

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

Кафедра электронных приборов

## **ВАКУУМНЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления 210100 - «Электроника и микроэлектроника»,  
(специальность 210105 - «Электронные приборы»)

2012

**Аксенов Александр Иванович**  
**Злобина Алевтина Федоровна**

Вакуумные и плазменные приборы и устройства: Методические указания к практическим занятиям для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / А. И. Аксенов, А.Ф. Злобина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2012. - 18 с.

Материал пособия поможет закрепить теоретические знания, а также вырабатывать навык в решении практических вопросов и задач.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» по дисциплине «Вакуумные и плазменные приборы и устройства».

© Аксенов Александр Иванович, 2012  
© Злобина Алевтина Федоровна, 2012

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ВАКУУМНАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления 210100 - «Электроника и микроэлектроника»,  
(специальность 210105 - «Электронные приборы»)

Разработчик  
доцент каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ А.И.Аксенов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

\_\_\_\_\_ А.Ф. Злобина  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Примеры решения задач по темам	5
2.1 Эмиссионная электроника	5
2.2 Движение частиц в полях	5
2.3 Отклонение луча в электронно-лучевой трубке	6
2.4 Токопрохождение в ЭЛТ	7
2.5 Передающие трубки, сигнал на экране ЭЛТ	8
2.6 Фотоэлектронные приборы	9
2.7 Ионные приборы	10
2.8 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	10
2.9 Оптические квантовые генераторы (ОКГ)	12
2.10 Фотоприемники	14

## 1 ВВЕДЕНИЕ

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, ищите ошибку в своем решении.

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

## 2 Примеры решения задач по темам

### 2.1 Эмиссионная электроника

**Задача 1.** Определить плотность тока термоэмиссии (в  $A/cm^2$ ), если термокатод имеет эффективную работу выхода  $\phi_{эфф} = 1,5 \text{ эВ}$ , температура катода  $T_k = 900 \text{ К}$ , проницаемость  $D = 0,95$ .

**Решение.** Плотность тока можно определить, используя уравнение термоэмиссии:

$$j_{\text{э}} = A_0 D T_k^2 e^{-\frac{e\phi_{эфф}}{kT_k}} = 120 \cdot 0,95 \cdot 900^2 \cdot e^{-\frac{1,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 900}} =$$

$$= 38,5 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2,$$

где  $A_0 = 120 \text{ А/см}^2$  – постоянная термоэмиссии;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана.

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

**Решение.** Фотон с энергией  $h\nu$  всю ее отдает электрону, который, выходя из кристалла, теряет энергию эффективной работы выхода  $\phi_{эфф}$ . Выходя из фотокатода, электрон имеет кинетическую энергию  $\frac{mV^2}{2}$ . В результате можно записать:

$$\frac{mV^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - \phi_{эфф} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} -$$

$$- 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,7 \text{ эВ},$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$  – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме;  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона;  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  – связь между частотой и длиной волны.

### 2.2 Движение частиц в полях

**Задача 1.** Электрон прошел разность потенциалов  $200 \text{ В}$ . Определить скорость электрона (в  $м/с$ ) у поверхности положительного электрода, если начальная скорость электрона  $V_0 = 0$ .

**Решение.** Электрон у поверхности анода будет иметь энергию, соответствующую потенциалу электрода  $E_a = eU_a$ . Это кинетическая

энергия, выраженная формулой  $E_k = \frac{mV^2}{2}$ . Учитывая, что  $\frac{mV^2}{2} = eU_a$ , можно определить скорость электрона:

$$V = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 200}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ м/с},$$

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

**Задача 2.** Каким полем ускорялся ион, имеющий массу протона, если его скорость  $V = 10^6 \text{ м/с}$ ? Ответ дать в кВ.

**Решение.**

$$U = \frac{m_{pr}V^2}{2e} = \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{12}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,3 \text{ кВ},$$

где  $m_{pr} = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – масса протона.

### 2.3 Отклонение луча в электронно-лучевой трубке

**Задача 1.** В электронно-лучевой трубке отклоняющие пластины по оси X имеют размеры:  $d = 5 \text{ мм}$ ;  $l = 10 \text{ мм}$ ;  $L = 30 \text{ см}$ ; напряжение на втором аноде  $U_{a2} = 3 \text{ кВ}$ . Определить чувствительность к отклонению (в мм/В). Какой величины сигнал подан на пластины, если луч отклонился на  $2 \text{ см}$  на экране?

**Решение.** Чувствительность к отклонению можно найти из выражения:

$$\varepsilon = \frac{l \cdot L}{2U_a d} = \frac{10 \cdot 300}{2 \cdot 3 \cdot 3000} = 0,1 \text{ мм/В}.$$

Учитывая, что размерность в мм/В, все размеры подставляем в мм, а напряжение в В.

На экране луч отклонился на  $l_1 = 2 \text{ см}$ , тогда напряжение, поданное на пластины:

$$U_{пл} = \frac{l_1}{\varepsilon} = \frac{20}{0,1} = 200 \text{ В}.$$

**Задача 2.** В кинескопе магнитная отклоняющая система. На экране видна горизонтальная линия в центре длиной  $l = 25 \text{ см}$ . При этом ток в катушке  $50 \text{ мА}$ , а число витков  $2000$ . Определить чувствительность к отклонению (в мм/А·вит). Как запитаны катушки, отклоняющие по Y? Как изменится чувствительность к отклонению, если напряжение на третьем аноде увеличить в 1,5 раза?

**Решение.** Чувствительность можно определить из выражения:

$$\varepsilon = \frac{l}{nI} = \frac{250}{2000 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \text{ мм} / \text{А} \cdot \text{вит.}$$

Обратите внимание: в размерности чувствительности расстояние подставляем в мм, а ток – в А.

На экране видна горизонтальная линия, значит на отклоняющие катушки по Y ток не подан.

Чувствительность к отклонению не зависит от потенциала  $A_3$ .

**Ответ:** 2,5; «не запитаны»; «не изменится».

## 2.4 Токопрохождение в ЭЛТ

**Задача 1.** В ЭЛТ температура катода 2000 К, напряжение на модуляторе  $U_m = -5 \text{ В}$ , напряжение на ускоряющем электроде  $U_{y3} = 1 \text{ кВ}$ , проницаемость модулятора 0,02, напряжение на втором аноде  $U_{a2} = 10 \text{ кВ}$ . Какова максимальная энергия (в эВ) электрона у катода, в плоскости модулятора, ускоряющего электрода, второго анода и экрана? Как изменится эта энергия в плоскости экрана, если на отклоняющие катушки подано  $B = 1 \text{ Тл}$ ?

**Решение.** Электрон, находясь в кристалле, получает энергию, соответствующую  $T = 2000 \text{ К}$ . Эту энергию можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{m\bar{v}^2}{2} &= 3kT = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2000}{2} = \\ &= 4,14 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = 0,26 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Поскольку в задаче не дана эффективная работа выхода из катода, можно считать, что максимальная энергия, которую будет иметь электрон при выходе из катода, составляет 0,26 эВ.

В плоскости модулятора на электрон действует поле самого модулятора и поле ускоряющего электрода. Результирующее поле определяется действующим напряжением:

$$U_d = U_M + DU_{y3} = -5 + 0,02 \cdot 1000 = 15 \text{ эВ}.$$

ЭЛТ – высоковакуумный прибор, поэтому электрон при движении к экрану не претерпевает столкновений с молекулами. Электрон, двигаясь от одного электрода до другого, ускоряется и в плоскости электрода имеет энергию, соответствующую потенциалу того электрода:

$$U_{y3} = 1000 \text{ эВ}; U_{a2} = 10000 \text{ эВ}; U_3 = 10000 \text{ эВ}$$



Магнитное поле изменяет только траекторию электрона и не изменяет его энергию.

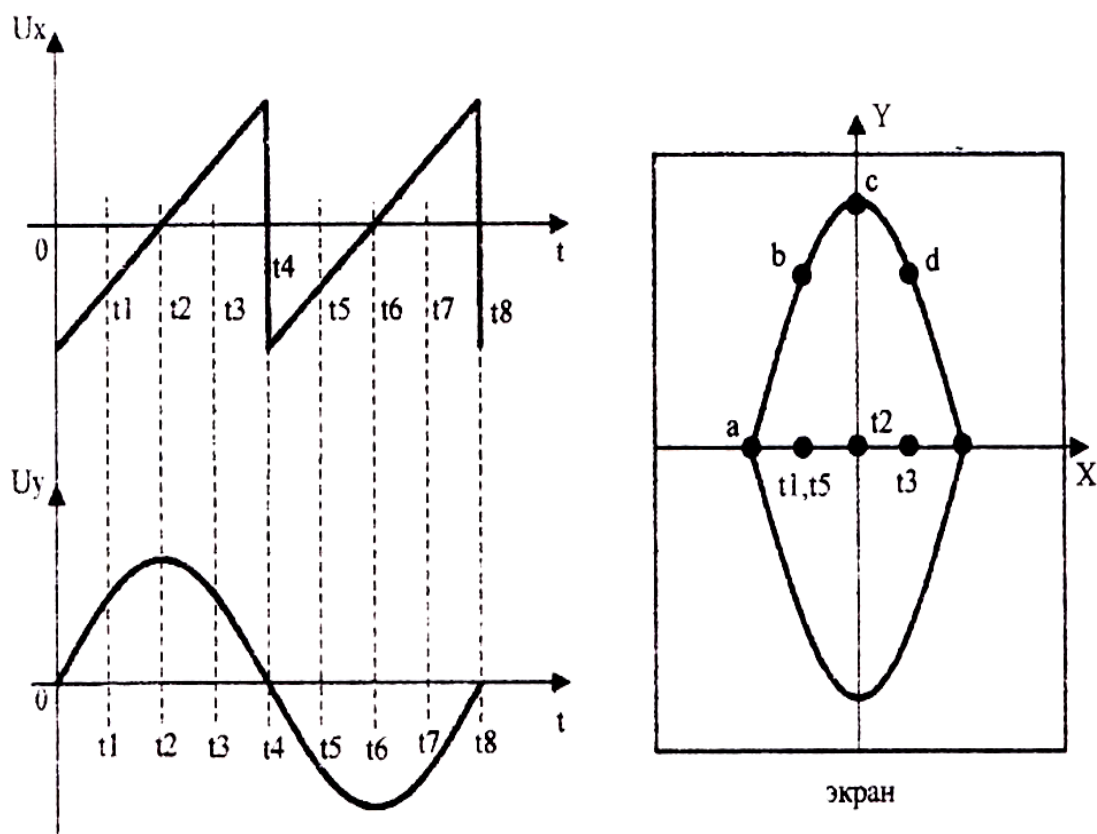
**Ответ:** 0,3; 1000; 10000; 10000; «не изменится».

## 2.5 Передающие трубки, сигнал на экране ЭЛТ

**Задача 1.** В электронно-лучевой трубке запитаны все электроды. На отклоняющие пластины сигналы не поданы. Что видим на экране? На пластины, отклоняющие по  $X$ , подана «пила», а по  $Y$  – синусоида, причем  $\tau = \frac{1}{2}T$ , где  $\tau$  – длительность «пилы»,  $T$  – период синусоиды. Что видим на экране?

**Решение.** Если в электронно-лучевой трубке запитаны все электроды, то получен и сфокусирован луч электронов. На отклоняющие пластины не поданы сигналы, значит, отклонения нет, луч проходит в центр экрана. Таким образом, в центре экрана видим светящуюся точку.

Подаем напряжение на отклоняющие пластины:



Рассмотрим движение луча по экрану при подаче отклоняющих сигналов. По оси  $X$  подали сигнал в виде «пилы», а по оси  $Y$  не подали сигнала, что видим? Луч в центре экрана. В момент времени  $t_0$  на отклоняющих пластинах  $X$  отрицательное напряжение – луч смещается в

крайнее левое положение. Напряжение на пластине растет равномерно (пила), и луч равномерно движется вправо. В момент времени  $t_2$  луч оказывается в центре экрана, а в момент времени  $t_4$  – в крайнем правом положении. Таким образом, когда по оси X подана «пила», на экране видим горизонтальную прямую линию в центре.

Теперь дополнительно подали синусоиду по оси Y. В момент времени  $t_0$  луч на левом краю экрана и по Y смещения нет (точка «a»), в момент времени  $t_1$  луч смещается по X в точку « $t_1$ », а по Y – в точку «b». В момент времени  $t_2$  по X луч оказался в центре, а по Y в точке «c» – амплитуда синусоиды. При дальнейшем движении луча вырисовывается  $\frac{1}{4}T$  синусоиды за время  $t_2 - t_4$ . Итак, за время  $\tau$  (длительность «пилы») на экране получили полпериода синусоиды. В момент времени  $t_4$  луч по оси X смещается (скачком) в крайнее левое положение. Луч опять равномерно движется к центру. Но по оси Y теперь идет отрицательная полуволна синусоиды, которая и вырисовывается на экране за время  $t_4 - t_7$ .

## 2.6 Фотоэлектронные приборы

**Задача 1.** В электронном фотоэлементе интегральная чувствительность  $K = 50 \text{ мкА/Лм}$ , на фотокатод падает световой поток  $\Phi = 6 \text{ Лм}$ . Чему равен ток фотоэмиссии (в мА)?

**Решение.** Ток фотоэмиссии можно найти:

$$I_{\phi} = K\Phi = 50 \cdot 6 = 300 \text{ мкА} = 0,3 \text{ мА}.$$

**Ответ:** 0,3.

**Задача 2.** В ФЭУ чувствительность катода  $K = 10 \text{ мкА/Лм}$ , световой поток  $\Phi = 4 \text{ Лм}$ , число каскадов  $n = 5$ , коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma = 3$ , коэффициент передачи тока  $\alpha = 0,8$ . Определить ток в цепи анода  $I_a$  (в мкА). Как изменится  $\sigma$ , если световой поток уменьшить в два раза?

**Решение.** Определим фототок с катода:

$$I_{\phi} = K\Phi = 10 \cdot 4 = 40 \text{ мкА} = 0,04 \text{ мА}.$$

Определим коэффициент усиления ФЭУ:

$$M = \sigma^n \alpha^n = 3^5 \cdot 0,8^5 = 79,6.$$

Определим ток анода:

$$I_a = I_{\phi} M = 40 \cdot 79,6 = 3184 \text{ мкА} = 3,2 \text{ мА}.$$

Коэффициент вторичной эмиссии не зависит от светового потока, поскольку фотон всю свою энергию отдает одному электрону.

**Ответ:** 3,2; «не изменится».

## 2.7 Ионные приборы

**Задача 1.** В тиратроне с электростатическим управлением моментом зажигания горит разряд между катодом и анодом. При этом  $U_{c1} = 90 \text{ В}$ ,  $U_{c2} = 110 \text{ В}$ ,  $U_c = 150 \text{ В}$ . Напряжение на второй сетке понизили до нуля. Как изменится при этом ток разряда? Как изменится напряжение горения ( $U_g$ )?

**Решение.** Когда разряд горит, сетка теряет свое управляющее действие. Вокруг сетки образуется двойной слой (радиус Дебая), на котором падает разность напряжений между потенциалом плазмы и потенциалом сетки. При этом напряжение горения зависит от материала и геометрии электродов, от давления и рода газа, но не зависит от потенциала сетки. Ток разряда определяется балластным сопротивлением и не зависит от потенциала сетки.

**Ответ:** «не изменится»; «не изменится».

**Задача 2.** Электрон движется в электрическом поле с напряженностью  $400 \text{ В/м}$ . При этом средняя длина свободного пробега электрона  $\bar{\lambda} = 10 \text{ см}$ , а потенциал ионизации газа  $U_i = 20 \text{ В}$ . Будет ли электрон ионизировать газ?

**Решение.** При напряженности поля  $400 \text{ В/м}$  электрон набирает энергию  $400 \text{ эВ}$  на пути  $1 \text{ м}$ . Чтобы набрать энергию  $20 \text{ эВ}$ , электрон должен пройти путь  $d$ :

$$d = \frac{U_i}{E} = \frac{20}{400} = 0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}.$$

Двигаясь в газе, электрон набирает энергию в электрическом поле на пути  $\bar{\lambda}$ . При столкновении он теряет и направление, и энергию. Учитывая, что  $d < \bar{\lambda}$ , можно сказать, что на пути  $\bar{\lambda}$  электрон наберет энергию  $40 \text{ эВ}$  и будет ионизировать газ.

**Ответ:** «будет».

## 2.8 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

**Задача 1.** Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна  $2,11 \text{ эВ}$ . Найти максимальные скорости фотоэлектронов, если длины волн падающего света имеют следующие значения:

- а)  $\lambda = 330$  и  $250 \text{ нм}$  – ультрафиолетовая область;
- б)  $\lambda = 580 \text{ нм}$  – желтая область;
- в)  $\lambda = 644 \text{ нм}$  – красный свет.

**Решение.** Подставив в формулу  $E_{\text{кв}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  данные значения  $\lambda$ , получим:

- а) для  $\lambda = 330 \text{ нм}$   $E = 3,76 \text{ эВ}$ ; для  $\lambda = 250 \text{ нм}$   $E = 4,96 \text{ эВ}$ ;
- б) для  $\lambda = 580 \text{ нм}$   $E = 2,11 \text{ эВ}$ ;
- в) для  $\lambda = 644 \text{ нм}$   $E = 1,93 \text{ эВ}$ .

Скорости фотоэлектронов, обладающих наибольшей энергией, определяем из уравнения Эйнштейна:

$$\frac{mV_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - \varphi,$$

где  $\varphi$  – работа выхода материала,  $h\nu$  – энергия фотона падающего излучения.

Тогда при освещении красным светом электроны из натрия испускаться не будут; на длине волны желтого света электроны смогут преодолеть потенциальный барьер, но вблизи поверхности натрия их скорость равна нулю; в УФ-области для  $\lambda = 330 \text{ нм}$   $V_{\text{max}} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ; для  $\lambda = 250 \text{ нм}$   $V_{\text{max}} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ .

**Задача 2.** Населенность верхнего ( $n_j$ ) и нижнего ( $n_i$ ) уровней равна соответственно  $1 \cdot 10^{10}$  и  $0,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Кратность вырождения ( $\bar{g}$ ) верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление? Поглощение?

**Решение.** Отношение чисел частиц на уровнях  $i$  и  $j$  с учетом вырождения:

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{\bar{g}_i}{\bar{g}_j} \exp\left(-\frac{E_i - E_j}{kT}\right).$$

Для температурной зависимости можно записать:

$$T = \frac{E_i - E_j}{k \ln\left(\frac{\bar{n}_j / \bar{n}_i}{\bar{g}_j / \bar{g}_i}\right)}.$$

Условие усиления  $\bar{n}_i \bar{g}_j > \bar{n}_j \bar{g}_i$  не выполняется, так как  $\frac{1 \cdot 10^{10}}{2} = 0,5 \cdot 10^{10}$ , то в системе нет ни усиления, ни поглощения.

## 2.9 Оптические квантовые генераторы (ОКГ)

**Задача 1.** Несимметричный резонатор состоит из двух вогнутых зеркал, отстоящих друг от друга на расстоянии  $L = 0,45$  м. Радиусы кривизны зеркал  $R_1 = 0,84$  м и  $R_2 = 2,0$  м. Рассчитать местоположение перетяжки (минимального сечения пучка) и сечение пучка на расстоянии  $l$  м от перетяжки.

**Решение.** Находим параметры резонатора:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 - \frac{0,45}{0,84} = 0,465,$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} = 1 - \frac{0,45}{2,0} = 0,775,$$

$$u = \sqrt{g_1 g_2} = \sqrt{0,465 \cdot 0,775} = 0,6,$$

$$v = \frac{g_1}{g_2} = \frac{0,465}{0,775} = 0,6.$$

Вычислим  $z_0$  по формуле:

$$z_0 = \sqrt{\frac{0,45}{6 \cdot 10^6}} \sqrt{\frac{0,8}{\frac{1,6}{1,55} - 0,6}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,37 \text{ мм}.$$

Воспользовавшись формулой  $R_g = L \frac{\sqrt{1-u^2}}{\left(\frac{1+v}{2\sqrt{v}}\right)^{-u}}$ , нетрудно найти

конфокальный параметр:

$$R_g = 0,45 \cdot 1,85 = 0,83 \text{ м}.$$

Зная конфокальный параметр, легко определить размер пятна в любом сечении пучка излучения. Минимальный размер пятна  $\omega_0$  определяется параметрами резонатора и длиной волны излучения генерации:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L}{k}} \sqrt{\frac{\sqrt{1-u^2}}{\left(\frac{1+v}{2\sqrt{v}}\right)^{-u}}},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число, характеризующее излучение.

Подсчитаем минимальный размер пятна в перетяжке:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{0,83}{6 \cdot 10^6}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,37 \text{ мм}.$$

Сечение пучка на расстоянии 1 м от перетяжки определим,

воспользовавшись выражением  $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{R_2}\right)^2}$  :

$$\omega = 0,37 \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 1}{0,83}\right)^2} = 0,96 \text{ мм.}$$

Следует помнить, что величина  $\omega$  дает действительный радиус пятна только для основной моды. Моды высших порядков имеют больший радиус пятна, который может быть найден из (3,42). Например, индексам 1 и 2 при прямоугольной симметрии резонатора соответствует  $1,49\omega$  и  $1,7\omega$ . Каждый размер соответствует данному индексу моды. Если мода имеет два различных индекса, то и размер пятна в обоих измерениях разный. В рассматриваемом случае пятно моды  $TEM_{12}$  на расстоянии 1 м от перетяжки имеет следующие размеры: по оси  $x$   $1,49 \cdot 0,96 = 1,43$  мм; по оси  $y$   $1,73 \cdot 0,96 = 1,66$  мм.

**Задача 2.** Оценить угол расхождения пучка основного типа колебаний конфокального резонатора, если  $\lambda = 1$  мкм, расстояние между зеркалами  $L = R_1 = R_2 = 2$  м. Апертурный размер зеркал велик, и дифракционные эффекты пренебрежимо малы.

**Решение.** Угол расхождения пучка основного колебания определяется по формуле

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \rho_0},$$

где  $\rho_0$  – минимальный размер луча в резонаторе.

Воспользуемся формулой:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\lambda \omega_0}{2\pi}} = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi}},$$

$$\text{тогда } \theta = \sqrt{\frac{2\lambda}{2\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14}} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 1,9'.$$

Угол расхождения можно еще определить еще как

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega}{z} = \frac{2}{\sqrt{kR_2}}.$$

## 2.10 Фотоприемники

**Задача 1.** Уравнение фотоэффекта Эйнштейна. Фотоэлектрическая работа выхода для калия равна  $2,0$  эВ. На поверхность калия падает свет  $\lambda = 0,35$  мкм.

Определить:

- а) запирающий потенциал  $V_s$ ;
- б) кинетическую энергию  $E_k$  самых быстрых электронов;
- в) скорости этих электронов;
- г) вычислить, на сколько изменится запирающий потенциал, если длина волны уменьшится до  $348$  нм.

**Решение.** Энергия фотона  $E = 1,24/\lambda$  эВ,

$$E = 1,24/0,35 = 3,54 \text{ эВ.}$$

Энергия эмитированного электрона ( $E_e$ ) представляет собой разность между энергией падающего излучения и работой выхода материала  $\varphi$ , т.е.

$$E_e = E_{\text{изл}} - \varphi = 3,54 - 2 = 1,54 \text{ эВ.}$$

Запирающий потенциал будет  $V_s = 1,54$  В.

$E_k$  наиболее быстрых электронов также равна  $1,54$  эВ.

Скорость наиболее быстрых электронов определяется как

$$\frac{mV^2}{2} = 2,46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж,}$$

$$V_{\text{max}} = 0,74 \text{ м/с.}$$

Уравнение Эйнштейна

$$\frac{mV_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - \varphi \quad \text{или} \quad eV_s = (hc/\lambda) - \varphi,$$

предполагая, что  $\lambda$  мало, запишем в дифференциальной форме:

$$\delta V_s = hc/1 - \delta\lambda/\lambda^2.$$

Поскольку  $\delta\lambda = 348 - 350$  нм, а  $\lambda = 350$  нм, получаем, что запирающий потенциал уменьшается на величину  $\delta V_s = 20,4$  мВ.

**Задача 2.** Здесь определяются следующие параметры: фотоэлектронная эмиссия, квантовый выход ( $Q$ ), спектральная чувствительность ( $S$ ), вывод соотношения  $S/Q = l/h\nu$ , пороговая частота (длина волны).

Пусть фотодиод имеет работу выхода  $2,08$  эВ и спектральная чувствительность  $20$  мкА/нм при освещении его  $\lambda = 0,546$  мкм. Считая, что

световой поток  $0,625 \text{ мкм}$  на этой длине волны эквивалентен  $1 \text{ Вт}$ , вычислить:

- а) пороговую частоту;
- б) запирающий потенциал, при котором фототок равен нулю;
- в) квантовый выход.

**Решение.** Работа выхода – это разница между падающей энергией излучения и энергией, характеризующей эмиссионные свойства материала. Квантовый выход ( $Q$ ) – это есть отношение числа испускаемых электронов к числу падающих. Квантовый выход

$$Q = \frac{n_e}{n_p} = \frac{I}{l} / \frac{P}{hv} = \frac{Ihv}{Pl},$$

где  $n_e$  – число фотонов, падающих на фотокатод в  $1 \text{ с}$ , а излучение с частотой  $\nu$  несет мощность  $P$ . Спектральная чувствительность

$$S = I/P = l/h\nu.$$

Пороговая частота находится из условия  $\phi = h\nu$ , где  $\nu = \phi/h = 502 \cdot 10^{-12} \text{ Гц}$ , а пороговая длина волны  $\lambda = c/\nu = 5,98 \text{ нм}$ ,

$$V_s = h\nu - \phi = 1,24/0,546 = 2,27 \text{ эВ}.$$

Запирающий потенциал, при котором фототок уменьшается до нуля, равен  $V_s = h\nu - \phi/l = 2,27 - 2,08 = 0,19 \text{ В}$ .

Квантовый выход  $Q = \frac{Ihv}{Pl} = 0,03$ .

### Рекомендуемая литература

1. Аксенов А.И. [и др]. Вакуумные и плазменные приборы и устройства: учебное пособие; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск: ТУСУР, 2007. - 135 с

2. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные и фотоэлектронные приборы. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

3. Жигарев А.А., Шамаева Г.Г. Электроннолучевые и фотоэлектронные приборы. – М.: Высшая школа, 1982. – 270 с.

4. Основы физики плазмы: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. - СПб.: Издательство "Лань", 2011. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/1550/>

5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 320 с..

6. Рожанский В. А. Теория плазмы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань». — 2012. — 320 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). Режим доступа <http://e.lanbook.com/view/book/2769/page1/>



7. Сушков А.Д.. Вакуумная электроника. Физико-технические основы: учебное пособие для вузов - СПб. : Лань, 2004. - 462 стр. .
8. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам: Учебное пособие. Изд. 3-е, перераб., доп.- СПб.: Лань., 2003.- 280 с
9. Щука А.А. Электроника. – СПб : ВНУ, 2005. – 800 стр.
10. Яблонский Ф.М. Средства отображения информации.- М.: Высшая школа, 1985. – 180 с.

Учебное пособие

Аксенов А.И., Злобина А.Ф.

Вакуумные и плазменные приборы и устройства

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40