

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов
И.В. Осипов
А.А. Шмидт

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания для выполнения практических работ
и самостоятельной работы для студентов технических вузов

Томск 2026

УДК 621.383.29
ББК 32.851
А42

Рецензент:

Шляхтун С.В., начальник отдела разработки и производства электронных пушек
ООО «ТЭТА»

Аксенов, Александр Иванович

А42 Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники: методические указания для выполнения практических работ и самостоятельной работы для студентов технических вузов / А.И. Аксенов, И.В. Осипов, А.А. Шмидт. – Томск: ТУСУР, 2026. – 14 с.

Представлены методические указания для выполнения практических работ и самостоятельной работы по дисциплине «Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники» для студентов технических направлений подготовки.

Авторами данных методических указаний являются профессорско-преподавательский состав кафедры электронных приборов (А.И. Аксенов и А.А. Шмидт), а также сотрудник профильного предприятия, коммерческий директор компании ТЭТА, г. Томск, И.В. Осипов.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-26 от 05.05.2026 г.

УДК 621.385

ББК 32.851

© Аксенов А. И, Осипов И.В.,
Шмидт А.А. 2026
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение	4
Раздел 1 Эмиссионная электроника	5
1.1 Содержание раздела	5
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	5
1.3 Вопросы для самопроверки	5
Раздел 2 Электронно-лучевые установки	5
2.1 Содержание раздела	5
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
2.3 Вопросы для самопроверки	6
Раздел 3 Ионно-лучевые установки	6
3.1 Содержание раздела	6
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
3.3 Вопросы для самопроверки	6
4 Практические занятия.....	7
5 Методические указания по решению задач.....	7
6 Примеры решения задач по темам	7
6.1 Эмиссионная электроника	7
6.2 Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.....	9
6.3 Отклонение луча в электроннолучевых пушках	9
6.4 Токопрохождение в электронно-лучевых пушках (ЭЛП)	10
6.5 Плазменные источники электронов.....	11
7 Рекомендации по выполнению курсовой работы	12
8 Темы для самостоятельного изучения	12
Заключение	13
Список рекомендуемой литературы	14

Введение

Целью преподавания дисциплины «Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники» является подготовка специалистов к разработке приборов и устройств вакуумной и плазменной электроники и эксплуатации их в технологических процессах производства приборов квантовой и оптической электроники.

Задачей дисциплины «Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники» является изучение формирования и транспортировки электронных и ионных пучков, а также применение электронно-ионно-плазменных устройств в технологических процессах.

Раздел 1 Эмиссионная электроника

1.1 Содержание раздела

Основы электронной теории твердого тела. Статистика электронов в твердом теле. Поверхностный потенциальный барьер. Виды эмиссии электронов из твердого тела. Термоэлектронная эмиссия металлов. Термоэлектронная эмиссия при наличии ускоряющего поля на поверхности металла. Пленочные термоэлектронные катоды. Оксидный катод и другие металлические термоэлектронные катоды. Фотоэлектронная эмиссия металлов. Фотоэлектронная эмиссия полупроводников. Эффективные фотокатоды. Отражение электронов. Закономерности вторичной электронной эмиссии. Распределение электронов по энергиям. Эффективные эмиттеры вторичных электронов Антидинаatronные покрытия. Автоэлектронная эмиссия металлов. Автоэлектронная эмиссия полупроводников. Взрывная эмиссия металлов. Взрывная эмиссия полупроводников.

1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Эмиссионная электроника» следует обратить внимание на физические процессы эмиссии электронов из нагретых твердых тел, на влияние внешнего электрического поля на эмиссию электронов из твердого тела, на процессы передачи энергии фотонами и первичными электронами электронам кристаллической решетки, на основные законы фотоэлектронной и вторичной эмиссии. А также обратить внимание на конструкции и параметры катодов, на применение их в электронных приборах.

1.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите основное уравнение термоэлектронной эмиссии.
2. Что такое проникаемость потенциального барьера?
3. Что такое эффективная работа выхода?
4. Что такое критическая напряженность электрического поля?
5. Назовите типы термокатодов.
6. Назовите параметры термокатодов.
7. Какой процесс называется фотоэлектронная эмиссия?
8. Что такое вторичная эмиссия?
9. Что такое «красная граница» фотоэффекта?
10. Что такое полный пробег электрона?
11. Опишите распределение вторичных электронов по энергиям.
12. Объясните процесс уменьшения величины потенциального барьера при наложении внешнего электрического поля.
13. Назовите характерные величины критической напряженности внешнего электрического.
14. Опишите основные конструкции катодов, а также области их применения.

Раздел 2 Электронно-лучевые установки

2.1 Содержание раздела

Электронный поток, его формирование и транспортировка, способы формирования электронных потоков различной интенсивности (электронные пушки и прожекторы), транспортировка электронного потока и способы ограничения его поперечных размеров. Управление электронными потоками. Электрические и магнитные способы управления плотностью и скоростью электронов. Основные узлы и компоновка электронно-лучевых установок. Применение электронно-лучевых установок в технологических процессах.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Электронно-лучевые установки» следует обратить внимание на способы формирования электронного потока, его параметры и примеры использования в электронных приборах, конструкции электронных пушек, взаимодействие электронного потока с твердым телом.

2.3 Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные параметры электронного потока.
2. Как влияет электрическое поле на параметры электронного потока?
3. Как влияет магнитное поле на параметры электронного потока?
4. Приведите основные конструкции электронных прожекторов.
5. Назовите основные типы и параметры электронных линз.
6. Назовите основные типы и параметры магнитных линз.
7. Назовите основные типы и параметры отклоняющих систем.
8. Приведите конструкции электроннолучевых пушек.

Раздел 3 Ионно-лучевые установки

3.1 Содержание раздела

Ионизованный газ и плазма. Типы газовых разрядов. Общие свойства плазмы. Радиус Дебая. Применение плазмы в электронике. Плазменные источники ионов газов и металлов. Плазменные источники электронов и ионов металлов. Плазменные генераторы и ускорители. Применение ионно-лучевых установок в технологических процессах.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Ионно-лучевые установки» следует обратить на типы газовых разрядов, их параметры и вольт-амперные характеристики, эмиссию заряженных частиц из плазмы, взаимодействие электрического и магнитного полей с плазмой, типы конструкции и области применения плазменных источников заряженных частиц и плазменных генераторов

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Что такое потенциал ионизации?
2. Что такое средняя длина свободного пробега заряженной частицы?
3. Назовите основные типы соударений.
4. Что такое плазма?
5. Параметры плазмы.
6. Что такое радиус Дебая?
7. Какая плазма считается квазинейтральной?
8. Назовите основные типы газовых разрядов.
9. Что такое плазменная граница?
10. Как влияет форма плазменной границы на формирование пучков заряженных частиц?

4 Практические занятия

На практических занятиях студенты приобретают навык расчета параметров вакуумных и плазменных приборов, моделирования конструкций электронных прожекторов. Студентам предлагается оценка граничных условий применения соотношений, умение составления программ для расчетов, умение сравнивать полученные результаты с аналогами и достижениями в данной области.

Перед практическими занятиями студент должен повторить лекционный материал, ответив на вопросы для самоконтроля по необходимой теме, а также просмотреть рекомендации по решению типичных задач этой темы.

Темы практических занятий

1. Эмиссионная электроника.
2. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.
3. Отклонение электронного луча в электронно-лучевых пушках.
4. Токопрохождение в электронно-лучевых пушках.
5. Плазменные источники электронов

5 Методические указания по решению задач

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

Все аналитические решения следует проводить, используя общеизвестные физические законы, физические постоянные и физические системы единиц. Сначала надо написать исходные формулы, сделать, если это необходимо, соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а затем подставить в эти формулы числовые значения и найти результат. Помните, что все физические величины в формуле должны быть в одной системе единиц. Не забывайте в ответе давать размерность полученной величины.

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

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

6 Примеры решения задач по темам

6.1 Эмиссионная электроника

Задача 1. Определить плотность тока термоэмиссии (в А/см²), если термокатод имеет эффективную работу выхода $\varphi_{\text{эфф}} = 1,5$ эВ, температура катода $T_k = 900$ К, проницаемость $D = 0,95$.

Решение. Плотность тока можно определить, используя уравнение термоэмиссии:

$$j_s = A_0 D T_k^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_{\text{эфф}}}{kT_k}\right) = 120 \cdot 0,95 \cdot 900^2 \exp\left(-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 900}\right) = 38,5 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2,$$

где $A_0 = 120$ А/см² – постоянная термоэмиссии;

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

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

Задача 2. Определить эффективную работу выхода материала термокатада $\varphi_{\text{эфф}}$, если температура катода $T_k = 900$ К, проницаемость потенциального барьера $D = 0,95$, а плотность

тока термоэмиссии $j_3 = 3,85 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$. Определить ток эмиссии термокатода, если площадь катода $S_k = 0,1 \text{ см}^2$. Постоянные смотри в задаче 1.

Решение. Ток эмиссии термокатода можно определить из уравнения:

$$j_3 \cdot S_k = 3,85 \cdot 10^3 \cdot 10^{-5} = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ А} = 38,5 \text{ мА}.$$

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

$$j_3 = A_0 D T_k^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_{\text{эфф}}}{kT_k}\right).$$

$$\text{Выразим } \varphi_{\text{эфф}} = \ln\left(\frac{A_0 D T_k^2}{j_3}\right) \cdot \frac{kT_k}{e} = \ln\left(\frac{120 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 900^2}{3,85 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 900}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,5 \text{ эВ}.$$

Задача 3. 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 $\varphi_{\text{эфф}} = 0,5 \text{ эВ}$.

Решение. Фотон с энергией $h\nu$ всю ее отдает электрону, который, выходя из кристалла, теряет энергию эффективной работы выхода $\varphi_{\text{эфф}}$. Выходя из фотокатода, электрон имеет

кинетическую энергию $\frac{mV^2}{2}$. В результате можно записать:

$$\frac{mV^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - e\varphi_{\text{эфф}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5 = 9,13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5,7 \text{ эВ},$$

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.

Задача 4. Определить плотность тока термоэмиссии (в А/м^2), если температура катода $T_k = 2000 \text{ К}$, эффективная работа выхода материала катода $\varphi_{\text{эфф}} = 2 \text{ эВ}$, проницаемость $D = 1$, а напряженность электрического поля у поверхности катода составляет $E = 8 \cdot 10^7 \text{ В/м}$.

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

$$\Delta\varphi = \frac{e^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \cdot \sqrt{E} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} \cdot \sqrt{8 \cdot 10^7} = 0,543 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,34 \text{ эВ}.$$

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

$\pi = 3,14$;

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

Для определения плотности тока термоэмиссии используем формулу Ричардсона-Дэшмана:

$$j_3 = A_0 D T_k^2 \exp\left(-\frac{e(\varphi_{\text{эфф}} - \Delta\varphi)}{kT_k}\right) = 120 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 2000^2 \exp\left(-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (2 - 0,34)}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2000}\right) = 3,24 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2,$$

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

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

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

6.2 Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях

Задача 1. Электрон прошел разность потенциалов 200 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 $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона;

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

Задача 2. Какую разность потенциалов прошел ион, имеющий массу протона, если его скорость $V = 10^6$ м/с? Ответ дать в кВ.

Решение. Из формулы $\frac{m_{pr}V^2}{2} = eU$ выразим разность потенциалов:

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

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

6.3 Отклонение луча в электроннолучевых пушках

Задача 1. В электроннолучевой пушке используется электростатическая система отклонения электронного пучка, представляющая собой две пары отклоняющих пластин. Размеры пластин по оси X: $d = 5$ мм; $l = 10$ мм; $L = 30$ см; напряжение на аноде $U_a = 3$ кВ. Определить чувствительность к отклонению (в мм/В). Какой величины сигнал подан на пластины, если на мишени луч отклонился на 2 см?

Решение. Чувствительность к отклонению можно найти из выражения:

$$\varepsilon = \frac{l \cdot L}{2U_a d} = \frac{10 \cdot 300}{2 \cdot 5 \cdot 3000} = 0,1 \text{ мм/В}.$$

Учитывая, что размерность в мм/В, все размеры подставляем в мм, а напряжение – в В. На экране луч отклонился на $l_1 = 2$ см, тогда напряжение, поданное на пластины:

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

Задача 2. В электронно-лучевой пушке используется магнитная отклоняющая система. В центре мишени видна горизонтальная линия длиной $l = 25$ см. При этом ток в катушке 50 мА, а число витков 2000 Вит. Определить чувствительность к отклонению (в мм/А·вит). Как запитаны катушки, отклоняющие по Y? Как изменится чувствительность к отклонению, если напряжение на аноде увеличить в 1,5 раза?

Решение. Чувствительность можно определить из выражения:

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

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 слабо зависит от потенциала анода.

6.4 Токопрохождение в электронно-лучевых пушках (ЭЛП)

Задача 1. В ЭЛП температура катода 2000 К, напряжение на управляющем электроде (модуляторе) $U_m = -5$ В, напряжение на ускоряющем электроде $U_{y3} = 1$ кВ, проницаемость модулятора 0,02.

Какова максимальная энергия (в эВ) электрона у катода, в плоскости модулятора, ускоряющего электрода?

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

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2000 = 4,14 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = 0,26 \text{ эВ},$$

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

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:

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

Следовательно максимальная энергия в плоскости модулятора будет равна 15 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 этого электрода. Значит энергия в плоскости ускоряющего электрода будет 1000 эВ.

Задача 2. В электронно-лучевой пушке запитаны все электроды. Для управления перемещением электронного пучка по мишени используется электростатическая отклоняющая система. На отклоняющие пластины сигналы не поданы. Что видим на экране? На пластины, отклоняющие по X, подан пилообразный сигнал, а по Y – синусоида, причем $\tau = T$, где τ – длительность пилообразного сигнала, T – период синусоиды. Что видим на экране?

Решение. Если в электроннолучевой пушке запитаны все электроды, то получен сфокусированный электронный луч. На отклоняющие пластины не поданы сигналы, значит, отклонения нет, луч находится в центре мишени. Таким образом, в центре мишени видим светящуюся точку.

Подаем напряжение на отклоняющие пластины (см. рисунок 1.1):

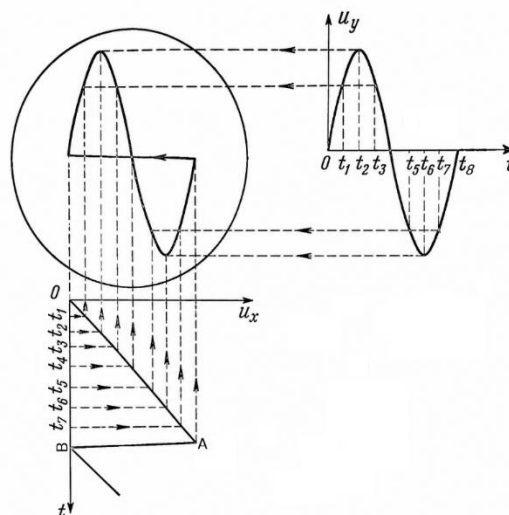


Рисунок 1.1 – Напряжения, поданные на отклоняющие пластины по осям X и Y и изображение, полученное на мишени

Рассмотрим движение электронного луча по мишени при подаче отклоняющих напряжений U_x и U_y .

На участке ОА более медленное изменение напряжения развертки U_x , оно линейно зависит от времени и под действием этого напряжения пятно перемещается по мишени вдоль оси X пропорционально времени. В тоже время под действием напряжения U_y пятно смещается вдоль оси Y на величину, пропорциональную его значению в данный момент времени. Таким образом при непрерывном одновременном изменении приложенных напряжений U_x и U_y пятно прочерчивает на мишени синусоиду.

На участке АВ напряжение развертки резко падает и пятно возвращается в исходное положение. Так как период развертки выбран кратным периоду синусоиды, то электронный луч в последующие периоды будет передвигаться по пройденной ранее траектории.

6.5 Плазменные источники электронов

Задача 1. Электрон движется в электрическом поле с напряженностью 400 В/м. При этом средняя длина свободного пробега электрона $\bar{\lambda} = 10$ см, а потенциал ионизации газа $U_i = 20$ В. Будет ли электрон ионизировать газ?

Решение. При напряженности поля 400 В/м электрон набирает энергию 400 эВ на пути 1 м. Чтобы набрать энергию 20 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 эВ и будет ионизировать газ.

Задача 2. На анод диода подано напряжение $U_a = 400$ В, расстояние между катодом и анодом $d_{\text{ка}} = 0,5$ см. Какое расстояние должен пройти электрон в ускоряющем поле анода, чтобы приобрести скорость $V = 3 \cdot 10^6$ м/с?

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

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

Зная скорость электрона, находим разность потенциалов, которую электрон пройдет, из уравнения $\frac{mV^2}{2} = eU$:

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

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

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

Скорость $3 \cdot 10^6$ м/с электрон приобретает, пройдя разность потенциалов 25,6 В. Находим расстояние, на котором электрон будет иметь энергию 25,6 эВ:

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

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

Решение. Сечение ионизации характеризует число ионизаций, совершаемых электроном на 1 м его пути. Эта величина обратно пропорциональна средней длине свободного

пробега электрона $\bar{\lambda}$.

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

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

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

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

7 Рекомендации по выполнению курсовой работы

Организация работы по курсовому проектированию со стороны студента заключается в планировании и самоконтроле выполнения курсовой работы. Для обеспечения нормальной организации работы на этапе разработки рекомендуется завести рабочую тетрадь, в которой регулярно фиксировать:

1. используемые литературные источники;
2. краткую информацию по используемым литературным источникам;
3. список задач, которые должны быть решены в процессе курсовой работы, основные вопросы, возникающие в процессе работы;
4. расчетные формулы, интересные факты, описание используемых данных.

8 Темы для самостоятельного изучения

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

5. Использование электронных потоков в приборах вакуумной электроники
6. Управление электронными потоками.
7. Ионизованный газ и плазма.
8. Основные методы генерации плазмы.
9. Типы газовых разрядов, явление переноса.

Заключение

В итоге изучения тем студент должен твердо знать ответы, как минимум, на следующие вопросы.

1. Электронная эмиссия.
2. Основы электронной теории твердого тела.
3. Термоэлектронная, автоэлектронная, взрывная, вторично-электронная, фотоэлектронная эмиссия.
4. Электронный поток.
5. Формирование и транспортировка электронных потоков.
6. Электронные пушки.
7. Примеры использования электронных пушек и прожекторов в приборах вакуумной электроники.
8. Электрические и магнитные способы управления плотностью и скоростью электронов.
9. Преобразование энергии электронного потока в другие виды энергии.
10. Ионизированный газ и плазма;
11. Основные методы генерации плазмы.
12. Типы газовых разрядов.
13. Эмиссионные свойства плазмы.

Список рекомендуемой литературы

1. Аксенов, А. И. Вакуумные и плазменные приборы и устройства : учебное пособие / А. И. Аксенов [и др.] – Томск : ТУСУР, 2007. – 135 с.
2. Берковский, А. Г. Вакуумные и фотоэлектронные приборы / А. Г. Берковский, В. А. Гаванин, И. Н. Зайдель. – Москва : Радио и связь, 1988. – 272 с.
3. Жигарев, А. А. Электроннолучевые и фотоэлектронные приборы / А. А. Жигарев, Г. Г. Шамаева. – Москва : Высшая школа, 1982. – 270 с.
4. Основы физики плазмы : учебное пособие / В. Е. Голант, А. П. Жилинский, И. Е. Сахаров. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2011. – 448 с.
5. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Москва : Наука, 1987. – 320 с.
6. Рожанский, В. А. Теория плазмы : учебное пособие / В. А. Рожанский. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2012. – 320 с.
7. Сушков, А. Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы : учебное пособие для вузов / А. Д. Сушков. – Санкт-Петербург : Лань, 2004. – 462 с.
8. Терехов, В. А. Задачник по электронным приборам : учебное пособие / В. А. Терехов. – 3-е изд., перераб., доп. – Санкт-Петербург : Лань, 1993. – 280 с.
9. Щука, А. А. Электроника / А. А. Щука. – Санкт-Петербург : ВHV, 2005. – 800 с.
10. Яблонский, Ф. М. Средства отображения информации / Ф. М. Яблонский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 180 с.