

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника»
для студентов направления подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль)

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

Содержание

1.	Предисловие	3
2.	Учебно-тематический план	4
3.	Лабораторная работа № 1 Техника безопасности	5
4.	Лабораторная работа №2 Гелий-неоновый лазер	8
5.	Лабораторная работа № 3 Твердотельный лазер с оптической накачкой	20
6.	Лабораторная работа №4 Изучение параметров светодиодов	32
7.	Лабораторная работа №5. Исследование полупроводниковых приемников излучения	54
8.	Список литературы	65

Предисловие

Методические рекомендации составлены в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего профессионального образования и программой дисциплины «Квантовая и оптическая электроника».

В методических рекомендациях дано описание к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника», включающие в себя исследование газовых и твердотельных лазеров, изучение характеристик светодиодов и полупроводниковых приемников излучения. Материал изложен в объеме, необходимом студентам специальности 11.03.04 по направлению подготовки «Электроника и нанoeлектроника».

Учебно-тематический план

№ Темы	Наименование работы	Объем часов	Форма проведения
	<u>5 семестр</u>		
1	Техника безопасности	2	Заседание научной лаборатории
2	Гелий-неоновый лазер и принцип его работы	4	Заседание научной лаборатории
3	Твердотельный лазер с оптической накачкой	4	
4	Изучение параметров светодиодов	4	
5	Параметры полупроводниковых приемников излучения	3	
	<u>Итого за 5 семестр</u>	<u>16</u>	
	<u>Итого</u>	<u>16</u>	

Лабораторная работа № 1 Техника безопасности

Цель и содержание: Освоить правила безопасной работы с источниками лазерного излучения при выполнении учебного практикума. Ознакомиться с правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей.

Теоретическое обоснование:

Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей

РАЗДЕЛ Б1

Область и порядок применения правил

Б1.1.1. Настоящие Правила распространяются на персонал, обслуживающий действующие электроустановки, производящий в них оперативные переключения, выполняющий и организующий ремонтные, монтажные, наладочные работы или испытания

Б1.1.2. Требования настоящих Правил являются обязательными. Отступлений от них не допускается. Каждый работник, если он сам не может принять меры к устранению нарушений Правил, обязан немедленно сообщить своему непосредственному, а в случае его отсутствия – вышестоящему руководителю о всех замеченных им нарушениях Правил, а также о неисправностях оборудования и применяемых при работах машин, механизмов, приспособлений, инструмента и средств защиты, представляющих опасность для людей.

Б1.1.6. При несчастных случаях с людьми снятие напряжения для освобождения пострадавшего от воздействия электрического тока должно быть произведено немедленно без предварительного разрешения.

Б1.1.7. Запрещается выполнение распоряжений и заданий, противоречащих требованиям настоящих Правил

РАЗДЕЛ Б2

Глава Б2.2 Организационные мероприятия, обеспечивающие безопасность работ

Б2.2.1. Организационными мероприятиями, обеспечивающими безопасность работы в электроустановках, являются:

- а) оформление работы нарядом-допуском, распоряжением или перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации;
- б) допуск к работам;
- в) надзор во время работы;
- г) оформление перерыва в работе, переводов на другое рабочее место, окончания работы.

Наряд, распоряжение, текущая эксплуатация

Б2.2.5. Распоряжение – это задание на производство работы, определяющее ее содержание, место, время, меры безопасности (если они требуются) и лиц, которым поручено ее выполнение. Распоряжение может быть передано непосредственно или с помощью средств связи с последующей записью в оперативном журнале. Распоряжение имеет разовый характер; срок его действия зависит от продолжительности рабочего дня исполнителей. Лица, ответственные за безопасность работ, их права и обязанности.

Б2.2.7. Ответственными за безопасность работ являются

- а) лицо, выдающее наряд, отдающее распоряжение;
- б) допускающий – ответственное лицо из оперативного персонала;
- в) ответственный, руководитель работ (далее ответственный руководитель);
- г) производитель работ;
- д) наблюдающий;
- е) члены бригады.

Безопасность при работе с лазерным излучением.

Все работы, проводимые с источниками лазерного излучения, должны выполняться в соответствии с ГОСТ 12.1.040-83, группа Т58.

Воздействие лазерного излучения на биологические системы

Луч лазера, работающего в видимом диапазоне, проходя и фокусируясь на сетчатке глаза, может вызвать ее разрушение. При интенсивности $0,07 \text{ Дж/см}^2$ происходит отслоение сетчатки глаза. Механизм повреждения глаза является чисто тепловым, т.е. повреждение есть результат нагрева тканей.

Уровень повреждения кожи лазерным излучением выше, чем уровень повреждения глаза. Механизм повреждения кожи чисто тепловой. Особенно опасны CO_2 лазеры, излучение которых сильно поглощается кожей.

Мощные твердотельные лазеры кроме ожогов кожи способны вызывать поражение органов, находящихся в глубине под кожей.

Контрольные вопросы и защита работы:

1. Что понимают под поглощаемой и биологической дозами? В каких единицах они измеряются?
2. Что понимают под ионизирующим действием облучения, в каких единицах измеряются дозы ионизирующего облучения?
3. Чему равна предельно допустимая доза облучения?
4. Назовите меры, обеспечивающие работу, безопасную от воздействия электрического тока и рентгеновского излучения?
5. Каков порядок допуска к работе в электроустановках?
6. Каков порядок действий при поражении человека электрическим током?
7. Назовите ответственного за безопасность производимых работ в данной лаборатории?

Лабораторная работа №2 Гелий-неоновый лазер

Цель работы – исследование некоторых характеристик излучения гелий-неонового лазера.

Краткая теория

В начале семидесятых годов был создан принципиально новый вид источников электромагнитного излучения оптического диапазона – лазеры. Характерными особенностями излучения лазеров являются: когерентность (временная и пространственная); монохроматичность (степень монохроматичности $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-10}$); направленность (угол расходимости $\sim 10^{-3}$ рад).

Излучение всех иных источников – ламп накаливания, газоразрядных ламп, электрических дуг – некогерентно, распределено по всему спектру и ненаправлено.

В лазерах, как и в других источниках, свет излучается возбужденными атомами или молекулами. Особенности излучения лазеров – концентрация основной части излучаемой энергии в узком спектральном интервале и малом телесном угле – обусловлено тем, что в лазерах излучение происходит при вынужденных (индуцированных), а не спонтанных переходах. Это определило и само название таких источников – лазер (laser - аббревиатура: light amplification stimulated emission (of) radiation).

Напомним о различии двух механизмов излучения кванта возбужденным атомом. При спонтанном переходе, происходящем самопроизвольно, фаза и направление излучения произвольны. Вероятность спонтанного перехода определяется только индивидуальными свойствами атома, она обратно пропорциональна среднему времени жизни атома в возбужденном состоянии τ . Вынужденное (стимулированное) излучение вызывается воздействием на возбужденный атом электромагнитного поля квантов с энергией перехода. При этом атом излучает квант, тождественный кванту, обусловившему переход. Вероятность вынужденного перехода зависит не только от свойств атома, но и от интенсивности воздействия поля,

обусловившего стимулированный переход, а именно – от объемной плотности излучения на частоте перехода.

Количественно это различие можно описать следующим образом: число квантов, излученных за секунду n_k возбужденными атомами в результате спонтанных переходов между уровнями W_k и W_i , равно:
$$n_{\text{кв. спонт.}} = A_{ki} \cdot n_k.$$

Число квантов, излученных в результате вынужденных переходов, определяется следующим соотношением: $n_{\text{кв. вын.}} = B_{ki} \cdot n_k \cdot \rho_{ki}$. Здесь ρ_{ki} - так называемая спектральная плотность энергетической мощности, величина, характеризующая число квантов $h\nu_{ki}$, которые, воздействуя на возбужденные атомы, могут вызвать переходы, A_{ki} , B_{ki} - коэффициенты Эйнштейна.

Принцип устройства и работы лазера.

Наиболее коротко лазер можно определить как объем активного вещества, заключенный в оптическом резонаторе. Под активным веществом (активной средой) понимают вещество, атомы или молекулы которого путем подвода энергии (накачки) поддерживаются в таком возбужденном состоянии, когда населенность верхнего рабочего уровня выше нижнего. Это так называемая инверсная населенность. Световой сигнал, распространяясь в среде с инверсной населенностью, усиливается за счет вынужденных переходов. При этом сохраняются частота, фаза и направление распространения сигнала.

Оптический резонатор в простейшем случае представляет собой систему из двух параллельных зеркал. Одно из зеркал изготовляют с максимально возможным коэффициентом отражения, другое делают частично-прозрачным, через него выходит генерируемое излучение.

Такой резонатор называется открытым – боковые стенки у него отсутствуют. В открытом резонаторе энергия накапливается только в виде стоячих волн, распространяющихся вдоль (или под очень малым углом) оси прибора.

Основные условия возможности возникновения генерации.

Изменение интенсивности потока излучения при распространении в среде определяется зависимостью $I = I_0 \cdot e^{x l}$, где I - путь, пройденный излучением, x - коэффициент поглощения. Рассмотрим распространение потока излучения на частоте ν_{ki} ($h\nu_{ki} = W_k - W_i$) в среде, содержащей в единице объема n_k атомов в энергетическом состоянии W_k и n_i , атомов в состоянии W_i .

Ослабление потока обусловлено поглощением квантов атомами в нижнем энергетическом состоянии. Схематически запишем этот процесс так:

$A(W_i) + h\nu_{ki} \rightarrow A(W_k)$, где $A(W_i)$ и $A(W_k)$ обозначают атом в соответствующем энергетическом состоянии.

Вероятность процесса поглощения равна $B_{ki} \cdot \rho_{ki}$. Единственный процесс, ведущий к усилению потока, - это индуцированное излучение: $A(W_k) + h\nu_{ki} \rightarrow A(W_i) + 2h\nu_{ki}$.

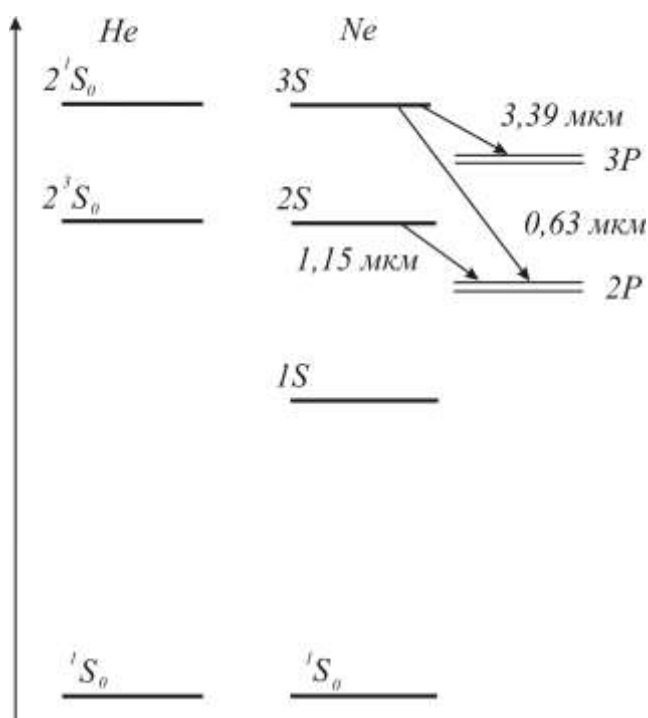
При достаточно высоком значении спектральной плотности энергетической мощности ρ_{ki} спонтанным излучением ($A(W_k) \rightarrow A(W_i) + h\nu_{ki}$) можно пренебречь, оно приведет к слабому некогерентному, немонахроматическому излучению через боковые «стенки» резонатора. В этих условиях $x = \frac{1}{c} h\nu_{ki} \cdot B_{ki} \cdot (n_k - n_i)$. Обычно $n_k < n_i$, $x < 0$, и поток ослабляется.

Усиление потока возможно только при наличии инверсной населенности, когда $n_k > n_i$; тогда $x > 0$. Итак для работы лазера необходимы два условия:

- наличие инверсной населенности рабочих уровней $n_k > n_i$, при $W_k > W_i$;
- большая вероятность вынужденных переходов, чем спонтанных: $B_{ki} \cdot \rho_{ki} > A_{ki}$. Это достигается накоплением энергии в резонаторе.

Гелий-неоновый лазер.

При выполнении данной работы используется лазер на смеси инертных



газов гелия и неона. Рабочим газом является неон, т.е. генерация обусловлена излучением атомов неона. Гелий играет вспомогательную роль, он необходим для создания инверсной населенности рабочих уровней неона. Смесь газов заключена в запаянной длинной узкой трубке, ограниченной с торцов окнами, наклоненными к оси трубки под углом Брюстера. Для возбуждения

газов используется разряд постоянного тока, создаваемый между впаянными в трубку электродами – накаливаемым катодом и анодом. Зеркала резонатора размещены вне разрядной трубки.

На рис.1 приведена в упрощенном виде схема нижних уровней гелия и неона. Стрелками обозначены переходы, на которых возможна генерация; жирными линиями обозначены группы близких уровней.

Разумеется, генерации соответствует переход между отдельными уровнями, а не группами. Так, например, генерации на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ соответствует переход $3S_2 \rightarrow 2P_4$. Но, чтобы не усложнять сущности процессов спектроскопической терминологией, мы и дальше будем пользоваться обозначениями, введенными на рис.1.

Как видно из схемы, генерация возможна на трех переходах. Наибольшая мощность (сотни милливатт) достигается при генерации на длине волны $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ (переход $3S \rightarrow 3P$), меньшая – при переходе $2S \rightarrow 2P$ ($\lambda = 1,15 \text{ мкм}$). Наиболее слабой является генерация на переходе $3S \rightarrow 2P$ с излучением красной линии $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$.

Создание инверсной населенности в He-Ne лазере. Уточним термин «населенность энергетического уровня». Проведем мысленную «рассортировку» n_0 атомов рабочего вещества, объединяя в одну группу атомы, находящиеся в одинаковом энергетическом состоянии. Так как нас интересуют оптические процессы, при которых кинетическая энергия атомов и энергия их внутренних электронов не меняется, то мы будем различать энергетические состояния атомов по положению их внешних (оптических) электронов.

Пусть n_k - концентрация атомов в энергетическом состоянии W_k (т.е. число атомов в единице объема, оптический электрон которых находится на уровне W_k). Эта величина называется населенностью уровня W_k . Зависимость отношения n_k/n_0 от энергии называется функцией распределения атомов по энергетическим состояниям. Для вещества, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, эта зависимость описывается законом Больцмана: $n_k = n_0 \exp\left(-\frac{W_k}{kT}\right)$, где k – постоянная Больцмана; T – температура (см.рис.2).

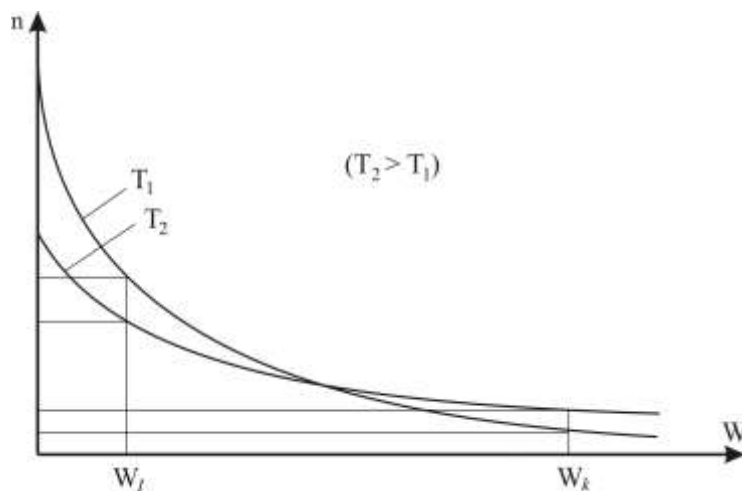
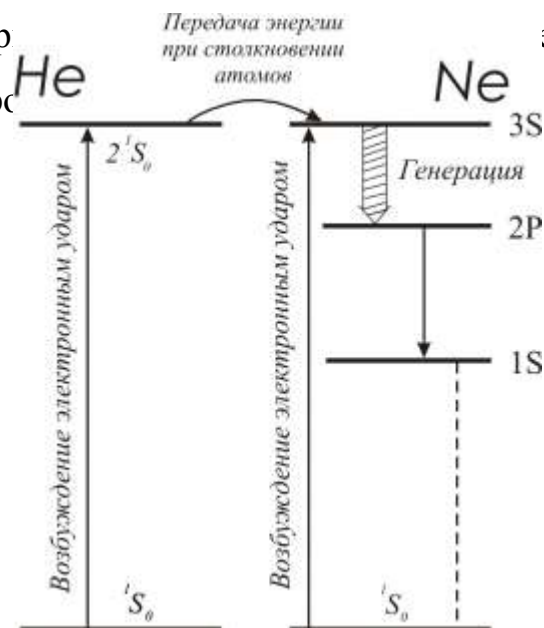


Рис. 2

На рисунке приведен вид распределения Больцмана для двух температур T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$). Хотя повышение температуры (или силы тока в разряде) увеличивает абсолютное значение населенности верхнего уровня, в

условиях тер
чем выше урс



згда $n_k < n_i$, если $W_k > W_i$, т.е.

Рис. 3

Как отмечалось выше, для усиления светового сигнала средой необходима инверсная населенность рабочих уровней, т.е. такое состояние, когда $n_k > n_i$, при $W_k > W_i$. Создать условия, при которых будут инверсно населены все уровни, невозможно. Формально, математически, это соответствует отрицательной абсолютной температуре $T < 0$; $\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) > 0$.

Практически задача заключается в создании инверсной населенности верхнего рабочего уровня относительно нижнего. Для этого необходимо обеспечить достаточно высокую скорость заселения верхнего и опустошение нижнего уровней.

Ознакомимся с механизмом возникновения инверсной населенности уровней неона $3S$ относительно $2P$, которые являются рабочими уровнями при генерации линии $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ (рис.3).

Два процесса, протекающие при разряде в He-Ne смеси, обеспечивают нужную скорость заселения уровня $3S$ неона:

1) возбуждение электронным ударом: $\text{Ne}(^1S_0) + e \rightarrow \text{Ne}(3S)$, (но одного этого процесса мало, он идет во всех неоновых лампах);

2) резонансная передача энергии возбужденными атомами гелия атомам неона при их столкновении: $\text{He}(2^1S) + \text{Ne}(^1S_0) \rightarrow \text{Ne}(3S) + \text{He}(^1S_0)$.

Этот процесс играет решающую роль. Он возможен в силу двух обстоятельств:

а) уровень $\text{He}(2^1\text{S})$ почти совпадает по энергии с уровнем $\text{Ne}(3\text{S})$, поэтому говорят о резонансной передаче энергии;

б) уровень 2^1S гелия обладает очень большим временем жизни $\tau \approx 10^{-3} \text{ с}$. Такие долгоживущие состояния называются метастабильными. Благодаря большому времени жизни и при надлежащем подборе давлений в смеси ($P_{\text{He}} : P_{\text{Ne}} = 5:1$) атомы гелия, возбужденные в состоянии 2^1S электронным ударом, успевают отдать энергию атома неона, прежде чем потеряют ее иным путем (например, при ударах о стенки)

Опустошение нижнего рабочего уровня 2P со скоростью, необходимой для работы лазера, сопряжено с некоторыми трудностями. Дело в том, что процесс идет не непосредственно ($2\text{P} \rightarrow 1\text{S}^0$), а в две ступени ($2\text{P} \rightarrow 1\text{S}$ и затем $1\text{S} \rightarrow 1\text{S}^0$) через долгоживущий уровень 1S . Оптический переход $1\text{S} \rightarrow 1\text{S}^0$ запрещен, и разрушение состояния 1S в основном идет при ударах возбужденных атомов о стенки разрядной трубки. Поэтому для He-Ne лазеров используют трубки малого диаметра. Накапливание атомов в состоянии 1S опасно тем, что при больших плотностях разрядного тока приводит к возбуждению электронным ударом уровня 2P , что ведет к срыву генерации: $\text{Ne}(1\text{S}) + e \rightarrow \text{Ne}(2\text{P})$. Этим же ограничено использование разрядного тока большой силы.

Оптический резонатор лазера. Его назначение и основные характеристики.

Основное назначение оптического резонатора состоит в создании условий, при которых вынужденное излучение вдоль оси прибора становится вероятнее, чем некогерентное, беспорядочно направленное, спонтанное. Резонатор, в основном, определяет свойства выходного излучения: его когерентность, монохроматичность и направленность. Высокая степень монохроматичности свойственна только генерации лазера. Спонтанное

излучение, выходящее через боковые поверхности резонатора, содержит все длины волн спектра неона. В этом можно убедиться, наблюдая спектр излучения, выходящего через боковую стенку разрядной трубки лазера. Такие наблюдения могут быть проведены в ходе выполнения лабораторной работы.

Подсчитаем изменение числа квантов в излучении на частоте генерации ν_r , распространяющемся в активной среде, заключенной в резонаторе. Обозначим n_3 и n_2 - концентрации атомов неона в состоянии 3S и 2P; $A_{3,2}$; $B_{3,2}$, β – коэффициенты Эйнштейна для перехода $\text{Ne}(3S) \leftrightarrow \text{Ne}(2P)$.

1. Число квантов, поглощенных в единицу времени, пропорционально n_2 - концентрации атомов в нижнем состоянии 2P и ρ_r - плотности фотонов $h\nu_r$ в потоке. (Точное наименование величины ρ_r - спектральная плотность мощности). Этот процесс ослабляет поток: $-n_{\text{кв.погл.}} = B_{2,3}$

Схематически обозначим этот процесс так: $\text{Ne}(2P) + h\nu_r \rightarrow \text{Ne}(3S)$

2. Число квантов излученных спонтанно в единицу времени, выразится следующим образом: $n_{\text{кв.спонт.}} = A_{3,2} \cdot n_3$

Схематически: $\text{Ne}(3S) \rightarrow \text{Ne}(2P) + (h\nu_r)_{\text{спонт.}}$

Хотя по энергии $h\nu_r \equiv (h\nu_r)_{\text{спонт.}}$, эти кванты, как говорилось выше, не усилят поток (некогерентны, равномерно распределены по направлениям).

3. Число квантов, излученных при вынужденных переходах за единицу времени, равно $n_{\text{кв.инд}} = B_{3,2} \cdot n_3 \cdot \rho_r$. Схематически: $\text{Ne}(3S) + h\nu_r \rightarrow \text{Ne}(2P) + 2h\nu_r$

Это единственный процесс, приводящий к усилению потока с сохранением когерентности и направленности.

Необходимое для работы лазера условие преобладания вынужденного излучения над спонтанным сводится к требованию: $B_{3,2} \cdot \rho_r \gg A_{3,2}$

Так как коэффициенты Эйнштейна являются константами перехода, такое условие может быть выполнено только за счет увеличения плотности излучения ρ_r . Именно это и происходит в резонаторе. Фотоны $h\nu_r$ до выхода

из резонатора многократно отражаются от ограничивающих его зеркал, многократно проходят активную его среду, растет вероятность их встречи с возбужденным атомом $\text{Ne}(3S)$, сопровождающийся вынужденным переходом $\text{Ne}(3S) \rightarrow \text{Ne}(2P)$. Излученные кванты добавляются к потоку, его интенсивность лавинно растет и достигает значения, достаточного для возникновения генерации. Заметим, что резонатор усиливает только излучение, распространяющееся под малым углом к его оси. Другие фотоны покидают резонатор, пройдя малый путь и почти не вызывая вынужденных переходов.

Направленность (расходимость) излучения лазера характеризуется телесным углом ω , в пределах которого распространяется большая часть излучения. Можно использовать плоский угол θ , получаемый при сечении телесного угла ω плоскостью, проходящей через ось симметрии.

Эти углы связаны соотношением $\omega \approx \frac{\pi}{4} \theta$. Как уже говорилось, направленность лазерного излучения обусловлена свойствами индуцированных переходов к тем, что в открытом резонаторе могут накапливаться только волны, распространяющиеся вдоль оси прибора или под очень малым углом к ней. Расходимость лазерного излучения в основном определяется дифракцией на выходном окне. Направление на первый минимум при дифракции на круглом отверстии диаметра D определяется соотношением $\theta_{\text{пред.}} \approx \lambda/2D$.

За предельно достижимое значение угла расхождения принимает ширину дифракционного максимума на уровне половины интенсивности

Поляризация излучения лазера. Поляризация излучения *He-Ne* лазера возникает в результате многократного прохождения излучением окон разрядной трубки, установленных по отношению к падающим лучам под углом Брюстера (рис.4). Как известно, при этом отраженный луч полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной падению, т.е. $E_{||} = 0$, а $E_{\perp} = \text{max}$, прошедший луч частично поляризован в плоскости падения ($E_{||} > E_{\perp}$). При

многократном прохождении окон степень поляризации излучения растет. Кроме того, в результате вынужденных переходов усиливается излучение с преимущественным направлением поляризации. В результате из *He-Ne* лазера выходит плоскополяризованное излучение.

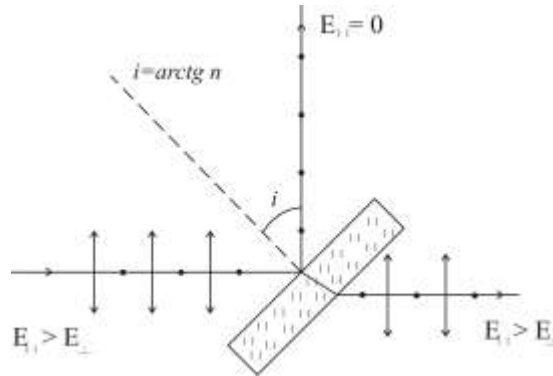


Рис. 4

Некоторые энергетические характеристики лазера. Обозначим W^+ энергию, добавляющуюся к потоку на рабочей частоте за один проход активной среды. Энергию, теряемую за один проход на все виды потерь, обозначим W^- . Очевидно, что генерация возможна только при условии $W^+ - W^- > 0$. Энергия $W^+ - W^-$ - это та часть энергии, излученной за один проход на частоте генерации, которую можно вывести из резонатора, не снижая допустимого предела значения объемной плотности излучения ρ_r . Коэффициент полезного действия лазера определяется отношением мощности выводимого излучения W_u к мощности накачки W_n : $\eta = \frac{W_u}{W_n}$.

КПД лазера тем больше, чем меньше в нем потери. Кроме потерь в резонаторе, характеризующих его добротностью, имеют место потери на поглощение в окнах и зеркалах, на дифракцию. Кроме этого, необходимо учесть, что не вся энергия, затраченная на возбуждение верхнего рабочего уровня, идет на генерацию. Энергия перехода с нижнего рабочего уровня в нормальное состояние расходуется бесполезно. Иногда величину отношения энергии рабочего перехода к энергии верхнего рабочего уровня называют

КПД перехода. Эта величина мала у лазеров на атомных переходах: она значительно больше у молекулярных и твердых лазеров.

Для оценки энергетических потерь, вносимых резонатором, вводится понятие добротности. Добротность определяется формулой $Q = 2\pi\nu_r \cdot \frac{W_p}{W_n}$ где W_p - энергия, запасенная в резонаторе, W_n - потери энергии за секунду. Чем лучше резонатор, тем выше его добротность.

Приборы и оборудование.

Гелий-неоновый лазер, анализатор, приемник излучения с регистрирующим прибором.

В работе исследуются следующие параметры *He-Ne* лазера:

1) спектральный состав излучения лазера, включая спонтанное и вынужденное излучение; 2) распределение энергии по сечению пучка.

По данным о распределении энергии в пучке вычисляется расходимость излучения. Установка состоит из лазера и оптической скамьи, на которой размещены диспергирующий элемент (монокроматор) и приемник излучения, соединенный с измерительным трактом.

Порядок выполнения работы.

Для вычисления расходимости необходимо исследование распределения интенсивности выполнить в двух сечениях пучка, удаленных от выходного окна лазера на расстояние $l_1 = 0.2 \text{ м}$ и $l_2 \approx 1 \text{ м}$.

При измерении определяют положение экрана, относительно лазера d , и соответствующие им значения эффективного диаметра пучка лазера. Исходя из этих данных вычисляется значения угла расходимости лазерного луча.

По этим данным строят на одном графике зависимости от смещения датчика, измеренного по микрометру для расстояний l_1 и l_2 так, чтобы точки максимумов совпадали.

Обозначим D_1 и D_2 значения ширины максимума при $I_d/I_{\max} = 0,5$. Тогда плоский угол расхождения пучка определяется по формуле: $\theta = \arctg \frac{D_2 - D_1}{l_2 - l_1}$.

В отчете приводятся графики спектрального распределения вынужденного и спонтанного излучения. Оценивается погрешность. Приводятся результаты качественного сравнения спектра излучения в направлении, перпендикулярном оси разрядной трубки лазера. (Оптическая схема – на установке).

Контрольные вопросы.

1. Чем отличается излучение лазеров от излучения других оптических источников? Чем обусловлено это различие?
2. Что такое населенность энергетического уровня? Какая зависимость населенности от энергии соответствует термодинамическому равновесию?
3. Что такое инверсная населенность, как она создается в He-Ne лазере? Какие особенности энергетических состояний атомов He и Ne делают возможным создание инверсной населенности?
4. Зачем нужен резонатор? Как влияет геометрия резонатора на спектр излучения?
5. Чем отличается излучение лазера в направлении оси резонатора и в направлении, перпендикулярном оси?
6. Чем обусловлена поляризация лазерного излучения?

Лабораторная работа № 3 Твердотельный лазер с оптической накачкой

Цель работы.

1.1. Знакомство с принципом действия и устройством твердотельных лазеров и определение их основных характеристик.

1.2. Приобретение практических навыков юстировки лазеров и работы с электронной измерительной аппаратурой лазерной техники.

Краткая теория

2. Основные понятия о предмете исследования.

В лазерах используются три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы поглощения, спонтанного и вынужденного излучения квантов света.

1. Спонтанное излучение (рис. 1а). Атом или молекула, находящиеся первоначально в возбужденном состоянии, самопроизвольно, без внешнего воздействия, испускает электромагнитную волну в течении времени, называемым временем жизни данного состояния. При этом направления распространения, фазы и поляризации волн, излученных разными атомами определяется случайными процессами и не зависят друг от друга. Спектральный состав излучения, спонтанно испускаемого совокупностью атомов или молекул, совпадает с спектральным составом излучения отдельного атома. Вероятность dP_{21}^{sp}/dt спонтанного излучения фотона с энергией $h\nu = E_2 - E_1$, (т.е. число фотонов, испущенных в единицу времени), является константой, определяемой строением атома (или молекулы), но не зависит от внешнего по отношению к атому поля излучения:

$$dP_{21}^{sp}/dt = A_{21} \quad (1)$$

Эта константа, обозначенная как A_{21} , называется коэффициентом Эйнштейна для спонтанного излучения или вероятностью спонтанного перехода.

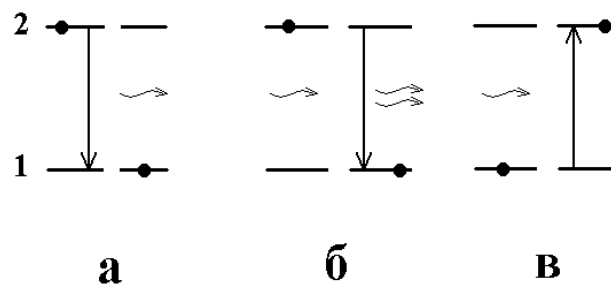


Рис.1. Схематическое представление процессов испускания и поглощения:

- а) спонтанное излучение;
- б) вынужденное излучение;
- в) поглощение

2. Вынужденное излучение (рис.1б). Процесс излучения инициируется падающей электромагнитной волной, и поэтому излучение любой молекулы добавляется к этой волне с той же фазой. Направление испущенной волны совпадает с направлением падающей волны. Вероятность вынужденного излучения dP_{21}/dt пропорциональна спектральной плотности энергии поля излучения в падающей волне $\rho(\nu)$:

$$dP_{21}/dt = B_{21} \rho(\nu). \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности B_{21} называется коэффициентом Эйнштейна для вынужденного излучения.

3. Поглощение (рис. 1в). Падающий фотон поглощается, вызывая переход атома в возбужденное состояние. Вероятность поглощения dP_{12}/dt можно записать аналогично (2) в виде

$$dP_{12}/dt = B_{12} \rho(\nu). \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности B_{12} называется коэффициентом Эйнштейна для поглощения. Между коэффициентами Эйнштейна A_{21} , B_{21} и B_{12} существует связь:

$$B_{12} = g_2 B_{21} / g_1, \quad (4)$$

$$A_{21} = (8\pi h \nu^3 / c^3) B_{21},$$

где g_1 , g_2 - кратности вырождения уровней 1 и 2, h - постоянная Планка, ν - частота излучения, c - скорость света.

4. Основные элементы и принцип работы лазера

Лазер, по существу, состоит из трех компонент (рис.2):

1. Активная среда, которая усиливает падающую электромагнитную волну;
2. Система накачки, которая селективно накачивает активную среду (т. е. передает ей энергию), так чтобы заселить выбранные уровни и достичь инверсной заселенности;
3. Оптический резонатор, состоящий из двух расположенных параллельно зеркал M_1 и M_2 с коэффициентами отражения R_1 и R_2 , обеспечивающий многократное прохождение усиливаемым излучением активной среды.

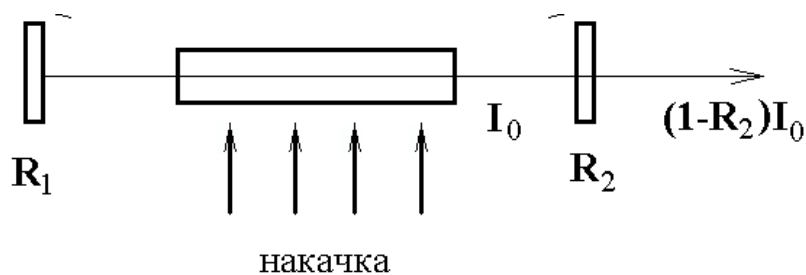


Рис.2. Схематическое изображение устройства лазера.

Система накачки создает распределение населенностей в лазерной среде, существенно отличающееся от больцмановского распределения, существующего при тепловом равновесии. При достаточно большой мощности накачки населенность $N(E_2)$ одного из возбужденных уровней E_2 может превысить населенность более низкого энергетического уровня E_1 (Рис. 3). Такое соотношение населенностей называется инверсией населенностей. При этом мощность индуцированного излучения $N_2 B_{21} \rho(\nu)$ на переходе $2 \rightarrow 1$ превышает поглощенную мощность $N_1 B_{12} \rho(\nu)$, и электромагнитная волна, проходя через такую среду, усиливается. Активная среда, таким образом, может служить усилителем светового излучения. Используя положительную обратную связь, т.е. подавая усиленное излучения снова на вход усиливающей среды, можно превратить усилитель в генератор светового излучения. Обычно обратная связь обеспечивается размещением активной среды между двумя зеркалами с высоким коэффициентом отражения. Свет, распространяющийся в направлении, перпендикулярном обоим зеркалам, будет поочередно отражаться от них и усиливаться при каждом прохождении через активную среду. Если одно из зеркал сделать частично прозрачным, то часть излучения будет выходить из резонатора, образуя выходной пучок.

Генерация становится возможной при выполнении определенного порогового условия, когда усиление в среде компенсирует потери в ней. Если

потери в резонаторе определяются только пропусканием зеркал, то порог генерации достигается при превышении критического значения разности населенностей $\Delta N_{кр}$, которое определяется соотношением:

$$\Delta N_{кр} = -\ln(R_1 R_2)/2\sigma L, \quad (5)$$

где L - длина активной среды, R_1 и R_2 - коэффициенты отражения зеркал, σ - сечение поглощения на переходе 1 - 2. Если разность населенностей ΔN больше, чем $\Delta N_{кр}$, то волна, распространяющаяся между зеркалами, будет усиливаться. В качестве затравочного сигнала при генерации служит спонтанное излучение возбужденных атомов в активной среде.

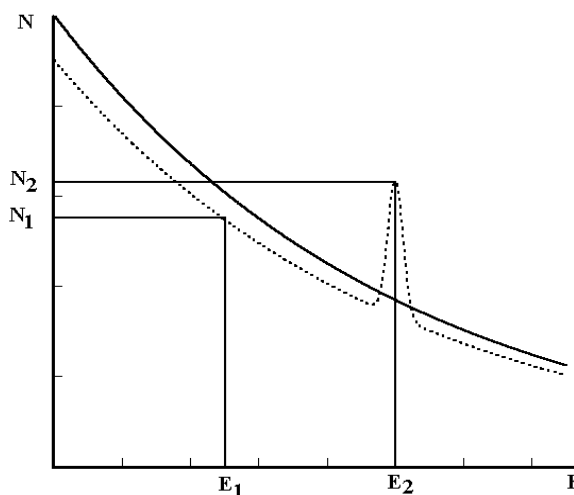


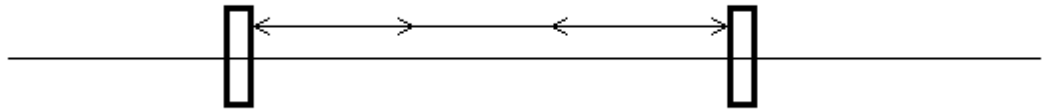
Рис. 3. Возникновение инверсии на фоне больцмановского распределения населенностей.

Возбуждение активной среды с целью достижения инверсии населенностей может осуществляться разными способами: с помощью интенсивного облучения некогерентным светом импульсных или

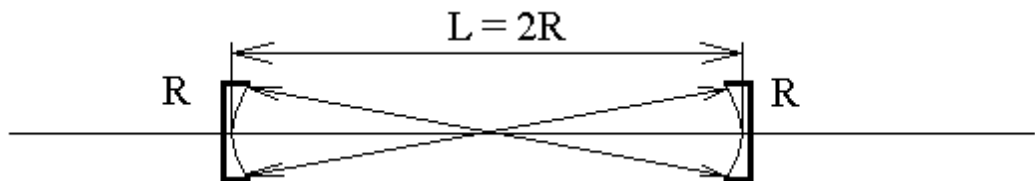
непрерывных дуговых ламп, при помощи электрического разряда в активной среде и другими способами.

5. Типы резонаторов

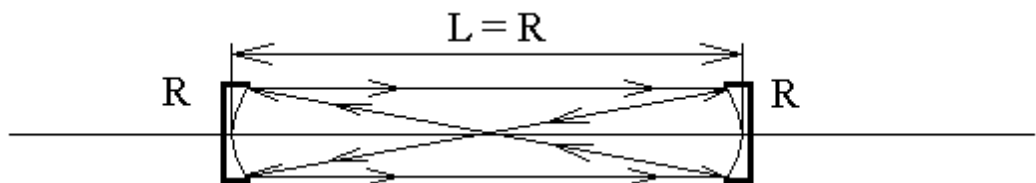
а. Плоскопараллельный резонатор.



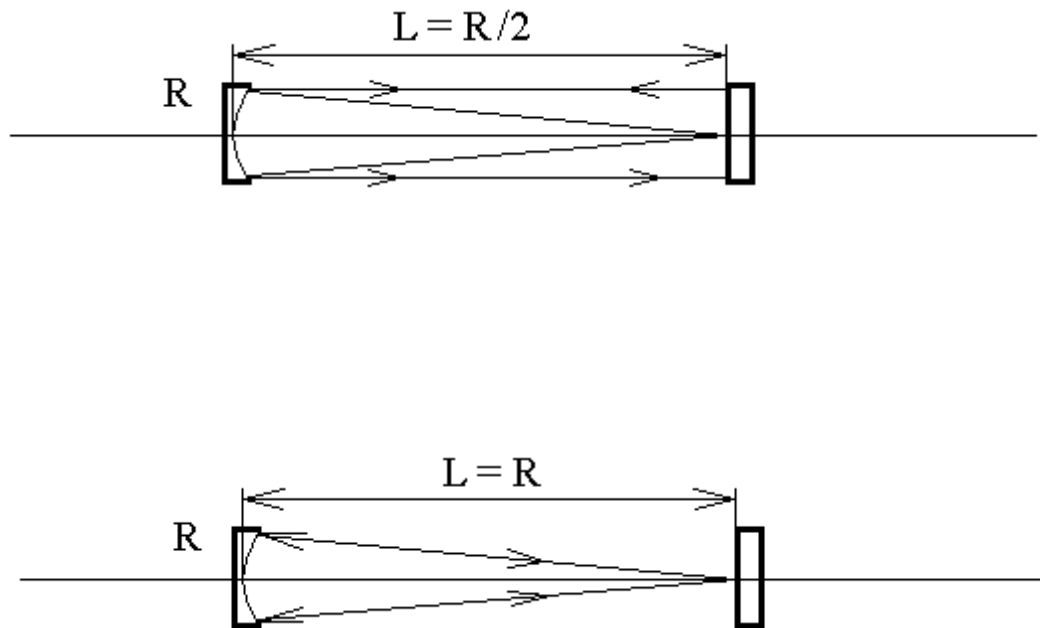
б. Концентрический (сферический) резонатор.



в. Конфокальный резонатор.



г. Полуконфокальный резонатор.



д. Полусферический резонатор.

Для импульсных твердотельных лазеров чаще всего используются плоскопараллельные резонаторы. Поле излучения в резонаторе лазера не является плоской волной. Такая волна могла бы существовать лишь в резонаторе с бесконечно большим диаметром зеркал и активной среды. В лазере с конечными размерами зеркал и активной среды плоская волна не образует стоячей волны, и следовательно, не может существовать. В результате многократных проходов излучением резонатора в нем образуется стоячая волна со стационарным, воспроизводимым от прохода к проходу пространственным распределением электромагнитного поля, которое можно описать суперпозицией плоских волн. Такая стоячая волна называется модой электромагнитных колебаний. Низшая мода резонатора, т.н. TEM_{00} -мода, имеет однородное, затухающее к краям пространственное распределение интенсивности в поперечном сечении. Высшие моды, TEM_{mn} , где $m, n > 0$ - индексы моды, имеют поперечное сечение в виде системы светлых пятен, разделенных темными узловыми линиями (Рис. 5).

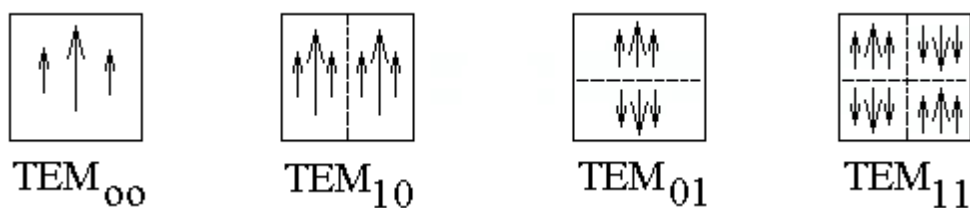


Рис.5. Поперечная структура некоторых мод низших порядков.

6. Режим свободной генерации твердотельного лазера

Лазеры могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. При импульсном режиме работы возбуждение осуществляется мощным импульсом энергии, вводимым в среду в течение короткого времени. Мощность импульсного возбуждения при этом достигает величин, которые были бы невозможны при непрерывном возбуждении вследствие разрушения среды и источника накачки. Поэтому в импульсном режиме проще достичь порога генерации и проще получить высокое усиление, чем в непрерывном режиме. Энергия, запасенная в лазере за время действия импульса накачки, выделяется в виде импульса света, длительность которого, как правило, совпадает с длительностью импульса накачки, если не принимать специальных мер по управлению длительностью. В этом случае генерация лазера называется свободной. Наиболее распространенным источником для накачки импульсных твердотельных лазеров являются импульсные лампы. Длительность импульса накачки определяется параметрами источника питания и разрядной цепи и для лазеров на ионах неодима составляет величину порядка сотен микросекунд. Такова же длительность огибающей импульса генерации.

7. $\text{Nd}^{+3}:\text{YAG}$ – лазеры

В $\text{Nd}^{+3}:\text{YAG}$ – лазерах роль активного элемента играет кристалл $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, в котором небольшая часть ионов Y^{+3} замещена ионами Nd^{+3} . Неодимовые лазеры могут генерировать на нескольких линиях (0.91; 1.06; 1.34 и 1.9 мкм). **Самая сильная из них имеет длину волны излучения 1.06 мкм.** Неодимовый лазер работает по четырехуровневой схеме. Упрощенная схема энергетических уровней ионов неодима в кристалле, участвующих в процессе возбуждения ионов и создания инверсной заселенности, представлена на рис.2. Две основные линии поглощения (следовательно, основные линии оптической накачки) расположены на длинах волн 0.73 и 0.8 мкм на переходах между основным состоянием $1(^4\text{I}_{9/2})$ и группой уровней $2(^4\text{F}_{5/2}, ^2\text{H}_{9/2}, ^4\text{S}_{9/2}, ^4\text{F}_{7/2})$. Группа уровней 2 связаны с верхним лазерным уровнем $3(^4\text{F}_{3/2})$, а нижний лазерный уровень $4(^4\text{I}_{11/2})$ – с основным состоянием быстрой безизлучательной релаксацией. Лазерный переход между уровнями 3 и 4 преимущественно уширен однородно и имеет при температуре $T=300\text{K}$ ширину $\Delta\nu=6.5\text{ см}^{-1}=195\text{ ГГц}$. Лазерные кристаллы, обычно, имеют вид стержней диаметром 5-10 мм и длиной 5-20 см. Лампы накачки и лазерный стержень помещаются в специальную осветительную систему, который должен обеспечить максимум концентрации световой энергии ламп на месте расположения лазерного стержня.

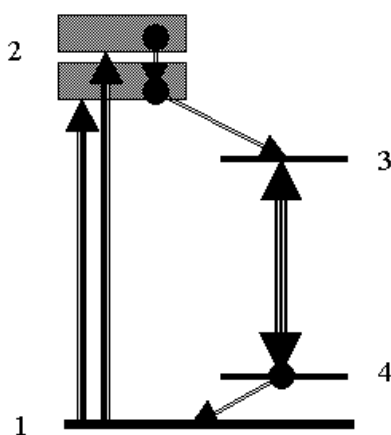


Рис. 2. Упрощенная схема энергетических уровней $\text{Nd}:\text{YAG}$.

В качестве ламп накачки используются, в основном, ксеноновые дуговые лампы среднего давления (500-1500 мм рт.ст.) и криптоновые лампы высокого давления (4-6 атм). Для повышения КПД лазера очень важно совмещение спектра излучения накачки со спектром поглощения рабочих частиц активного элемента. При накачке ксеноновыми лампами удастся использовать до 30% лучистой энергии ламп.

8. Юстировка лазера.

Для юстировки лазерного резонатора из элементов оборудования необходимо собрать оптическую схему в соответствии с рис.3.

На первом этапе юстировки необходимо в отсутствии диафрагмы 6 с помощью двух поворотных зеркал 2 совместить луч вспомогательного гелий-неонового лазера 1 с оптической осью лазерного стержня 4. Контроль качества совмещения оптических осей опорного луча и стержня следует осуществлять с помощью полупрозрачного экрана с юстировочным крестом на торцах стержня. При этом необходимо добиться совпадения юстировочного луча с геометрической осью симметрии стержня.

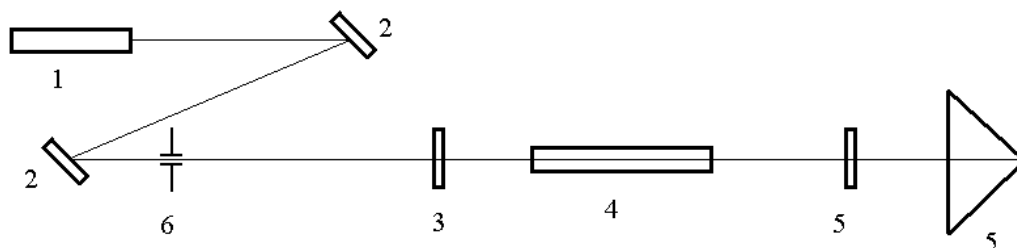


Рис 4. 1 – He-Ne-лазер, 2 – алюминиевое зеркало, 3 – выходное полупрозрачное зеркало резонатора, 4 – активный элемент излучателя на $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, 5 – глухое зеркало, 6 – диафрагма.

На втором этапе необходимо установить диафрагму 6, перемещая ее в горизонтальном и вертикальном направлениях так, чтобы центр диафрагмы

совпал с осью юстировочного луча. Затем, с помощью юстировочных винтов глухого зеркала следует точно направить отраженный луч в обратном направлении, пропуская его через установленную для этой цели диафрагму 6. Таким образом, одно из зеркал лазерного резонатора оказывается настроенным. Аналогичным образом следует выполнить юстировку выходного зеркала 3. Для этого нужно найти отраженное от рабочей поверхности зеркала луч и направить его с помощью юстировочных винтов на центр диафрагмы 6.

На третьем этапе следует произвести тонкую юстировку зеркал резонатора по максимуму выходной мощности излучения лазера. С этой целью следует включить систему охлаждения квантрона и источник питания лампы накачки в соответствии с инструкциями их эксплуатации. Если лазерный резонатор достаточно хорошо съюстирован, то одновременно со вспышкой лампы накачки должен возникать импульс генерации лазерного излучения, в чем можно убедиться по пятну отжига на жестком экране либо черной бумаге, установленном примерно на расстоянии 20 см от выходного зеркала (если лазерная генерация не достигнута, то настройку резонатора необходимо повторить). Вращая юстировочные винты зеркал резонатора в обоих направлениях, находят их оптимальное положение, при котором яркость пятна лазерного факела максимальна. Юстировку производят сначала визуально, а затем более точно с помощью измерителя мощности.

Приборы и оборудование

- 1.1. Гелий-неоновый лазер ЛГН-105 для юстировки резонатора.
- 1.2. Квантрон твердотельного лазера.
- 1.3. Зеркала лазерного резонатора.
- 1.4. Источник импульсного высоковольтного напряжения.
- 1.5. Осциллограф С1-91.
- 1.6. Фотоприемник.
- 1.7. Измеритель энергии и мощности излучения ИМО-2Н.

9. Порядок выполнения работы.

ВНИМАНИЕ !!! В блоке питания и на зажимах электродов лампы накачки имеется опасное для жизни высокое напряжение!

1) Провести юстировку излучателя по методике, изложенной в разделе 8.

2) Включить блок питания в соответствии с инструкцией по эксплуатации лазера (максимально допустимое напряжение на накопительных конденсаторах – 1000 В.

8. Задание к работе

а) Измерить энергию $E_{\text{имп}}$ и длительность $\tau_{\text{имп}}$ генерируемого импульса и определить его мощность W .

б) Измерить зависимость энергии импульса генерации $E_{\text{имп}}$ от энергии накачки $E_{\text{н}}$.

в) Построить график указанной зависимости.

Контрольные вопросы

1) Какие физические явления лежат в основе работы лазеров?

2) Какова связь между коэффициентами Эйнштейна A_{21} , B_{21} и B_{12} ?
Получить выражение (4).

3) Основные элементы лазера и их функции.

4) Назвать условия, необходимые для возникновения генерации.
Получить соотношение (5).

5) Типы резонаторов. Моды резонаторов. Распределение электромагнитного поля в конфокальном резонаторе.

Лабораторная работа №4 Изучение параметров светодиодов

Цель работы – ознакомление с принципом действия излучательных диодов, диодных и транзисторных оптронов. Снятие вольтамперных и световых характеристик светодиодов, расчет мощности излучения и КПД. Снятие проходных характеристик оптронов, определение коэффициента передачи по току.

Выполнение лабораторной работы рассчитано на четырехчасовое занятие с предварительной домашней подготовкой. Выполнение лабораторной работы может предшествовать изучению соответствующих разделов лекционного курса. В этом случае они изучаются самостоятельно с использованием рекомендованных учебников и методических изданий по курсу “Твердотельная электроника”.

1. СВЕТОДИОДЫ. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Светоизлучающими диодами (светодиодами) называются полупроводниковые приборы с p – n -переходом, предназначенные для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного оптического излучения. В основе принципа их действия лежит рекомбинационное излучение – излучение квантов света (фотонов) при рекомбинации пар электрон – дырка. Для интенсивной рекомбинации необходимо одновременно иметь высокую плотность электронов в зоне проводимости и высокую плотность свободных уровней (дырок) в валентной зоне. Такие условия создаются при высоком уровне инжекции электронов в дырочный полупроводник.

Зонная диаграмма прямосмещенного p – n -перехода с эмиттером электронов представлена на рис. 1. При прямом смещении p – n -перехода внешнее поле $E_{\text{вн}}$ (возникшее за счет падения части напряжения источника питания U на p – n -переходе) частично компенсирует контактное $E_{\text{к}}$. Энергия электронов в области эмиттера n^+ -типа увеличивается, уровень Ферми W_F поднимается, высота потенциального барьера уменьшается $q_e(\phi_0 - U)$ и

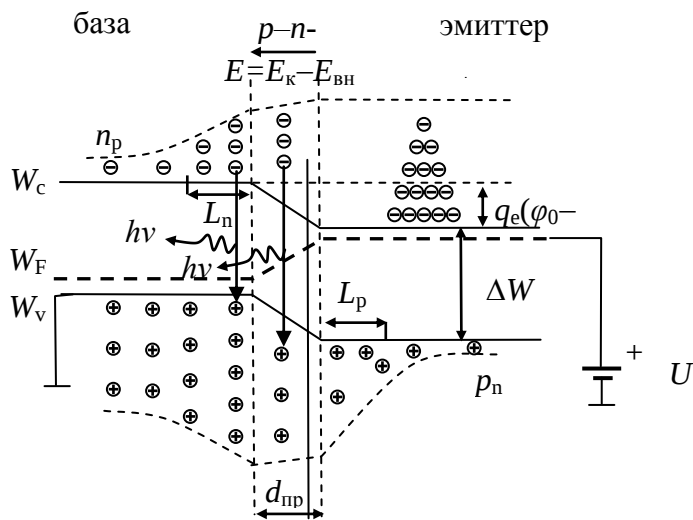


Рис. 1. Зонная диаграмма прямосмещенного p - n -перехода

наблюдается высокий уровень инжекции электронов в базу p -типа. Электроны в базе являются неосновными носителями и создают неравновесный заряд, сосредоточенный вблизи границы p - n -перехода на расстоянии порядка средней длины диффузии электронов в базе L_n . Для сохранения электрической нейтральности из глубины базы подтягиваются дырки. Таким образом, вблизи границы p - n -перехода создается избыточная концентрация электронов и дырок, что приводит к их интенсивной рекомбинации с испусканием квантов света $h\nu$.

Однако через прямосмещенный p - n -переход диффундируют не только электроны, но и дырки из p -области. Это приводит к увеличению рекомбинации электронов и дырок в p - n -переходе и в эмиттере и снижению концентрации электронов в базе. Кванты света, возникающие в глубине полупроводника, частично поглощаются в полупроводнике, что снижает квантовый выход. Поэтому необходимо уменьшить дырочный ток через p - n -переход, используя эмиттеры с коэффициентом электронной инжекции $\gamma_n = I_n / (I_n + I_p)$, где I_n – электронный, I_p – дырочный ток, близким к единице.

Идеальным эмиттером ($\gamma = 1$) является гетеропереход. Зонная диаграмма гетероперехода с эмиттером электронов в состоянии термодинамического равновесия приведена на рис. 2. Гетеропереход

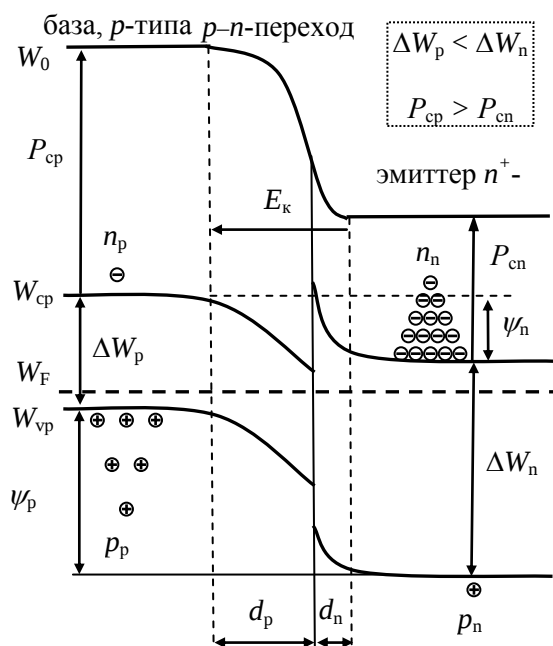


Рис. 2. Зонная диаграмма несимметричного p - n -гетероперехода с эмиттером электронов в состоянии термодинамического равновесия

образуется между двумя полупроводниками, имеющими разные электрофизические свойства: разную энергию сродства к электрону P_c , ширину запрещенной зоны ΔW и диэлектрическую проницаемость ε . Для изготовления гетероперехода необходимо правильно подобрать пару контактирующих материалов. Они должны иметь кристаллическую решетку с одинаковой структурой и близкими постоянными кристаллической решетки a (отличие не более 0.5%) и коэффициентами температурного расширения α . Материал эмиттера по сравнению с материалом базы должен быть более широкозонным и иметь меньшую энергию сродства к электрону. Поэтому гетеропереход с инжекцией электронов имеет $\Delta W_p < \Delta W_n$, $P_{cp} > P_{cn}$ и $\varepsilon_p \neq \varepsilon_n$ как показано на рис. 2. При этом уровни энергии W_c и W_v имеют разрыв на металлургической границе (непрерывная вертикальная линия), а потенциальные барьеры для электронов ψ_n и дырок ψ_p оказываются разными. Разница в высоте потенциальных барьеров $\Delta\psi = \psi_p - \psi_n = \Delta W_n - \Delta W_p$.

В прямо смещенном гетеропереходе (рис. 3) при высоком уровне инжекции электронов, за счет $\Delta\psi$ дырочный ток практически равен нулю и $\gamma_n = 1$, что характерно для идеальных эмиттеров. В базе вблизи

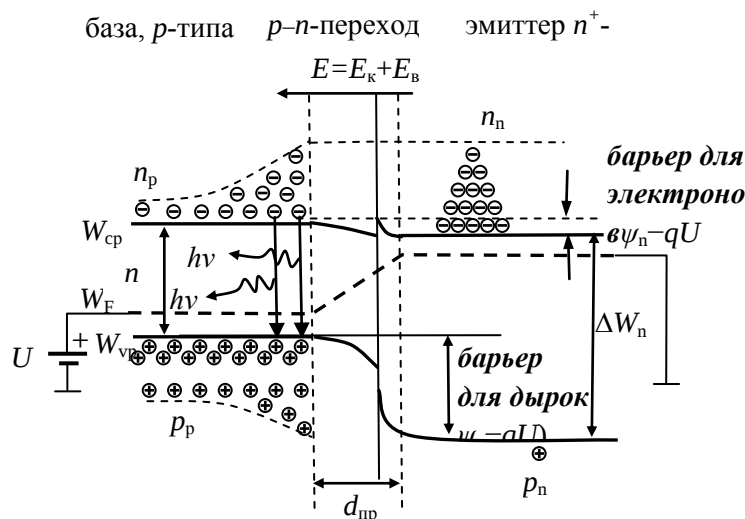


Рис. 3. Зонная диаграмма прямосмещенного p - n -гетероперехода

гетероперехода создается большая (по сравнению с гомопереходом) инверсная заселенность энергетических уровней и квантовый выход инжекционной электролюминесценции повышается. Поэтому в современных светодиодах, как правило, используются гетеропереходы.

Излучательные квантовые переходы в светодиодах происходят спонтанно, независимо друг от друга и в разные моменты времени, поэтому излучение является некогерентным. Спектр излучения светодиодов является широким.

2. РЕКОМБИНАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

2.1. Прямая межзонная рекомбинация

При
прямого
тока
неосновных
(электронов)
в
полупроводника.
перехода создается
(неравновесная)
электронов и дырок.

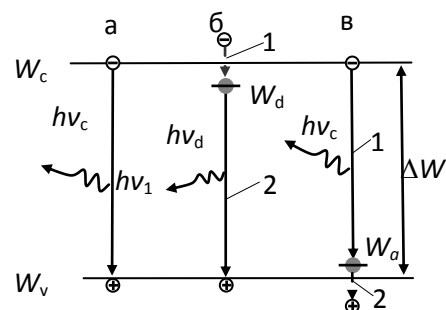


Рис. 4. Схема излучательных переходов в полупроводнике: а – межзонный, б – с уровня донора в валентную зону, в – из зоны проводимости на уровень

протекании через диод
происходит инжекция
носителей заряда
базовую p -область
Вблизи границы p - n -
избыточная
концентрация

Происходят процессы

их рекомбинации, сводящиеся к переходу электронов из зоны проводимости

в валентную зону на имеющиеся там свободные уровни. Возможные пути рекомбинации показаны на энергетической диаграмме рис. 4. Здесь изображены уровни энергии дна зоны проводимости W_c и верха валентной зоны W_v , уровень энергии донорной примеси W_d и уровень энергии акцепторной примеси W_a . Переход электрона с нижнего уровня зоны проводимости на верхний уровень валентной зоны называется межзонной рекомбинацией (рис. 4,а). Разность энергии $\Delta W = W_c - W_v$ выделяется в виде кванта электромагнитного излучения – фотона $h\nu_{cv} = \Delta W$, где $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (излучательная рекомбинация), либо передается решетке в виде кванта тепловых колебаний – фонона (безизлучательная рекомбинация). Однако процесс прямой межзонной излучательной рекомбинации маловероятен. Для его осуществления электрон и дырка должны оказаться одновременно в одном и том же месте кристалла. Кроме того, должен выполняться закон сохранения импульса, т.е. излучательная рекомбинация может произойти, если и электрон, и дырка имеют одинаковые, но противоположно направленные импульсы.

2.2. Рекомбинация с участием ловушек

Переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону могут происходить через энергетические уровни, расположенные внутри запрещенной зоны (рис. 4,б,в). Это могут быть донорные или акцепторные уровни, достаточно удаленные от краев запрещенной зоны ($W_c - W_d \gg kT$, $W_a - W_v \gg kT$, где $k = 0.862 \cdot 10^{-4}$ эВ/К постоянная Больцмана, при $T = 293$ К, $kT \approx 25$ мэВ).

Атомы акцепторов и ионы доноров, способные захватывать, удерживать и отдавать электроны, называют центрами захвата или рекомбинационными ловушками.

Процесс рекомбинации через ловушки происходит в два этапа:

– на первом этапе электрон из зоны проводимости захватывается незанятым уровнем донорной примеси, а на втором происходит переход электрона с донорного уровня на свободный уровень в валентной зоне

(нейтрализация дырки) с излучением фотона $h\nu_{dv} = W_d - W_v < \Delta W$ или образованием фонона (рис. 4, б);

—на первом этапе происходит переход электрона из зоны проводимости на незаполненный уровень акцепторной примеси с излучением фотона $h\nu_{ca} = W_c - W_a < \Delta W$ или образованием фонона, а на втором — переход захваченного электрона на свободный уровень в валентной зоне (нейтрализация дырки) (рис. 4, в).

Вероятность захвата и длительность удержания зависят от глубины залегания уровней ловушек. Рекомбинационными ловушками могут быть также любые дефекты в кристаллах: примесные атомы или ионы, незаполненные узлы в решетке, дислокации и другие несовершенства объема или поверхности.

Двухступенчатый процесс релаксации более вероятен, т.к. он не требует одновременного присутствия в данной точке электрона и дырки. Ловушка воспринимает количество движения, необходимое для соблюдения закона сохранения импульса и часть энергии ($W_c - W_d$, $W_a - W_v$), освобождаемой в процессе рекомбинации.

Рассмотренные процессы перехода электронов из зоны в зону могут происходить и в обратном направлении (генерация электрон – дырочных пар или внутренний фотоэффект) с поглощением фотонов той же или большей энергии, что и излучаемых при рекомбинации.

2.3. Прямые и не прямые межзонные переходы

В кристалле полупроводника электроны движутся в поле периодического электрического потенциала кристаллической решетки. Допустим, в некотором направлении x атомы, а следовательно, и периодический потенциал повторяются с частотой, соответствующей периоду решетки a . Электрон, движущийся в направлении x , может иметь различные значения волнового вектора k_x и импульса $p_x = \hbar k_x$, за исключением

$$k_x = \pm(\pi/a)n, \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$, и соответственно, импульса $p_x = \pm(\hbar\pi/a)n$, при которых длина волны де Бройля $\lambda = 2\pi/k$ оказывается кратной периоду решетки $n\lambda = 2a$. Это значит, что величины энергии, соответствующие значениям $k_x = \pm(\pi/a)n$ являются запрещенными. Зона проводимости разделяется на ряд зон (зон Бриллюэна) разрешенных значений энергии.

В обычных условиях зона проводимости является частично заполненной зоной, в которой электроны занимают уровни, расположенные вблизи дна зоны. Эти уровни будут соответствовать самым нижним уровням первой зоны Бриллюэна ($|k_x| \ll \pm\pi/a$). В этой области, при малых значениях импульса электрона, энергия электрона описывается зависимостью, аналогичной зависимости $W(p)$ свободного электрона:

$$W = \frac{p_x^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} k_x^2. \quad (2)$$

Кривая зависимости энергии электрона от волнового вектора $W(k)$ показана на рис. 5. Аналогично может быть построена кривая зависимости энергии электрона от волнового вектора в валентной зоне. Как и в предыдущем случае, интерес представляют самые нижние уровни первой зоны Бриллюэна, т.е. уровни вблизи верха валентной зоны. Именно здесь находятся свободные уровни, которые интерпретируются как дырки (рис. 5).

Из рис. 5 можно видеть, что запрещенная зона полупроводника представляет собой зазор между экстремумами двух параболических кривых (2) первых зон Бриллюэна.

Мы рассмотрели одномерную задачу. В реальном трехмерном кристалле электрон может двигаться в произвольном направлении, при этом картина зон Бриллюэна получается более сложной. Картина усложняется и за счет того, что в разных кристаллах зоны проводимости и валентная образуются расщеплением различных уровней оболочек атомов. Сложная зависимость энергии от импульса приводит к тому, что положение экстремума (минимума или максимума) функции $W(k)$ может быть сдвинуто относительно нулевого значения k . Кроме того, оказывается возможным

наличие нескольких экстремумов в зоне Бриллюэна, причем минимум, смещенный относительно $k = 0$, может быть более глубоким, т.е. соответствует меньшему значению энергии по сравнению с минимумом, находящимся в точке $k = 0$ (рис. 6).

Различают прямые и непрямые переходы электронов из зоны в зону. Прямые переходы (прямая межзонная рекомбинация) совершаются практически без изменения импульса электрона и могут сопровождаться выделением фотона (рис. 5). Прямые переходы возможны в прямозонных полупроводниках, когда экстремумы расположены один над другим (в точке $p = 0$). Строго говоря, прямой переход сопровождается отдачей импульса фотона $p = h\nu/c$. Однако этот импульс настолько мал, что считают, что переход электрона из зоны в зону происходит без изменения импульса.

(Прямой переход электрона из зоны в зону происходит без изменения импульса, т.е. без изменения вектора скорости движения. Следовательно, при прямом переходе изменяется лишь потенциальная энергия электрона. Кинетическая энергия электрона (2) остается постоянной).

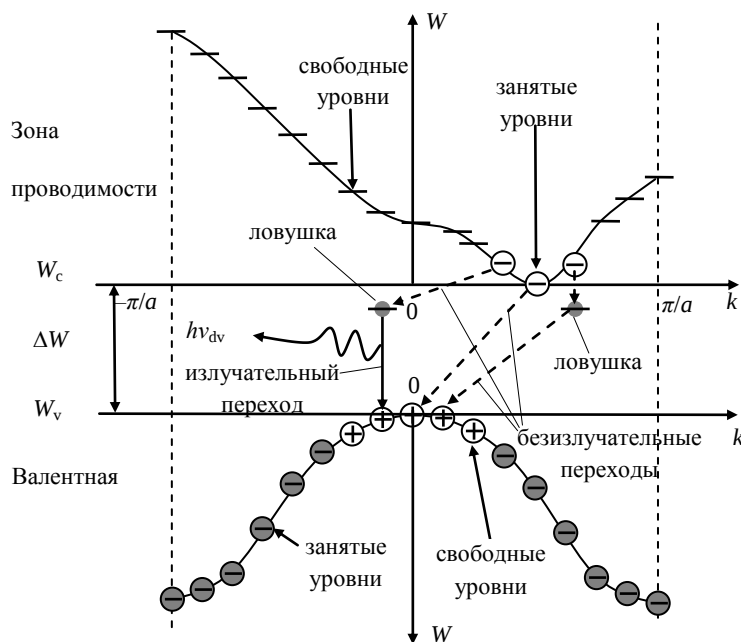


Рис. 6. Зависимости энергии электрона от волнового вектора в непрямозонном полупроводнике

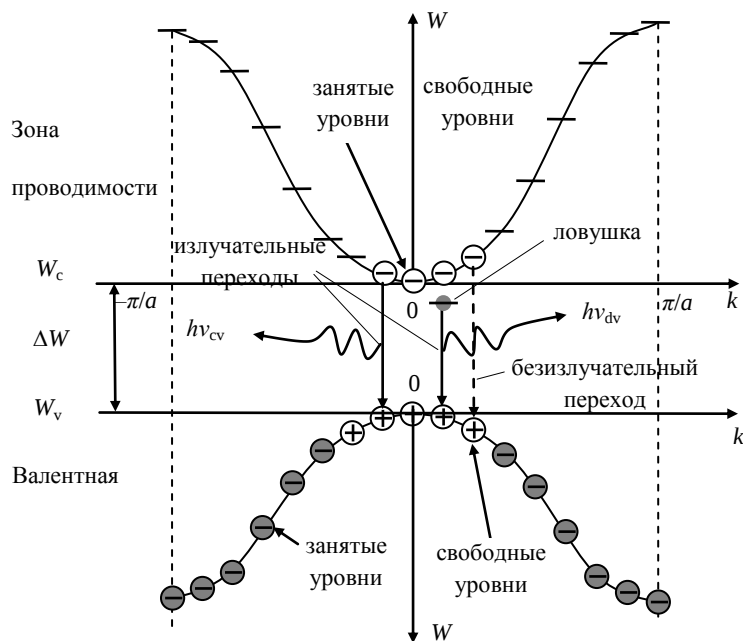


Рис. 5. Зависимости энергии электрона от волнового вектора в

прямозонном полупроводнике

В непрямозонных полупроводниках (рис. 6) происходит переход с изменением импульса электрона в результате взаимодействия электрона с решеткой. Непрямой переход всегда заканчивается выделением энергии в виде фононов (элементарных квантов тепловых колебаний кристаллической решетки). Импульс фонона определяется относительным положением минимумов первых зон Бриллюэна в зоне проводимости и в валентной зоне. Рекомбинация без излучения фотона называется безизлучательной рекомбинацией. В непрямозонных полупроводниках возможны излучательные переходы с предварительным захватом электрона рекомбинационной ловушкой. Рекомбинационные ловушки являются своеобразным посредником, получающим от электрона и передающим решетке импульс фонона (рис. 6).

Кремний и германий являются непрямозонными полупроводниками. Для них характерными являются не прямые переходы и безизлучательная рекомбинация на примесных центрах.

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Спектральная характеристика светоизлучающих диодов выражает зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света и дает представление о цвете свечения прибора. Обычно излучение светодиодов является монохроматическим. Ширина максимума спектральной характеристики излучения по уровню 0,5 составляет $\Delta\lambda = 0.03 \div 0.05$ мкм. Длина волны излучаемого света λ определяется разностью энергий ΔE двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов на излучательном этапе процесса рекомбинации

$$\lambda = hc/\Delta E, \quad (3)$$

где $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4.14 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка,

$c = 2.998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Величина ΔE близка к энергетической ширине запрещенной зоны полупроводника ($\Delta E \leq \Delta W$). Чтобы кванты света – фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света ($0.4 < \lambda < 0.7$ мкм), ширина запрещенной зоны должна быть относительно большой ($\Delta W > 1.8$ эВ).

В настоящее время для изготовления светоизлучающих диодов используются кристаллы соединений типов $A_{III}B_V$ (элементов III и V групп таблицы Менделеева) табл. 1:

– арсенид галлия GaAs, $\Delta W = 1.42$ эВ, максимум излучения лежит в инфракрасной области $\lambda = 0.89$ мкм;

– фосфид галлия GaP, $\Delta W = 2.27$ эВ, максимум излучения в зеленой области спектра $\lambda = 0.55$ мкм;

– нитрид галлия GaN, который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны $\Delta W = 3.4$ эВ, что позволяет получать излучение в синей области, вплоть до фиолетового.

Тройные соединения $GaAs_{x-1}P_x$ и $GaAs_{x-1}Al_x$, где x – концентрация фосфора или алюминия, используют, в основном, для получения диодов

красного цвета свечения. Кроме того, находят применение и другие широкозонные полупроводники, например, карбид кремния SiC ($\text{A}_{\text{IV}}\text{B}_{\text{IV}}$) свечение в диапазоне $\lambda = 0.56 \div 0.63$ мкм, сульфид цинка ZnS ($\text{A}_{\text{II}}\text{B}_{\text{VI}}$) $\Delta W = 3.74$ эВ, максимум спектрального распределения излучения на длине волны $\lambda = 0.38$ мкм (фиолетовая часть спектра).

Диоды на основе фосфида галлия имеют спектральные характеристики с двумя выраженными максимумами излучения с длинами волн $\lambda = 0.55$ мкм и $\lambda = 0.70$ мкм. В зависимости от вида и количества легирующих примесей (цинк, кислород или азот) внедренных в структуру излучающего кристалла при изготовлении, изменяются соотношения между этими максимумами. В результате получают диоды зеленого, желто-оранжевого или красного цвета свечения.

Арсенид галлия GaAs является прямозонным полупроводником. В прямозонных полупроводниках могут происходить как излучательные, так и безизлучательные рекомбинации. Соотношение между излучательными и безизлучательными рекомбинациями характеризует внутренний квантовый выход η , который является важнейшим показателем светоизлучающего диода:

$$\eta_{\text{внутр}} = N_{\text{изл}} / N_{\text{инж}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{изл}}$ – число излученных фотонов, а $N_{\text{инж}}$ – число инжектированных носителей в единицу времени.

Внутренний квантовый выход определяется соотношением концентраций и сечений захвата центров излучательной и безизлучательной рекомбинации. Поэтому в окрестности p – n -перехода стремятся снизить количество дефектов кристаллической решетки и нежелательных примесей с тем, чтобы уменьшить скорость безизлучательной рекомбинации.

Фосфид галлия является непрямозонным полупроводником. В тройных соединениях GaAsP отношение прямых и непрямых переходов уменьшается с увеличением концентрации фосфора. Основной вклад в излучательную рекомбинацию вносит рекомбинация через примесные центры.

Основными легирующими соединениями в светодиодах на основе соединений $A_{III}B_V$ являются:

- элементы II группы Zn и Mg – акцепторы;
- элемент V группы N – изоэлектронная примесь;
- элементы VI группы S, Se, Te – доноры;
- комплексы Zn-O, Cd-O, которые играют роль глубоких ловушек для электронов.

На первой ступени акта рекомбинации (переход электрона из зоны проводимости на донорный уровень или переход с акцепторного уровня в валентную зону) изменяется волновой вектор электрона. Ионы доноров или акцепторов являются своеобразными посредниками, получающими от электрона и передающими решетке импульс фонона. Благодаря этому становятся возможными излучательные переходы с донорного или акцепторного уровней (рис. 4 и 6). Следует отметить, что рекомбинация через примесные центры характеризуется меньшей величиной энергии фотона (сдвиг в красную область спектра), чем при прямом межзонном переходе. При этом характерно, что энергия фотона при рекомбинации донор – свободная дырка в *n*-полупроводнике (рис. 4, б) обычно больше, чем акцептор – свободный электрон в *p*-полупроводнике (рис. 4, в). Причина состоит в том, что глубина залегания донорных уровней обычно меньше, чем акцепторных.

В видимой области спектра внутренний квантовый выход $\eta_{\text{внутр}}$ у диодов с гомопереходом составляет единицы процентов, у диодов с гетеропереходом – может составлять единицы – десятки процентов.

4. ВНЕШНИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД И ЯРКОСТЬ СВЕЧЕНИЯ ДИОДА

К числу важных параметров светодиода относится внешний квантовый выход

$$\eta_{\text{внеш}} = \eta_{\text{внутр}} \cdot \eta_{\text{поверх}}, \quad (5)$$

где $\eta_{\text{поверх}}$ – коэффициент вывода света во внешнюю среду. На величину $\eta_{\text{поверх}}$ оказывают влияние ряд факторов:

Поглощение света полупроводником. В полупроводниках с прямыми переходами имеет место высокий коэффициент поглощения, поэтому глубину залегания p – n -перехода уменьшают до $1\div 2$ мкм. Другой способ повышения $\eta_{\text{поверх}}$ – вывод света через n -область (рис. 7, а). При этом n -область легируют значительно сильнее, чем p -область, вследствие чего излучательная рекомбинация инжектированных носителей происходит в p -области. Глубина залегания акцепторного уровня W_a больше, чем донорного W_d и энергия фотонов $h\nu_{ca} = W_c - W_a$ оказывается меньше, чем $h\nu_{dv} = (W_d - W_v)$ и ΔW .

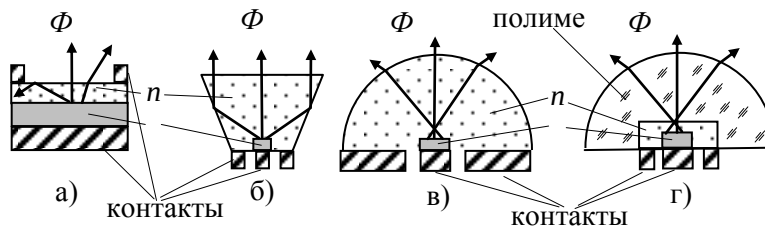


Рис. 7. Конструкция светодиодов: а – плоская планарная, $\eta_e = 1.3\%$; б – усеченный конус, $\eta_e = 20\%$; в – полусферическая, $\eta_e = 37\%$; г – плоская планарная с полусферическим покрытием, $\eta_e = 37\%$;

Отражение излучения от границы раздела полупроводник-воздух. Полупроводниковые материалы имеют высокий коэффициент преломления $n = 3.3\div 3.6$. Наружу может выйти только то излучение, которое падает на поверхность раздела под углом, меньшим критического $\theta_{\text{крит}} = \arcsin n^{-1}$. Для фосфида галлия GaP этот угол составляет $\theta_{\text{крит}} = 17.7^\circ$. С целью увеличения критического угла кристаллы полупроводника заливают полимерными компаундами с большим показателем преломления ($n = 1.5\div 2.0$). Высокое значение коэффициента вывода света можно получить, если придать кристаллам полупроводника (путем шлифования) специальную форму (рис. 7,б и в). Для уменьшения поглощения света и стоимости изделия p – n -переход изготавливают по планарной технологии и покрывают прозрачным полимерным полусферическим (или параболическим) покрытием (рис. 7,г).

Работа некоторых светоизлучающих приборов основана на двойном преобразовании энергии: электрической энергии в инфракрасное излучение и преобразование его в видимый свет. Преобразование в видимый свет происходит при возбуждении антистоксовского люминофора ($\lambda_{\text{излучения}} < \lambda_{\text{поглощения}}$), покрывающего излучающую поверхность ИК диода (GaAs).

Характеристикой диода как источника света является зависимость силы света I_v от прямого тока (световая характеристика). Сила света I_v – излучаемый диодом световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Измеряется в канделах (кд).

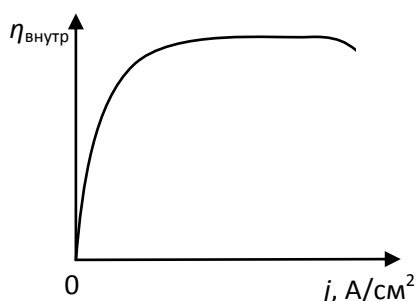


Рис. 8. Зависимость внутреннего квантового выхода $\eta_{\text{внутр}}$ от плотности тока j

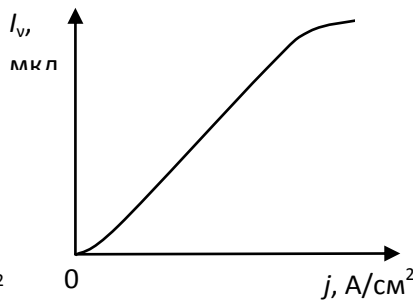


Рис. 9. Зависимость силы света светодиода I_v от плотности тока j

Сила света диода пропорциональна числу актов излучательной рекомбинации в единицу времени (пропорциональна произведению квантового выхода (5) на полное число актов рекомбинации. На рис. 8 и 9 представлены зависимости внутреннего квантового выхода $\eta_{\text{внутр}}$ и силы света I_v от плотности прямого тока j для GaP диодов. При малых значениях j происходит, в основном, безизлучательная рекомбинация носителей на примесных центрах в области p - n -перехода. Вследствие этого $\eta_{\text{внутр}}$ при малых токах невелик и резко возрастает с увеличением инжекции носителей и их рекомбинации на центрах излучательной рекомбинации. При дальнейшем увеличении плотности тока имеется почти линейный участок световой характеристики $I_v(j)$, протяженность которого определяется изменением силы света светодиода в пределах одного – двух порядков ($\eta_{\text{внутр}} \approx \text{const}$). При больших значениях j нарушается пропорциональная

зависимость между силой света и плотностью тока вследствие заполнения излучательных центров, которые образовались при введении в полупроводник акцепторной, донорной или изоэлектронной примеси.

Светодиоды обладают высоким быстродействием. Излучение нарастает за время менее 10^{-8} с после подачи импульса прямого тока.

5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Для маркировки светоизлучающих приборов российского производства приняты две системы обозначений. Покажем их на примерах:

АЛС338Б (ЗЛС338Б)

А – (или цифра 3) материал полупроводника (GaAs или GaP, GaAsP и т.д.);

Л – светоизлучающий диод;

С – матрица из светодиодов (например, цифровой индикатор из семи сегментов);

338 – порядковый номер разработки;

Б – группа. (А, Б, В, Г ... – диоды одного типа, но различающиеся по некоторым параметрам).

КИПД05А-1К

К – прибор широкого (общепромышленного) назначения;

И – индикатор;

П – полупроводниковый;

Д – единичный светодиод (или М – для мнемонических табло, Т – линейная шкала из диодов, Ц – знакосинтезирующий индикатор;

05 – номер разработки;

А – группа (А, Б, В ...);

1 – число диодов в индикаторе;

К – красный (или Л – зеленый, Г – голубой, Ж – желтый, Р – оранжевый, С – синий, М – многоцветный).

Основными параметрами светоизлучающих диодов являются:

- Сила света I_v – излучаемый диодом световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении максимального излучения. Указывается при заданном значении прямого тока $I_{пр}$, мА и измеряется в милликанделах (мкд);
- Яркость L – величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности (для мнемонических и многосегментных индикаторов). Указывается при заданном значении прямого тока $I_{пр}$, мА и измеряется в кд/м².
- Мощность излучения (для излучающих диодов ИК-диапазона). Указывается при заданном значении $I_{пр}$, мА и измеряется в милливаттах (мВт);
- Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В – значение напряжения на светодиоде при протекании заданного прямого тока;
- Максимум спектрального распределения λ_{max} , мкм – длина волны светового излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики светодиода;
- Спектральная характеристика светодиода – зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света (представляется графически);
- Световая (яркостная) характеристика – зависимость силы света от прямого тока (представляется графически);
- Диаграмма направленности – снижение силы света в зависимости от угла, под которым ведется наблюдение (излучение может быть узконаправленным или рассеянным);
- Вольтамперная характеристика – аналогична характеристике обычного диода;
- Зависимость силы света от температуры (в интервале рабочих температур I_v может меняться в 2÷3 раза, с повышением температуры сила света уменьшается);

Светоизлучающие диоды имеют большой разброс параметров от образца к образцу. Изготовителем указываются крайние значения параметров, являющиеся критерием годности при их производстве.

Предельно допустимые режимы эксплуатации – указываются максимальные значения прямого тока $I_{пр, max}$, мА, обратного напряжения $U_{обр, max}$, В и др. параметры, при которых обеспечивается заданная надежность работы прибора.

Условное обозначение светодиода приведено на рис. 10.

Светодиоды в основном применяются как элементы индикации включения, готовности аппаратуры к работе, наличия напряжения питания в блоке, аварийной ситуации и других состояний.

Линейные шкалы (столбики из светодиодов) служат для отображения непрерывно изменяющейся информации – уровня звукового сигнала, уровня горючего в баке и т.д. Достоинства – наглядность отображения и быстрота восприятия информации.

Инфракрасные излучающие диоды (ИК-диоды) применяются в оптических каналах передачи информации (дистанционный пульт управления телевизора), линиях, требующих гальванической развязки, датчиках систем автоматики, охранной сигнализации и т.д. Излучение ИК-диода не может быть воспринято человеческим глазом, и регистрируется обычно фотодиодом или фототранзистором.

Ввиду нелинейности вольтамперной характеристики (резкого возрастания прямого тока при прямом напряжении выше $2\div 3$ В) светодиоды всегда подключают к источнику питания через балластное сопротивление (рис. 10,а,б), величина которого может быть найдена из соотношения

$$R_6 = (E - U_{пр}) / I_{пр}. \quad (6)$$

Обычно информация, предназначенная для отображения цифровым или шкальным индикатором, поступает в двоичном коде. Для преобразования ее в натуральный для шкал или 7-сегментный код используются микросхемы – дешифраторы (рис. 10,в). Некоторые типы дешифраторов имеют токовые

выходы (создают заданную величину тока, независимо от величины падения напряжения на диоде). В этом случае светодиоды индикатора можно подключать к выходам дешифратора без балластных резисторов (рис. 10,в).

8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы “ предполагает:

1. Предварительное ознакомление с основами теории электропроводности собственных и примесных полупроводников, рекомбинации неравновесных носителей, процессов в $p-n$ -переходе, фотопроводимости и люминесценции полупроводников; физическими принципами работы светоизлучающих диодов и оптоэлектронных пар.

2. Проведение испытаний светодиодов в соответствии с заданиями, содержащимися в методических указаниях или полученных у преподавателя.

3. Обработку результатов измерений.

4. Подготовку и защиту отчета по работе.

Приборы и принадлежности: установка для исследования вольт-амперных и световых характеристик светодиодов, люксметр Ю-116, установка для исследования передаточных характеристик оптопар, источник постоянного тока MPS-6001 LK-1, два вольтметра В7-78/1 или аналогичные, установка для исследования диаграммы направленности светодиодов, установка для исследования спектральных характеристик светодиодов, исследуемые светодиоды и оптоэлектронные пары.

Задания

1. Собрать схему установки для снятия вольт-амперных и световых характеристик светодиодов согласно рис. 14.

2. Подготовить люксметр к работе:

- фотоэлемент без светопоглощающих насадок закрыть светозащитным экраном и подключить к измерителю люксметра;

- установить предел измерения освещенности $L_x = 30$ лк;

– установить исследуемый светодиод в отверстие светозащитного экрана.

3. По справочнику или прилож.1 определить величину максимально допустимого постоянного прямого тока $I_{\text{пр max}}$. Снять вольт-амперную $I = f(U)$ (только прямую ветвь) и ампер-люксую $L_x = f(I)$ характеристики светодиода в диапазоне изменения тока $I = 0 \div I_{\text{пр max}}$.

4. Собрать установку для исследования диаграмм направленности светодиода рис. 15. Закрепить исследуемый светодиод в центре поворотного столика установки. Установить величину прямого тока $I_{\text{пр}} = 0.8 I_{\text{пр max}}$. Снять угловую зависимость интенсивности излучения светодиода в виде

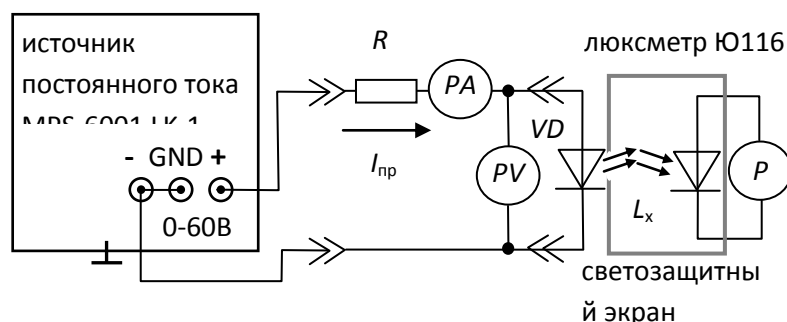


Рис. 14. Схема установки для снятия вольтамперных и световых характеристик светодиодов

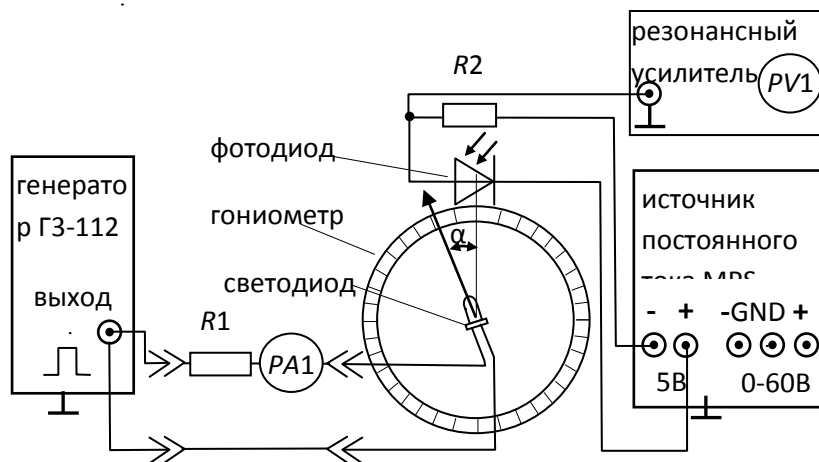


Рис. 15. Установка для исследования диаграммы направленности светодиода

зависимости фототока фотодиода VD2 от угла поворота светодиода $I_{\text{фот}} = f(\alpha)$.

5. Собрать установку для исследования спектральных характеристик светодиодов рис. 16. Закрепить исследуемый светодиод напротив входной щели монохроматора. Измерить длину световой волны λ_{max} , соответствующей максимуму (максимумам) спектральной характеристики

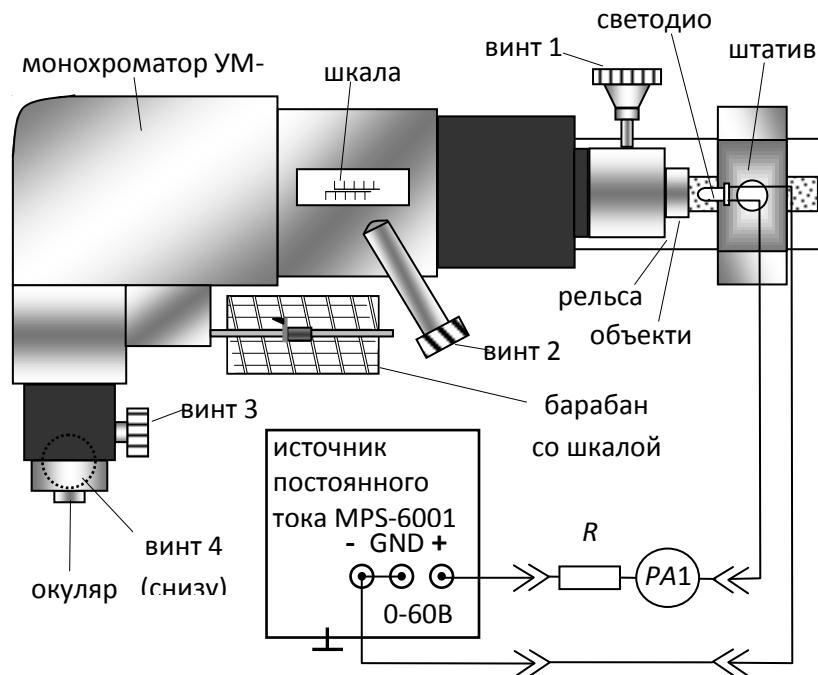


Рис. 16. Установка для снятия спектральных характеристик светодиодов

излучения светодиода. Градуировочный график монохроматора (градуировочная таблица) входят в комплект установки.

Обработка результатов измерений и подготовка отчета

1. Построить прямую ветвь ВАХ светодиодов $U_{пр} = f(I_{пр})$. Оценить величину контактной разности потенциалов перехода ϕ_0 как показано на рис. 19.

2. Построить зависимость освещенности L от величины прямого тока светодиода (ампер-люксую характеристику) $L = f(I_{пр})$. Найти величину светового потока создаваемого светодиодом при $I_{пр\ max}$:

$$\Phi_L = LS, \text{ лм} \quad (9)$$

где L – среднее значение освещенности фотозлемента (1 люкс = 1 люмен/ 1 м²),

$S = 26.4 \text{ см}^2$ – площадь поверхности фотозлемента люксметра Ю116.

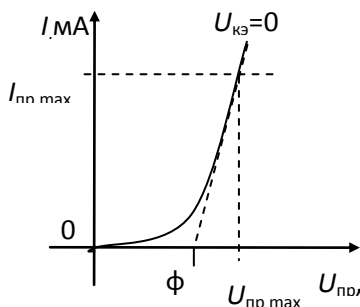


Рис. 19. Вольт-амперная характеристика светодиода

3. Оценить величину мощности излучения светодиода в энергетических единицах Φ_w . Световым потоком Φ_L в (фотометрических единицах – люменах) называют мощность светового излучения, оцениваемую по его действию на нормальный глаз. Для монохроматического излучения, соответствующего максимуму видности

$\lambda = 0.555 \text{ мкм}$, световой поток равен $\Phi_L = 683 \text{ лм}$, если мощность излучения равна $\Phi_w = 1 \text{ Вт}$. Приблизительно принимая соотношение между мощностью излучения и световым потоком (поскольку использованный люксметр прокалиброван для белого света)

$$\Phi_w \approx \Phi_L/683, \text{ Вт} \quad (10)$$

найти мощность излучения светодиода при $I_{пр\ max}$.

4. Оценить КПД светодиода

$$\eta \approx \Phi_w/P = \Phi_w/(I_{пр\ max} \cdot U_{пр\ max}), \quad (11)$$

где $U_{пр\ max}$ – падение напряжения на светодиоде при $I_{пр\ max}$.

5. Найти величину внешнего квантового выхода светодиода $\eta_{внеш}$ как отношение числа излученных квантов света $\Phi_w/h\nu = \Phi_w \lambda_{max}/hc$ к полному числу актов рекомбинации $I_{пр\ max}/q_e$

$$\eta_{\text{внеш}} \approx \frac{\Phi_w \lambda_{\text{max}} / hc}{I_{\text{пр max}} / q_e}, \quad (12)$$

где $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

7. По длине волны излучаемого света определить разность энергий двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов на излучательном этапе процесса рекомбинации

$$\Delta W_L = hc / \lambda_{\text{max}}, \text{ Дж.}$$

Сравнить полученное значение ΔW_L с высотой потенциального барьера p – n -перехода $q_e \phi_0$ и шириной запрещенной зоны ΔW полупроводникового материала светодиода.

8. Отчет должен содержать:

- 1) Основные теоретические положения и формулы, использованные при выполнении работы;
- 2) Описание методики проведения испытаний, электрических схем и использованной аппаратуры;
- 3) Полученные экспериментальные данные: таблицы с результатами проведенных измерений и графики;
- 4) Результаты обработки экспериментальных данных в соответствии с полученным заданием;
- 5) Выводы.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.
2. Зонные диаграммы светодиода с гомо и гетеро переходом в состоянии термодинамического равновесия и при прямом смещении.
3. Светодиоды. Конструкция и принцип действия.
4. Основные характеристики светодиода.
5. Оптоэлектронные пары. Конструкция, принцип действия.
6. Основные характеристики фотодиодных и фототранзисторных оптоэлектронных пар.

Лабораторная работа №5. Исследование полупроводниковых фотоприемников

Целью работы является исследование характеристик и определение основных параметров наиболее важных приемников оптического излучения - полупроводниковых фоторезисторов и фотодиодов.

1.1. Основные сведения о фоторезисторах и фотодиодах

Фоторезистором называется приемник излучения, принцип действия которого основан на фоторезисторном эффекте. Под действием излучения вследствие внутреннего фотоэффекта у фоторезистора меняется сопротивление.

Основной частью конструкции является полупроводниковый фоточувствительный слой, который может быть выполнен в виде монокристаллической или поликристаллической пленки полупроводника, нанесенной на диэлектрическую подложку. На поверхность фоточувствительного слоя наносят металлические электроды. Поверхность полупроводникового фоточувствительного слоя, расположенную между электродами, называют рабочей площадкой.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фоторезистора представляют собой зависимости темнового тока I_t , а также тока $I_{осв}$ освещенного фоторезистора при неизменном световом потоке от приложенного к фоторезистору напряжения. При омическом характере темнового сопротивления ВАХ линейна практически при любом соотношении между темновым током I_t и фототоком, который определяется как $I_f = I_{осв} - I_t$. Нелинейность ВАХ может проявляться при очень малых напряжениях у фоторезисторов с фоточувствительным слоем из поликристаллического полупроводникового материала, а также при слишком больших напряжениях, когда мощность, выделяемая на фоторезисторе, превышает некоторое допустимое значение.

Световая (люкс-амперная) характеристика фоторезистора представляет собой зависимость фототока I_{Φ} от освещенности или от падающего на фоторезистор светового потока. В узком диапазоне изменения светового потока Φ для аппроксимации световой характеристики часто используют зависимость

$$I_{\Phi} = A\Phi^{\chi}, \quad (1.1)$$

где A и χ - коэффициенты, являющиеся постоянными для данного фоторезистора в выбранном диапазоне изменения светового потока. Фоторезисторы обычно имеют световую характеристику с $\chi < 1$. Инерционность фоторезистора характеризуется постоянными времени фронта нарастания $t_{н}$ и спада $t_{сп}$ фотоответа при импульсной засветке. Ими определяются предельные рабочие частоты модуляции света, при которых еще не происходит заметного уменьшения фотоответа. Как правило, $t_{н} < t_{сп}$.

Постоянная времени $t_{сп}$ определяется как интервал времени, в течение которого фототок фоторезистора уменьшается в e раз по отношению к установившемуся значению. Если используется синусоидальная модуляция светового потока, то быстродействие фотоприемника характеризуется граничной частотой $f_{гр}$, на которой амплитуда фотоотклика уменьшается в 2 раз относительно стационарного значения.

При практическом использовании фоторезисторов важное значение имеет кратность изменения сопротивления

$$N = R_T/R_{осв} = I_{осв}/I_T, \quad (1.2)$$

которая является мерой чувствительности резистора.

Другим исключительно важным параметром фоторезистора является коэффициент усиления

$$K = \tau/t_{\text{пр}} = \frac{\tau \mu U}{l^2}, \quad (1.3)$$

где τ - время жизни носителей заряда; $t_{\text{пр}}$ - время пролета носителей между электродами; μ - подвижность носителей заряда; l - расстояние между электродами резистора; U - значение приложенного напряжения. Для образцов с большим временем жизни неравновесных носителей заряда и малым расстоянием между электродами фоторезистора коэффициент усиления может быть существенно больше единицы.

Наиболее распространенными полупроводниковыми приемниками излучения в настоящее время являются фотодиоды. Основным элементом фотодиода является p - n -переход, при освещении которого происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле перехода разделяет неравновесные носители заряда. Ток, обусловленный этими носителями, совпадает по направлению с обратным током p - n -перехода. Поэтому ВАХ фотодиода при освещении, представленная на рис. 1.1, а, может быть записана в виде:

$$I = I_{\text{нас}} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{\text{ф}}, \quad (1.4)$$

где $I_{\text{нас}}$ - ток насыщения; $I_{\text{ф}}$ - фототок.

Типичная структура фотодиода показана на рис. 1.1, б. Фотодиод может использоваться в двух режимах работы - фотодиодном, когда p - n -переход смещен в обратном направлении под действием внешнего источника напряжения, и фотогальваническом, когда диод не имеет внешнего источника питания и работает как преобразователь энергии, характеризующийся либо напряжением холостого хода - $U_{\text{хх}}$, либо током короткого замыкания - $I_{\text{кз}}$. В первом случае ток через структуру является функцией интенсивности светового потока, а во втором - функцией потока

являются значения U_{xx} или $I_{кз}$, так как сам фотодиод используется в качестве источника напряжения или тока.

Зависимость фототока от потока Φ для фотодиодного режима работы фотодиода является линейной. Сравнительным критерием качества фотодиодов является чувствительность, которая определяется как отношение фототока к световому потоку:

$$SI = I\phi/\Phi. \quad (1.5)$$

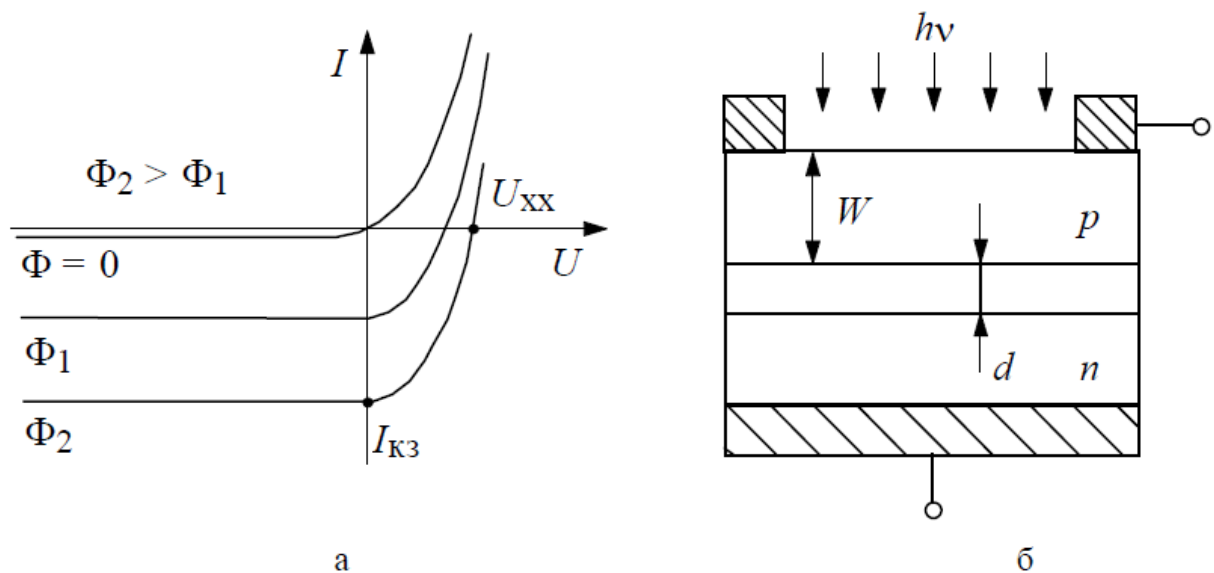


Рис. 1.1. Вольт-амперные характеристики (а) и схематическое изображение структуры (б) фотодиода

Зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от светового потока легко получить из выражения (1.4), положив значение полного тока I равным нулю. Тогда

$$U_{xx} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{кз}}{I_{нас}} + 1 \right). \quad (1.6)$$

Фотодиоды являются более быстродействующими фотоприемниками, чем фоторезисторы. Инерционность фотодиодов определяется тремя

основными физическими факторами. Это время диффузии или дрейфа неравновесных носителей заряда через базу τ_i , время их пролета через p - n -переход τ_D , время перезарядки барьерной емкости p - n -перехода, характеризующееся постоянной времени τ_{RC} , равной RC .

τ_i , время их пролета через p - n -переход τ_D , время перезарядки барьерной емкости p - n -перехода, характеризующееся постоянной времени τ_{RC} , равной RC .

Для фотодиодов с однородно легированной базой время пролета неосновных носителей через базу определяется временем диффузии $\tau_D = W^2/2D_n$, где W -

толщина базы (рис. 1.1, б); D_n - коэффициент диффузии электронов. Наличие градиента концентрации примесей создает тянущее электрическое поле в базе, которое в 2-5 раз уменьшает значение τ_D . При этом неосновные носители движутся в базе фотодиода за счет дрейфа.

Время $\tau_i = d/v_{др}$, где $v_{др}$ - скорость дрейфа носителей заряда; d - ширина области

объемного заряда. При больших полях $v_{др}$ не зависит от напряженности электрического поля. В Ge и Si $v_{др} = 5 \cdot 10^4$ м/с, значение d зависит от обратного напряжения и концентрации примесей в базе и обычно меньше 5 мкм. Следовательно, для обычных фотодиодов τ_i не превышает 10^{-10} с.

Для p - i - n -фотодиодов τ_i определяет инерционность этих приборов. Постоянная времени фотодиода τ_{RC} определяется барьерной емкостью p - n -перехода $C_{бар}$ и сопротивлением R , которое является суммой сопротивлений базы фотодиода и нагрузки. Минимальное время $RC_{бар}$ наблюдается, когда сопротивление нагрузки мало по сравнению с сопротивлением базы, которое у фотодиодов значительно больше, чем у других диодов, так как невыпрямляющие контакты расположены по ее краям, а не по всей поверхности базы. Одним из путей уменьшения постоянной времени $\tau_{RC} = RC_{бар}$ является уменьшение площади фотодиода.

1.2. Описание установки

Вольт-амперные и световые характеристики исследуют с помощью схемы, приведенной на рис. 1.2, где $G2$ - регулируемый источник постоянного напряжения; PV - вольтметр для измерения напряжения на фоторезисторе; $PA2$ - микроамперметр для измерения фототока. Световой поток, падающий на фоторезистор, определяется током, протекающим через светодиод и измеряемым миллиамперметром $PA1$. Регулировка тока через светодиод осуществляется с помощью потенциометра источника тока $G1$. Зависимость светового потока, падающего на фоторезистор, от тока светодиода приведена на рис. 1.3.

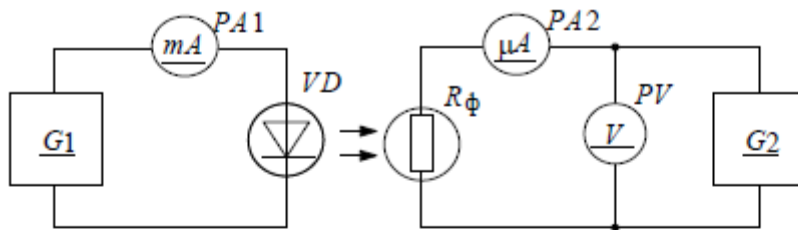


Рис. 1. 2. Схема для исследования вольт-амперных и световых характеристик фоторезистора

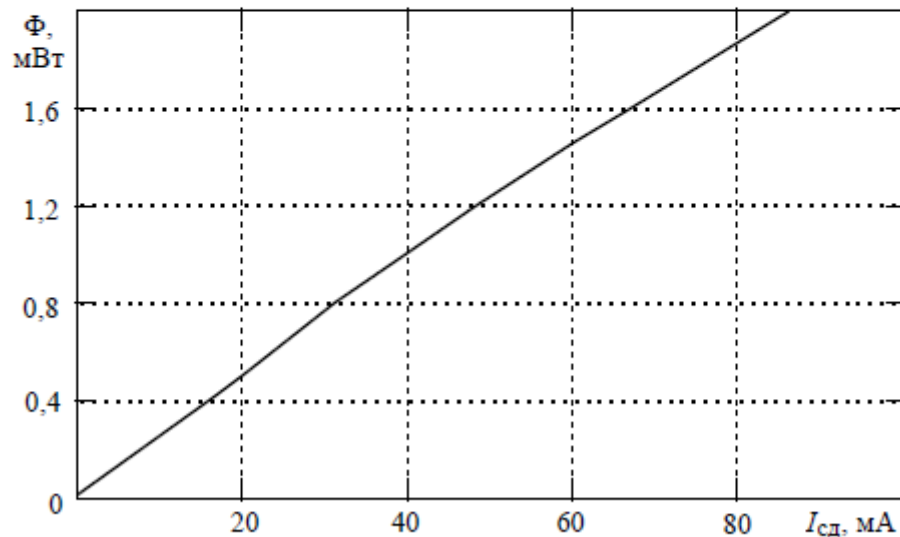


Рис. 1. 3. Зависимость излучаемого светового потока от значения тока через светодиод

Измерение постоянных времени фронтов нарастания τ_n и спада $\tau_{сп}$ фототока производится с помощью схемы, приведенной на рис. 1. 4.

Подавая на светодиод импульс тока с генератора $G3$ (Г5-26), мы получаем модулированное оптическое излучение, воздействующее на фоторезистор. Импульс фототока фоторезистора с сопротивления $R1$, которое по своему значению много меньше сопротивления освещенного фоторезистора, поступает на один из входов двухканального осциллографа. На другой вход осциллографа подается импульс напряжения с генератора $G3$.

Схемы для исследования вольт-амперных, световых и нагрузочных характеристик фотодиодов, а также для измерения их параметров, характеризующих инерционность фотоотклика, аналогичны схемам для исследования соответствующих характеристик фоторезистора. Отличие заключается лишь в том, что в цепи фотодиода вместо сопротивления $R1$ включен магазин сопротивлений нагрузки R_n .

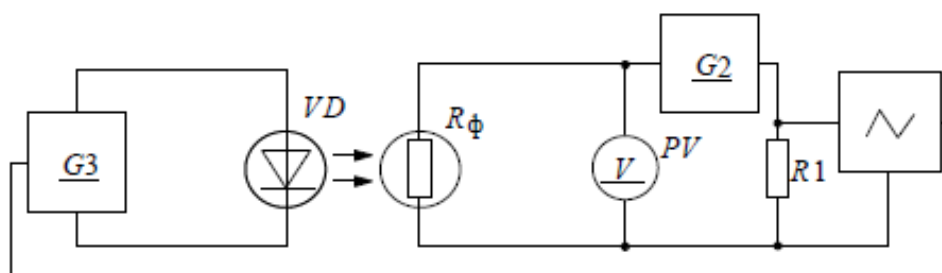


Рис. 1.4. Схема для измерения времени нарастания τ_r и времени спада τ_{cs} импульса фототока исследуемого фоторезистора

1.3. Порядок проведения исследований

1.3.1. Исследование вольт-амперной и световой характеристик фоторезистора

Установить ток через светодиод равным нулю. Снять темновую ВАХ фоторезистора, изменяя напряжение генератора $G2$ от 0 до 10 В через 1 В.

Установить максимальный ток (80 мА) через светодиод и снять ВАХ освещенного фоторезистора. Уменьшив мощность излучения в 4 раза, снять еще одну вольт-амперную характеристику фоторезистора.

Установить напряжение на фоторезисторе 10 В. Изменяя ток через светодиод, снять зависимость фототока от светового потока (10-12 точек).

1.3.2. Измерение параметров, характеризующих инерционные свойства фоторезистора

Включить генератор G3 (Г5-26). Установить длительность импульсов 0,4 с, частоту их повторения 1 Гц, а амплитуду импульса напряжения генератора 4 В. Включить осциллограф С1-83. Установить переключатель режима работы входов в прерывистый

режим обоих каналов, т. е. в положение “. . .”. Переключатели источника синхронизации установить в положения “Внутр. Г” и “—”. Потенциометр “Уровень” поставить в положение “Ждуц.”. Добиться на экране осциллографа устойчивого изображения импульса фототока фоторезистора. Уменьшать длительность импульса тока светодиода до тех пор, пока постоянные времен фронта нарастания и спада не составят 10 % от длительности всего импульса фототока. При этом амплитуда импульса фототока не должна изменяться. Измерить τ_n и $\tau_{сп}$. Снять зависимость амплитуды импульса фототока от длительности импульса тока светодиода. Уменьшать длительность импульса до тех пор, пока амплитуда фототока не уменьшится в 10 раз.

Установить на генераторе длительность импульса 0,4 с. Ручкой регулировки напряжения генератора уменьшить фототок в 4 раза. Снова измерить τ_n и $\tau_{сп}$ и снять зависимость амплитуды импульса фототока от длительности импульса излучения.

1.3.3. Исследование вольт-амперных, световых и нагрузочных характеристик фотодиода

Установить ток через светодиод равным нулю. Установить $R_n = 0$. Снять темновую ВАХ фотодиода при прямом и обратном включениях. Обратное напряжение изменять от 0 до -10 В через 1 В, а прямое - от 0 до 1 В через 0,1 В. Установить максимальный ток через светодиод. Снять вольт-амперную характеристику освещенного фотодиода в том же диапазоне напряжений, что

и для темновой ВАХ. Аналогичные измерения провести при мощности излучения светодиода, уменьшенной в 2 раза.

Исследовать зависимость фототока короткого замыкания $I_{кз}$ от светового потока. При этом напряжение на генераторе $G2$ должно быть равно 0. При тех же значениях тока через светодиод снять зависимость напряжения холостого хода $U_{хх}$ от светового потока. Для этого установить $R_n = 20$ кОм, а значение $U_{хх}$ определять компенсационным методом по значению прямого напряжения, при котором ток через светодиод равен нулю.

Установить $R_n = 10$ кОм. Измерить световую характеристику фотодиода ($I_\Phi = f(\Phi)$) в фотогальваническом (вентильном) режиме работы и в фотодиодном режиме при напряжении смещения, равном - 10 В. Исследовать нагрузочные характеристики диода в вентильном режиме работы. Установить максимальный ток через светодиод. Изменяя сопротивление нагрузки R_n , фиксировать значения тока в цепи фотодиода и напряжения на фотодиоде.

1.3.4. Исследование частотной характеристики фотодиода

Измерения параметров, характеризующих инерционность фотодиода в вентильном режиме работы, производить в следующем порядке.

1. Установить сопротивление нагрузки фотодиода 75 Ом.
2. Установить длительность импульса тока светодиода равной 50 мкс при частоте повторения 10 кГц, а амплитуду импульса напряжения генератора $G3$ равной 4 В.
3. Добиться на экране осциллографа устойчивого изображения импульсов тока фотодиода с помощью регулятора “Развертка” и потенциометра “Уровень”.
4. Измерить постоянные времени фронта нарастания τ_n и спада $\tau_{сп}$ аналогично тому, как это делалось для фоторезисторов.
5. Снять зависимость амплитуды импульса фототока от длительности импульса тока светодиода, уменьшая последнюю до тех пор, пока амплитуда импульса фототока не уменьшится в 10 раз.

6. Установить сопротивление нагрузки 10 кОм и повторить измерения по пп. 2-5. Аналогичные измерения провести для фотодиодного режима работы фотодиода при напряжении смещения - 10 В.

1.4. Содержание отчета и обработка результатов

1. Кратко описать методики исследований.

2. Построить вольт-амперные и световые характеристики фоторезистора.

3. Привести измеренные значения τ_n и $\tau_{сп}$, а также построить зависимость амплитуды импульса фототока от длительности светового импульса для фоторезистора.

4. Рассчитать кратность изменения сопротивления фоторезистора при 5 и 10 В, используя выражение (1.2).

5. Определить коэффициент усиления фоторезистора, пользуясь выражением (1.3) при $\mu = 350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $l = 0,1 \text{ см}$, $U = 10 \text{ В}$ и $\tau = \tau_{сп} / 3$.

6. Аппроксимировать световую характеристику фоторезистора выражением (1.1) и определить параметры A и x .

7. Из зависимости амплитуды фототока от длительности светового импульса определить длительность импульса $\tau_{0,7}$, при которой амплитуда фототока уменьшается до уровня 0,7 от стационарного значения. Найти граничную частоту $f_{гр} = 1 / \tau_{0,7}$.

8. Построить вольт-амперные, световые и нагрузочные характеристики фотодиода.

9. Привести значения τ_n и $\tau_{сп}$, а также построить зависимость амплитуды импульса фототока фотодиода от длительности светового импульса для вентильного и фотодиодного режимов работы.

10. По вольт-амперным характеристикам фотодиода определить его чувствительность, используя выражение (1.5).

11. Определить значение тока насыщения $I_{\text{нас}}$ из выражения (1.6), подставив туда экспериментальные значения $U_{\text{хх}}$ и $I_{\text{кз}}$ при одинаковых значениях светового потока. Сравнить полученное значение со значением $I_{\text{нас}}$, найденным по вольт-амперной характеристике неосвещенного фотодиода.

12. Из нагрузочных характеристик определить $R_{\text{н}}$, при котором мощность фотодиода в вентильном режиме будет максимальной.

13. Определить $\tau_{0,7}$ и $f_{\text{гр}}$ для вентильного и фотодиодного режимов работы фотодиода при разных значениях сопротивления нагрузки.

1.5. Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы работы фоторезисторов и фотодиодов?
2. Объясните световые характеристики фоторезисторов и фотодиодов.
3. Какие физические явления определяют инерционные свойства фоторезисторов и фотодиодов?
4. Как влияют сопротивление нагрузки и напряжение, приложенное к фотодиоду, на его инерционные свойства?
5. Какой режим работы фотодиода целесообразно использовать для измерения интенсивности оптического излучения и почему?
6. Укажите области применения фоторезисторов и фотодиодов.

Литература

1. Давыдов, В.Н. Физические основы оптоэлектроники : учебное пособие / В.Н. Давыдов ; Министерство образования и науки Российской Федерации. - Томск : ТУСУР, 2016. - 139 с. : ил., табл., схем. - Библиогр. в кн. ; - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480763>

2. Квантовые и оптические процессы в твердых телах: теория и практика : учебное пособие / Н.Н. Безрядин, А.В. Линник, Ю.В. Сынов и др. ; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» ; науч. ред. Н.Н. Безрядин. - Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2015. - 153 с. : ил. ; То же - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=336036>

3. Айхлер, Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер ; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. – М. : Техносфера, 2008. – 440 с. – (Мир физики и техники). – ISBN 978-5-94836-167-3;

4. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника : учебник для вузов / А. Н. Пихтин. – М. : Высш. шк., 2001. – 573 с. : ил. – Библиогр.: с. 571. – ISBN 5-06-002703-1;

5. Янг, М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы / Мэтт Янг ; под ред. В. В. Михайлина ; пер. с англ. Н. А. Липуновой, О. К. Нания, В. В. Стратонович. – М. : Мир, 2005. – 542 с. : ил. – ISBN 5-03-003457-9(русск.). – ISBN 3-540-65741-X(англ.).

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине «КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»
для студентов направления подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Ставрополь
2026

Содержание

1.	Предисловие	3
2.	Учебно-тематический план	4
3.	Практическое занятие № 1 Энергетические уровни и их населенность	5
4.	Практическое занятие №2 Оптические резонаторы	7
5.	Практическое занятие № 3 Оптические волокна и резонаторы на их основе	10
6.	Практическое занятие №4 Методы модуляции излучения	11
7.	Практическое занятие №5 Газовые лазеры	14
8.	Практическое занятие №6 Принцип работы светодиодов	16
9.	Практическое занятие № 7 Оптическая генерация неравновесных носителей заряда в полупроводниках	17
10.	Практическое занятие 8. Фоторезисторы	19
11	Практическое занятие №9 Фотоприемники на р-п переходах	19
12.	Список литературы	22

Предисловие

Методические рекомендации составлены в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего профессионального образования и программой дисциплины «Квантовая и оптическая электроника».

В методических рекомендациях дано описание некоторых основных вопросов по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника», включающее в себя квантовые переходы, усиление и генерация электромагнитного излучения, приемники излучения. Материал изложен в объёме, необходимом студентам по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

Учебно-тематический план

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Использование интерактивных форм	Зачетные единицы (часы)
	5 семестр		
1.	Квантовые переходы		1,5
1.1	Энергетические уровни и их населенность	Решение проблемных задач	1,5
2.	Усиление и генерация электромагнитного излучения		4,5
2.1	Оптические резонаторы	Решение проблемных задач	1,5
2.2	Оптические волокна и резонаторы на их основе	Решение проблемных задач	1,5
2.3	Методы модуляции излучения	Решение проблемных задач	1,5
3.	Лазеры		1,5
3.1	Газовые лазеры	Решение проблемных задач	1,5
4.	Полупроводниковые источники излучения		1,5
4.1	Принцип работы светодиодов	Решение проблемных задач	1,5
5.	Приемники излучения		4,5
5.1	Оптическая генерация неравновесных носителей заряда в полупроводниках	Решение проблемных задач	1,5
5.2	Фоторезисторы	Решение проблемных задач	1,5
5.3	Фотоприемники на р-п переходах	Решение проблемных задач	1,5
	Итого за 5 семестр		13,5
	Итого		13,5

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ И ИХ НАСЕЛЕННОСТЬ

Теоретическое обоснование

При переходе атомного электрона с одного уровня энергии на другой атом может излучать или поглощать электромагнитные волны, частоты которых определяются соотношением:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; E_m – конечный уровень, E_n – начальный уровень.

частота квантового перехода для молекулы определяется:

$$\nu = \frac{E' - E''}{h} = \frac{\Delta E_{\text{эл}}}{h} - \frac{\Delta E_{\text{кол}}}{h} - \frac{\Delta E_{\text{вр}}}{h}$$

$\Delta E_{\text{эл}}$ – разность энергий между электронными уровнями; $\Delta E_{\text{кол}}$ – разность энергий между колебательными уровнями; $\Delta E_{\text{вр}}$ – разность энергий между вращательными уровнями.

Главное квантовое число принимает значения 1,2,3... и определяет полную энергию электрона в любом квантовом состоянии.

В квантовых состояниях с заданным значением главного квантового числа n азимутальное квантовое число может иметь следующие значения:

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1).$$

Модуль орбитального момента импульса движущегося в атоме электрона однозначно определяется орбитальным квантовым числом:

$$L = h \sqrt{l(l+1)}.$$

В квантовом состоянии с заданным значением орбитального квантового числа l магнитное квантовое число может принимать $2l + 1$ различных значений из ряда

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l.$$

Квантовая теория обосновывает правила отбора для квантовых чисел при переходах атома из одного квантового состояния в другое. Существенно отличные от нуля вероятности имеют только такие переходы, в которых

$$\Delta L = 0, \pm 1; \Delta S = 0; \Delta J = 0, \pm 1.$$

В состоянии термодинамического равновесия распределение частиц по всем возможным энергетическим состояниям подчиняется статистическому закону распределения Больцмана:

$$N_i = \left(\frac{N}{\sum_j g_j \cdot \exp(-E_j / kT)} \right) g_i \exp(-E_i / kT) = \frac{N g_i}{Q} \exp(-E_i / kT),$$

где N_i - населенность состояния с энергией E_i , g_i - степень вырождения (статистический вес) данного состояния, N - полное число частиц, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, Q - так называемая молекулярная сумма или функция распределения служит для нормировки на полное число частиц: $\sum_i N_i = N$.

Распределение частиц для двух уровней запишем в виде:

$$N_m / N_n = g_m / g_n \cdot \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT}\right).$$

Задачи

1) Какие из термов 2s, 6p, 2d, 6h, 4f не могут соответствовать реально существующим уровням?

2) Найдите относительную населенность верхнего энергетического уровня по сравнению с нижним, если они находятся в термодинамическом равновесии и если энергетический зазор между уровнями соответствует частоте генерации CO₂ лазера ($\lambda=10,6$ мкм) в случаях температур 300, 777 и 4,2 К. Учсть, что $h\nu / K = 14,3 \cdot 10^3 / \lambda, K$, где λ в микрометрах.

3) Определить равновесную разность населенностей, отнесенную к общему числу частиц на рассматриваемых двух уровнях для случая предыдущей задачи.

4) Решить задачи 2 и 3 для аргонового лазера, у которого $\lambda=0,488$ мкм.

5) Какие из термов $4q$, $6s$, $3p$, $5q$, $3d$ соответствуют существующим уровням?

6) Сколько зеемановских уровней будет в системе, если квантовое число полного момента движения равно $7/2$?

7) Какое наибольшее количество значений может принимать квантовое число m , если главное квантовое число варьируется от 1 до 4 (влияние спина не учитывается).

Вопросы:

1. При каких условиях снимаются запреты, установленные правилами отбора для электронных переходов?

2. Опишите физический смысл коэффициентов Эйнштейна?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2 ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Теоретическое обоснование

Оптические резонаторы могут содержать большое количество отражающих и других элементов, но наиболее часто применяются двухзеркальные резонаторы, зеркала которых плоские или сферические. В зависимости от радиусов зеркал и их взаимного расположения выделяют следующие типы двухзеркальных резонаторов (R_1 и R_2 - радиусы кривизны зеркал):

- **Плоскопараллельный** ($R_1 = R_2 = \infty$) - так называемый резонатор Фабри-Перо. Широко используемой в лазерной технике разновидностью резонатора с плоскопараллельными зеркалами

является резонатор с брегговскими отражателями, представляющими собой многослойные диэлектрические или полупроводниковые структуры.

- **Конфокальный** ($R_1 = R_2 = L$). Конфокальный резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и фокусные расстояния которых совпадают. Поле в таком резонаторе концентрируется около оси, что снижает дифракционные потери. Данный тип резонатора мало чувствителен к разъюстировке, однако объем активной области используется неэффективно.

- **Полуконфокальный** ($R_1 = 2L, R_2 = \infty$). Полуконфокальный резонатор образован одним плоским и одним сферическим зеркалом, радиус кривизны которого равен удвоенной длине резонатора. По своим свойствам он аналогичен конфокальному резонатору с удвоенной длиной.

- **Концентрический** ($R_1 = R_2 = L/2$). Концентрический резонатор образован двумя сферическими зеркалами, оси и центры кривизны которых совпадают. В таких резонаторах дифракционные потери для неаксиальных мод быстро возрастают, что используется для селекции мод.

- **Полуконцентрический** ($R_1 = L, R_2 = \infty$). Образован одним сферическим зеркалом и одним плоским, по своим свойствам близок к концентрическому резонатору.

Длины волн собственных колебаний объемного резонатора с размерами L_1, L_2, L_3 , можно определить из соотношения

$$\frac{1}{\lambda_{mq}} = \sqrt{\left(\frac{m}{2L_1}\right)^2 + \left(\frac{n}{2L_2}\right)^2 + \left(\frac{q}{2L_3}\right)^2}.$$

Число собственных типов колебаний в единичном объеме, в единичном интервале частот

$$\frac{1}{V} \frac{dN_k}{d\omega} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}.$$

Расстояние между ближайшими типами аксиальных колебаний

$$\Delta \nu_q = \nu_q - \nu_{q-1} = c/\lambda_q - c/\lambda_{q-1} = qc/(2L) - (q-1)c/(2L) = c/(2L).$$

Задачи

- 1) Какой объем (в м^3) должен иметь кубический резонатор, чтобы при минимальной резонансной длине волны равной 0,5 микрон в нем разместилось 10^{20} резонансных частот?
- 2) Какой объем (в м^3) должен иметь кубический резонатор. чтобы расстояние между его соседними резонансными частотами было такое же. как у открытого резонатора с резонансной длиной волны 1 мкм и расстоянием между зеркалами равными 1 м?
- 3) Два вогнутых зеркала с фокусными расстояниями 15 см расположены на расстоянии 80 см друг от друга по оптической оси. На сколько нужно сместить эти зеркала по оси (в м), чтобы они образовали конфокальный резонатор?
- 4) Чему равен эффективный радиус (в см) гауссова пучка на расстоянии 80 см от места его перетяжки (по оптической оси), если радиус пучка в месте перетяжки равен 0,5 см, а частота колебаний света равна $3 \cdot 10^3$ ГГц?
- 5) Радиусы зеркал, образующих открытый резонатор равны 8 м и 5 м, радиус гауссова пучка в месте его перетяжки равен 0,5 см, а частота колебаний света равна $3 \cdot 10^3$ ГГц. Определить расстояние между зеркалами (в м), при котором они будут согласованы с пучком.
- 6) В методе разрядки спектра продольных колебаний открытого резонатора использующем внутренний составной резонатор, расстояние между первым зеркалом и полупрозрачным в два раза больше, чем между полупрозрачным и остальными зеркалами. При каком соотношении между номерами гармоник основного резонатора и второго система будет давать результирующие резонансы?

Вопросы:

1. Дайте определение понятию оптический резонатор?
2. Какие типы оптических резонаторов вы знаете?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3 ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА И РЕЗОНАТОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Теоретическое обоснование

Резонатор внутри оптического волокна создается парами внутриволоконных брэгговских решёток — участков оптического волновода, в которых создается структура смодулированным показателем преломления. Участки с измененным показателем преломления (штрихи) располагаются перпендикулярно оси волновода. Отражение от такой структуры происходит на длине волны

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_B,$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления основной моды, Λ_B — период решётки. Характер отражения (полное или частичное) будет зависеть от её параметров. Ширина спектра отражения при большом количестве штрихов становится пропорциональной коэффициенту связи κ , связанному с коэффициентом отражения соотношением

$$R = \tanh^2 \kappa L,$$

где L — длина решётки.

Задачи

1. Радиус внутренней части ступенчатого оптического волокна равен 100 мкм, показатель преломления этой части 1,50. Какой минимальный показатель преломления должен быть у наружной части волокна, чтобы волокно на частоте $3 \cdot 10^3$ ГГц работало в одномодовом режиме?

2. Радиус внутренней части ступенчатого оптического волокна равен 150 мкм, показатель преломления этой части 1,50. Какой должен быть показатель преломления наружной части волокна, чтобы волокно на частоте $2 \cdot 10^3$ ГГц пропускало 8 типов колебаний?

3. Угол падения пучка на боковую грань пленочного волноводного резонатора составляет 60° . Какую длину должен иметь резонатор (в м), чтобы

луч, проходя по нему в одну сторону 180 раз, отразился от верхней границы пленки, если ее показатель преломления равен 1,73, а толщина 2 мкм?

4.Резонансный отражатель содержит 4 пластины с показателем преломления 2. Во сколько раз уменьшится коэффициент отражения от него света, по напряжению, если число пластин будет вдвое меньше?

5.Угол падения света накачки на активную пленку лазера с РОС - резонатором, использующим неоднородную накачку светом частоты $3 \cdot 10^5$ ГГц, равен 45° . Какую максимальную длину волны (в м) может генерировать такой лазер, если показатель преломления пленки равен 2?

Вопросы:

1. Что такое волоконная брэгговская решетка?
2. Опишите характеристики оптических волокон для лазеров?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4 МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Теоретическое обоснование

Важнейшими характеристиками оптических модуляторов являются:

а) глубина модуляции:

$$\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max},$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – интенсивности света при полностью открытом и закрытом состоянии модулятора;

б) ширина полосы пропускания или диапазон модулирующих частот $\Delta\nu$, которые определяются как разность между верхней и нижней частотами, при которых глубина модуляции уменьшается на 50% от максимального значения; полоса частот $\Delta\nu$ определяет предельный объем информации, который можно передать с помощью данного модулятора;

в) рабочая апертура – тот угол, измеряемый в градусах илистерадианах, в пределах которого оптическое излучение может быть введено в модулятор;

г) спектральная область – область длин волн, в которой модулятор способен работать;

д) рабочее напряжение или напряжение полуволнового смещения – те величины сигнала, которые необходимо подать на вход модулятора, чтобы перевести его из «открытого» состояния в «закрытое»;

е) потери, вносимые модулятором, выражаемые, как правило, в децибелах:

$$\beta = 10 \lg I_0 / I_{\max},$$

где I_0 – интенсивность света в отсутствие модулятора, $I_{\max}$ – интенсивность света, прошедшего через модулятор в открытом состоянии;

ж) потребляемая мощность на единицу ширины полосы пропускания модулятора $P / \Delta f$, выражаемая обычно в Вт/ГГц.

Изменение показателя преломления в одноосном кристалле, вызванное продольным электрическим полем

$$\Delta n = n(E) - n_0(0) = \pm \frac{1}{2} r_{ijk} n_0^3 E_i,$$

Зависимость оптического пропускания модулятора от приложенного напряжения

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} r_{63} n_0^3 U \right),$$

Управляемая мощность модулятора с поперечным полем

$$P = \frac{\pi}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r V_{\lambda/2}^2 \Delta \nu \frac{aD}{L} \left(\frac{\Delta \varphi}{\pi} \right)^2.$$

В области не очень сильных магнитных полей разность $n_+ - n_-$ линейно зависит от напряжённости магнитного поля и в общем виде угол фарадеевского вращения описывается соотношением

$$\Theta = \nu Hl,$$

где ν — постоянная Верде.

Уравнение для эффекта Керра

$$n_e - n_o = b\lambda_0 E^2,$$

где λ_0 — длина волны света в вакууме; b — постоянная Керра.

Задачи

1. Определить в одноосном кристалле фазовую скорость луча необыкновенной волны (в мс^{-1}) идущей под углом в 30° к оптической оси кристалла, если показатель преломления луча при движении перпендикулярном этой оси равен 2, а фазовая скорость обыкновенной волны равна $2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

2. Свет распространяется вдоль главной оптической оси одноосного кристалла $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (АДР), имеющего константу $\gamma_{63} = 8,5 \cdot 10^{-12} \text{ мВ}^{-1}$ и показатель преломления обыкновенного луча равный 1,52. Какое поле (в Вм^{-1}) надо периодически прикладывать вдоль этой оси, чтобы кристалл толщиной 1мм мог использоваться в качестве центрального элемента модулятора света частоты $3 \cdot 10^5 \text{ ГГц}$?

3. Какой длины (в м) надо выбрать кристалл трехбромистого хрома (с постоянной Верди равной $27 \text{ град. } \text{Э}^{-1} \text{ см}^{-1}$), чтобы, используя варьируемое магнитное поле в 7,5 эрстед, создать коммутатор светового луча?

4. Свет распространяется перпендикулярно направлению варьируемого постоянного электрического поля в кристалле арсенида галлия, имеющего постоянную $\gamma_{41} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ мВ}^{-1}$. Какой протяженности (в м) вдоль движения луча должен быть этот кристалл, чтобы его можно было использовать в модуляторе света с длиной 10,6 мкм, если его показатель преломления обыкновенного луча равен 3,34, а варьируемое поле равно 10^7 В/м .

5. Постоянная Керра в нитробензоле равна $2 \cdot 10^3 \text{ В}^{-2} \text{ м}^{-2}$. Какой длины (в м) нужно сделать ячейку Керра в нитробензоле, чтобы поле напряженностью 150 В/м могло коммутировать световой луч при наличии поляризатора и анализатора?

Вопросы

1. В чем состоит сущность электрооптического эффекта?
2. Опишите классификацию оптических модуляторов?
3. В чем сущность эффекта Фарадея.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5 ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Цель занятия: изучение принципа действия и параметров лазеров с газовой активной средой.

Краткая теория

Длительность волнового цуга $\Delta\tau$ и эффективная спектральная ширина $\Delta\nu$ при гауссовой форме линии связаны соотношением

$$4\pi\Delta\tau\Delta\nu \sim 1.$$

Время $\Delta\tau$ называется временем когерентности.

Длина l называется длиной когерентности

$$l = c\Delta\tau$$

Условие генерации лазера имеет вид

$$k = \alpha_i + \alpha_e$$

Здесь k – коэффициент усиления активной среды, α_i – коэффициент вредных потерь, включающий потери на поглощение и рассеяние в активной среде и зеркалах резонатора, α_e – коэффициент полезных потерь на выход излучения из резонатора.

Добротность резонатора определяется отношением запасенной энергии W к энергии, теряемой за период оптических колебаний

$$Q = 2\pi \frac{\nu_0 W}{P}$$

Через добротность можно выразить и такие важные параметры резонансной системы как спектральная ширина линии

$$\delta\nu_r = \frac{\nu_0}{Q}$$

Задачи

1. Оцените минимальную длину когерентности излучения гелий-неонового лазера, если его суммарные потери равны 0.1 %.

2. В гелий - неоновом лазере длина активной среды $l = 0,5$ м, показатель усиления активной среды: $\kappa = 0,06 \text{ м}^{-1}$; диссипативные потери $\alpha = 0.5 \%$, полезные потери $\tau = 0,5 \%$. Длина волны генерируемого излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Определить коэффициент усиления K и коэффициент обратной связи β . Определить добротность резонатора Q . Возможна ли генерация при таких данных?

3. Определить частотные характеристики гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм) с такими параметрами: длина резонатора примерно равна длине активной среды $L = 0,3$ м; ненасыщенный показатель усиления среды $\kappa_0 = 0,06$, диссипативные потери $\alpha = 0,1\%$, коэффициент пропускания выходного зеркала (полезные потери) $\tau = 0,1\%$, полуширина доплеровского контура усиления $\Delta\nu_D = 1500$ МГц.

4. Показатель усиления газового лазера длиной 1 м равен $\kappa_0 = 0,1 \text{ м}^{-1}$. Если окна, герметизирующие газовую кювету, расположить по нормали к оси лазера, то будет ли выполняться условие генерации? Какой при этом может быть коэффициент пропускания выходного зеркала?

5. Резонатор лазера на углекислом газе имеет следующие параметры: $L = 1$ м; $R_1 = 4$ м; $R_2 = 2$ м. Определить, устойчив или неустойчив этот резонатор. Классифицировать этот резонатор.

Вопросы

1. Чем определяются потери излучения в активной среде?
2. Чем определяется коэффициент ненасыщенного усиления?
3. Что такое коэффициент порогового усиления?
4. Дайте определение добротности оптического резонатора исходя из параметров зеркал.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6 ПРИНЦИП РАБОТЫ СВЕТОДИОДОВ

Цель занятия: изучение основных параметров и принципа действия полупроводниковых светодиодов

Краткая теория

Эффективность светодиода представляет собой его КПД и связана с внешним квантовым выходом электролюминесценции соотношением

$$\eta \approx \frac{\hbar \omega}{e U_{\text{раб}}} \eta_e,$$

Значение внешнего квантового выхода определяется произведением внутреннего квантового выхода, коэффициента инжекции и оптической эффективности вывода излучения.

Коэффициент инжекции есть отношение электронного тока к полному току, протекающему через p-n переход

$$\eta_I = I_e / (I_e + I_p).$$

Коэффициент вывода излучения без учета поглощения внутри диода

$$\eta_0 = \frac{\sin^2 \theta_{\text{кр}}}{4} T \approx \frac{1}{n(n+1)^2}.$$

Здесь n показатель преломления материала светодиода.

Задачи

1. Эффективность преобразования внешней (электрической) мощности планарного GaAs светодиода η равна 1,5 % при прямом токе $I = 50$ мА и

разности потенциалов $U = 2$ В. Оценить генерируемую прибором оптическую мощность P_i , если коэффициент отражения R на границе GaAs – воздух равен $R = 0,8$. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

2. Оценить эффективность преобразования внешней мощности планарного GaAs светодиода η , когда внутренняя оптическая мощность P_i составляет 30 % от приложенной электрической мощности. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

3. Ширина запрещенной зоны слаболегированного GaAs при комнатной температуре 1,43 эВ. Когда материал сильно легирован (до вырождения) появляются «хвосты состояний», которые эффективно уменьшают ширину запрещенной зоны на 8%. Определить разницу в излучаемой длине волны света в случае слабого и сильного легирования.

Вопросы

1. Каковы критерии выбора полупроводниковых материалов для оптоэлектронных приборов?
2. В какой области светодиодов происходит генерация оптического излучения?
3. Чем отличается спектр излучения светодиода и полупроводникового лазера?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7 ОПТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель занятия: изучение описания физических основ оптической генерации носителей заряда.

Краткая теория

Вероятность рекомбинации

$$R_0 = \gamma_r n_0 p_0$$

где, γ_r - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом рекомбинации.

Для равновесного состояния полупроводника справедливо равенство

$$G_0 = R_0$$

В случае малого уровня биполярной генерации избыточная концентрация электронов и дырок после прекращения возбуждения уменьшается по экспоненциальному закону и за время τ .

В случае малого уровня возбуждения скорость рекомбинации зависит от Δn по квадратичному закону.

Задачи

1 Свет падает на образец кремния, легированный донорами с концентрацией $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом генерируется $10^{21} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ электронно-дырочных пар. Генерация происходит равномерно по образцу. Имеется 10^{15} см^{-3} центров генерации-рекомбинации с энергией $E_t = E_i$, поперечные сечения захвата электронов и дырок равны 10^{-14} см^2 . Рассчитать:

- 1) установившиеся концентрации электронов и дырок после включения света,
- 2) время релаксации системы после выключения света τ_p и время жизни τ_0 .

2 Образец арсенида галлия GaAs подвергается внешнему воздействию, в результате которого генерируется $10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ электронно-дырочных пар. Уровень легирования $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, время жизни $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $T = 300 \text{ К}$.

Вычислить:

- 1) коэффициент рекомбинации;
- 2) избыточную концентрацию неосновных носителей заряда.

3 Вычислить относительное изменение проводимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ при стационарном освещении с интенсивностью $I = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в германии. Коэффициент поглощения $\gamma = 100 \text{ см}^{-1}$, толщина образца много меньше γ^{-1} . Рекомбинация происходит на простых дефектах, время жизни $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, равновесная концентрация электронов $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Вопросы

1. Какие параметры неравновесных носителей заряда вы знаете?

2. От чего зависит время релаксации?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8 ФОТОРЕЗИСТОРЫ. №9 ФОТОПРИЕМНИКИ НА P-N ПЕРЕХОДАХ

Цель занятия: изучение параметров и конструкции оптических сенсоров на основе твердотельных структур электроники.

Теоретическое обоснование

Чувствительность оптического датчика

$$S = I / \Phi = I_p / \Phi$$

Спектральная чувствительность – чувствительность датчика, принимающего монохроматический поток оптического излучения:

$$S(\lambda) = I_p / \Phi(\lambda)$$

Фотоэлектрическое действие падающего светового потока:

$$R_c = a \cdot \Phi^\gamma,$$

В случае падения монохроматического излучения, фототок

$$I_\phi = q \frac{\tau_n \mu \cdot U}{L^2} \eta \frac{(1-R)\lambda}{hc} \cdot \Phi(\lambda)$$

Когда к фоторезистору приложено постоянное напряжение U , через него протекает ток I :

$$I = I_0 + I_\phi = U \cdot (1/R_d + 1/R_c) = U \cdot (1/R_d + \Phi^\gamma/a)$$

Характеристика полупроводникового диода описывается следующим выражением:

$$I = I_s [\exp(eU/kT) - 1]$$

Характеристика диода в случае падения излучения

$$I = I_s [\exp(eU/kT) - 1] - I_\phi$$

Фототок в фотодиоде может быть записан как:

$$I_\phi = \frac{q \eta (1-R)\lambda}{hc} \cdot \Phi_0 \exp(-\alpha x)$$

У биполярных транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером, коэффициент усиления по току h_{FE} увеличивает фототок. Общий ток тогда равен $(1 + h_{FE}) i_p$

Задачи

1 Для уменьшения потерь на отражение оптического сенсора предложены три покрытия со следующими коэффициентами преломления: $n_1 = 1,6$; $n_2 = 1,9$; $n_3 = 2,3$. Какое из покрытий наиболее подходит для фотодетектора если коэффициент преломления полупроводникового материала $n_{п/п} = 2,56$, а излучение попадает на фотоприемник из среды, с коэффициентом преломления $n_{ср} = 1$.

2 Рассчитать коэффициент усиления фоторезистора K на основе кремния, если расстояние между электродами $d = 50$ мкм, подвижность носителей заряда $\mu_n = 0,14$ м²/В·с, напряжение $U = 1,5$ В, эффективное время жизни носителей заряда $\tau_n = 10^{-5}$ с.

3 Рассчитайте коэффициент формы K_ϕ фоторезистора на основе AlN. Темновое сопротивление фоторезистора $R_m = 1010$ Ом, темновое удельное сопротивление $\rho_m = 1013$ Ом·см, толщина пленки AlN $d = 2$ мкм.

4 Рассчитайте чувствительность кремниевого фотодиода $S(\lambda)$ на длине волны $\lambda = 0,7$ мкм, полагая, что квантовая эффективность $\eta = 0,78$, коэффициент отражения $R = 0,1$, коэффициент поглощения $\alpha = 103$ см⁻¹, ширина p-n перехода $d = 10$ мкм.

5 Определить значение выходного напряжения на нагрузочном сопротивлении фототранзистора, включенного по схеме с ОЭ, если коэффициент передачи тока $h_{21Э} = 200$, фототок $I_\phi = 10^{-7}$ А, сопротивление нагрузки $R_{нагр.} = 1$ кОм.

6 Идеальный фотодиод (т.е. с квантовым выходом равным 1) освещается излучением мощностью $P = 10$ мВт при длине волны $0,8$ мкм. Рассчитать ток и напряжение на выходе прибора, когда детектор

используется в режиме фототока и фото-э.д.с. соответственно. Ток утечки при обратном смещении $I_0=10$ нА, рабочая температура $T=300$ К.

7 Фотодиод на основе р-п перехода имеет квантовый выход 50% на длине волны 0.9 мкм. Рассчитать чувствительность R , поглощенную оптическую мощность P ($I_p=1$ мкА) и число фотонов, поглощенных в секунду на этой длине волны r_p .

8 Лавинный фотодиод с коэффициентом умножения $M=20$ работает на длине волны $\lambda=1.5$ мкм. Рассчитать квантовый выход и выходной фототок прибора, если его чувствительность R на этой длине волны равна 0.6 А/Вт при потоке 10^{10} фотонов/с.

9 Кремниевый лавинный фотодиод имеет коэффициент умножения $M=20$ на длине волны 0.82 мкм при этом квантовый выход 50% и темновой ток 1 нА. Определить число падающих фотонов r_p на этой длине волны в секунду, обеспечивающее выходной ток прибор (после умножения), больший уровня темнового тока.

Вопросы

1. Опишите классификацию полупроводниковых приемников излучения.
2. Параметры полупроводниковых фотодиодов.
3. От чего зависит область спектральной чувствительности полупроводниковых фотоприемников?
4. Какие режимы включения фотодиодов вы знаете?

Литература

1. Давыдов, В.Н. Физические основы оптоэлектроники : учебное пособие / В.Н. Давыдов ; Министерство образования и науки Российской Федерации. - Томск : ТУСУР, 2016. - 139 с. : ил., табл., схем. - Библиогр. в кн. ; - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480763>

2. Квантовые и оптические процессы в твердых телах: теория и практика : учебное пособие / Н.Н. Безрядин, А.В. Линник, Ю.В. Сынов и др. ; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» ; науч. ред. Н.Н. Безрядин. - Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2015. - 153 с. : ил. ; То же - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=336036>

3. Айхлер, Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер ; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. – М. : Техносфера, 2008. – 440 с. – (Мир физики и техники). – ISBN 978-5-94836-167-3;

4. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника : учебник для вузов / А. Н. Пихтин. – М. : Высш. шк., 2001. – 573 с. : ил. – Библиогр.: с. 571. – ISBN 5-06-002703-1;

5. Янг, М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы / Мэтт Янг ; под ред. В. В. Михайлина ; пер. с англ. Н. А. Липуновой, О. К. Нания, В. В. Стратонович. – М. : Мир, 2005. – 542 с. : ил. – ISBN 5-03-003457-9(русск.). – ISBN 3-540-65741-X(англ.).

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине
«КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»
для студентов направления подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
профиль
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь
2026

СОДЕРЖАНИЕ

	Основные мотивы самостоятельной работы студентов	3
·	Способы самостоятельной работы при чтении учебной	4
·	и научной литературы	
·	Формы ведения записей	1
·		3
·	Форма проведения и подготовки к лекциям	2
·		3
·	Пояснительная записка	2
·		6
·	План график выполнения СРС по дисциплине	2
·		7
·	Подготовка к проведению лабораторной работы и	2
·	оформление отчета	8
·	Методические указания для подготовки к	2
·	практическим занятиям	9
·	Методические указания к выполнению письменного	3
·	обзора	0
0	Список тем индивидуальных заданий для письменного	3
	обзора	2
1	Вопросы для самопроверки	3
		4
2	Рекомендуемая литература	3
		6
3	Приложение 1	3
		8

1. Основные мотивы самостоятельной работы студентов

Активная самостоятельная работа студентов возможна только при наличии серьезной и устойчивой мотивации. Самый сильный мотивирующий фактор – подготовка к дальнейшей эффективной профессиональной деятельности. Среди внутренних факторов, способствующих активизации самостоятельной работы выделяют следующие:

1. *Полезность* выполняемой работ заключается в том, что результаты самостоятельной работы могут быть использованы на семинарских и практических занятиях, лабораторном практикуме, при подготовке публикации. Другим вариантом использования фактора полезности является активное применение результатов работы в профессиональной подготовке. Так, например, если студент получил задание на дипломную работу на одном из младших курсов, он может выполнять самостоятельные задания по ряду дисциплин, которые затем войдут в его выпускную квалификационную работу.

2. *Творческая деятельность*. Это может быть участие в научно-исследовательской, опытно-конструкторской или методической работе, проводимой на той или иной кафедре.

3. *Участие* в олимпиадах по учебным дисциплинам, конкурсам научно-исследовательских или прикладных работ и т.д.

4. *Участие* в научно – практических конференциях.

5. *Подготовка публикаций* для сборников тезисов и докладов научно-практических конференций, журналов, учебных пособий и т.д.

6. *Участие в грантовых конкурсах*.

2. Способы самостоятельной работы при чтении учебной и научной литературы

При остром недостатке времени у студентов встает вопрос об оптимизации обучения, то есть такой организации учебного процесса, которая обеспечила бы условия для продуктивного самообучения и самовоспитания. Важнейшую роль здесь играет овладение способами самостоятельной работы. Речь идет о том, чтобы прежде всего научиться рациональному использованию времени при работе с книгой.

В этом особенно нуждаются первокурсники, которые еще недостаточно владеют навыками умственной деятельности, обеспечивающей успешное обучение.

Начинать самостоятельные занятия следует с первых же дней учебы в вузе. Первые дни семестра важны, чтобы включиться в работу, установить определенный равномерный ритм на весь семестр. Чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься самостоятельно по 4-5 часов ежедневно, кроме выходных дней.

Под ритмом работы понимают ежедневные занятия в одни и те же часы, при чередовании их с перерывами для отдыха. Вначале для организации ритмичной работы требуется сознательное напряжение воли, затем принуждение снимается, возникает привычка и работа становится потребностью.

Ритмичная работа позволяет студенту заниматься много, не уставая, не снижая производительности и не перегружая себя. Для этого необходимо:

- Сменять один вид работы другим, что позволяет сохранять высокую работоспособность, поскольку при однообразных видах занятий человек утомляется больше, чем при работе разного характера.
- Заниматься несколькими предметами в один и тот же день не всегда целесообразно, поскольку при каждом переходе нужно вновь концентрировать внимание и затрачивать время.

- Умение сосредотачиваться – необходимое условие для умственного труда, иначе работа оказывается малопродуктивной и даже бесполезной.

- Начинать занятия немедленно, как только сел за стол. Следует начинать с уверенностью, что вскоре придет сосредоточенное состояние, но если внимание наступает не сразу или нарушается на время, нужно выяснить и устранить причины этого.

- Нужно научиться не прерывать внимания, пока читаемое не получит логического завершения, пока не будет пройден какой либо этап. Нередко внимание отвлекается посторонними мыслями, которые во время занятий следует решительно отгонять. Перерыв в занятиях следует приурочить к концу изучения параграфа, раздела или главы книги, та как в этом случае не будет потери времени при возобновлении работы. Умение сосредоточиться, углубиться в работу приобретается в результате практики, создающей определенные навыки.

- Повысить производительность умственного труда может порядок на рабочем месте и обстановка, благоприятствующая работе.

Большая часть самостоятельной работы студента состоит в **изучении литературы**. Одна из задач студента – научиться самостоятельно работать с книгой, а это требует определенных затрат энергии и времени. Поэтому надо научиться делать эту работу рационально, то есть необходимо учиться читать.

Как работать с учебной и научной книгой

Методы эффективной работы с книгой в целях развития интеллекта можно условно разделить на две группы:

1. Правильная организация процесса чтения
2. Повышение скорости чтения и восприятия.

В комплексе оба метода могут в 2-3 раза сократить время прочтения различных материалов.

При чтении текста мозг формирует «свою трактовку содержания» прочитанного. Происходит перекодирование сообщения на языке собственных мыслей читателя. Мозг выделяет «ядерное», сущностное значение из текста. Эффективность такой перекодировки зависит от осмысления и внимательности чтения.

Как показали эксперименты, знание и умелое применение некоторых упражнений дают возможность извлекать «ядерное» значение в тексте быстро и надежно. Эти упражнения основаны на использовании дифференциального алгоритма чтения. Центральное место в этом алгоритме занимает «блок доминанта». Это слово в переводе с латинского языка означает «господствующий, основной, главный». Что же такое доминанта применительно к тексту?

Доминанта – главная смысловая часть текста. Она выражается своими словами, на языке собственных мыслей, является результатом переработки текста, его осмысления в соответствии с индивидуальными особенностями читателя, выявления основного замысла автора.

Дифференциальный алгоритм чтения в соответствии с блоками позволяет реализовать логико-семантический анализ текста: вначале выделить ключевые слова, затем построить смысловые ряды и, наконец, выделив цепь знаний, сформулировать доминанту. Именно так и только так можно увидеть главное, действительно, проникнуть в суть вещей, явлений, излагаемых автором.

Возможны три основных способа чтения.

- Первый способ – артикуляция или проговаривание вслух (или почти вслух) того, что читаешь. Скорость такого чтения невелика.

- Второй способ – чтение про себя, при котором речевой процесс проявлен в форме внутренней речи, то есть без открытой артикуляции. Текст, при этом усваивается более эффективно. Способ в принципе допускает быстрое чтение.

- Третий, наиболее совершенный способ чтения – тоже молча, но в условиях максимального сжатия внутренней речи, при котором она проявляется в виде коротких залпов ключевых слов и смысловых рядов, адекватно отражающих смысл текста.

Итак, артикуляция замедляет процесс чтения и от нее необходимо избавиться. Однако не приведет ли сокращение артикуляции при повышении скорости чтения к снижению качества восприятия и осмысления полученной информации?

Как показали исследования психологов, иногда при чтении слова могут быть заменены наглядными представлениями, пространственными схемами. Целые группы слов – одним словом.

Быстро читающие люди обладают способностью, не проговаривая читаемый текст, сразу улавливать и фиксировать замысел автора, а затем усваивать его на уровне внутренней речи. В этом случае, несмотря на высокую скорость чтения, происходит глубокое понимание и усвоение прочитанного, так как основная идея понятна с самого начала. Задачу научиться такому чтению можно решать в два этапа. Первый предполагает сокращение артикуляции, если она ярко выражена, второй – овладение приемами чтения, при которых текст воспринимается крупными информационными блоками.

Как известно, людей по способу восприятия и переработки информации делят на три типа: зрительный, слуховой и кинестетический. Люди зрительного типа при чтении используют код наглядных образов, тогда как люди слухового типа применяют менее производительный код речедвижений. Наблюдения за людьми, читающими быстро, показывают, что они, как правило, относятся к зрительному типу.

Направленным обучением можно практически любого здорового человека научить в процессе чтения использовать код наглядных зрительных образов при соответствующем сокращении артикуляции.

Приводим следующие рекомендации по работе с книгой.

- В тексте всегда есть элементы, нахождение и использование которых позволяет извлечь требуемую информацию наиболее быстро. Например, при чтении учебника в первую очередь отыскивается наиболее важная информация данной главы, параграфа, а она часто следует после слов: в итоге, в результате, выводы и т.д.

- Попробуйте в процессе чтения мысленно заглянуть вперед, представить себе, о чем будет идти речь, к какому выводу придет автор, как далее будет строиться изложение и т.д. например, если описывается одна сторона явления, то, очевидно, далее будет описана и другая и т.д. Это позволяет предварительно подготовиться к последующей информации.

- Хорошим упражнением по развитию навыков «предвидения» является остановка чтения в момент, когда, по вашему мнению, заканчивается какая-то часть текста. Попытайтесь предугадать содержание следующей части.

- До начала чтения текста важно собрать о нем как можно больше информации, чтобы точнее представить, что можно получить из данного текста и как лучше работать с ним. Это помогут сделать название, автор, издательство, аннотация, оглавление, предисловие и заключение. Предварительное ознакомление с книгой перед настоящим чтением позволяет сберечь время и труд.

Как правило, предисловие пишется крупным специалистом в данной области, и поэтому излагаемая проблема показывается как бы целиком, в общем плане, без подробностей. А это позволяет лучше сориентироваться, начинать чтение, зная основную цель автора.

- Перед углубленным чтением любого текста (статьи, книги, конспекта, лекции перед экзаменом) сначала бегло просмотрите его целиком.

При этом постарайтесь выявить основные стержневые идеи, наиболее крупные части и логику их изложения. Лишь после такого просмотра переходите к более детальному чтению.

- Перед чтением статьи или параграфа учебника попробуйте проделать следующее: прочитайте внимательно первый абзац, потом бегло просмотрите первые или последние фразы следующих абзацев (в них обычно содержится основная информация), обратите внимание на курсивы, разрядки, подзаголовочный текст и, наконец, внимательно прочтите один-два последних абзаца; постарайтесь выявить основное направление текста и его построение.

- Прочитав в тексте интересную идею, полезно остановить свое внимание на ней, прислушаться к тем мыслям, которые она у вас вызвала, подумать о тех последствиях, которые из нее вытекают, попытаться развивать ее дальше.

- Существенно замедляют чтение регрессии – частые возвратные движения глаз, многократное повторное прочитывание материала. Возвратиться к уже прочитанному, но недостаточно хорошо понятому участку лучше всего, когда прочитан законченный смысловой фрагмент текста и сделана хотя бы попытка его осмысления, а не в процессе чтения предложения.

- Любой текст не однороден по своей информационной насыщенности. В некоторых предложениях, абзацах сконцентрировано очень много информации, например, формулируются основные положения, ведущие идеи и т.д., а другие служат лишь иллюстрацией, фоном. Таким образом, текст имеет «смысловой рельеф». Чем точнее читатель умеет определить степень важности каждого отрезка текста и приспособить к «смысловому барьеру» способ своего чтения (то есть замедлить и углубить в более важных местах и ускорять в менее важных), тем продуктивнее чтение. Постарайтесь гибко варьировать способ работы с текстом в соответствии с его «смысловым барьером».

- Чтобы чтение было эффективным, попробуйте по прочитанному всегда отвечать на 6 вопросов: *«Кто делает? Что делает? Когда? Почему? Где? Как?»*

Большое значение при чтении учебной и научной литературы имеет умение запоминать прочитанный материал, а для этого необходимо тренировать память. Существуют приемы, позволяющие тренировать память, которыми необходимо овладеть, что позволит повысить эффективность работы с учебной и научной литературой.

Тренировка памяти. В учебной деятельности важно не только, и не столько быстро читать, но и усваивать материал, сохранять в памяти. Память прекрасно тренируема и управляема. Однако прежде чем ее развивать, подумайте, какая именно память вам нужна: на идеи, на логику изложения материала, на схемы и формулы. Это разные виды памяти и развивать их надо по-разному.

Наблюдая за собой, выясните, как вам легче запомнить информацию – если вы ее видите, слышите или записываете. В дальнейшем постарайтесь так организовать работу, чтобы максимально использовать ведущий тип своей памяти.

Если у вас хорошая **зрительная память**, то хорошо запоминаются рисунки, расположение информации на странице, цвет и т.д. помогите себе, выделяя цветными карандашами отдельные места конспекта, обводя рамками, делая значки, пометки на полях, представляя зрительно отдельные аспекты текста.

При хорошей **слуховой памяти** лучше запоминается звучащая речь. Используйте эту особенность, выделяя интонацией, тембром голоса отдельные места текста, слушая его в записи на магнитофоне, рассуждая в слух и т.д.

В случае **памяти на движение** помогает повторная сокращенная запись запоминаемого материала, например выводов, основных положений

текста, рисование таблиц, графиков, схем, а при выполнении лабораторных работ лучше все потрогать и проделать самому.

Наряду с использованием ведущего типа памяти, специально позаботьтесь и о развитии отстающих, так как при многих видах профессиональной деятельности они также могут потребоваться.

Использование приемов логического, осмысленного запоминания в несколько раз повышает продуктивность деятельности. Например, при запоминании лекции, глав учебников особенно действенным является основные аспекты содержания, но и запомнить логику – целесообразную связь отдельных частей материала.

Постарайтесь с первого курса развивать память на то, что непосредственно касается вашей будущей профессии. Это и основной круг идей данной отрасли знаний, и методы, и наиболее интересные факты, и фамилии ведущих специалистов области и т.д. при этом лучше не ждать, что запомнится само, а специально стараться запомнить нужное.

Вообще установка на запоминание, особенно длительное, положительно сказывается на прочности и точности сохранения материала в памяти. Прикажите себе запомнить надолго, а не так как нерадивый студент, спешно «набивающий» себе голову информацией непосредственно перед экзаменом с единственной целью – удержать выученное на один – два дня.

Любая информация запоминается лучше, если в ней намечены какие-то спорные моменты – ориентиры. И как по камушкам переходят реку, так и по этим ориентирам потом легче воспроизвести содержание. При запоминании текста выделяйте «смысловые опорные пункты», которые легко запоминаются, но с которыми тесно связаны целые фрагменты материала. Это может быть крылатая фраза, яркая цитата, пример, идея и т.д.

Материал запоминается непроизвольно, то есть легко и без затраты специальных усилий, если он является целью какой-либо поисковой деятельности. Например, если вы задались вопросом и нашли ответ на то, что долго искали, или нашли подтверждение гипотезы, которую вы сами

выдвинули, то это запоминается само собой. Отсюда вывод – организуйте свою деятельность так, чтобы предмет запоминался, являлся целью этой деятельности. Например, ищите, выделяйте в тексте наиболее важные его положения – и они запомнятся, делите текст на части, анализируйте связи между ними – и запомнится логика текста.

При повторении курса лекций, запоминая материал по отдельным темам или даже вопросам, не забывайте повторить связь между ними. Именно тогда в голове укладывается система знаний, которая гораздо эффективнее, чем разрозненные обрывки.

В процессе развития памяти старайтесь не использовать стихийно сложившиеся мнения, механическое зазубривание, а применяйте научно обоснованные методы сознательной и рациональной организации развития памяти и поиск новых приемов.

Предпосылкой хорошей памяти являются осознание человеком своей деятельности и разграничение информации на ту, которая решающим образом помогает скорейшему достижению своих целей, и на менее существенную информацию. Начинайте любое дело с четкой и ясной формулировки его цели; определите, какая информация может оказать решающее воздействие на ее достижение, и сконцентрируйтесь на ней.

Прочному запоминанию способствует многомодельность восприятия, то есть запоминаемый текст читается, проговаривается и прослушивается. Везде, где это возможно, постарайтесь использовать три приема (слух, зрение и чувства) обработки запоминаемой информации сразу несколько органов чувств.

Не очень осмысленную вами информацию, которую, тем не менее, надо запомнить, можно удерживать с помощью ассоциативных приемов мнемотехники, суть которых в том, что новое связывается с известным не прямо, а через цепочку дополнительных промежуточных ассоциаций (помните цвета спектра – «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан»). Везде, где трудно запомнить прямо, найдите дополнительный связующий

мостик. Такими «связующими» мостиками являются буквальные «узелки» на память, завязываемые многими на носовом платке. В течение дня человек неизбежно пользуется носовым платком, а там – узелок, «напоминающий», что нужно не забыть сделать определенное дело.

Память будет работать прекрасно, если наряду с имеющимися приемами вы будете придумывать все новые, адекватные различным видам информации. Если такая работа привычна для вас, то с каждым годом память будет становиться все более мощной и продуктивной.

3. Формы ведения записей

Самостоятельная работа с книгой может быть успешной, если текст не только прочитан, но и законспектирован. Существует несколько **форм записей**, но любая форма записи не даст нужного результата, если не будет пробуждать мысли того, кто ее ведет, если отсутствует активная работа ума и формирование своих выводов из прочитанного.

Выбор формы записи зависит от индивидуальных особенностей человека, его образованности и опыта. При этом не меньшую роль играет назначение записей, то есть то, какие задачи ставит перед собой человек (для самообразования, для выступления на семинаре, для использования в будущем).

Введение записей мобилизует наряду со зрительной памятью, также и моторную память. Кроме того, у человека, систематически ведущего записи изучаемой литературы, создается свой фонд материалов для быстрого повторения и мобилизации накопленных знаний.

Все записи должны быть убористыми и компактными. Интервалы между строками должны быть достаточными, чтобы вписывать дополнения. Рекомендуется вести записи ручкой, а карандашом или ручкой другого цвета пользоваться для отметок и выделений при последующей работе. Полезно также датировать записи.

Записи могут носить различный характер: план, выписки, тезисы, аннотирование, конспектирование, реферирование.

1. План - наиболее краткая формой записи.. Это перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. План обычно раскрывает структуру произведения, логику автора, способствует лучшей ориентации в содержании.

Так, составленным планом можно воспользоваться, чтобы вспомнить прочитанное или быстро отыскать в книге нужное место. Представление об основных пунктах плана дает оглавление книги, поэтому во многих случаях наименования глав и разделов можно использовать в качестве пунктов. Составление плана приучает логически мыслить, вырабатывать умение сжато и последовательно излагать суть вопроса в письменной и устной форме.

Существует два способа составления плана: работа над ним по ходу чтения и составление плана после ознакомления с произведением. При этом план получается более последовательным и стройным.

Трудность составления плана состоит в том, что надо выяснить для себя, прежде всего, построение изучаемого текста, ход мыслей автора и лишь затем изложить содержание работы кратко и ясно. При всей своей краткости план дает представление о содержании прочитанного. Следует учесть, что форма плана не исключает цитирования отдельных мет и обобщений. Различают простой и развернутый план. В отличие от простого плана развернутый план не только содержит перечисление вопросов, но и раскрывает основные идей произведения, может включать выдержки из него, схемы, таблицы. Планом, особенно развернутым, необходимо пользоваться при написании выступления или статьи.

В целом развернутый план дает гораздо большее представление о произведении, его основных идеях, задачах, которые в нем решаются. Он может включать положения, замечания, собственные мысли студента.

Важно знать, что составление планов помогает вырабатывать способность к отвлеченному, абстрактному мышлению, но наибольшую

пользу составление плана даст подготовленным лицам, которые бывают достаточно лишь взглянуть на перечень основных вопросов, чтобы воспроизвести содержание прочитанного.

2. Тезисы – более сложная и совершенная форма записи, чем составление плана.

Это сжатое изложение основных мыслей прочитанного произведения или подготовляемого вступления. Особенностью тезисов является их утвердительный характер.

В них сосредотачивается самое главное, только выводы и обобщения, в них меньше доказательств, иллюстрации и пояснений. Тезисы не должны повторять дословно текст, но в ряде мест могут быть близки к нему, воспроизводя некоторые характерные выражения автора, важные для понимания хода его мыслей. Составление тезисов помогает глубже понять основные идеи произведения, выделить главное в нем; приучают сжато, точно и четко сформулировать свои мысли, повышает культуру речи и письма. При составлении тезисов учитывают следующее. Прежде всего, если произведение небольшое, необходимо внимательно изучать его в целом, если большое – изучать по главам и разделам. Затем, когда будут ясны основные идеи, кратко и последовательно излагать их в виде пунктов.

Различают простые и сложные, развернутые тезисы. Если записывают только утверждение чего – либо, такой тезис называют простым, а сложным тезисом будет выражение главной мысли, содержащее, кроме утверждения, еще и краткое ее доказательство.

Часто тезисы формулируются самим автором как выводы и обобщения в заключении книги или разделах книги. Нередко тезисы выделяются в тексте другим шрифтом.

Рекомендуется делать тезисные записи своими словами, причем можно записывать один абзац за другим, учитывая смысловую связь между ними. Но в большинстве случаев следует составлять сводный тезис, сложный по

форме. При этом объединяется несколько утверждений, тесно связанных между собой.

Тезисы по содержанию очень близки к **конспекту**, но конспект носит более описательный характер, и его положения не столь категоричны, как в тезисах. Кроме того, конспект представляет собой более полную форму записи.

Следует отметить, что различие между формами записей условно, но в любой форме запись – важнейшая часть самостоятельной работы с книгой.

3. Выписки. Это записи текста из книги: теоретических положений, статистических данных, имеющих по мнению читателя важное значение.

Достоинство выписок состоит в точности воспроизведения текста книги, удобстве пользования записями при последующей работе, в накоплении обобщений и фактического материала. Выписки полезны для повторения, освежения в памяти прочитанного, для быстрой мобилизации своих знаний, когда необходимо в короткий срок вспомнить материал. Выписки выделяют из текста самое главное и тем самым помогают глубже понять его. Без них трудно обойтись при подготовке доклада, реферата, выступления. Выписки следует рассматривать как составную часть тезисов и конспектов.

Выписывать текст можно и по ходу чтения и после его завершения. В последнем случае надо замечать места, которые потом будут выписаны. Необходимо каждую выписку снабжать ссылкой на источник с указанием соответствующей страницы. Это нужно, чтобы в последствии можно было быстро найти в книге соответствующее место. Целесообразно выписывать из текста только такие места, в которых содержится самое главное, суть вопроса. Выписки должны быть ориентированы на изучение произведения в целом, а не отдельных мест, поскольку положения, вырванные из общего контакта, понимаются нередко совсем не так, как этого хотел автор. Иначе говоря, отдельно взятые, лишённые пояснений выдержки могут быть не поняты или поняты неправильно.

Выписки бывают дословные (цитаты) и «свободные», когда мысли автора излагаются своими словами. Следует учесть, что большие отрывки, которые трудно цитировать, целесообразнее в краткой форме переложить своими словами, но «яркие» и важные места лучше выписывать дословно. Каждую цитату следует заключать в кавычки. Если ее берут из середины предложения, то после вводных кавычек ставят три точки. Ставят их и в конце цитаты, если из предложения опущены последние слова.

Следует знать, что какого-либо единого метода выписок, годного для всех случаев, не существует, поскольку у каждого человека свои особенности мышления и восприятия, свой подход к теме. Все это влияет на содержание и характер выписок.

Выписки рекомендуется хранить в картотеке, конвертах или папках, на которых следует обозначить общую тему.

4. Аннотация – еще одна форма записи, являющаяся кратким обобщением содержания книги. Ею удобно пользоваться, если имеется намерение вернуться к изучаемому произведению. Аннотация может быть необходима и для того, чтобы не забыть о нем.

Для составления аннотации надо сначала полностью прочитать и глубоко продумать произведение. При всей своей краткости аннотация может содержать отдельные фрагменты авторского текста, а не только оценку книги или статьи.

5. Резюме очень близко к аннотации. Это запись, являющаяся краткой оценкой прочитанного материала. Различие между ними состоит в том, что аннотация сжато характеризует произведение в целом, а резюме концентрирует внимание на его выводах, главных итогах.

6. Конспект – наиболее совершенная и наиболее сложная форма записи. Слово «конспект» происходит от латинского «conspectus», что означает «обзор, изложение». В правильно составленном конспекте обычно выделено самое основное в изучаемом тексте, сосредоточено внимание на

наиболее существенном, в кратких и четких формулировках обобщены важные теоретические положения.

Конспект представляет собой относительно подробное, последовательное изложение содержания прочитанного. На первых порах целесообразно в записях ближе держаться тексту, прибегая зачастую к прямому цитированию автора. В дальнейшем, по мере выработки навыков конспектирования, записи будут носить более свободный и сжатый характер.

Конспект книги обычно ведется в тетради. В самом начале конспекта указывается фамилия автора, полное название произведения, издательство, год и место издания. При цитировании обязательная ссылка на страницу книги. Если цитата взята из собрания сочинений, то необходимо указать соответствующий том. Следует помнить, что четкая ссылка на источник – непереносимое правило конспектирования. Если конспектируется статья, то указывается, где и когда она была напечатана.

Конспект подразделяется на части в соответствии с заранее продуманным планом. Пункты плана записываются в тексте или на полях конспекта. Писать его рекомендуется четко и разборчиво, так как небрежная запись с течением времени становится малопонятной для ее автора. Существует правило: конспект, составленный для себя, должен быть по возможности написан так, чтобы его легко прочитал и кто-либо другой.

Формы конспекта могут быть разными и зависят от его целевого назначения (изучение материала в целом или под определенным углом зрения, подготовка к докладу, выступлению на занятии и т.д.), а также от характера произведения (монография, статья, документ и т.п.). Если речь идет просто об изложении содержания работы, текст конспекта может быть сплошным, с выделением особо важных положений подчеркиванием или различными значками.

В случае, когда не ограничиваются переложением содержания, а фиксируют в конспекте и свои собственные суждения по данному вопросу или дополняют конспект соответствующими материалами их других

источников, следует отводить место для такого рода записей. Рекомендуется разделить страницы тетради пополам по вертикали и в левой части вести конспект произведения, а в правой свои дополнительные записи, совмещая их по содержанию.

Конспектирование в большей мере, чем другие виды записей, помогает вырабатывать навыки правильного изложения в письменной форме важные теоретических и практических вопросов, умение четко их формулировать и ясно излагать своими словами.

Таким образом, составление конспекта требует вдумчивой работы, затраты времени и труда. Зато во время конспектирования приобретаются знания, создается фонд записей.

Конспект может быть текстуальным или тематическим. В **текстуальном конспекте** сохраняется логика и структура изучаемого произведения, а запись ведется в соответствии с расположением материала в книге. За основу тематического конспекта берется не план произведения, а содержание какой-либо темы или проблемы.

Текстуальный конспект желательно начинать после того, как вся книга прочитана и продумана, но это, к сожалению, не всегда возможно. В первую очередь необходимо составить план произведения письменно или мысленно, поскольку в соответствии с этим планом строится дальнейшая работа. Конспект включает в себя тезисы, которые составляют его основу. Но, в отличие от тезисов, конспект содержит краткую запись не только выводов, но и доказательств, вплоть до фактического материала. Иначе говоря, конспект – это расширенные тезисы, дополненные рассуждениями и доказательствами, мыслями и соображениями составителя записи.

Как правило, конспект включает в себя и выписки, но в него могут войти отдельные места, цитируемые дословно, а также факты, примеры, цифры, таблицы и схемы, взятые из книги. Следует помнить, что работа над конспектом только тогда будет творческой, когда она не ограничена текстом

изучаемого произведения. Нужно дополнять конспект данными из другими источников.

В конспекте необходимо выделять отдельные места текста в зависимости от их значимости. Можно пользоваться различными способами: подчеркиваниями, вопросительными и восклицательными знаками, репликами, краткими оценками, писать на полях своих конспектов слова: «важно», «очень важно», «верно», «характерно».

В конспект могут помещаться диаграммы, схемы, таблицы, которые придадут ему наглядность.

Составлению **тематического конспекта** предшествует тщательное изучение всей литературы, подобранной для раскрытия данной темы. Бывает, что какая-либо тема рассматривается в нескольких главах или в разных местах книги. А в конспекте весь материал, относящийся к теме, будет сосредоточен в одном месте. В плане конспекта рекомендуется делать пометки, к каким источникам (вплоть до страницы) придется обратиться для раскрытия вопросов. Тематический конспект составляется обычно для того, чтобы глубже изучить определенный вопрос, подготовиться к докладу, лекции или выступлению на семинарском занятии. Такой конспект по содержанию приближается к реферату, докладу по избранной теме, особенно если включает и собственный вклад в изучение проблемы.

Следующим методом самостоятельной работы с книгой является **реферирование** на определенную тему. Слово реферат употребляется в двух различных значениях:

1. Краткое изложение содержания книги, научной работы;
2. Доклад за заданную тему на основе критического образа литературных источников.

7. Реферат – это один из самых сложных видов самостоятельной работы с книгой, а для этого следует овладеть более простыми приемами работы – разработкой плана, составлением тезисов и конспектов. Подготовка

реферата и выступление с его изложением углубляет знания, расширяет кругозор, приучает логически, творчески мыслить, развивать культуру речи.

При просмотре литературы намечается ориентировочный план реферата, в который включается обычно 3-4 основных вопроса или раздела. Каждом из разделов формулируются подвопросы, помогающие последовательно раскрыть содержание проблемы.

В процессе изучения материала формулировки подвопросов и разделов обычно уточняются. При реферировании следует делать выписки, записывать мысли, возникающие при чтении; следует также точно записывать и определения тех понятий, которые будут использованы в реферате. Из прочитанной литературы нужно заимствовать не буквальный текст, а важнейшие мысли, идеи, теоретические положения; можно цитировать небольшие отрывки, приводить диаграммы, схемы, чертежи, но главное – высказывать собственные соображения по вопросам реферата. Приведенные выше советы следует рассматривать как примерные, предполагающие и другие подходы, поскольку у каждого человека вырабатываются свои приемы и навыки составления рефератов. Большую помощь в работе над рефератом оказывают предисловия к монографиям и сборникам. В них можно найти сведения о цели издания, а также о существующих пробелах в исследовании.

При разработке плана реферата важно учитывать, чтобы каждый его пункт раскрывал одну из сторон избранной темы, а все пункты в совокупности охватывали тему целиком. Различают несколько композиционных решений реферата: во-первых, хронологическое, когда тема раскрывается в исторической последовательности; во-вторых, описательное, при котором тема расчленяется на составные части, в целом раскрывающие определенное явление; в-третьих, аналитическое, когда тема исследуется в ее причинно-следственных связях и взаимозависимых проблемах. Важно следить за тем, чтобы каждый пункт плана был соотнесен с главной темой и не содержал повторения в других пунктах. Важными разделами реферата

является вступление и заключение. Во вступлении надо обосновать актуальность темы, обозначить круг составляющих ее проблем, четко и кратко определить задачу своей работы. В заключении делаются краткие выводы, подводятся итоги. В конце реферата должен быть приложен список литературы.

В отличие от тематического конспекта реферат требует большей творческой активности, самостоятельности в обобщении изученной литературы, умения логически стройно изложить материал, оценить различные точки зрения на исследуемую проблему и высказать о ней собственное мнение. В реферате важно связать теоретические положения с практикой.

Итак, реферат – это самостоятельное произведение автора, которое должно свидетельствовать о знании литературы по данной теме, ее основной проблематике, отражать точку зрения автора реферата на эту проблематику, его умение осмысливать явления жизни на основе теоретических знаний.

При оценке реферата обычно руководствуются следующими критериями:

1. Удалось ли его автору раскрыть сущность данной проблемы;
2. Сумел ли автор показать связь рассматриваемой проблемы с жизнью;
3. Проявил ли автор самостоятельность и творческий подход в изложении реферата;
4. Можно ли считать реферат логически стройным и т.д.

4. Форма проведения и подготовки к лекциям

Основы знаний закладываются на лекциях, им принадлежит ведущая роль в учебном процессе. На лекциях дается самое важное, основное в изучаемой дисциплине. Основные задачи, стоящие перед лектором: помочь студентам понять основы и усвоить материал на самой лекции, дать указания

на то, что требует наибольшего внимания, учить правильному мышлению и создавать ясное представление о методологии изучаемой науки.

Лекции являются эффективным видом занятий для формирования у студентов способности быстро воспринимать новые факты, идеи, обобщать их, а также самостоятельно мыслить.

Лектор излагает теоретический и практический материал, относящийся к основному курсу. Из большого числа монографий, учебников, сборников лектор выбирает самое главное, помогает усвоить логику рассуждений. Интонацией голоса и манерой изложения лектором подчеркивает наиболее существенное, выделяет главное и второстепенное.

Лектор может приводить наблюдения и факты из своего личного опыта, что придает материалу убедительность, повышает интерес к предмету лекции, способствует его усвоению.

Важно помнить, что лекция – это творческий процесс, в котором участвуют одновременно и лектор, и студенты, поэтому она требует атмосферы сотрудничества и уважительного отношения к труду лектора.

Студенту следует научиться понимать и основную идею лекции, а также, следуя за лектором, участвовать в усвоении новых мыслей. Но для этого надо быть подготовленным к восприятию очередной темы. Время, отведенное на лекцию, можно считать использованным полноценно, если студенты понимают роль лектора, задачи лекции, если работают вместе с лектором, а не бездумно ведут конспект.

Подготовленным можно считать такого студента, который, присутствуя на лекции, усвоил ее содержание, а перед лекцией припомнил материал раздела, излагаемого на ней или просмотрел свой конспект, или учебник.

Перед лекцией необходимо прочитывать конспект предыдущей лекции, а после окончания крупного раздела курса рекомендуется проработать его по конспектам и учебникам.

Для наиболее важных дисциплин, вызывающих наибольшие затруднения, рекомендуется перед каждой лекцией просматривать содержание предстоящей лекции по учебнику с тем, чтобы лучше воспринять материал лекции. В этом случае предмет усваивается настолько, что перед экзаменом остается сделать немного для закрепления знаний.

Важно помнить, что ни одна дисциплина не может быть изучена в необходимом объеме только по конспектам. Для хорошего усвоения курса нужна систематическая работа с учебной и научной литературой, а конспект может лишь облегчить понимание и усвоение материала.

Основная задача при слушании лекции – учиться мыслить, понимать идеи, излагаемые лектором. Большую помощь при этом может оказать конспект. Передача мыслей лектора своими словами помогает сосредоточить внимание, не дает перейти на механическое конспектирование. Механическая запись лекции приносит мало пользы.

Ведение конспекта создает благоприятные условия для запоминания услышанного, т.к. в этом процессе принимают участие слух, зрение и рука. Конспектирование способствует запоминанию только в том случае, если студент понимает излагаемый материал. При механическом ведении конспекта, когда просто записываются слова лектора, присутствие на лекции превращается в бесполезную трату времени.

Некоторые студенты полагают, что при наличии учебных пособий, учебников нет необходимости вести конспект. Такие студенты нередко совершают ошибку, так как не используют конспект как средство, позволяющее активизировать свою работу на лекции или полнее и глубже усвоить ее содержание.

Определенная часть студентов считает, что конспекты лекции могут заменить учебники, поэтому они стремятся к дословной записи лекции и нередко не задумываются над ее содержанием. В результате при разборе учебного материала по механической записи требуется больше труда и времени, чем при понимании и кратком конспектировании лекции.

Конспект ведется в тетради или на отдельных листах. Записи в тетради легче оформить, их удобно брать с собой на лекцию или практические занятия. Рекомендуется в тетради оставлять поля для дополнительных записей, замечаний и пунктов плана. Но конспектирование в тетради имеет и недостаток: в нем мало места для пополнения новыми материалами, выводами и обобщениями. В этом отношении более удобен конспект на отдельных листах (карточках). Из него нетрудно извлечь отдельную необходимую запись, конспект можно быстро пополнить листами, в которых содержатся новые выводы, обобщения, фактические данные. При подготовке выступлений, докладов легко подобрать листки из различных конспектов и свести их вместе. В результате такой работы конспект может стать тематическим.

Но вести конспект на отдельных листках или карточках более трудоемко, чем в тетради. Карточки легко рассыпать и перепутать, приходится обзаводиться ящичками для хранения карточек, возникает необходимость на каждом листке писать его порядковый номер.

Но затрата труда и времени окупается преимуществами конспектирования на карточках перед конспектом в тетради.

Рекомендуется делать такие карточки, которые помещаются в обычный почтовый конверт. Карточки удобно тасовать, менять при необходимости их последовательность, раскладывать на столе для обзора. Например, учителю истории карточки служили бы долго. Перед уроком можно взять соответствующий конверт и найти в нем материал по узловым вопросам темы, записанный еще в вузе.

При конспектировании допускается сокращение слов, но необходимо соблюдать меру. Каждый студент обычно вырабатывает свои правила сокращения. Но если они не введены в систему, то лучше их не применять, т.к. случайные сокращения ведут к тому, что спустя некоторое время конспект становится непонятным.

Следует знать, что не существует какого-либо единого, годного для всех метода конспектирования. Каждый ведет записи так, как ему представляется наиболее целесообразным и удобным. Собственный метод складывается по мере накопления опыта, но во всех случаях надо стремиться к тому, чтобы конспективные записи были краткими и наилучшим образом содействовали глубокому усвоению изучаемого материала. Известный отечественный педагог В.А. Сухомлинский, рекомендовал учиться думать над конспектом уже на лекции и работать над записями ежедневно хотя бы в течение 2 часов. Он советовал также делить конспект на две графы: в первой кратко записывать изложенные лекции, а во второй – то, над чем надо подумать; сюда же следовало заносить узловые, главные вопросы, над которыми надо подумать постоянно, связывая с этим повседневное чтение. Он подчеркивал, что узловые вопросы предмета будут программой, на основе которой припоминается весь материал.

5.Пояснительная записка

В изучении дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» достаточно большой объем материала отводится на самостоятельную работу студента.

Изучение дисциплины начинается с ознакомления рабочей программой дисциплины «Квантовая и оптическая электроника». Это необходимо для того, чтобы осмыслить содержание учебной дисциплины, круг вопросов, которые предстоит изучить.

Для проведения самостоятельной работы рекомендуется следующий порядок действий: а) овладение теоретическим материалом; б) самостоятельная работа с рекомендованной литературой.

При самостоятельном изучении дисциплины студенту необходимо самостоятельно работать с учебной и научной литературой. В рамках самостоятельной работы студент должен изучить ряд теоретических

вопросов, используя учебники и учебные пособия, приведенные в библиографическом списке данных методических указаний. В общем самостоятельна работа по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника» включает подготовку к практическим и лабораторным занятиям, написание письменных обзоров и реферата с их защитой.

При подготовке к теоретическому вопросу следует внимательно прочитать соответствующий параграф в рекомендованном литературном источнике и сделать краткий письменный конспект, аналогично конспекту лекций.

6.План-график выполнения СРС по дисциплине.

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Виды самостоятельной работы	Срок сдачи (неделя)
1	2	3	4
1.	Введение в дисциплину	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям	2
2.	Квантовые переходы.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям	3
3.	Усиление и генерация электромагнитного излучения. Квантовое усиление и генерация. Открытые резонаторы.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	5
4.	Лазеры	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	6

5.	Полупроводниковые источники излучения. Источники излучения в технике и связи.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	10
6.	Приемники излучения. Разновидности фотодиодов.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	12
7.	Методы модуляции. Методы модуляции оптической несущей.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	14
8.	Квантовые приборы СВЧ. Квантовые усилители СВЧ.	индивидуальное собеседование по разделу, проверка письменного обзора, подготовка к семинарским занятиям, подготовка к защите лабораторных работ	17
9	Письменный обзор индивидуального задания	Защита письменного обзора	18

7. Подготовка к проведению лабораторной работы и оформление отчета

Лабораторная работа включает самостоятельную проработку теоретического материала, изучение методик проведения и планирование эксперимента, изучение измерительных средств и приборов, обработку и интерпретацию экспериментальных данных.

При проведении лабораторного практикума необходимо:

- подготовиться к экспресс-опросу по теоретическому материалу, необходимому для выполнения работы (для получения допуска к лабораторной работе), с использованием руководства по выполнению лабораторных работ и рекомендованной литературы;
- подготовить и оформить план выполнения лабораторной работы;
- после выполнения лабораторной работы провести необходимые расчеты, выполнить анализ полученных данных и оформить отчет в

соответствии с руководством по выполнению лабораторных работ;

- сдать отчет по выполненной лабораторной работе и ответить на вопросы преподавателя (получить зачет за выполненную работу). Краткие теоретические сведения и порядок проведения лабораторных работ представлены в методических указаниях к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника».

8. Методические указания для подготовки к практическим занятиям

Практические занятия проводятся в форме дискуссии, на которых проходит обсуждение путей решения конкретных заданий по параметрам и характеристикам приборов квантовой и оптоэлектроники. Обсуждения направлены на освоение научных основ, эффективных методов и приемов решения конкретных практических задач, на развитие способностей к творческому использованию получаемых знаний и навыков. Основная цель проведения семинара заключается в закреплении знаний полученных в ходе прослушивания лекционного материала. Семинар проводится в форме устного опроса студентов по вопросам семинарских занятий, а также в виде решения практических задач или моделирования практической ситуации. В ходе подготовки к семинару студенту следует просмотреть материалы лекции, а затем начать изучение учебной литературы. Следует знать, что освещение того или иного вопроса в литературе часто является личным мнением автора, построенного на анализе различных источников, поэтому следует не ограничиваться одним учебником или монографией, а рассмотреть как можно больше материала по интересующей теме. Обязательным условием подготовки к семинару является изучение нормативной базы.

В ходе самостоятельной работы студенту для необходимы отслеживать научные статьи в специализированных изданиях, а также

изучать статистические материалы, соответствующей каждой теме. Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к семинарскому занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы плана семинарского занятия;
4. Выполнить домашнее задание;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

При подготовке к семинарским занятиям следует руководствоваться указаниями и рекомендациями преподавателя, использовать основную литературу из представленного им списка. Для наиболее глубокого освоения дисциплины рекомендуется изучать литературу, обозначенную как «дополнительная» в представленном списке. При подготовке доклада на семинарское занятие желательно заранее обсудить с преподавателем перечень используемой литературы, за день до семинарского занятия предупредить о необходимых для предоставления материала технических средствах, напечатанный текст доклада предоставить преподавателю.

Краткие теоретические сведения и задания на семинарские занятия представлены в методических указаниях к выполнению практических занятий по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника».

9. Методические указания к выполнению задания письменного обзора

Целью выполнения письменного обзора является закрепление теоретических знаний по темам дисциплины.

Письменный обзор рекомендуется выполнять, состоящим из шести указанных ниже разделов по теоретическим и практическим основам дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» указанных в *Плане-графике выполнения СРС по дисциплине*.

Все эти вопросы освещаются в письменном обзоре на основе обзора литературы по проблемам «Квантовая и оптическая электроника». Рекомендованные разделы письменного обзора:

1. Введение.
2. Постановка цели обзора.
3. Постановка задач решаемых в обзоре.
4. Решение поставленных задач.

5. Индивидуальное задание: расширенное изложение одного из контрольных вопросов согласно приведенному перечню тем (название тем выделено жирным шрифтом п.9. перечень вопросов которые необходимо раскрыть при выполнении индивидуального задания указаны обычным шрифтом)

Заключение: обоснование данных.

Работа должна быть написана аккуратно, разборчиво, без сокращений слов. Проводится защита письменного обзора с оценкой его преподавателем. При оценке учитываются знание предмета, умение пользоваться дополнительной литературой по курсу дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» и специальной литературой, знание и полнота использованного в обзоре материала, а также качество оформления.

Письменный обзор должна быть набран на компьютере и распечатан на принтере. Стилль оформления основного текста должен содержать следующие установки.

Шрифт – кегль 16, гарнитура «Таймс».

Межстрочный интервал – 1,5.

Выравнивание - по ширине.

Формат страницы – А4.

Поля: верхнее – 25 мм; нижнее – 25 мм; левое – 25 мм; правое – 25 мм.

В виде исключения письменный обзор может быть выполнен в рукописном варианте. В этом случае, работа должна быть написана

аккуратно, разборчиво, без сокращений слов, с полями (4-5 см) для замечаний рецензента.

Текст обзора необходимо дополнить иллюстрациями, таблицами, схемами, графиками. Обязательно должен быть приведен список использованной литературы по правилам библиографического описания и содержать следующие элементы: фамилия и инициалы автора, наименование, место издания работы, издательство, год издания, количество страниц. Группировка литературы может быть алфавитная, систематическая, хронологическая, по видам источников.

Титульный лист оформляется в соответствии с Приложением 1. Обязательна нумерация страниц. Первой считается титульный лист, на котором номер страницы не ставится. Личная подпись и дата выполнения – обязательны.

Письменный обзор представляется преподавателю строго в срок, согласно календарному графику учебного процесса.

Система оценки письменного обзора пятибалльная. При получении неудовлетворительной оценки работы студент должен внести исправления по замечаниям преподавателя и сдать работу на повторную проверку.

10.Список тем индивидуальных заданий для письменного обзора

№ п/п	Темы для самостоятельного изучения	Рекомендуемые источники информации (№ источника)			
		Основная	Дополни- тельная	Методи- ческая	Интернет- ресурсы
1	Спектральные термы атомов и молекул	1-2	1-3		
2	Дипольное приближение	1-2	1-3		
3	Уширение спектральных линий	1-2	1-3		
4	Анализ двух-, трех- и четырехуровневых схем	1-2	1-3		

	работы квантовых усилителей и генераторов				
5	Нестационарная генерация	1-2	1-3		
6	Модуляция добротности резонатора	1-2	1-3		
7	Синхронизация мод	1-2	1-3		
8	Генерация гармоник	1-2	1-3		
9	Классификация газовых лазеров	1-2	1-3		
10	Перестраиваемые твердотельные лазеры	1-2	1-3		
11	Волоконные лазеры	1-2	1-3		
12	Рентгеновские лазеры и лазеры на свободных электронах	1-2	1-3		
13	Полупроводниковые гетеропереходы и инжекционная электролюминесценция	1-2	1-3		
14	Фотовольтаические эффекты в неоднородных структурах	1-2	1-3		
15	Оптопары и оптроны	1-2	1-3		
16	Волоконнооптические линии связи	1-2	1-3		
17	Принципы голографии	1-2	1-3		

11. Вопросы для самопроверки

Квантовые переходы

1. Электромагнитное излучение.
2. Волновые свойства излучения.
3. Квантовые свойства излучения.
4. Квантовые числа многоэлектронных атомов.
5. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного и вынужденного

излучения.

6. Электрические и магнитные дипольные переходы.
7. Уширение спектральных линий.

Усиление и генерация электромагнитного излучения

1. Общие схемы квантовых усилителей и генераторов.
2. Инверсная населенность.
3. Способы подвода энергии (накачка).
4. Двух, трех и четырехуровневые схемы накачки активного вещества.
5. Резонатор Фабри-Перо.
6. Активные и пассивные модуляторы добротности.
7. Режим свободной генерации и модуляция добротности.
8. Дайте определение понятию оптический резонатор?
9. Какие типы оптических резонаторов вы знаете?
10. В чем состоит сущность электрооптического эффекта?
11. Опишите классификацию оптических модуляторов?
12. В чем сущность эффекта Фарадея.
13. Какие физические явления лежат в основе работы лазеров?
14. Какова связь между коэффициентами Эйнштейна A_{21} , B_{21} и B_{12} ?
15. Назвать условия, необходимые для возникновения генерации.
16. Моды резонаторов. Распределение электромагнитного поля в конфокальном резонаторе.

Лазеры

1. Общая характеристика твердотельных лазеров.
2. Рубиновый лазер.
3. Лазеры на кристаллах и стеклах, активированных неодимом.
4. Перестраиваемые твердотельные лазеры.

5. Жидкостные лазеры.
6. Общая характеристика газовых лазеров.
7. Атомарные газовые лазеры.
8. Ионные газовые лазеры.
9. Молекулярные лазеры.
10. Эксимерные лазеры.
11. Чем определяются потери излучения в активной среде?
12. Чем определяется коэффициент ненасыщенного усиления?
13. Что такое коэффициент порогового усиления?
14. Дайте определение добротности оптического резонатора исходя из параметров зеркал.
15. Чем отличается излучение лазеров от излучения других оптических источников? Чем обусловлено это различие?
16. Что такое населенность энергетического уровня? Какая зависимость населенности от энергии соответствует термодинамическому равновесию?
17. Что такое инверсная населенность, как она создается в He-Ne лазере? Какие особенности энергетических состояний атомов He и Ne делают возможным создание инверсной населенности?
18. Зачем нужен резонатор? Как влияет геометрия резонатора на спектр излучения?
19. Чем отличается излучение лазера в направлении оси резонатора и в направлении, перпендикулярном оси?
20. Чем обусловлена поляризация лазерного излучения?

Полупроводниковые источники излучения

1. Классификация люминесценции. Механизмы рекомбинационной люминесценции. Внутрицентрированная люминесценция.
2. Излучательная рекомбинация и эффективность люминесценции.

- 3.Эффективность светодиодов.
- 4.Светодиоды: конструкции, характеристики и параметры.
- 5.Инжекционные полупроводниковые гетеролазеры.
- 6.Жидкокристаллические дисплеи.
- 7.Плазменные дисплейные панели.
- 8.Дисплеи с полевой эмиссией электронов.
- 9.OLED дисплеи.
- 10.Каковы критерии выбора полупроводниковых материалов для оптоэлектронных приборов?
- 11.В какой области светодиодов происходит генерация оптического излучения?
- 12.Чем отличается спектр излучения светодиода и полупроводникового лазера?
- 13.Какие параметры неравновесных носителей заряда вы знаете?
14. От чего зависит время релаксации?
- 15.Прямозонные и непрямозонные полупроводники.
- 16.Зонные диаграммы светодиода с гомо и гетеро переходом в состоянии термодинамического равновесия и при прямом смещении.
- 17.Оптоэлектронные пары. Конструкция, принцип действия.
- 18.Основные характеристики фотодиодных и фототранзисторных оптоэлектронных пар

Приемники излучения

- 1.Фоторезистивный эффект. Механизмы фотопроводимости.
- 2.Механизмы возникновения фотовольтаических эффектов.
- 3.Приборы на фотовольтаических эффектах.
- 4.Приемники оптических изображений.
5. Опишите классификацию полупроводниковых приемников

излучения.

6.Параметры полупроводниковых фотодиодов.

7.От чего зависит область спектральной чувствительности полупроводниковых фотоприемников?

8.Какие режимы включения фотодиодов вы знаете?

9.Каковы физические основы работы фоторезисторов и фотодиодов?

10.Объясните световые характеристики фоторезисторов и фотодиодов.

11.Какие физические явления определяют инерционные свойства фоторезисторов и фотодиодов?

12.Как влияют сопротивление нагрузки и напряжение, приложенное к фотодиоду, на его инерционные свойства?

13. Какой режим работы фотодиода целесообразно использовать для измерения

14. Укажите области применения фоторезисторов и фотодиодов.

12. Рекомендуемая литература

1.Давыдов, В.Н. Физические основы оптоэлектроники : учебное пособие / В.Н. Давыдов ; Министерство образования и науки Российской Федерации. - Томск : ТУСУР, 2016. - 139 с. : ил.,табл., схем. - Библиогр. в кн. ; - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480763>

2.Квантовые и оптические процессы в твердых телах: теория и практика : учебное пособие / Н.Н. Безрядин, А.В. Линник, Ю.В. Сыдоров и др. ; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» ; науч. ред. Н.Н. Безрядин. - Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2015. - 153 с. : ил. ; То же - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=336036>

3. Айхлер, Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер ; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. – М. : Техносфера, 2008. – 440 с. – (Мир физики и техники). – ISBN 978-5-94836-167-3;

4. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника : учебник для вузов / А. Н. Пихтин. – М. : Высш. шк., 2001. – 573 с. : ил. – Библиогр.: с. 571. – ISBN 5-06-002703-1;

5. Янг, М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы / Матт Янг ; под ред. В. В. Михайлина ; пер. с англ. Н. А. Липуновой, О. К. Нания, В. В. Стратонович. – М. : Мир, 2005. – 542 с. : ил. – ISBN 5-03-003457-9(русск.). – ISBN 3-540-65741-X(англ.).

