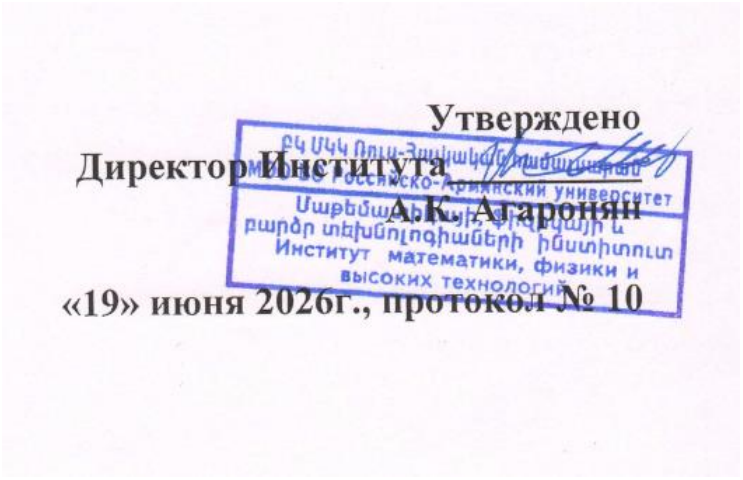
Межгосударственная образовательная организация высшего образования
«Российско-Армянский университет»



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.01.01 «Излучательная рекомбинация в п/п»

Автор (ы) _к.ф.-м.н. Маргарян Нарек Бабикович
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Магистерская программа: Квантовая и оптическая электроника

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

В курсе рассматриваются явления излучательной рекомбинации, спонтанного и вынужденного излучения в полупроводниках и их твердых растворах, механизмы излучательных рекомбинации, спектры люминесценции, полупроводниковые излучатели- принципы действия и характеристики.

1.2. Трудоемкость в академических кредитах и часах, формы итогового контроля (экзамен/зачет);

6 академических кредитов / 216 часов. Форма итогового контроля — экзамен.

1.3. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Физика гетеропереходов, Полупроводниковая наноэлектроника.

1.4. Результаты освоения программы дисциплины:

Код компетенции *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Наименование компетенции** *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Код индикатора достижения компетенций** *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Наименование индикатора достижений компетенций***(в соответствии рабочим с учебным планом)*
ПК-4	Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	ПК-4.1	Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований
		ПК-4.2	Умеет самостоятельно проводить экспериментальные исследования
		ПК-4.3	Владеет навыками проведения исследования с применением современных средств и методов

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

Целью курса является формирование у студентов теоретических знаний о механизмах излучательной рекомбинации в полупроводниках и твердых растворах. Задачами являются изучение процессов спонтанного и вынужденного излучения, анализ спектров люминесценции и принципов работы полупроводниковых излучателей.

2.2. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и зачетных единицах) ***(удалить строки, которые не будут применены в рамках дисциплины)***

Виды учебной работы	**Всего, в акад. часах**	**Распределение по семестрам**
		1 сем
1	**2**	**3**
1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	**216**	**216**
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	**48**	**48**
1.1.1. Лекции	**32**	**32**
1.1.2. Семинары	**16**	**16**
1.1.2.1. Контрольные работы	**36**	**36**
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	**132**	**132**
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	**Экзамен 36**	**Экзамен 36**

2.3. Содержание дисциплины

2.3.1. Тематический план и трудоемкость аудиторных занятий (модули, разделы дисциплины и виды занятий) по рабочему учебному плану

Разделы и темы дисциплины	**Всего (ак. часов)**	**Лекции(ак. часов)**	**Семинары (ак. часов)**
1	**2=3+4+5+6+7**	**3**	**5**
Модуль 1. Общие свойства электромаг-	**22**	**19**	**10**
Введение	**1**	**1**	**-**
Раздел 1. Приближенные представления электромагнитного поля	**14**	**9**	**5**
Тема 1.1. Световые лучи, эл.магнитная волна,	**2**	**1**	**1**
Тема 1.2. Квантовые переходы.	**2**	**1**	**1**

Тема 1.3. Спонтанное и вынужденное излучения, коэффициенты Эйнштейна и связи между ними.	**3**	**2**	**1**
Тема 1.4 Скорость вынужденных переходов, коэффициент поглощения, связь между	**4**	**3**	**1**
Тема 1.5 Вычисление скорости спонтанных излучательных переходов.	**3**	**2**	**1**
Раздел 2. Процессы люминесценции	**14**	**9**	**5**
Тема 2.1. Люминесценция полупроводников, механизмы люминесценции.	**2**	**1**	**1**
Тема 2.2. Возбуждение электронно-дырочных пар в полупроводниках.	**3**	**2**	**1**
Тема 2.3. Термализация электронно-дырочных пар в полупроводниках.	**3**	**2**	**1**
Тема 2.4 Диффузионное распределение неравновесных электронно-дырочных пар в	**3**	**2**	**1**
Тема 2.5 Рекомбинация электронно-дырочных пар в полупроводниках.	**3**	**2**	**1**
Модуль 2. Механизмы люминесценции	**18**	**13**	**5**
Раздел 3. Статистика электронов в	**18**	**13**	**5**
Тема 3.1. Излучательная рекомбинация типа зона-зона в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.	**3**	**2**	**1**
Тема 3.2. Люминесценция, обусловленная излучательной рекомбинацией свободных и связанных экситонов.	**3**	**2**	**1**
Тема 3.3 Донорно-акцепторная излучательная рекомбинация в полупроводниках.	**3**	**2**	**1**
Тема 3.4 Излучательная рекомбинация, обусловленная переходами свободный носитель- примесный центр.	**3**	**3**	**0**
Тема 3.5 Излучательные переходы с участием глубоких центров / рекомбинация электронов и дырок, захваченных на разных центрах;	**3**	**2**	**1**
Тема 3.6 Механизмы уширения линии люминесценции.	**3**	**2**	**1**
ИТОГО	**48**	**32**	**16**

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

Модуль 1. Общие свойства электромагнитного поля
Введение
Раздел 1. Приближенные представления электромагнитного поля

Тема 1.1. Световые лучи, эл.магнитная волна, фотоны.
Тема 1.2. Квантовые переходы.
Тема 1.3. Спонтанное и вынужденное излучения, коэффициенты Эйнштейна и связи между ними.
Тема 1.4 Скорость вынужденных переходов, коэффициент поглощения, связь между скоростями спонтанного, вынужденного излучений и коэффициентом поглощения.
Тема 1.5 Вычисление скорости спонтанных излучательных переходов.

Раздел 2. Процессы люминесценция,
Тема 2.1. Люминесценция полупроводников, механизмы люминесценции.
Тема 2.2. Возбуждение электронно-дырочных пар в полупроводниках.
Тема 2.3. Термализация электронно-дырочных пар в полупроводниках.
Тема 2.4 Диффузионное распределение неравновесных электронно-дырочных пар в полупроводниках.
Тема 2.5 Рекомбинация электронно-дырочных пар в полупроводниках.

Модуль 2. Механизмы люминесценци
Раздел 3. Излучательные переходы.
Тема 3.1. Излучательная рекомбинация типа зона-зона в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.

Тема 3.2. Люминесценция, обусловленная излучательной рекомбинацией свободных и связанных экситонов.
Тема 3.3 Донорно-акцепторная излучательная рекомбинация в полупроводниках.
Тема 3.4 Излучательная рекомбинация, обусловленная переходами свободный носитель-примесный центр.
Тема 3.4 Излучательные переходы с участием глубоких центров / рекомбинация электронов и дырок, захваченных на разных центрах; электронные переходы внутри самого центра между его возбужденными и основным состояниями с фонными повторениями/.
Тема 3.5 Механизмы уширения линии люминесценции.

2.3.3. Краткое содержание семинарских/практических занятий/лабораторного практикума

Семинарские и практические занятия направлены на углублённое понимание механизмов излучательных переходов в полупроводниках. Рассматриваются приближённые модели электромагнитного поля, характеристики спонтанного и вынужденного излучения, коэффициенты Эйнштейна и их связи. Особое внимание уделяется расчетам скорости спонтанных переходов и коэффициентов поглощения.

На практических примерах разбираются спектры люминесценции различных полупроводников, обсуждаются механизмы возбуждения, термализации и рекомбинации электронно-дырочных пар. Анализируются различные типы

излучательных переходов — зона-зона, экситонные, донорно-акцепторные и примесные. Также рассматриваются физические причины уширения люминесцентных линий.

Формат работы включает аналитические задачи, разбор экспериментальных спектров, расчетные упражнения и решение кейсов по выбору подходящего полупроводникового материала под заданные оптические свойства.

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Мультимедийное оборудование для лекций и практических занятий.

2.4. Модульная структура дисциплины с распределением весов по формам контролей

Формы контролей	**Вес формы (форм) текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля (по модулям)**		**Вес формы промежуточного контроля в итоговой оценке промежуточного контроля**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей (семестровой оценке)**	**Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля**
Вид учебной работы/контроля	**M1**[1]	**M2**	**M1**	**M2**	**M1**	**M2**		
Контрольная работа *(при наличии)*			0.5	0.5				
Устный опрос *(при наличии)*								
Лабораторные работы *(при наличии)*	0.5	0.5						
Письменные домашние задания *(при наличии)*								
Решение задач	0.5	0.5						
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках промежуточных контролей					0.5	0.5		
Веса оценок промежуточных контролей в итоговых оценках промежуточных контролей								
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	

[1] Учебный Модуль

Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	∑ = 1	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**

3. Теоретический блок ***(указываются материалы, необходимые для освоения учебной программы дисциплины)***

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и);

1. А. Н. Пихтин, Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники, Изд. Высшая школа, Москва, 1983
2. Х. Кейси, М. Паниш, Лазеры на гетероструктурах, Изд. Мир, 1 том, 1981.
3. Ансельм А.И., Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978
4. Шалимова К.В., Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1976.
5. Пикус Г. Е., Основы теории полупроводниковых приборов, М. Наука, 1975
6. П. Ю., М. Кардона, Основы полупроводников, М, Мир, 2003.

3.1.2. Учебное(ые) пособие(я);

1. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П., Громов И.С. , Элементы твердотельной электроники. -Изд. Сарат.ун-та, 1985.

2. Богданкович О.В., Дапзнек С.А., Елисеев П. Г. Полупроводниковые лазеры, М., Наука, 1976.

3.1.3. Электронные материалы (электронные учебники, учебные пособия, курсы и краткие конспекты лекций, презентации PPT и т.п.);

L. Pavesi. M. Guzzi, Photoluminescence of *AlGaAs* alloys, J. Appl. Phys.,75 (10), pp. 4779-4842, 1994.

4. Фонды оценочных средств ***(указываются материалы, необходимые для проверки уровня знаний в соответствии с содержанием учебной программы дисциплины).***

4.1. Планы практических занятий

№	Тема занятия	Содержание
1	Основы электромагнитного поля и	Свет как волна и как поток фотонов. Представления

	природы света	о квантах света.
2	Квантовые переходы. Коэффициенты Эйнштейна	Спонтанное и вынужденное излучения, физический смысл коэффициентов A и B.
3	Расчёт скорости излучательных переходов	Формулы для скорости переходов, коэффициент поглощения, связь с плотностью состояний.
4	Механизмы люминесценции в полупроводниках	Типы люминесценции, условия их возбуждения, особенности спектров.
5	Термализация и диффузия электронно-дырочных пар	Поведение носителей после возбуждения, распределения, диффузионные уравнения.
6	Излучательная рекомбинация зона-зона, экситонная	Спектры и вероятности переходов, влияние ширины запрещённой зоны.
7	Донорно-акцепторная и примесная люминесценция	Механизмы переходов с участием примесей, энергия переходов, спектры.
8	Уширение линий люминесценции	Причины уширения, температурные и примесные эффекты, типы уширения.

4.2. Материалы по практической части курса

4.2.1. Задачники (практикумы);

Шкловский Е. И., *Оптоэлектроника: задачи и решения*. — СПб.: Лань, 2019. — 288 с.

Герман А. М., Рязанов С. М., Савельев С. Е., *Физика полупроводников: задачи и решения*. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 352 с.

4.3. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

1. Сравните характеристики спонтанного и вынужденного излучения в полупроводнике.
2. Выведите связи между коэффициентами Эйнштейна.
3. Рассчитайте скорость спонтанного излучения для прямозонного перехода в GaAs.
4. Опишите механизм термализации электронно-дырочных пар.
5. Какие процессы приводят к уширению линии люминесценции?
6. Чем отличается зона-зонная рекомбинация от экситонной?
7. Постройте энергетическую диаграмму донорно-акцепторной рекомбинации.
8. Объясните физическую природу фотолюминесценции в непрямозонных полупроводниках.

4.4. Образцы вариантов контрольных работ, тестов и/или других форм текущих и промежуточных контролей

Вариант контрольной работы (2 вопроса):

1. Объясните разницу между спонтанным и вынужденным излучением. Выведите соотношения Эйнштейна.

2. Охарактеризуйте люминесценцию, обусловленную зона-зонной рекомбинацией, и её зависимость от ширины запрещённой зоны.
3. Объясните физическую природу фотолюминесценции в непрямозонных полупроводниках.

4.5. Перечень экзаменационных вопросов

1. Природа света: волновое и корпускулярное описание.
2. Квантовые переходы и взаимодействие излучения с веществом.
3. Коэффициенты Эйнштейна и связи между ними.
4. Расчёт скорости спонтанного излучения.
5. Коэффициент поглощения и его связь со скоростями переходов.
6. Механизмы люминесценции в полупроводниках.
7. Возбуждение и термализация электронно-дырочных пар.
8. Диффузия и рекомбинация неравновесных носителей.
9. Излучательная зона-зонная рекомбинация: особенности.
10. Экситонная люминесценция.
11. Донорно-акцепторная рекомбинация.
12. Примесные и глубокие центры в люминесценции.
13. Механизмы уширения линии излучения.
14. Люминесценция в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
15. Применения полупроводниковых люминесцентных структур.

4.6. Образцы экзаменационных билетов

МОО ВО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, ФИЗИКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра общей физики и квантовых наноструктур

Направление: Электроника и наноэлектроника
Дисциплина: Излучательная рекомбинация в полупроводниках
(магистратура I-ой курс, II-ой семестр)

Экзаменационный билет № **

1. Расчёт скорости спонтанного излучения.
2. Донорно-акцепторная рекомбинация.

Зав. кафедройОФКН _____Д.Б. Айрапетян
20__г.