

**ГОО ВПО Российско-Армянский (Славянский)
университет**

Директор Института

А.К. Агаронян

«30» апреля 2025г., протокол № 05

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

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

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

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
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)
УК-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1	Знает методы анализа проблемной ситуации как системы, выявляя ее составляющие и связи между ними; знает способы определения пробелы в информации, необходимой для решения проблемной ситуации, и проектирования процессов по их устранению.
		УК-1.2	Умеет критически оценивать надежность источников информации, работать с противоречивой

			информацией из разных источников; Разрабатывать и содержательно аргументировать стратегию решения проблемной ситуации на основе системного и междисциплинарных подходов
		УК-1.3	Владеет навыками использования логико-методологического инструментария для критической оценки современных концепций философского и социального характера в своей предметной области.
ПК-1	Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	ПК-1.1	Знает принципы построения и функционирования изделий микро- и нанoeлектроники
		ПК-1.2	Умеет рассчитывать предельно-допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники
		ПК-1.3	Владеет навыками выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и нанoeлектроники
ПК-5	Способен делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения	ПК-5.1	Знает принципы проведения анализа полноценности и эффективности экспериментальных исследований
		ПК-5.2	Умеет подготавливать научные публикации на основе результатов исследований
		ПК-5.3	Владеет навыками подготовки заявок на изобретения

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 люминесценции

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 фоновыми 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
	M1 ¹	M2	M1	M2	M1	M2		
Вид учебной работы/контроля								
Контрольная работа <i>(при наличии)</i>			0.5	0.5				
Устный опрос <i>(при наличии)</i>								
Лабораторные работы <i>(при наличии)</i>	0.5	0.5						
Письменные домашние задания <i>(при наличии)</i>								
<i>Решение задач</i>	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	

¹ Учебный Модуль

Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

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. Саратов.ун-та, 1985.
2. Богданкович О.В., Дапзек 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 РРТ 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 природы света	Свет как волна и как поток фотонов. Представления о квантах света.
2	Квантовые переходы. Коэффициенты Эйнштейна	Спонтанное и вынужденное излучения, физический смысл коэффициентов А и В.
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.

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

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
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. кафедрой ОФКН _____ Д.Б. Айрапетян
20__ г.
