

Министерство образования и науки РФ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)
Кафедра физической электроники (ФЭ)

Смирнов С.В., Саврук Е.В.

ОСНОВЫ ФОТОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
Учебно-методическое пособие по аудиторным занятиям
и самостоятельной работе студентов для бакалавров
технических направлений специальностей

Томск, 2012

Рецензент: Шандаров С.М., доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов (ЭП)

Смирнов С.В., Саврук Е.В.

Основы фотоники и оптоэлектроники: учебно-методическое пособие по аудиторным занятиям и самостоятельной работе студентов для бакалавров технических направлений подготовки специальностей. – Томск. – 2012.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Рабочая программа по дисциплине «Основы фотоники».....	6
3. Положение о рейтинговой технологии обучения.....	8
4. Методические указания и примеры решения задач	9
5. Задания для самостоятельного решения	11
5.1. Законы излучения	11
5.2. Направленные радиационные свойства.....	12
5.3. Расчет параметров нити накала	15
5.4. Электропроводность газов	16
5.5. Расчет интерференционного фильтра на длину волны λ	17
5.6. Излучательные переходы	18
5.7. Фотопроводимость.....	19
5.8. Расчет вольтамперной характеристики диода	20
5.9. Электропроводность материалов и распределение электронов по длине образца	21
6. Варианты контрольного теста.....	23
7. Перечень вопросов к зачету и экзамену.....	30
Список литературы	31

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов технических специальностей. Целью изучения дисциплины является приобретение знаний и навыков, необходимых для проектирования, испытания и использования устройств и систем оптической электроники.

Учебно-методическое пособие содержит методические указания по решению задач, примеры заданий для самостоятельного решения, перечень вопросов контрольного теста и вопросов к зачету и экзамену по дисциплине «Основы фотоники».

2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ОСНОВЫ ФОТОНИКИ»

Цель дисциплины – приобретение знаний и навыков, необходимых для проектирования, испытания и использования устройств и систем оптической электроники.

Задачи дисциплины: изучение принципов функционирования, характеристик и номенклатуры основных элементов и узлов современной оптической и оптико-электронной аппаратуры, используемой в системах оптической электроники, практических аспектов их использования.

В результате изучения дисциплины «Основы фотоники» студент должен **знать**: актуальные проблемы и достижения современной фотоники; законы излучения; основы фотоники высоких интенсивностей; основные характеристики современных источников излучения; принципы работы и характеристики современных лазеров и усилителей света; физические эффекты, принципы, элементы и устройства для управления светом в оптических материалах и волноводных структурах; устройство, принцип действия и характеристики современных типов фотоприемных устройств фотоники;

уметь: проводить измерения и тестирование характеристик основных элементов и устройств фотоники; применять основные типы источников излучения в фотонике;

владеть: терминологией в предметной области фотоники; способами анализа эффектов взаимодействия излучения с веществом.

Изучение дисциплины «Основы фотоники» базируется на изучении таких дисциплин, как: математика, физика, химия, оптическая физика, физика твердого тела, уравнения оптофизики.

В свою очередь материал дисциплины используется при изучении таких дисциплин, как: оптическое материаловедение, основы оптоинформатики, твердотельные приборы и устройства, физические основы квантовой и оптической электроники, приборы квантовой электроники и фотоники, голограммические методы в фотонике и оптоинформатике, когерентная и нелинейная оптика, волоконная оптика, интегральная оптика.

Содержание разделов дисциплины:

2.1.1. *Законы излучения.* Закон Планка. Закон смещения Вина. Закон Стефана–Больцмана. Радиационные функции. Радиационные свойства. Интегральные радиационные свойства. Закон Кирхгофа. Монохроматические радиационные свойства. Направленные радиационные свойства. Солнечное излучение.

2.1.2. *Источники излучения. Источники некогерентного излучения.* Тепловые источники излучения. Черное тело, коэффициент теплового излучения полости. Штифт Нернста, силитовый излучатель, темные излучатели, трубчатые кварцевые излучатели. Лампы накаливания. Газоразрядные источники излучения. Виды разряда, используемые в газоразрядных источниках излуче-

ния. Дуговой разряд. Люминесцентные лампы. Различные газоразрядные источники. Газоразрядные импульсные лампы для накачки твердотельных лазеров. Источники излучения в вакуумной УФ области спектра.

2.1.3. *Светоизлучающие диоды.* Спектральные характеристики люминесцентных светодиодов. Эффективность люминесценции

2.1.4. *Источники когерентного излучения.* Молекулярные лазеры. Лазеры на CO₂. Непрерывные CO₂ лазеры. Лазеры на молекулярном азоте. Аргоновый лазер. Гелий-неоновый лазер. Лазеры на парах металлов. Твердотельные лазеры. Волоконный лазер. Химические лазеры. Лазер на красителях. Лазер на свободных электронах. Лазеры с р-п-переходами и гетеропереходами. Лазеры с перестройкой частоты

2.1.5. *Приемники излучения.* Классификация приемников излучения. Основные параметры детекторов света. Детекторы на основе фотопроводимости. Фоторезисторы. Характеристики и параметры фоторезисторов. Фотодиоды. PIN-фотодиоды. Фототранзисторы. Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта. Электровакумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители. Электронно-оптические преобразователи. Сцинтиляционные детекторы. Полупроводниковые счетчики.

2.1.6. *Солнечные элементы.* Способы концентрирования солнечного света.

2.1.7. *Приборы с зарядовой связью.* Хранение заряда. Перенос заряда и частотные свойства.

2.1.8. *Устройства управления характеристиками когерентных пучков.* Электрооптические и акустооптические световые затворы, жидкокристаллические и полупроводниковые транспаранты, устройства на основе фотопрефрактивных сред, изоляторы Фарадея.

2.1.9. *Устройства отображения информации.* Электронно-лучевые и, жидкокристаллические дисплеи, лазерные проекционные системы, голограммические дисплеи, системы формирования объемного изображения.

2.1.10. *Микроэлектромеханические устройства.* Принципы создания микроэлектромеханических устройств и фотолитография, оптические микроэлектромеханические элементы, применение микроэлектромеханических устройств.

2.1.11. *Устройства управления светом в оптических волоконных световодах.* Компоненты волоконно-оптических линий, модуляторы, мультиплексоры и демультиплексоры, изоляторы, соединители, разветвители, фокусирующие элементы.

2.1.12. *Устройства управления светом в интегральной оптике.* Планарные диэлектрические волноводы, нелинейные преобразователи излучения, канальные волноводы, элементы ввода-вывода излучения.

2.1.13. *Устройства управления светом на основе фотонных кристаллов.* Оптические цепи, оптический транзистор, микрочип, оптические ограничители, фотонно-кристаллические волокна.

3. ПОЛОЖЕНИЕ О РЕЙТИНГОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ

Таблица 3.1. Балльные оценки для элементов контроля

Элементы учебной деятельности	Всего за 5 семестр	Всего за 6 семестр
Выполнение индивидуальных заданий	30	-
Контрольная работа, тест	10	15
Выполнение практических работ	54	43
Компонент своевременности	6	12
Итого максимум за период:	100	70
Сдача экзамена (максимум)	-	30
Нарастающим итогом	100 (зачет)	100 (экзамен)

Таблица 3.2. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

Таблица 3.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов	Оценка (ECTS)
5 (отлично) (зачтено)	90 – 100	A (отлично)
4 (хорошо) (зачтено)	85 – 89	B (очень хорошо)
	75 – 84	C (хорошо)
	70 – 74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно) (зачтено)	65 – 69	
	60 – 64	E (посредственно)
2 (неудовлетворительно), (не зачтено)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

4.1. Сколько аксиальных типов колебаний может возбудиться в резонаторе рубинового лазера длиной 10 см? Ширина линии спонтанной люминесценции $\Delta\lambda = 0,6$ нм, длина волны излучения 0,69 мкм, коэффициент преломления рубина 1,76. Какова ширина резонансной линии для аксиального колебания?

$$\Delta\nu = \frac{c}{n2L} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,76 \cdot 2 \cdot 0,1} = 8,5 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

$$\Delta\nu_{\text{люм}} = \frac{c}{n\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{1,76 \cdot 0,48 \cdot 10^{-12}} 0,6 \cdot 10^{-9} = 2,13 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$$

$$N = \frac{\Delta\nu_{\text{люм}}}{\Delta\nu} = \frac{2,13 \cdot 10^{11}}{8,5 \cdot 10^8} = 0,25 \cdot 10^3 = 250$$

4.2. В резонаторе неодимового лазера возбудилось 100 аксиальных типов колебаний. Определить длину резонатора и ширину резонансной линии для аксиального колебания. Ширина линии спонтанной люминесценции $\Delta\lambda = 1$ нм, длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, коэффициент преломления стекла 1,55.

$$\Delta\nu = \frac{c}{n2L} \quad L = \frac{c}{2n\Delta\nu} \quad N = \frac{\Delta\nu_{\text{люм}}}{\Delta\nu} \quad L = \frac{cN}{2n\Delta\nu_{\text{люм}}}$$

$$\Delta\nu_{\text{люм}} = \frac{c}{n\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{1,55 \cdot 1,06 \cdot 10^{-12}} 1 \cdot 10^{-9} = 1,83 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$$

$$L = \frac{cN}{2n\Delta\nu_{\text{люм}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 100}{2 \cdot 1,55 \cdot 1,83 \cdot 10^{11}} = 53 \text{ мм}$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{n2L} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1,55 \cdot 53 \cdot 10^{-3}} = 1,8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

4.3. Определить величину ненасыщенного показателя усиления, если при прохождении активного лазерного элемента длиной 10 см интенсивность излучения возрастает в 20 раз. Отражатель не учитывать.

$$I = I_0 e^{-k_\omega z} \quad \frac{I_{10}}{I_0} = 20 = e^{10\alpha_\omega}$$

$$10\alpha_\omega = \ln 20 = 2,99 \quad \alpha_\omega = \frac{2,99}{10} = 0,3 \text{ см}^{-1}$$

4.4. Какова должна быть длина активного лазерного элемента на основе вещества с показателем поглощения $0,5 \text{ см}^{-1}$, чтобы при прохождении этого элемента интенсивность излучения возрастила в 5 раз?

$$I = I_0 e^{-k_\omega z} \quad \frac{I_5}{I_0} = 5 = e^{0,5\alpha_\omega}$$

$$5z = \ln 5 = 1,6 \quad z = 3,2 \text{ см}$$

4.5. Электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda = 1 \text{ мкм}$ мощностью 1 мВт падает на поверхность $S = 1 \text{ мм}^2$. Определить плотность потока фотонов, падающих на эту поверхность.

$$I = \frac{P}{S\hbar\omega} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{10^{-6} \cdot 1,24 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{22} = 5 \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^2 \text{с}}$$

4.6. Поток фотонов плотностью $10^{21} \text{ 1/м}^2 \text{с}$ с длиной волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ падает на поверхность $S = 1 \text{ см}^2$. Определить мощность излучения.

$$I = \frac{P}{S\hbar\omega} \quad P = IS\hbar\omega = 10^{21} \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 1,24 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,04 \text{ Вт}$$

4.7. Определить квантовую эффективность кремниевого фотодетектора, если известно, что при освещении его поверхности излучением с длиной волны 700 нм и мощностью 0,1 Вт в нем возникает фототок в 10^{-2} А .

$$\hbar\omega = \frac{1,24}{\lambda} = \frac{1,24}{0,7} = 1,78 \text{ эВ}$$

$$\eta = \frac{I_\phi / q}{P / \hbar\omega (\text{Дж})} = \frac{10^{-2}}{\frac{10^{-1}}{1,78}} = \frac{10^{-2}}{0,056} = 17,8\%$$

4.8. Определить коэффициент вывода света и критический угол θ_{kp} для светодиода на арсениде галлия. Показатель преломления арсенида галлия 3,65.

$$\theta_{kp} = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{3,65}\right) = 15,9^\circ$$

$$\eta_0 \approx \frac{1}{n(n+1)^2} = \frac{1}{3,65 \cdot (3,65+1)^2} = 0,0127$$

4.9. Определить КПД светодиода, если на нем падает напряжение 2,4 В, длина волны его излучения составляет 0,5 мкм, а внешняя квантовая эффективность составляет 30%.

$$\eta \approx \frac{\hbar\omega_{\max}}{eU_{\text{раб}}} \eta_e = \frac{1,24}{0,5 \cdot 2,5} \cdot 0,3 = 30\%$$

5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

5.1. Законы излучения

1. Предположим, что солнце ($T = 5800$ К) является черным телом. Рас-считать для него плотность потока интегрального излучения.
2. Рассчитать максимальное значение плотности монохроматического излучения черного тела для поверхности, имеющей температуру 500 К и 2500 К.
3. Вольфрамовая нить лампы имеет температуру 3500 К. Предполагая, что нить излучает как черное тело, найти, в каком соотношении распределя-ется полная энергия излучения, испускаемая нитью в ультрафиолетовой, ви-димой и инфракрасной области.
4. Рассчитать максимальное значение плотности монохроматического излучения черного тела для поверхности, имеющей температуру 300 К и 5000 К.
5. Предположим, что солнце ($T = 5800$ К) является черным телом. Рас-считать для него энергию фотонов, соответствующих длине волны, при кото-рой наблюдается максимум плотности потока интегрального излучения.
6. Определить температуру, до которой нужно нагреть черную поверх-ность, чтобы 20% её энергии приходилось на видимую область спектра.
7. Предположим, что солнце ($T = 5800$ К) является черным телом. Рас-считать для него максимум плотности потока интегрального излучения.
8. Определить температуру, до которой нужно нагреть черную поверх-ность, чтобы 40% её энергии излучения приходилось на инфракрасную об-ласть спектра.
9. Построить график плотности монохроматического потока излучения черного тела для температуры 200 К.
10. Нить лампы накаливания имеет температуру 3200 К и излучает как черное тело. Какова доля (%) энергии излучения, приходящаяся на инфра-красную область длин волн?
11. Предположим, что нить лампы ($T = 2800$ К) является черным телом. Рас-считать для неё длину волны, на которой имеет место максимум плотно-сти потока интегрального излучения.
12. Предположим, что солнце ($T = 5800$ К) является черным телом. Рас-считать для него длину волны, на которой имеет место максимум плотности потока интегрального излучения.
13. Определить длину волны, при которой достигается максимум плот-ности потока излучения черного тела для поверхности, имеющей температу-ру 5000 К.
14. Определить длину волны, при которой достигается максимум плот-ности потока излучения, для нити лампы, имеющей температуру 3800 К.

15. Предположим, что спираль лампы является черным телом. Рассчитать для него энергию фотонов, соответствующих длине волны, при которой наблюдается максимум плотности потока интегрального излучения.

5.2. Направленные радиационные свойства

1. Направленная излучательная способность окисленной меди может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,70 \cdot \cos\theta$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,5 \text{ м}^2$ при температуре 800 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

2. Поверхность имеет температуру 500 К и монохроматическую излучательную способность

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,002\lambda \cdot 10^6 - 0,01 \text{ при } 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 100 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,19 \text{ при } 100 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 200 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 200 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Определить интегральную излучательную способность поверхности.

3. Направленная излучательная способность вольфрамовой нити может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,039 \cdot \cos\theta \cdot \sin(2\theta)$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,1 \text{ м}^2$ при температуре 2800 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

4. Поверхность имеет температуру 500 К и монохроматическую излучательную способность

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,002\lambda \cdot 10^6 - 0,01 \text{ при } 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 100 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,19 \text{ при } 100 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 200 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 200 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Определить поглощательную способность поверхности, если падающее на поверхность излучение исходит от черного тела при температуре 500 К.

5. Направленная излучательная способность полированной пластины алюминия может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,04 \cdot \sin\theta$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,9 \text{ м}^2$ при температуре 520 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

6. Поверхность имеет температуру 1000 К и монохроматическую поглощающую способность

$$\alpha_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0,5(\lambda \cdot 10^6 - 0,5) \text{ при } 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0,5 \text{ при } 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0 \text{ при } 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Определить интегральную поглощающую способность поверхности, если источником падающего излучения является черное тело при температуре 5000 К.

7. Направленная излучательная способность олова может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,07 \cdot \cos^2 \theta$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,1 \text{ м}^2$ при температуре 305 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

8. Поверхность имеет температуру 1000 К и монохроматическую поглощающую способность

$$\alpha_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0,5(\lambda \cdot 10^6 - 0,5) \text{ при } 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0,5 \text{ при } 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\alpha_\lambda = 0 \text{ при } 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Определить интегральную поглощающую способность поверхности, если источником падающего излучения является черное тело при температуре 500 К.

9. Направленная излучательная способность полированного хрома может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,058 \cdot \sin(5\theta)$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,2 \text{ м}^2$ при температуре 750 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

10. Поверхность имеет температуру 500 К и монохроматическую излучательную способность

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,002\lambda \cdot 10^6 - 0,01 \text{ при } 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 100 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,19 \text{ при } 100 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda \leq 200 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 200 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Определить поглощательную способность поверхности, если падающее на поверхность излучение исходит от черного тела при температуре 1000 К.

11. Направленная излучательная способность окисленной шероховатой стали может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,94 \cdot \sin \theta$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,5 \text{ м}^2$ при температуре 760 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

12. Монохроматическая излучательная способность реальной поверхности аппроксимируется выражениями

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda < 2 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,2 \text{ при } 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} \leq \lambda < 8 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,4 \text{ при } 8 \cdot 10^{-6} \text{ м} \leq \lambda < 25 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 25 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Рассчитать интегральную излучательную способность поверхности, когда ее температура 800 К.

13. Направленная излучательная способность неполированного золота может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,47 \cdot \cos^2(2\theta)$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью $0,01 \text{ м}^2$ при температуре 370 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

14. Монохроматическая излучательная способность реальной поверхности аппроксимируется выражениями

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 0 \leq \lambda < 2 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,2 \text{ при } 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} \leq \lambda < 8 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0,4 \text{ при } 8 \cdot 10^{-6} \text{ м} \leq \lambda < 25 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$\varepsilon_\lambda = 0 \text{ при } 25 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < \infty.$$

Рассчитать интегральную поглощательную способность поверхности, когда падающее на поверхность излучение исходит от черного тела при температуре 1000 К.

15. Направленная излучательная способность окисленного гладкого железа может быть приблизительно описана выражением $\varepsilon(\theta) = 0,78 \cdot \sin(0,5\theta)$, где θ – угол, измеренный относительно нормали к поверхности. Определить количество энергии излучения, испускаемого в единицу времени поверхностью окисленной меди площадью 1 м^2 при температуре 1000 К. Определить величину полусферической излучательной способности поверхности.

16. Поверхность имеет постоянную монохроматическую поглощательную способность, равную $0,6$ в диапазоне длин волн $4 \cdot 10^{-7} \text{ м} \leq \lambda \leq 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Поглощательная способность равна нулю для всех других длин волн. Предположим, что монохроматические излучательная и поглощательная способности равны. Рассчитать интегральные поглощательную и излучательную способности, если температура поверхности 3000 К при падающем излучении от черной поверхности при 1000 К .

5.3. Расчет параметров нити накала

1. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД осмевой нити накала ($\beta = 1,08 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,05 \text{ см}$, $b_H = 1 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
2. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД молибденовой нити накала ($\beta = 1,18 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,01 \text{ см}$, $b_H = 0,1 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
3. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД молибденовой нити накала ($\beta = 1,18 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,09 \text{ см}$, $b_H = 0,2 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
4. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД серебряной нити накала ($\beta = 1,2 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,1 \text{ см}$, $b_H = 0,8 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
5. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД платиновой нити накала ($\beta = 1,25 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,03 \text{ см}$, $b_H = 0,5 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
6. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД танталовой нити накала ($\beta = 1,31 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,07 \text{ см}$, $b_H = 0,9 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
7. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД вольфрамовой нити накала ($\beta = 1,47 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,02 \text{ см}$, $b_H = 0,4 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
8. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД вольфрамовой нити накала ($\beta = 1,47 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,06 \text{ см}$, $b_H = 0,6 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.
9. Рассчитать идеальную и реальную энергетические светимости, КПД никелевой нити накала ($\beta = 1,65 \cdot 10^{-4}$), если $d_H = 0,04 \text{ см}$, $b_H = 0,7 \text{ см}$ при $\lambda_{\max} = 0,55 \text{ мкм}$.

5.4. Электропроводность газов

1. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,4$, $\alpha = 5$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

2. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 4 мм , если трубка заполнена аргоном. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $100 \text{ пар ионов / мм рт. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $4\,000 \text{ В / м·м рт. ст.}$.

3. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,018$, $\alpha = 7$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

4. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 4 мм , если трубка заполнена азотом. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $60 \text{ пар ионов / мм рт. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $10\,000 \text{ В / м·м рт. ст.}$.

5. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 2$, $\alpha = 150$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

6. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 2 мм , если трубка заполнена аргоном. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $100 \text{ пар ионов / мм рт. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $4000 \text{ В / м·м рт. ст.}$.

7. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,04$, $\alpha = 4$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

8. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 2 мм , если трубка заполнена азотом. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $60 \text{ пар ионов / мм рт. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $10\,000 \text{ В / м·м рт. ст.}$.

9. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 1$, $\alpha = 50$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

10. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 5 мм , если трубка заполнена аргоном. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $100 \text{ пар ионов / мм рт. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $4000 \text{ В / м·м рт. ст.}$.

11. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,5$, $\alpha = 10$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

12. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 5 mm , если трубка заполнена азотом. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $60 \text{ пар ионов / mm rt. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $10\,000 \text{ В / м} \cdot \text{мм rt. ст.}$

13. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,4$, $\alpha = 7$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

14. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 8 mm , если трубка заполнена аргоном. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $100 \text{ пар ионов / mm rt. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $4000 \text{ В / м} \cdot \text{мм rt. ст.}$

15. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 0,02$, $\alpha = 10$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

16. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 8 mm , если трубка заполнена азотом. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $60 \text{ пар ионов / mm rt. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $10\,000 \text{ В / м} \cdot \text{мм rt. ст.}$

17. При каком расстоянии между электродами зажигается самостоятельный разряд, если $\gamma = 3$, $\alpha = 150$? Определить анодный ток, если ток насыщения 15 nA .

18. Рассчитайте потенциал зажигания в разрядной трубке, два плоскопараллельных катода которой разделены промежутком длиной 3 mm , если трубка заполнена азотом. Отношение степени ионизации к давлению составляет для аргона $60 \text{ пар ионов / mm rt. ст. м.}$ Отношение напряженности электрического поля к давлению $10\,000 \text{ В / м} \cdot \text{мм rt. ст.}$

5.5. Расчет интерференционного фильтра на длину волны λ

1. Подберите оптимальную толщину для длины волны 1 мкм системы подложка ($\text{Ge } n = 4$) и тонкая пленка ($\text{SiO}_2 \text{ } n = 1,46$) для:

а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

2. Подберите оптимальную толщину для длины волны 2 мкм системы подложка ($\text{Si } n = 3,5$) и тонкая пленка ($\text{Ta}_2\text{O}_5 \text{ } n = 2,2$) для:

а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

3. Подберите оптимальную толщину для длины волны 3 мкм системы подложка (стекло C5-1 $n = 1,54$) и тонкая пленка ($\text{Al}_2\text{O}_3 n = 1,6$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

4. Подберите оптимальную толщину для длины волны 4 мкм системы подложка ($\text{Ge } n = 4$) и тонкая пленка ($\text{MgF}_2 n = 1,35$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

5. Подберите оптимальную толщину для длины волны 5 мкм системы подложка ($\text{Si } n = 3,5$) и тонкая пленка ($\text{ZnS } n = 2,2$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

6. Подберите оптимальную толщину для длины волны 1 мкм системы подложка ($\text{Si } n = 3,5$) и тонкая пленка ($\text{SiO}_2 n = 1,46$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

7. Подберите оптимальную толщину для длины волны 2 мкм системы подложка (стекло C5-1 $n = 1,54$) и тонкая пленка ($\text{Ta}_2\text{O}_5 n = 2,2$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

8. Подберите оптимальную толщину для длины волны 3 мкм системы подложка ($\text{Ge } n = 4$) и тонкая пленка ($\text{Al}_2\text{O}_3 n = 1,6$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

9. Подберите оптимальную толщину для длины волны 4 мкм системы подложка (стекло C5-1 $n = 1,54$) и тонкая пленка ($\text{MgF}_2 n = 1,35$) для:

- а) однослойного фильтра; б) двухслойного фильтра.

Сравнить полученные результаты.

5.6. Излучательные переходы

1. Имеется $p-n$ переход Si ($E_g = 1,08 \text{ эВ}$) диаметром 1 мм. Концентрация $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 В. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 4,6 \text{ ч}$, $\tau' = 2500 \text{ мкс}$).

2. Имеется $p-n$ переход Ge ($E_g = 0,66 \text{ эВ}$) диаметром 1 мм. Концентрация $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 В. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 0,61 \text{ с}$, $\tau' = 150 \text{ мкс}$).

3. Имеется $p-n$ переход GaAs ($E_g = 1,45 \text{ эВ}$) диаметром 1 мм. Концентрация $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 В. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 0,2 \text{ с}$, $\tau' = 2000 \text{ мкс}$).

4. Имеется $p-n$ переход InAs ($E_g = 0,31 \text{ эВ}$) диаметром 1 мм. Концентрация $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 В. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 15 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,24 \text{ мкс}$).

5. Имеется *p-n* переход *InSb* ($E_g = 0,18 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 0,62 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,12 \text{ мкс}$).

6. Имеется *p-n* переход *PbS* ($E_g = 0,41 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 15 \text{ мкс}$, $\tau' = 2500 \text{ мкс}$).

7. Имеется *p-n* переход *PbTe* ($E_g = 0,32 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 2,4 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,19 \text{ мкс}$).

8. Имеется *p-n* переход *GaP* ($E_g = 2,25 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 1 \text{ с}$, $\tau' = 3000 \text{ мкс}$).

9. Имеется *p-n* переход *GaSb* ($E_g = 0,71 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 0,009 \text{ с}$, $\tau' = 0,37 \text{ мкс}$).

10. Имеется *p-n* переход *InAs* ($E_g = 0,31 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 15 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,24 \text{ мкс}$).

11. Имеется *p-n* переход *InSb* ($E_g = 0,18 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 0,62 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,12 \text{ мкс}$).

12. Имеется *p-n* переход *PbS* ($E_g = 0,41 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 15 \text{ мкс}$, $\tau' = 2500 \text{ мкс}$).

13. Имеется *p-n* переход *PbTe* ($E_g = 0,32 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 2,4 \text{ мкс}$, $\tau' = 0,19 \text{ мкс}$).

14. Имеется *p-n* переход *GaP* ($E_g = 2,25 \text{ эВ}$) диаметром 1 *мм*. Концентрация $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Прямое смещение 0,1 *В*. Найти мощность излучения ($\tau_{собсм} = 1 \text{ с}$, $\tau' = 3000 \text{ мкс}$).

5.7. Фотопроводимость

1. Полупроводник Si собственной проводимости толщиной 100 *мкм* светом с длиной волны 1 *мкм* с плотностью мощности 1 *Bm/cm²*. Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ К}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

2. Полупроводник GaAs собственной проводимости толщиной 200 *мкм* светом с длиной волны 0,63 *мкм* с плотностью мощности 1 *Bm/cm²*. Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ К}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

3. Полупроводник Si собственной проводимости толщиной 300 *мкм* светом с длиной волны 1 *мкм* с плотностью энергии 1 *Дж/см²*. Найти фотопро-

водимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

4. Полупроводник GaAs собственной проводимости толщиной 100 мкм светом с длиной волны $0,63 \text{ мкм}$ с плотностью энергии 1 Дж/см^2 . Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

5. Полупроводник Ge собственной проводимости толщиной 200 мкм светом с длиной волны 1 мкм с плотностью энергии 1 Дж/см^2 . Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

6. Полупроводник Si собственной проводимости толщиной 200 мкм светом с длиной волны $0,52 \text{ мкм}$ с плотностью мощности 1 Вт/см^2 . Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

7. Полупроводник Ge собственной проводимости толщиной 300 мкм светом с длиной волны 1 мкм с плотностью мощности 1 Вт/см^2 . Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

8. Полупроводник GaAs собственной проводимости толщиной 300 мкм светом с длиной волны $0,308 \text{ мкм}$ с плотностью мощности 1 Вт/см^2 . Найти фотопроводимость при $T = 300 \text{ K}$. Определить изменение электропроводности во времени и распределение неравновесных носителей по толщине.

5.8. Расчет вольтамперной характеристики диода

1. Имеется *Ge* диод сечением $1 \times 1 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

2. Имеется *GaAs* диод диаметром $0,5 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

3. Имеется *Si* диод диаметром 2 мм . Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

4. Имеется *GaAs* диод сечением $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

5. Имеется *Si* диод диаметром $0,5 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

6. Имеется *Ge* диод диаметром 1 мм . Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

7. Имеется *Si* диод диаметром 1 мм . Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

8. Имеется *GaAs* диод сечением $2 \times 2 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

9. Имеется *Ge* диод сечением $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

10. Имеется *Si* диод диаметром 1 мм. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

11. Имеется *GaAs* диод сечением 2x2 мм. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

12. Имеется *Ge* диод сечением 0,5x0,5 мм. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

13. Имеется *Ge* диод сечением 1x1 мм. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

14. Имеется *GaAs* диод диаметром 0,5 мм. Определить вольтамперную характеристику диода, если $T = 300 \text{ K}$, $N_D = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

5.9. Электропроводность материалов и распределение электронов по длине образца

1. Совершенный кристалл *GaAs* собственной проводимости площадью 1x1x0,1 см³ освещается с одной стороны при 300 К фотонами с длиной волны 0,8 мкм и плотностью потока 1 Дж/см². Найдите концентрацию носителей заряда. Во сколько раз увеличится электропроводность арсенида галлия, если квантовая эффективность преобразования одного фотона в электронно-дырочную пару равна 0,85.

2. Совершенный кристалл германия толщиной в 1 мм освещается при 300 К фотонами с длиной волны 1 мкм. ($\alpha=10 \text{ cm}^{-1}$). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет 1 Дж/см². Найдите концентрацию в неосвещенном и освещенном кристалле. Во сколько раз увеличится электропроводность германия, если квантовая эффективность преобразования одного фотона в одну электронно-дырочную пару равна 0,65.

3. Кристалл кремния легированный фосфором $N_d=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ толщиной в 1 мм освещается при 300 К фотонами с энергией 0,2 эВ ($\alpha=10 \text{ cm}^{-1}$). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет 1 Дж/см². Найдите концентрацию в освещенном и неосвещенном кристалле. Во сколько раз увеличится электропроводность кремния, если квантовая эффективность преобразования равна 1.

4. В прямоугольный образец германия длиной 10 см легированный се-
рой $N_d=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ при 300К инжектируются электроны $\Delta n=10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Найдите распределение электронов по длине образца.

5. Имеется однородная пластина кремния n-типа легированная фосфором с $N_d=2,25 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Вычислите термодинамически равновесные концентрации n_0 p_0 . Вычислите концентрации неравновесных носителей, если образец облучается потоком поток фотонов 10^{20} фотон/с с длиной волны 10 мкм при 300К. Определите уровень инжеекции.

6. Легированный бором $N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ кристалл *Si* толщиной в 1 мм освещается при 300К фотонами с энергией 0,2 эВ. Поток света составляет 10^{20} фотон/с². Определите концентрацию носителей заряда при 300К. Во сколь-

ко раз увеличится электропроводность кремния при 300К с освещением и без освещения.

7. В прямоугольный образец кремния длиной 10 см легированный фосфором $N_d=10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 300К инжектируются электроны $\Delta n=10^{12} \text{ см}^{-3}$. Найдите распределение электронов по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте плотность диффузационного тока.

8. В прямоугольный образец германия длиной 10 см легированный селем при 300К инжектируются электроны $\Delta n=10^{12} \text{ см}^{-3}$. Найдите исходную концентрацию примеси, если концентрация неравновесных носителей уменьшается в e раз на расстоянии 10^{-4} см. Найдите распределение электронов по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте плотность диффузационного тока.

9. В прямоугольный образец кремния длиной 10 см легированный бором при 300К инжектируются дырки $\Delta p=10^{13} \text{ см}^{-3}$. Найдите исходную концентрацию примеси, если концентрация неравновесных носителей уменьшается в e раз на расстоянии 10^{-3} см. Найдите распределение дырок по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте плотность диффузационного тока.

10. В прямоугольный образец арсенида галлия длиной 10 см легированный кремнием при 300К инжектируются электроны $\Delta n=10^{14} \text{ см}^{-3}$. Найдите исходную концентрацию примеси, если концентрация неравновесных носителей уменьшается в e раз на расстоянии 10^{-5} см. Найдите распределение электронов по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте плотность диффузационного тока.

11. В прямоугольный образец кремния собственной проводимости длиной 10 см при 300К инжектируются электроны и дырки $\Delta p=\Delta n=10^{15} \text{ см}^{-3}$. Найдите распределение электронов и дырок по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте суммарную плотность диффузационного тока.

12. В прямоугольный образец германия собственной проводимости длиной 10 см при 300К инжектируются электроны и дырки $\Delta p=\Delta n=10^{13} \text{ см}^{-3}$. Найдите распределение электронов и дырок по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте суммарную плотность диффузационного тока.

13. В прямоугольный образец арсенида галлия собственной проводимости длиной 10 см при 300К инжектируются электроны и дырки $\Delta p=\Delta n=10^{14} \text{ см}^{-3}$. Найдите распределение электронов и дырок по длине образца. Определите градиент концентраций и рассчитайте суммарную плотность диффузационного тока.

14. В прямоугольный образец германия длиной 10 см легированный селем $N_d=10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 300К инжектируются электроны $\Delta n=10^{12} \text{ см}^{-3}$. Найдите распределение электронов по длине образца.

6. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОГО ТЕСТА

Вариант 1

1. Каким образом формулируется закон Планка?

- | | |
|---|--|
| a) $\lambda_{\max} T = 2,898 \cdot 10^{-3}$ мК; | б) $E_b(T) = C_1 / [\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda T) - 1];$ |
| в) $E_b(T) = \sigma T^4;$ | г) $\varepsilon = E(T) / \sigma T^4.$ |

2. Какие характеристики описывают радиационные свойства материалов?

- а) Показатель преломления, показатель поглощения, коэффициент отражения;
- б) Коэффициент поглощения, коэффициент экстинции, коэффициент пропускания;
- в) Коэффициент поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, отражательная способность;
- г) Радиационная стойкость, доза облучения.

3. Что такое светимость?

- | | |
|-------------------------------------|--|
| а) $M = \Phi / S;$ | б) $I = d\Phi / d\omega;$ |
| в) $L = I / (dS \cdot \cos\alpha);$ | г) $\Phi = (K_\lambda)_{\max} \Phi_\lambda V_\lambda.$ |

4. Какие источники имеют сплошной спектр излучения?

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| а) Люминесцентные лампы; | б) Лампы накаливания; |
| в) Газоразрядные лампы; | г) Ртутные лампы ВД; |
| д) Галогенные лампы; | е) Полупроводниковые светодиоды. |

5. Где используется явление инжеクции неравновесных носителей?

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| а) В газоразрядных лампах; | б) В излучающих диодах; |
| в) В полупроводниковых лазерах; | г) В фотосопротивлениях; |
| д) В солнечных батареях; | е) В ФЭУ. |

6. Что используется для накачки излучения в лазерах на азоте?

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| а) Газоразрядные лампы; | б) Электронный пучок; |
| в) Тлеющий разряд; | г) Дуговой разряд; |
| д) Химическая реакция. | |

Вариант 2

1. Каким образом формулируется закон Стефана-Больцмана?

- | | |
|---|--|
| а) $\lambda_{\max} T = 2,898 \cdot 10^{-3}$ мК; | б) $E_b(T) = C_1 / [\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda T) - 1];$ |
| в) $E_b(T) = \sigma T^4;$ | г) $\varepsilon_i = E(T) / \sigma T^4 = \alpha_i.$ |

2. Какие характеристики описывают прозрачность материалов?

- a) Показатель преломления, показатель поглощения, коэффициент отражения;
 - б) Коэффициент поглощения, коэффициент экстинции, коэффициент пропускания;
 - в) Коэффициент поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, отражательная способность;
 - г) Радиационная стойкость, доза облучения.

3. Что такое световой поток?

4. Какие источники обладают монохроматическим излучением?

- а) Люминесцентные лампы;
б) Натриевые лампы;
в) Газоразрядные лампы;
г) Ртутные лампы ВД;
д) Галогенные лампы;
е) Солнечное излучение.

5. Где используется излучательная рекомбинация неравновесных носителей?

- а) В газоразрядных лампах;
б) В излучающих диодах;
в) В полупроводниковых лазерах;
г) В фотосопротивлениях;
д) В солнечных батареях;
е) В ФЭУ.

6. Что используется для накачки излучения в лазерах на алюминиевом гранате?

- а) Газоразрядные лампы;
б) Электронный пучок;
в) Тлеющий разряд;
г) Дуговой разряд;
д) Химическая реакция.

Вариант 3

1. Каким образом формулируется закон Кирхгофа?

- $$\begin{aligned} \text{a)} \lambda_{\max} T &= 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}; & \text{б)} E_b(T) &= C_1 / [\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda T) - 1]; \\ \text{в)} E_b(T) &= \sigma T^4; & \text{г)} \varepsilon_i &= E(T) / \sigma T^4 = \alpha_i. \end{aligned}$$

2. Какие характеристики описывают монохроматические радиационные свойства материалов?

- а) Показатель преломления, показатель поглощения, коэффициент отражения;
 - б) Коэффициент поглощения, коэффициент экстинции, коэффициент пропускания;
 - в) Коэффициент поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, отражательная способность;
 - г) Радиационная стойкость, доза облучения.

3. Что такое яркость источника?

- | | |
|--------------------------------------|---|
| a) $M = \Phi / S$; | б) $I = d\Phi / d\omega$; |
| в) $L = I / (dS \cdot \cos\alpha)$; | г) $\Phi = (K_\lambda)_{\max} \Phi_\lambda V_\lambda$. |

4. Какие источники имеют сплошной спектр излучения?

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| а) Люминесцентные лампы; | б) Натриевые лампы; |
| в) Газоразрядные лампы; | г) Ртутные лампы ВД; |
| д) Галогенные лампы; | е) Солнечное излучение. |

5. В каких приборах используется внешний фотоэффект?

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| а) В газоразрядных лампах; | б) В излучающих диодах; |
| в) В полупроводниковых лазерах; | г) В фотосопротивлениях; |
| д) В солнечных батареях; | е) В ФЭУ. |

6. Что используется для накачки излучения в He Ne лазерах?

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| а) Газоразрядные лампы; | б) Электронный пучок; |
| в) Тлеющий разряд; | г) Дуговой разряд; |
| д) Химическая реакция. | |

Вариант 4

1. Что используется для накачки излучения в лазерах на углекислом газе?

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| а) Газоразрядные лампы; | б) Электронный пучок; |
| в) Тлеющий разряд; | г) Дуговой разряд; |
| д) Химическая реакция. | |

2. Какие устройства используются для управления спектром излучения?

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| а) Призма Николя; | б) Акустооптический модулятор; |
| в) Интерферометр Фабри-Перо; | г) Дифракционная решетка; |
| д) Четвертьволновая пластина; | е) Эшелон Майкельсона. |

3. Как определяется величина обратного тока в светодиоде?

- | | |
|--|------------------------------|
| а) $I = I_S[\exp(eV / rT) - 1]$; | б) $I = \exp(eV / rT) - 1$; |
| в) $I = e n_i^2 A (D_n / (N_a L_n) + D_p / (N_d L_p))$; | г) $I = V / R$; |
| д) $I = A \sigma \bar{E}$. | |

4. В каких из указанных лазеров используется фотолюминесценция?

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| а) Рубиновый; | б) Аргоновый; |
| в) На парах меди; | г) Полупроводниковый; |
| д) На свободных электронах; | е) На иттрий-алюминиевом гранате. |

5. Что такое солнечная постоянная?

- а) Поток энергии излучения солнца;
 б) Средняя плотность энергии излучения на поверхности земли;
 в) Средняя плотность энергии излучения на внешней границе земной атмосферы;
 г) Количество энергии солнечного излучения приходящегося на 1 m^2 поверхности земли в сутки;
 д) Поток излучения солнца в видимой области спектра.

6. Какие газы используются для наполнения ламп накачки лазеров?

- | | |
|--------------|--------------------|
| а) Кислород; | б) Аргон; |
| в) Ксенон; | г) Криптон; |
| д) Неон; | г) Оксид углерода. |

Вариант 5

1. Какие устройства используются для управления частотой следования импульсов излучения?

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| а) Призма Николя; | б) Акустооптический модулятор; |
| в) Интерферометр Фабри-Перо; | г) Дифракционная решетка; |
| д) Четвертьволновая пластина; | е) Эшелон Майкельсона. |

2. Что используется для накачки излучения в газо-динамических лазерах на углекислом газе?

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| а) Газоразрядные лампы; | б) Электронный пучок; |
| в) Тлеющий разряд; | г) Дуговой разряд; |
| д) Химическая реакция. | |

3. Как определяется величина прямого тока в полупроводниковом лазере?

- | | |
|--|-----------------------------|
| а) $I = I_s[\exp(eV / rT) - 1];$ | б) $I = \exp(eV / rT) - 1;$ |
| в) $I = en_i^2 A (D_n / (N_a L_n) + D_p / (N_d L_p));$ | г) $I = V / R;$ |
| д) $I = A\sigma\bar{E}.$ | |

4. Что такое светимость?

- | | |
|-------------------------------------|--|
| а) $M = \Phi / S;$ | б) $I = d\Phi / d\omega;$ |
| в) $L = I / (dS \cdot \cos\alpha);$ | г) $\Phi = (K_\lambda)_{\max} \Phi_\lambda V_\lambda.$ |

5. Какие источники имеют сплошной спектр излучения?

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| а) Люминесцентные лампы; | б) Лампы накаливания; |
| в) Газоразрядные лампы; | г) Ртутные лампы ВД; |
| д) Галогенные лампы. | |

6. Где не используется явление инжекции неравновесных носителей?

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| а) В газоразрядных лампах; | б) В излучающих диодах; |
|----------------------------|-------------------------|

- в) В полупроводниковых лазерах; г) В фотосопротивлениях;
 д) В солнечных батареях; е) В ФЭУ.

Вариант 6

1. Как определяется КПД излучения в *p-n* переходе?

- а) $\eta = A\sigma E U$; б) $\eta = 1 / (1 + \tau_n / \tau_{bh})$;
 в) $\eta = I_n / I_p \cdot 100\%$; г) $\eta = [\exp(eV / kT) - 1] \cdot 100\%$.

2. Какие источники имеют когерентное излучение?

- а) Люминесцентные лампы; б) Лампы накаливания;
 в) Газовые лазеры; г) Полупроводниковые светодиоды;
 д) Галогенные лампы; е) Лазеры на красителях.

3. Какие источники имеют спектр излучения приближенный к солнечному излучению?

- а) Люминесцентные лампы; б) Лампы накаливания;
 в) Газоразрядные лампы; г) Ртутные лампы ВД;
 д) Галогенные лампы; е) Глобар.

4. С помощью какого закона возможно определить спектр излучения солнца?

- а) Закон Бугера-Ламберта; б) Закон Кирхгофа;
 в) Закон Вина; г) Закон Планка;
 д) Закон Стефана-Больцмана.

5. С помощью каких устройств возможно зарегистрировать инфракрасное излучение?

- а) Фотоумножителя; б) Фотодиода;
 в) Охлаждаемого фоторезистора; г) Болометра;
 д) Пиропрепемника.

6. Что используется для накачки излучения в лазерах на красителях?

- а) Газоразрядные лампы; б) Электронный пучок;
 в) Тлеющий разряд; г) Лазерное излучение;
 д) Химическая реакция.

Вариант 7

1. Что используется для накачки излучения в лазерах на аргоне?

- а) Газоразрядные лампы; б) Электронный пучок;
 в) Тлеющий разряд; г) Лазерное излучение;
 д) Химическая реакция.

2. Какие устройства используются для управления состоянием поляризации излучения?

- а) Призма Николя;
- б) Акустооптический модулятор;
- в) Интерферометр Фабри-Перо;
- г) Дифракционная решетка;
- д) Четвертьволновая пластина;
- е) Эшелон Майкельсона.

3. Как определяется величина прямого тока в светодиоде?

- а) $I = I_s[\exp(eV / kT) - 1]$;
- б) $I = \exp(eV / kT) - 1$;
- в) $I = e n_i^2 A (D_n / (N_a L_n) + D_p / (N_d L_p))$;
- г) $I = V / R$;
- д) $I = A \sigma E$.

4. Как определяется КПД излучения в *p-n* переходе?

- а) $\eta = A \sigma E U$;
- б) $\eta = 1 / (1 + \tau_n / \tau_{bh})$;
- в) $\eta = I_n / I_p \cdot 100\%$;
- г) $\eta = [\exp(eV / kT) - 1] \cdot 100\%$.

5. Какие источники имеют спектр излучения, приближенный к излучению абсолютно-черного тела?

- а) Люминесцентные лампы;
- б) Лампы накаливания;
- в) Газоразрядные лампы;
- г) Ртутные лампы ВД;
- д) Галогенные лампы;
- е) Глобар.

6. Какие из указанных лазеров инжекционные?

- а) Рубиновый;
- б) Аргоновый;
- в) На парах меди;
- г) Полупроводниковый;
- д) На свободных электронах;
- е) На иттрий-алюминиевом гранате.

Вариант 8

1. Какие устройства используются для управления длительностью и мощностью излучения?

- а) Призма Николя;
- б) Акустооптический модулятор;
- в) Интерферометр Фабри-Перо;
- г) Дифракционная решетка;
- д) Четвертьволновая пластина;
- е) Эшелон Майкельсона.

2. Что используется для накачки излучения в полупроводниковых лазерах?

- а) Газоразрядные лампы;
- б) Электронный пучок;
- в) Тлеющий разряд;
- г) Лазерное излучение;
- д) Химическая реакция.

3. Как определяется величина обратного тока в светодиоде?

- а) $I = I_s[\exp(eV / kT) - 1]$;
- б) $I = \exp(eV / kT) - 1$;
- в) $I = e n_i^2 A (D_n / (N_a L_n) + D_p / (N_d L_p))$;
- г) $I = V / R$;
- д) $I = A \sigma E$.

4. Какие газы используются для наполнения галогенных ламп?

- | | |
|--------------|-------------|
| а) Кислород; | б) Аргон; |
| в) Ксенон; | г) Криптон; |
| д) Неон; | е) Йод. |

5. Каким образом формулируется закон смещения Вина?

- | | |
|--|---|
| а) $\lambda_{\max}T = 2,898 \cdot 10^{-3}$ мК; | б) $E_b(T) = C_1 / [\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda T) - 1]$; |
| в) $E_b(T) = \sigma T^4$; | г) $\epsilon_i = E(T) / \sigma T^4 = \alpha_i$. |

6. Что такое светимость?

- | | |
|--------------------------------------|---|
| а) $M = \Phi / S$; | б) $I = d\Phi / d\omega$; |
| в) $L = I / (dS \cdot \cos\alpha)$; | г) $\Phi = (K_\lambda)_{\max} \Phi_\lambda V_\lambda$. |

Вариант 9

1. Каким образом формулируется закон смещения Вина?

- | | |
|--|---|
| а) $\lambda_{\max}T = 2,898 \cdot 10^{-3}$ мК; | б) $E_b(T) = C_1 / [\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda T) - 1]$; |
| в) $E_b(T) = \sigma T^4$; | г) $\epsilon_i = E(T) / \sigma T^4 = \alpha_i$. |

2. Какие характеристики описывают оптические свойства материалов?

- а) Показатель преломления, показатель поглощения, коэффициент отражения;
 б) Коэффициент поглощения, коэффициент экстинции, коэффициент пропускания;
 в) Коэффициент поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, отражательная способность;
 г) Радиационная стойкость, доза облучения.

3. Что такое сила света?

- | | |
|--------------------------------------|---|
| а) $M = \Phi / S$; | б) $I = d\Phi / d\omega$; |
| в) $L = I / (dS \cdot \cos\alpha)$; | г) $\Phi = (K_\lambda)_{\max} \Phi_\lambda V_\lambda$. |

4. Какие источники имеют линейчатый спектр излучения?

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| а) Люминесцентные лампы; | б) Лампы накаливания; |
| в) Газоразрядные лампы; | г) Ртутные лампы ВД; |
| д) Галогенные лампы; | е) Полупроводниковые лазеры. |

5. Где не используется явление инжеクции неравновесных носителей?

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| а) В газоразрядных лампах; | б) В излучающих диодах; |
| в) В полупроводниковых лазерах; | г) В фотосопротивлениях; |
| д) В солнечных батареях; | е) В ФЭУ. |

7. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЗАЧЕТУ И ЭКЗАМЕНУ

1. Законы излучения (закон Вина, закон Планка, закон Стефана-Больцмана).
2. Радиационные свойства (интегральные, монохроматические, направленные свойства, закон Кирхгофа).
3. Тепловые источники излучения.
4. Источники света непрерывного спектра (лампы накаливания).
5. Газоразрядные источники излучения.
6. Источники излучения в вакуумной УФ области спектра.
7. Светоизлучающие диоды.
8. Молекулярные лазеры.
9. Твердотельные лазеры.
10. Лазеры с р-п-переходами и гетеропереходами.
11. Классификация приемников излучения. Основные параметры детекторов света.
12. Фоторезисторы. Характеристики и параметры фоторезисторов.
13. Фотодиоды. PIN-фотодиоды.
14. Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта.
15. Приборы с зарядовой связью.
16. Солнечные элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Смирнов С.В. Основы фотоники. Источники и приемники оптического излучения: Учебное пособие. – Томск, 2009. – 179 с.
2. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. – 1-е изд. – Изд-во «Лань», 2011. – 528 стр. – [электронный ресурс]. – http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=684
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – 5-е изд. – Изд-во «Лань», 2008. – 480 с. – [электронный ресурс]. – http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=173

Дополнительная литература

1. Наноструктуры в электронике и фотонике: пер. с англ. / ред. Ф. Рахман; пер. Ю.А. Заболотная; ред. пер. Е.Л. Свинцов. – М.: Техносфера, 2010. – 343 с. (1)
2. Нанотехнологии в электронике: Монография / Н.И. Боргардт [и др.]; ред. Ю.А. Чаплыгин; Московский государственный институт электронной техники. – М.: Техносфера, 2005. – 446 с. (20)
3. Розеншер Э. Оптоэлектроника: Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер; ред. пер. О.Н. Ермаков. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с. (40)
4. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов [и др.]. – 4-е изд. – Изд во «Лань», 2008. – 448 с. – [электронный ресурс]. – http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=147