

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)  
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.04.04 Электроника и наноэлектроника и Положением «Об УМКД РАУ».

**УТВЕРЖДАЮ:**  
  
**Директор А.А. Саркисян**  
**«21» июля 2023г.**

**Инженерно-физический институт**

**Кафедра: Общей физики и квантовых наноструктур**

*Автор(ы): д.ф.-м.н., профессор Агаронян Камо Гамлетович*

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**

**Дисциплина: Б1.В.ДВ.05.02 «Оптические явления в наноструктурах»**

**Направление: 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»**

**Основная образовательная программа магистратуры:  
«Квантовая и оптическая электроника»**

## **1. Аннотация**

Оптические методы исследования полупроводниковых соединений являются мощным инструментом, позволяющим определить зонное строение изучаемых образцов. С учетом того, что полупроводники могут быть как прямозонными, так и не прямозонными, возникает необходимость изучения соответственно прямых и непрямых переходов в полупроводниках. Примечательно, что на сегодняшний день детально развиты как классическая, так и квантовая теории оптических свойств полупроводников. В предлагаемом курсе изучаются особенности оптических свойств полупроводниковых соединений. При этом рассматривается также влияние внешних полей на процессы поглощения в полупроводниках.

### *Цель преподавания дисциплины:*

ознакомление студентов с оптическими явлениями, имеющими место в полупроводниках, а также с механизмами внутризонных и межзонных (прямых и непрямых) переходов в вышеуказанных системах. Подготовка будущих специалистов в области микро и оптоэлектроники с необходимым знанием теоретических и прикладных знаний.

*Учебная задача:* дать представление студентам о характере оптических переходов в полупроводниках, а также начальную информацию о функционировании оптоэлектронных приборов нового поколения (гетероструктурные лазеры, диоды и т. д.).

*Основные методы проведения занятий:* лекции, практические занятия, самостоятельная работа.

*Список литературы* содержит 11 наименований книг и монографий отечественных и зарубежных авторов. Этот список поможет студентам освоить и создать свой профессиональный исследовательский инструментарий, обеспечить целостность обучения.

*Краткое содержание курса:* Дисперсионное соотношение Крамерса-Кронига. Механизмы поглощения света в полупроводниках. Внутризонное поглощение света в полупроводниках. Межзонное поглощение. Расчет матричного элемента перехода. Прямые разрешенные переходы. Запрещенные переходы. Экситонное поглощение. Дискретный спектр. Непрямые оптические переходы. Магнетопоглощение в полупроводниках. Поглощение в электрическом поле. Электроны и дырки в полупроводниках. Эффект Франца-Келдыша. Поляритоны.

## **2. Требования к исходным уровням знаний и умений студентов**

### **Знать:**

Оптика, Физика полупроводников, Полупроводниковая оптика

### **Уметь:**

Проводить теоретические расчеты для оптических явлений (межзонных и внутризонных) для массивного полупроводника

### **Владеть:**

Теория поля, квантовая механика, статистическая физика, квантовая теория твердого тела.

### **3. Цель и задачи дисциплины**

Основная цель изучаемой дисциплины — ознакомление студентов с оптическими явлениями, имеющими место в полупроводниках, а также с механизмами внутризонных и межзонных (прямых и непрямых) переходов в вышеуказанных системах. Подготовка будущих специалистов в области микро и оптоэлектроники с необходимым знанием теоретических и прикладных знаний.

#### **4.1. Требования к уровню освоения содержания дисциплины**

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:**

Иметь представления о специфике оптических процессов имеющих место в полупроводниках.

**Уметь:**

Уметь интерпретировать результаты оптических измерений, а также теоретических расчетов искомых оптических характеристик различных прямозонных и не прямозонных структур.

**Владеть:**

Навыками для реализации численного моделирования оптических процессов, протекающих в полупроводниках.

#### **4.2 Взаимосвязь с другими дисциплинами специальности:**

Квантовые наноструктуры во внешних полях; Квантоворазмерные структуры наноэлектроники.

### **5. Трудоемкости дисциплины и видов учебной работы по учебному плану**

<b>Виды учебной работы</b>	<b>Всего (ак. час)</b>
<i>Общая трудоемкость изучения дисциплины, в т.ч.:</i>	<b>72 (2 кр.)</b>
<b>1. Аудиторные занятия, в т. ч.:</b>	<b>18</b>
1.1. Лекционные занятия	<b>18</b>
1.2. Семинарские занятия	-
1.3. Практические занятия	-
1.4. Лабораторные работы	-
<b>2. Самостоятельная работа, в т. ч.:</b>	<b>54</b>
2.1. Контактная самостоятельная работа	-
2.2. Бесконтактная самостоятельная работа	<b>54</b>
<i>Итоговый контроль</i>	<i>Зачет</i>



## 7. Содержание дисциплины

### 7.1 Тематический план и трудоемкости аудиторных занятий

#### 7.1 Тематический план и трудоемкости аудиторных занятий

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекционные занятия (ак. часов)	Семинарские занятия (ак. часов)	Практические занятия (ак. часов)	Лабораторные работы (ак. часов)
1	2	3	4	5	6
Введение					
<b>Раздел 1. Макроскопическая теория оптики изотропных сред.</b>					
<i>Тема 1.1. Уравнения Максвелла, векторный потенциал, калибровочные преобразования.</i>		2			
<i>Тема 1.2. Теория Лоренца-Зинера.</i>		1			
<i>Тема 1.3. Дисперсия диэлектрической проницаемости.</i>		1			
<i>Тема 1.4. Аналитические свойства диэлектрической проницаемости. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Правило сумм.</i>		1			
<b>Раздел 2. Микроскопическая теория оптических свойств полупроводников.</b>					
<i>Тема 2.1. Особенности энергетических зон полупроводников. Механизмы поглощения света в полупроводниках.</i>		1			
<i>Тема 2.2. Гамильтониан электрона в кристаллах в поле электромагнитной волны. Энергия возмущения.</i>		1			
<i>Тема 2.3. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Разрешенные и запрещенные переходы.</i>		1			
<i>Тема 2.4. Учет влияния кулоновского взаимодействия электрона и дырки на поглощение света при прямых переходах.</i>		1			
<i>Тема 2.5. Межзонное поглощение света, связанное с непрямыми переходами (фононный механизм поглощения).</i>		1			
<i>Тема 2.6. Поглощение света в полупроводниках с участием примесных центров.</i>		1			
<b>Раздел 3. Оптические явления, обусловленные свободными носителями тока</b>					
<i>Тема 3.1. Классический плазменный резонанс, плазменная частота, время релаксации.</i>		1			
<i>Тема 3.2. Поглощение света на свободных носителях. Соотношение Хагена-Рубенса</i>		1			
<b>Раздел 4. Поглощение света во внешних полях</b>					
<i>Тема 4.1. Межзонное поглощение света в квантующем магнитном поле (прямые и не прямые переходы).</i>		1			
<i>Тема 4.2. Межзонное поглощение света в скрещенных электрическом и магнитном полях.</i>		1			
<i>Тема 4.3. Поглощение света в полупроводниках в однородном электрическом поле (эффект Франца-Келдыша).</i>		1			
<i>Тема 4.4. Эффект вращения Фарадея.</i>		1			
<b>Раздел 5. Взаимодействие света с кристаллической решеткой.</b>					
<i>Тема 5.1 Однофононный резонанс.</i>		1			
<i>Тема 5.2. Поляритон. Плазмон-фононный Резонанс</i> <i>Тема 5.3. Многофононное поглощение света</i>		2			
<i>Тема 5.4. Рассеяние света колебаниями решетки. Комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга). Рассеяние на акустических фононах Мандельштама-Бриллюэна).</i>		1			
<b>ИТОГО</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

## 7.2 Содержание разделов и тем дисциплины

### **МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ И МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

#### **Введение**

Предмет дисциплины и ее задачи.

#### **Раздел 1. Макроскопическая теория оптики изотропных сред**

##### ***Тема 1.1. Уравнения Максвелла, векторный потенциал, калибровочные преобразования***

Уравнения Максвелла для немагнитных сред. Калибровочные преобразования для векторного потенциала. Взаимодействие излучения с твердым телом. ([1] гл. 7 §1).

##### ***Тема 1.2. Теория Лоренца-Зинера.***

##### ***Тема 1.3. Дисперсия диэлектрической проницаемости.***

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. Комплексная функция диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость при очень больших частотах. ([1] гл. 7 §1, [2])

##### ***Тема 1.4. Аналитические свойства диэлектрической проницаемости. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Правило сумм.***

Аналитические свойства функции диэлектрической проницаемости. Связь между действительной и мнимой частями функции диэлектрической проницаемости. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Сила осциллятора. Правило сумм ([1] гл. 7 §1, [2])

#### **Раздел 2. Микроскопическая теория оптических свойств полупроводников**

##### ***Тема 2.1. Особенности энергетических зон полупроводников. Механизмы поглощения света в полупроводниках.***

Оптические коэффициенты и связь их с диэлектрической проницаемостью. Классификация механизмов поглощения света в полупроводниках. ([1] гл. 7 §1, 2).

##### ***Тема 2.2. Гамильтониан электрона в кристаллах в поле электромагнитной волны. Энергия возмущения.***

Оператор импульса электрона в поле световой волны. Сравнение значений волновых векторов фотона и электрона. Матричный элемент энергии возмущения.

([1] гл. 7 §2 п. 2, [2] [3])

##### ***Тема 2.3. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Разрешенные и запрещенные переходы.***

Край поглощения, ее связь с энергетической зонной структурой полупроводника. Расчет матричного элемента перехода. Разрешенные и запрещенные переходы. ([1] гл. 7 §2, [3])

##### ***Тема 2.4. Учет влияния кулоновского взаимодействия электрона и дырки на поглощение света при прямых переходах***

Закон сохранения волнового вектора при образовании экситона. Экситонное поглощение. Коэффициенты поглощения при разрешенных и запрещенных переходах. Правила отбора ([1] гл. 7 §2 п. 3. [3])

##### ***Тема 2.5. Межзонное поглощение света, связанное с непрямыми переходами (фононный механизм поглощения)***

Полупроводники с непрямыми зонами. Каналы переходов электронов в непрямозонных полупроводниках ([1] гл. 7 §3 п. 1)

##### ***Тема 2.6. Поглощение света в полупроводниках с участием примесных центров***

Донорные и акцепторные уровни. Коэффициенты поглощения при наличии примесных центров. ([3])

### **ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ.**

#### **Раздел 3. Оптические явления, обусловленные свободными носителями тока**

##### ***Тема 3.1. Классический плазменный резонанс, плазменная частота, время релаксации.***

Классический плазменный резонанс, плазменная частота, время релаксации. Спектры плазменного отражения, анализ экспериментальных данных. Определение эффективных масс для разных законов дисперсии. ([13], гл.5 § 7, гл.8 §2).

### ***Тема 3.2. Поглощение света на свободных носителях. Соотношение Хагена-Рубенса***

Поглощение света на свободных носителях. Соотношение Хагена-Рубенса. Сечение поглощения, роль разных механизмов рассеяния. Оптические переходы между различными ветвями зоны проводимости и валентной зоны ([1] гл. 7 § 4, [3] гл. 8 § 6)

## **Раздел 4. Поглощение света во внешних полях**

### ***Тема 4.1. Межзонное поглощение света в квантующем магнитном поле и (прямые не прямые переходы).***

Теория межзонного поглощения в квантующем магнитном поле. Прямые и не прямые переходы. Коэффициент поглощения, правила отбора ([1] гл. 7 § 7 п. 1.)

### ***Тема 4.2. Межзонное поглощение света в скрещенных электрическом и магнитном полях.***

Теория межзонного поглощения в скрещенных электрическом и магнитном полях. Коэффициент поглощения, правила отбора ([1] гл. 7 § 7 п. 2.)

### ***Тема 4.3. Поглощение света в полупроводниках в однородном электрическом поле (эффект Франца-Келдыша.)***

Теория поглощения света в полупроводниках в однородном электрическом поле (эффект Франца-Келдыша). Правила отбора ([1] гл. 7 § 8, [5] гл. 8 § 8-46)

### ***Тема 4.4. Эффект вращения Фарадея.***

Явление Фарадея для свободных носителей со скалярной эффективной массой ([1] гл. 7 § 6).

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ. ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ.**

## **Раздел 5. Взаимодействие света с кристаллической решеткой.**

### ***Тема 5.1. Однофононный резонанс***

([3] гл.7 § 3, [4], гл.9, §77)

### ***Тема 5.2. Поляритон, Плазмон-фононный резонанс.***

Квазичастица поляритон — фонон оптической ветви плюс фотон. ([1] гл. 7 § 5)

### ***Тема 5.3. Многофононное поглощение света.***

([3] гл.7 § 4, [4], гл.9, §78)

### ***Тема 5.4. Рассеяние света колебаниями решетки. Комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга). Рассеяние на акустических фононах (Мандельштама-Брилюэна)***

([4], гл.9, §79)

## **7.3 Экзаменационные вопросы**

1. Теория Лоренца-Зинера.
2. Дисперсия диэлектрической проницаемости.
3. Аналитические свойства диэлектрической проницаемости.
4. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Правило сумм.
5. Особенности энергетических зон полупроводников. Механизмы поглощения света в полупроводниках.
6. Гамильтониан электрона в кристаллах в поле электромагнитной волны. Энергия возмущения.
7. Межзонное поглощение света, связанное с прямыми переходами. Разрешенные и запрещенные переходы.
8. Экситонное поглощение. Правила отбора.

9. Межзонное поглощение света, связанное с непрямными переходами (фононный механизм поглощения).
10. Поглощение света в полупроводниках с участием примесных центров.
11. Классический плазменный резонанс, плазменная частота, время релаксации. Определение эффективных масс для разных законов дисперсии.
12. Поглощение света на свободных носителях. Соотношение Хагена-Рубенса.
13. Межзонное поглощение света в квантующем магнитном поле (прямые и непрямые переходы).
14. Межзонное поглощение света в скрещенных электрическом и магнитном полях, правила отбора.
15. Поглощение света в полупроводниках в однородном электрическом поле (эффект Франца-Келдыша). Правила отбора.
16. Эффект вращения Фарадея для свободных носителей.
17. Однофононный резонанс.
18. Поляритон. Плазмон-фононный резонанс.
19. Квазичастица поляритон — фонон оптической ветви плюс фотон.
20. Многофононное поглощение света.
21. Рассеяние света колебаниями решетки. Рассеяние Рамана-Ландсберга. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

## **8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины 8.1.**

### **Рекомендуемая литература**

#### **а) Основная литература**

- [1] Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М., Наука, 1978.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982.
- [3] Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М., Мир, 1966.
- [4] О.Маделунг, Теория твердого тела, М.,Наука,1980
- [5] Бассани Ф., Пастори Паравичини Дж. Электронные состояния и оптические переходы в твердых телах. М., Наука, 1982.
- [6] Воробьев Л.Е. и др., Оптические явления в полупроводниковых квантово-размерных структурах. Санкт-Петербург, изд. СПбГТУ, 2000.
- [7] Демиховский И.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М., "Логос", 2000.
- [8] Singh J. Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures. Cambridge Univ. Press, 2003.

#### **б) Дополнительная литература**

- [9] Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. Минск, 1975.
- [10] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., Мир, 1973.
- [11] Смит Р. Полупроводники. М, Мир, 1982.



## **8.2. Программные средства освоения дисциплины**

Mathematica 5.1 и Mathematica 6.0.

## **8.3. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Компьютер, проектор, слайдоскоп.