20 % диаметра катода уменьшает поверхность эмиссии всего на 4 %. Так как вклад центральных участков катода в ток эмиссии меньше, чем периферийных, фактическое уменьшение тока эмиссии из-за наличия отверстия не превышает 1 %. На распределение направлений движения ионов к катоду можно воздействовать, изменяя картину распределения потенциалов электрического поля в области ускорения частиц. Таким путем можно распределять ионный ток максимально равномерно по катоду или же, наоборот, сфокусировать его в катодное отверстие, а позади отверстия установить кол-

литор ионов. При этом вспомогательный электрод необходимо конструировать таким образом, чтобы он не подвергался воздействиям со стороны ионов и его срок службы был бы, по крайней мере, таким же, как и срок службы основного катода.

Таблица 8.1 – Усредненные характеристики типичных катодов

Тип катода	Род нагрева	Мощность подогрева катода, P_H , Вт	Ток эмиссии, $I_{\text{э}}$, А	КПД нагрева катода $\eta_H = I_{\text{э}}/P_H$, мА/Вт	Практический срок службы, t_0 , ч
Петлевой, диаметр проволоки 0,15 мм	Прямой	10	0,002	0,2	20–40
Бифилярная цилиндрическая спираль диаметром 10 мм из проволоки диаметром 0,5 мм	Прямой	100	1	10	30–50
Стержневой, с диаметром утолщенной (рабочей) части 1,6 мм	Электронная бомбардировка	100	0,2	2	30–100
Дисковый с диаметром шайбы 16 мм	То же	2500	7,5	3,0	100–500
То же с диаметром шайбы 36 мм	То же	9500	40	4,2–10	100–500

Испарение материала катода зависит от его температуры, а следовательно, от той плотности тока эмиссии, которую должен обеспечить катод. Например, у вольфрамового катода при плотности тока 10 А/см^2 унос материала испарением составляет около $0,001 \text{ мм/ч}$.

У массивных катодов решающее влияние на срок службы оказывает распыление, а у тонких проволочных катодов – и распыление, и испарение материала. Срок службы катодов, работающих в сверхвысоком вакууме, определяется исключительно испарением.

Рассчитать срок службы катода, исходя из данных об уносе материала распылением или испарением, удастся в очень редких случаях. В большинстве же случаев катод приходится заменять задолго до того, как наступает его аварийное состояние, вследствие, например, распыления материала деталей катодного узла, его плавления из-за уменьшения поперечного сечения до критической величины. Чаще всего момент замены катода определяется требованиями к длительной стабильности параметров пучка. В таблице 8.1 приведены данные

по срокам службы катодов различных типов; эти данные могут служить ориентировочными при решении вопроса о смене катода.

Основные параметры катодов

Катоды характеризуются следующими основными параметрами.

Удельная эмиссия (плотность тока эмиссии) – величина тока эмиссии с единицы поверхности катода. Зависит от температуры и работы выхода материала катода.

Удельная мощность катода, P_n – мощность, затрачиваемая на нагрев 1 см^2 поверхности катода. Характеризует мощность потребления катодом.

Эффективность катода, η [А/Вт] – ток электронной эмиссии I_e на один ватт мощности, затрачиваемой на разогрев катода. Это наиболее важный параметр катода, который оценивает его экономичность.

Рабочая температура, T_p – температура, при которой достигается требуемая величина тока эмиссии. По этому параметру термокатоды делят на: низкотемпературные катоды T_p – 1000–1100 К; высокотемпературные катоды T_p – 2400–2600 К.

Долговечность катода, D – время работы катода при нормальных условиях эксплуатации, в течение которого катод сохраняет свои свойства (технологические катоды 100...500 ч).

Отличительными особенностями технологических катодов являются:

- 1 Низкая долговечность.
- 2 Частая сменяемость, высокая ремонтпригодность.

Катод является узлом, работающим в исключительно неблагоприятных условиях. Во многих конструкциях длительность непрерывной работы технологического оборудования определяется временем службы катода. Выделение газов с поверхности обрабатываемого изделия, работа в плохом вакууме приводят, с одной стороны, к отравлению катода, с другой стороны, усиливается бомбардировка ионами, образующимися в камере, что ведет к его перегреву и разрушению. Стремление получить высокие плотности тока эмиссии с поверхности катода вынуждает нагревать его до предельно высоких температур, при которых нагреваемые поверхности начинают деформироваться и испаряться. Поэтому для изготовления катодов используют тугоплавкие металлы и сплавы с различными добавками.

Примеры решения задач

1 Оценить энергию Ферми W_F , для меди, полагая, что число свободных электронов равно числу атомов металла.

Решение. Относительная атомная масса меди $A_r = 63,5$, плотность ; $\rho = 8,93 \text{ г/см}^3$, молярная масса $M = 0,001 \text{ кг/моль}$, масса $M = (0,001 \text{ кг/моль})$, $A_r = 0,0635 \text{ кг/моль}$. В 1 м^3 меди содержится число атомов $N = \rho N_A / M$, (N_A – постоянная Авогадро). Подстановка этого значения в формулу (8.2) дает

$$W_F = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3N}{8\pi} \right)^{2/3} = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3\rho N_A}{8\pi M} \right)^{2/3} =$$

$$= \frac{6,62^2 \cdot 10^{-68}}{2 \cdot 9,106 \cdot 10^{-31}} \left(\frac{3 \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{8\pi \cdot 0,0635} \right)^{2/3} = 1,13 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} \approx 7 \text{ эВ}.$$

2 Определить напряженность электрического поля, возникающего в зазоре между пластинами плоского конденсатора, одна из которых изготовлена из алюминия, а другая из платины. Пластины соединены между собой медным проводом, а длина зазора $l = 5 \text{ мм}$. Работа выхода электронов из алюминия, меди и платины составляет соответственно 4,25, 4,4 и 5,32 эВ. Как изменится напряженность поля, если алюминиевую и медную пластины закоротить проводом из платины при той же длине зазора?

Решение. Разность потенциалов на концах последовательной разнородной цепи определяется различием в работах выхода электронов из крайних проводников и не зависит от числа и состава промежуточных звеньев. Поэтому в первом случае имеем

$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{Pt}}{el} = \frac{4,25 - 5,32}{5 \cdot 10^{-3}} = -214 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

во втором
$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{Cu}}{el} = \frac{4,25 - 4,4}{5 \cdot 10^{-3}} = -30 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Задачи для аудиторных занятий и домашних работ

1 Концентрация электронов в некотором металле составляет 10^{30} м^{-3} . Определить максимальное значение энергии для любого электрона в этом образце при 0 К (уровень Ферми).

2 Концентрация электронов в металлическом образце составляет $2 \cdot 10^{30} \text{ м}^{-3}$. Определить работу выхода, если энергия, необходимая для удаления электрона из металла, на бесконечно большое расстояние, $W_a = 60 \text{ эВ}$.

3 Максимальная скорость электрона в вольфрамовом катоде равна $1,77 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. До какой величины должна быть повышена скорость электрона, для того чтобы он был в состоянии выйти из металла?

4 Какая доля электронов, эмитируемых с поверхности металла, имеет нормальную составляющую скорости выше средней?

5 Рассчитать среднюю начальную энергию электронов в электронвольтах при вылете их из катода, нагретого до температуры $T = 2400$ К.

6 Анодное напряжение вакуумного диода равно $-0,5$ В. С какой минимальной начальной энергией должен выходить электрон из катода, чтобы достичь анода: а) если пренебречь контактной разностью потенциалов; б) если принять, что катод и анод имеют работу выхода соответственно $1,5$ и $2,7$ эВ?

7 Катод с поверхностью $0,1$ см² имеет ток эмиссии $0,5$ А при температуре $T = 1400$ К и $1,9$ А при температуре $T = 1600$ К. Определить постоянные A и b_0 в уравнении термоэлектронной эмиссии.

8 На сколько должна измениться работа выхода материала катода, для того чтобы его ток эмиссии при температуре $T = 2400^\circ$ С уменьшился на 10 %?

9 Какова работа выхода из металла, если повышение температуры нити накала, сделанной из этого металла, от 2000 до 2001 К ток термоэлектронной эмиссии увеличивает на 1 % ?

10 Ток эмиссии катода, работающего при температуре $T = 2100$ К, с течением времени снижается на 5 %. С каким изменением работы выхода связано это снижение? До какой величины необходимо повысить напряженность электрического поля для восстановления исходного уровня эмиссии, если в нормальных рабочих условиях напряженность поля у катода равна $10,0$ кВ/см?

11 При какой напряженности электрического поля у поверхности вольфрамового катода работа выхода уменьшится на 3 %? Температура катода $T = 2400$ К.

12 Известно, что материал, помещенный в сильное электрическое поле, имеет ток эмиссии, определяемый уравнением: $I = \alpha E^2 \exp(-\beta / E)$, где α и β — величины постоянные для данного материала; E — напряженность электрического поля. Определить напряженность электрического поля, если $\alpha = 5 \cdot 10^{-6}$ А·м²/В², $\beta = 10^9$ В/м и ток эмиссии равен 270 мА.

13 Вольфрамовый катод с эффективной длиной 100 мм и диаметром $0,2$ мм работает при температуре 2400 К. Чему равен ток эмиссии? На сколько процентов увеличится ток эмиссии, если температуру повысить на 5 %?

14 Рассчитать и построить график зависимости тока эмиссии вольфрамового катода от температуры в интервале температур $2000 - 2600$ К. Катод изготовлен из проволоки диаметром $0,5$ мм и эффективной длиной 80 мм.

15 Рассчитать и построить график зависимости плотности тока эмиссии карбидированного катода от температуры в интервале температур 1700 – 2200 К.

16 Вольфрамовый торированный и оксидный катоды нагреты, соответственно, до температуры 2400, 1900 и 1000 К. Как относятся площади этих катодов, если токи эмиссии катодов одинаковы?

17 Произвести те же расчеты, что и в задаче 16, если все катоды нагреты до температуры $T = 1000$ К.

18 Ток эмиссии карбидированного катода, работающего при температуре $T = 1000$ К, равен 100 мА. Чему равен ток эмиссии вольфрамового катода, разогретого до такой же температуры, если размеры обоих катодов одинаковы?

19 Вольфрамовый катод с эффективной длиной 2,4 см, диаметром 1,6 мм нагревается до температуры $T = 2550$ К. Определить: а) ток эмиссии; б) рабочую температуру катода тех же геометрических размеров, но изготовленного из торированного вольфрама, чтобы получить такой же ток эмиссии.

20 Определить удельную эмиссию, удельную мощность накала и эффективность катода, у которого при температуре $T = 2650$ К ток эмиссии равен $I_e = 830$ мА. Напряжение накала $U_n = 17$ В, ток накала $I_n = 16$ А, эффективная поверхность катода равна $S_k = 1,5$ см².

21 Как изменяются параметры катода при изменении его температуры (напряжения или тока накала)?

22 Почему при снятии накальных характеристик анодное напряжение пушки должно быть выключено?

23 Каковы недостатки катодов прямого накала и почему этих недостатков лишены катоды косвенного накала?

24 Почему работа выхода оксидного катода много ниже, чем у катодов других типов? Что представляет собой катод до и после активирования?

25 В электронных пушках с оксидным катодом случайные перегрузки могут вызвать значительное уменьшение тока эмиссии. Уменьшенная таким образом эмиссия может быть восстановлена, если катод будет в течение небольшого промежутка времени нагреваться сильнее, чем обычно. Объясните, что происходит на катоде во время этого дополнительного подогрева.

26 Вольт-амперная характеристика подогревателя имеет вид, показанный на рисунке 8.3. Объясните, почему при малых напряжениях накала она идет круто, а при больших – полого.

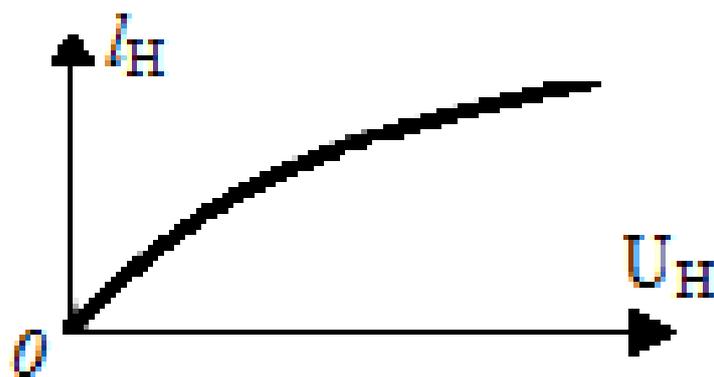


Рисунок 8.3 – Вольт-амперная характеристика подогревателя катода

27 От источника напряжением 24 В надо питать накал четырех ламп, рассчитанных на напряжение накала 6 В. Три из этих ламп имеют ток накала 0,45 А, а четвертая – 0,3 А. Как наиболее рационально организовать цепь накала?

28 Лампы Л1 и Л2 (рисунок 8.4) включены последовательно с источником анодного питания E_a и имеют питание накала от одного источника, изолированного от анодной цепи. Анодное напряжение лампы Л1 составляет 300 В. Сопротивление изоляции катода-подогревателя у лампы Л1 10,0 МОм, у лампы Л2 5,0 МОм. Предельное напряжение катода-подогревателя 100 В. Есть ли опасность пробоя изоляции катода-подогревателя?

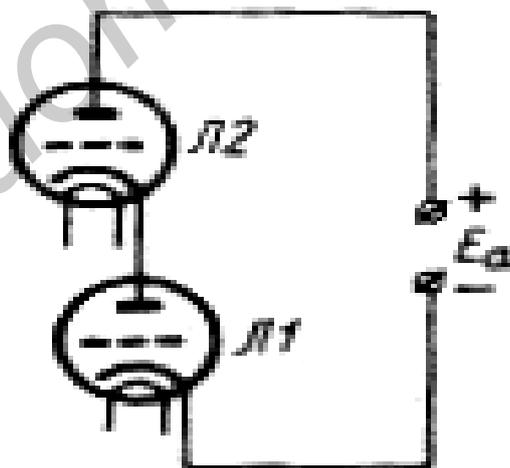


Рисунок 8.4 – Схема включения электронных ламп

Ответы к задачам практического занятия №8

- 1 $W_F(0) = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3N}{8\pi} \right)^{2/3} = 36,4 \text{ эВ.}$
- 2 $W_{\text{вых}} = 2,2 \text{ эВ.}$
- 3 $v = 2,17 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$
- 4 $1/e = 0,368.$
- 5 $W = 0,206 \text{ эВ.}$
- 6 а) $W = 0,5 \text{ эВ;}$ б) $W = 1,7 \text{ эВ.}$
- 7 $A = 13,1 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2 \cdot \text{град}^2$; $b_0 = 11960 \text{ град.}$
- 8 $\Delta U_0 = 24,3 \text{ мВ.}$
- 9 $W = 3,15 \text{ эВ.}$
- 10 $0,013 \text{ эВ;}$ напряженность поля увеличится на 48 %.
- 11 $E = 4,3 \cdot 10^8 \text{ В/см.}$
- 12 $E = 4,14 \cdot 10^7 \text{ В/м.}$
- 13 $I_0 = 70 \text{ мА;}$ на 300 %.
- 16 $S_W : S_{Th} : S_{\text{окс}} = 5,73 \cdot 10^3 : 10,2 : 1.$
- 17 $S_W : S_{Th} : S_{\text{окс}} = 1,63 \cdot 10^{14} : 7,3 : 12.$
- 19 а) $I_0 = 0,54 \text{ А;}$ б) $T = 1810 \text{ К.}$
- 27 Подогреватели ламп соединяются последовательно, но параллельно подогревателю лампы, имеющей ток накала 0,3 А, включить резистор с сопротивлением 40 Ом.
- 28 Да.

СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

Практическое занятие №9

Теоретические сведения

Отклоняющие системы (ОС) предназначены для отклонения (пространственного перемещения) электронного луча, сформированного генератором электронов и фокусирующей системой. ОС могут выполнять дополнительные функции: юстировки, модуляции (бланкирования) пучка.

В соответствии с основными техническими требованиями ОС должна:

1 Обладать достаточно большой чувствительностью по отклонению, т. е. отклонение луча на заданную величину (угла или линейного смещения в плоскости обработки) должно происходить при возможно меньшей величине отклоняющего фактора – напряжения или тока.

2 Быть линейной, т. е. отклонение луча должно быть пропорционально величине отклоняющего фактора при любых допустимых для данной конструкции углах отклонения или в любой части плоскости обработки.

3 Не нарушать существенно фокусировку пучка, т. е. пучок должен перемещаться ОС как одно целое. Форма и величина пятна должны оставаться неизменными в любой части плоскости обработки.

4 Иметь минимальную инерционность, для чего необходимо минимизировать величины паразитных емкостей и индуктивностей.

5 Быть экономичной, т. е. электрическая мощность, необходимая для отклонения электронного пучка на один угловой градус (LI^2 , CU^2 , RI^2), должна быть минимальной.

Электрические параметры ОС – индуктивность L , омическое сопротивление R , емкость C должны выбираться с учетом совместной работы с генератором развертки для обеспечения необходимой величины и формы отклоняющего тока и напряжения.

Конструкция ОС должна быть технологичной и обеспечивать повторяемость параметров. Для отклонения электронных пучков применяют электрические, магнитные и комбинированные поля.

Электростатические отклоняющие системы

Отклонить электронный луч на небольшие углы можно, пропустив его через отклоняющий конденсатор (рисунок 9.1). Электрическое поле должно быть направлено параллельно направлению отклонения луча и перпендикулярно направлению его распространения. Если считать электрическое поле однородным на рабочем участке и пренебречь краевым эффектом, то при выходе из конденсатора угол отклонения луча составит

$$\Theta_e \approx \text{tg}\Theta_e \approx \frac{eEl}{m_0v^2}, \quad (9.1)$$

где e , m , v – заряд, масса и скорость электрона;
 E – напряженность электрического поля;
 l – длина пластин.

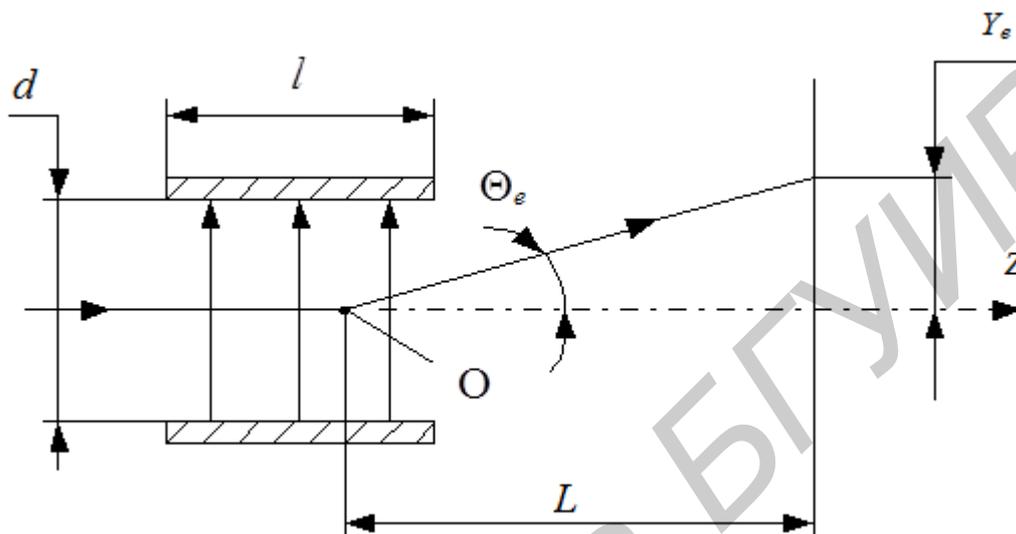


Рисунок 9.1 – Схема электростатической отклоняющей системы

Точка пересечения линии, которая является продолжением оси отклоненного пучка вне поля ОС с начальным направлением оси пучка, называется **центром отклонения**. После выхода из конденсатора электрон движется по прямой с углом излома Θ_e . Предполагается, что место излома (точка O) находится посередине конденсатора. При расстоянии от центра отклонения до плоскости обработки L величина абсолютного отклонения на плоскости обработки составит

$$Y_e = L \cdot \text{tg}\Theta_e \approx L \cdot \Theta_e = \frac{e \cdot E \cdot l \cdot L}{m_0v^2} = \frac{e \cdot E \cdot l \cdot L}{2eU_a} = \frac{U_0 \cdot l \cdot L}{2U_a \cdot d}, \quad (9.2)$$

где $U_0 = E \cdot d$ – напряжение на пластинах;
 d – расстояние между пластинами;
 U_a – ускоряющее напряжение.

Величина

$$\varepsilon_e = \frac{Y_e}{U_0} = \frac{l \cdot L}{2U_a \cdot d}, \quad (9.3)$$

называется **чувствительностью** электростатической ОС. Чувствительность определяет величину линейного отклонения при напряжении на пластинах в 1 В. Как видно из формулы (9.3), для электростатических ОС она не зависит от

массы и заряда отклоняемой частицы. Чувствительность определяется величиной ускоряющего напряжения U_a и расстояния от центра отклонения до плоскости обработки L , поэтому ОС, стоящие ближе к плоскости обработки, при одних и тех же прочих условиях будут иметь меньшую чувствительность. Для электростатического отклонения электронного луча обычно используются две пары пластин, отклоняющих его во взаимно перпендикулярных направлениях. Располагают их последовательно одна за другой и, как правило, тщательно экранируют друг от друга. Совмещение электростатических ОС невыгодно, т. к.:

- 1) увеличение расстояния между пластинами уменьшает чувствительность по отклонению;
- 2) взаимодействие электрических полей создает дополнительные искажения луча;
- 3) при совмещении двух пар пластин значительно увеличивается паразитная емкость системы.

Преимуществами электростатических ОС являются простота конструкции, высокая надежность и экономичность.

Электромагнитные отклоняющие системы

Электромагнитные ОС (рисунок 9.2) обладают рядом преимуществ и поэтому получили наибольшее распространение. Магнитное поле в них должно быть направлено перпендикулярно направлению отклонения пучка. Если считать поле однородным и пренебречь краевым эффектом, то угол отклонения

$$\Theta_M = \frac{e}{m\nu} \cdot Hl. \quad (9.4)$$

Здесь l – длина участка однородного магнитного поля.

При небольших скоростях электронов, когда $m \approx m_0$,

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Theta_M = \Theta_M &= \sqrt{\frac{e}{2m_0 U_a}} \cdot H \cdot l, \\ Y_M &= \sqrt{\frac{e}{2m_0 U_a}} \cdot H \cdot l \cdot L. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Таким образом, в отличие от электронного поля величина отклонения в магнитном поле зависит от заряда и массы частицы. Поэтому электромагнитные ОС используются для того, чтобы отвести в сторону поток ионов, попадающих в излучатель.

Чувствительность ОС при магнитном отклонении

$$\varepsilon_M = \frac{Y_M}{H} = \sqrt{\frac{e}{2m_0 U_a}} \cdot l \cdot L, \text{ мм/(А·ВИТ)}. \quad (9.6)$$

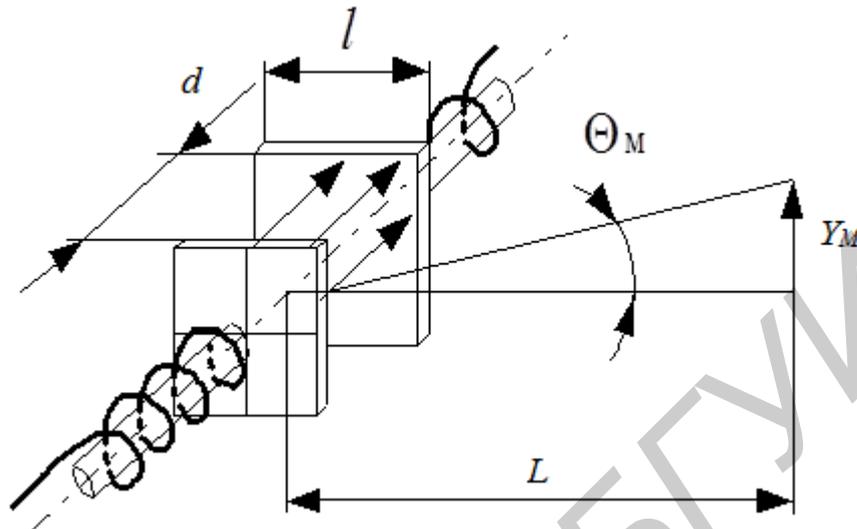


Рисунок 9.2 – Схема электромагнитной отклоняющей системы

В электромагнитных системах электроны движутся по окружности радиусом r , угол отклонения рассчитывается по формулам:

$$\sin \Theta = 2,97 \cdot 10^{-5} l B U_a^{-1/2}; \quad (9.7)$$

$$r = \frac{1}{B} \left(\frac{2m}{e} U_a \right)^{1/2}, \quad (9.8)$$

где B – магнитная индукция, Тл.

Магнитная индукция прямо пропорциональна магнитодвижущей силе возбуждения nI (число ампер – витков катушки) и обратно пропорционально расстоянию между полюсными башмаками:

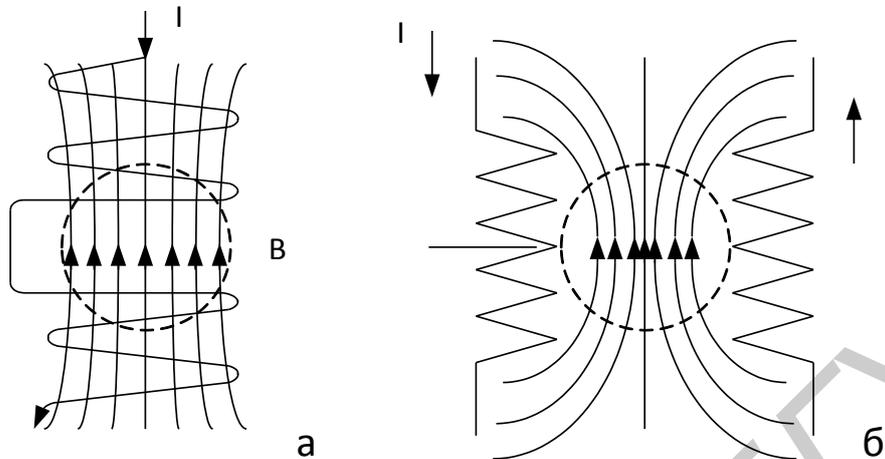
$$B = \mu_0 n I / d, \quad (9.9)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Постоянство чувствительности (линейность отклонения) имеет место, когда электронный луч не выходит за пределы однородного поля. Поэтому конструктивно катушки выполняются так, чтобы по возможности обеспечить его однородность. В основном применяются электромагнитные ОС с последовательно и параллельно складываемыми магнитными потоками (рисунок 9.3).

ОС с последовательным сложением магнитных полей более экономичны, т. к. для отклонения луча используется большая часть запасаемой в катушке магнитной энергии. В ОС с параллельно складываемыми потоками отклоне-

ние происходит только в области потока рассеяния и используется незначительная часть энергии поля. Повысить экономичность можно, применив магнитопроводы из ферромагнитных материалов. Поэтому на низких частотах применяются сердечники и экраны.



а – последовательная; б – параллельная

Рисунок 9.3 – Схема сложения магнитных полей в ОС

Примеры решения задач

1 Определить напряженность электростатического поля E , в котором сила, действующая на электрон, будет равна силе, действующей на электрон в магнитном поле с индукцией $B = 100$ мкТл, если электрон влетает в поле под углом $\alpha = 90^\circ$ относительно магнитных силовых линий с начальной скоростью $v = 10^4$ м/с.

Решение. При движении электрона в однородном поперечном ($\vec{v} \perp \vec{B}$) магнитном поле (рисунок 9.3) сила Лоренца является центростремительной силой, и электрон описывает круговую траекторию радиусом R .

$$\frac{mv^2}{R} = evB = eE.$$

Следовательно, напряженность электростатического поля определяется из соотношения

$$E = vB = 1 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ В/м.}$$

2 Изобразите фигуру, получающуюся на экране электронно-лучевой трубки, если к отклоняющим пластинам трубки подведены синусоидальные

напряжения одинаковой частоты, амплитуды и фазы. Чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин считать одинаковой.

Решение. Фигуру, которая должна получиться па экране, получаем графически. Для этого строим графики изменения, отклоняющих напряжений во времени $U_x = f_1(t)$ и $U_y = f_2(t)$, как показано на рисунке 9.4. Затем для различных моментов времени (1, 2, 3 и т. д.) находим отклонение пятна на экране трубки и след движения пятна. Видно, что при заданных условиях на экране трубки получается прямая линия с углом наклона, равным 45° .

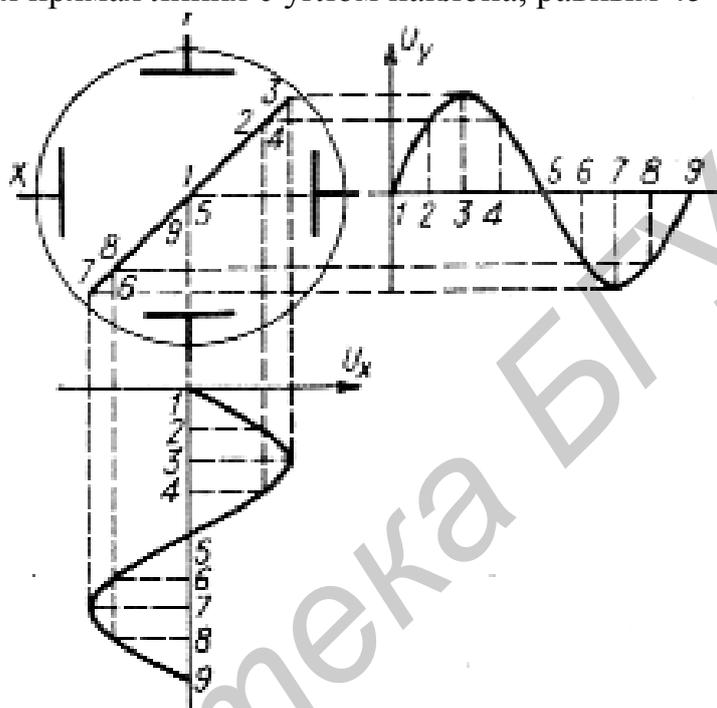


Рисунок 9.4 – Построение изображения на экране электронно-лучевой трубки

3 В течение какого времени световое пятно на экране электронно-лучевой трубки описывает фигуру, изображенную на рисунке 9.5, если напряжение, подводимое к горизонтально отклоняющим пластинам, имеет частоту $f_x = 1,5$ кГц.

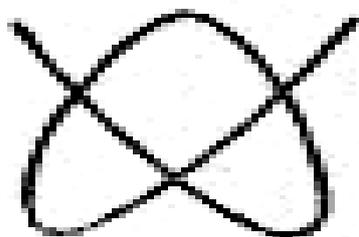


Рисунок 9.5 – Форма фигуры на экране

Решение. Для определения искомого времени найдем отношение частот напряжений, подводимых к вертикально и горизонтально отклоняющим пла-

стинам. Для фигуры, изображенной на рисунке 9.5 соотношение частот $f_y : f_x = 4 : 3$, следовательно, продолжительность образования фигуры будет определяться либо четырьмя периодами вертикально отклоняющего напряжения, либо тремя периодами горизонтально отклоняющего напряжения. При $f_x = 1,5$ кГц

$$T_0 = 3T_x = 3/f_x = 3/(1,5 \cdot 10^3) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 2 \text{ мс.}$$

Задачи для аудиторных занятий и домашних работ

1 Сравните относительные изменения чувствительности двух электронно-лучевых пушек, если известно, что все размеры одной из них в два раза меньше, чем другой, и при этом анодное напряжение меньшей пушки вдвое меньше, чем у большей. Рассчитайте относительные изменения чувствительности как электростатической, так и магнитной систем отклонения.

2 Отклоняющая катушка круглой формы установлена на горловине электронно-лучевой системы на расстоянии 180 мм от плоскости обработки. Определить чувствительность по отклонению, если $U_a = 4,0$ кВ. Коэффициент γ для круглых катушек равен $0,12 \text{ В}^{1/2}/\text{А}$.

3 Определить, как изменится чувствительность отклоняющей системы, если при условиях предыдущей задачи отклоняющую катушку сдвинуть: а) на 20 мм ближе к плоскости обработки; б) на 20 мм дальше от плоскости обработки.

4 Электромагнитная отклоняющая система имеет чувствительность $0,65 \text{ мм}/\text{А}$, диаметр экрана 135 мм, число витков отклоняющей катушки 2000. Какой ток следует пропустить через отклоняющую катушку, чтобы луч переместился на величину, равную радиусу экрана?

5 Отклоняющие пластины имеют длину $l = 15$ мм, расстояние между ними $D = 4$ мм, расстояние от середины пластин до экрана $L = 180$ мм и напряжение второго анода $U_{a2} = 1000$ В. Требуется определить: а) отклонение на экране, вызываемое постоянным напряжением 100 В; б) величину магнитной индукции поля, действующего в том же пространстве, необходимую для получения такого же отклонения; в) произвести те же расчеты, что и в п. а и б, при условии, что напряжение на втором аноде U_{a2} уменьшилось до 900 В.

6 К горизонтально отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подводится пилообразное напряжение. Нарисуйте изображение, которое получится на экране. Каким оно будет в случае синусоидального напряжения, подаваемого на пластины.

7 Исследуемое синусоидальное напряжение имеет период $T = 100$ мкс. Какой должна быть частота непрерывной линейной развертки для получения осциллограммы исследуемого напряжения в пять периодов. Временем обратного хода луча пренебречь.

8 Начертить осциллограммы синусоидального напряжения, если развертывающее напряжение имеет форму, показанную на рисунке 9.6, а и б, а период развертывающего напряжения в 5 раз больше периода исследуемого сигнала: $T_{\text{разв}} = 5T_{\text{иссл}}$.

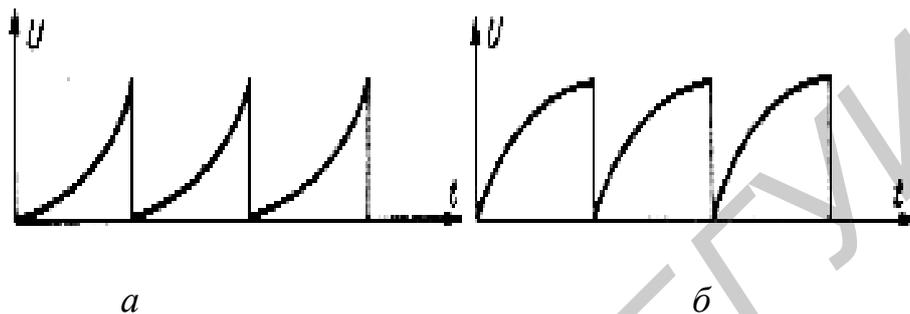


Рисунок 9.6 – Эпюры напряжений

9 Изобразите фигуру, получающуюся на экране электронно – лучевой трубки, если к отклоняющим пластинам трубки подведены, синусоидальны напряжения одинаковой частоты и амплитуды при сдвиге фаз: а) $\varphi = \pi/4$; б) $\varphi = \pi/2$; в) $\varphi = \pi$. Чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин считать одинаковой.

10 Постройте фигуру, которая должна получиться па экране трубки, если напряжения, подводимые к отклоняющим пластинам трубки, имеют синусоидальную форму, в начальный момент совпадают по фазе и их частоты находятся в отношении: $f_x : f_y = 1 : 2$, где f_y – частота напряжения, подведенная к вертикальным пластинам; f_x – частота напряжения, подведенная к горизонтальным пластинам. Считать, что чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин одинакова.

11 К горизонтальным пластинам электронно-лучевой трубки приложено переменное напряжение $U_x = A \sin \omega_1 t$, а к вертикальным пластинам – переменное напряжение $U_y = A \sin(\omega_2 t + \varphi)$. Постройте изображения, получаемые на экране, если: а) $\omega_2/\omega_1 = 2$; $\varphi = 0$; б) $\omega_2/\omega_1 = 2$; $\varphi = \pi/2$; в) $\omega_2/\omega_1 = 3$; $\varphi = 0$; г) $\omega_2/\omega_1 = 2/3$; $\varphi = 0$; д) $\omega_2/\omega_1 = 2/3$; $\varphi = \pi/2$. Чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин считать одинаковой.

12 Начертить фигуру, наблюдаемую па экране электронно – лучевой трубки, если на вертикально отклоняющие пластины подано синусоидальное напряжение с частотой f , а на горизонтально отклоняющие пластины – пилооб-

разное напряжение с частотой $0,8 f$. Временем обратного хода луча пренебречь. Считать чувствительность к отклонению по осям X и Y одинаковой.

13 Каково соотношение частот напряжений на пластинах X и Y , если на экране видна фигура, изображенная на рисунке 9.7?

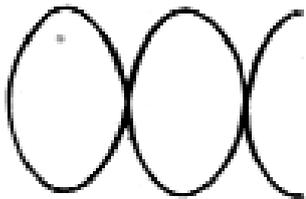


Рисунок 9.7 – К задаче 13

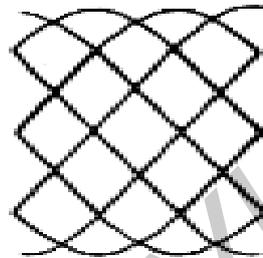


Рисунок 9.8 – К задаче 14

15 На экране видна окружность в результате того, что на вертикально отклоняющие и горизонтально отклоняющие пластины подано напряжение одинаковой амплитуды с частотой 50 Гц и сдвигом фаз 90° . Какая фигура будет наблюдаться на экране, если на второй анод, кроме постоянного напряжения, подать переменное напряжение частотой 400 Гц?

16 К вертикально и горизонтально отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подведено синусоидальное напряжение с частотой 250 Гц с сдвигом фаз 90° . Какое изображение получится на экране трубки, если на управляющий электрод подать переменное напряжение частотой 2 кГц?

17 Какова частота напряжения, подводимого к отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки, если при подведении к управляющему электроду синусоидального напряжения частотой 4 кГц на экране получилась фигура, изображенная на рисунке 9.9?



Рисунок 9.9 – К задаче 17

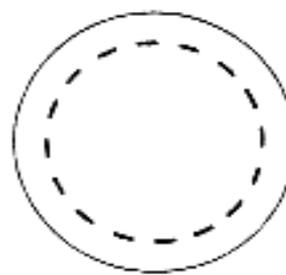


Рисунок 9.10 – К задаче 18

18 Определить частоту напряжения, подводимого к управляющему электроду электронно-лучевой трубки, если на отклоняющие пластины подано си-

нусоидальное напряжение частотой 100 Гц, а изображение, получившееся при этом на экране трубки, показано на рисунке 9.10.

19 В каких пределах можно измерить амплитудное значение переменного напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, если чувствительность $\epsilon_y = 0,43$ мм/В и диаметр экрана $d = 13$ см?

20 В осциллографе используется электронно-лучевая трубка, имеющая диаметр экрана $d = 8$ см и чувствительность к отклонению по вертикали $\epsilon_y = 0,23$ мм/В. Какое наибольшее по амплитуде импульсное напряжение можно измерять осциллографом, если подключить его непосредственно к вертикально отклоняющим пластинам?

Ответы к задачам практического занятия №9

2 0,342 мм/А .

3 а) 0,304 мм/А; б) 0,38 мм/А .

4 52 мА.

5 а) 33,7 мм; б) $B = 1,33$ мТл; 37,5 мм; $B = 1,4$ мТл.

7 $f = 125$ Гц.

13 При определении соотношения частот от какой-либо точки, взятой на фигуре, начинаем описывать всю фигуру. При этом считаем изменение направления движения по вертикали, а затем по горизонтали. Отношение этих чисел определит отношение частот. В данном случае $f_y : f_x = 5 : 2$.

14 $f_y : f_x = 3 : 4$.

15 Восьмиконечная звезда.

19 $U_m = 151$ В.

20 348 В.

Приложение А

Некоторые физические постоянные

1 Заряд электрона	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
2 Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
3 Масса покоя электрона	$m_e = 0,91 \cdot 10^{-30}$ кг
4 Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
5 Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц
6 Постоянная электрическая	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
7 Радиус электрона классический	$r_e = 2,81 \cdot 10^{-15}$ м
8 Скорость света в вакууме	$c = 299792458(1,2)$ м/с

Приложение Б

Постоянные термоэлектронной эмиссии

Материал катода	A, А/см ² · град ²	b ₀ = eφ ₀ / k , град	φ ₀ , эВ
1 Вольфрам	60	52400	4,52
2 Торий на вольфраме (100 %-ное покрытие)	3,0	30500	2,63
3 Торий на карбиде вольфрама	0,0115	17400	1,49
4 Окись бария на вольфраме	0,01	11200	1,0

ЛИТЕРАТУРА

1 Савельев, И. В. Курс физики: учебник. В 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра элементарных частиц / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 304 с.

2 Терехов, В. А. Задачник по электровакуумным и полупроводниковым приборам / В. А. Терехов. – Л. : Энергия, 1971. – 128 с.

3 Шиллер, З. Электронно-лучевая технология / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер ; пер. с нем. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.

4 Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.

5 Жигарев, А. А. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы : учебник для втузов / А. А. Жигарев. – М. : Высш. шк., 1972. – 540 с.

6 Шерстнев, Л. Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы : учебник для студ. втузов / Л. Г. Шерстнев. – М. : Энергия, 1971. – 368 с.

Учебное издание

Боженков Владимир Владимирович
Шахлевич Григорий Михайлович

РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Практикум
для студентов специальности
«Электронно-оптические системы и технологии»
всех форм обучения

В 2-х частях
Часть 2

Оборудование для электронно-лучевой обработки

Редактор Е. Н. Батурчик
Корректор А. В. Бас

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 2,5.	Тираж 100 экз.	Заказ 538.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6