

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе



\_\_\_\_\_ А.Л. Толстик

\_\_\_\_\_ 25.05.2017  
(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 3941 / уч.

## **ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности  
1-31 04 01 Физика (по направлениям)  
направления специальности  
1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность)**

Минск 2017

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 01-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08. 2013 № 88; учебных планов №G31-163/уч. и № G31и-174/уч.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**Н.И. Горбачук** — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент;

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 12 от 24 мая 2017);

Советом физического факультета БГУ (протокол № 9 от 25 мая 2017 г.).

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины "Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках" разработана для специальности 1-31 04 01 Физика (1-31 04 01-01 научно-исследовательская деятельность).

*Цель учебной дисциплины* — обучение студентов основам физики генерационно-рекомбинационных процессов. *Основные задачи учебной дисциплины* — развитие полученных знаний применительно к традиционным материалам полупроводниковой электроники, а также привитие навыков анализа спектральных и кинетических зависимостей проводимости для последующей исследовательской работы с моно- и поликристаллическими полупроводниками, полупроводниковыми приборными структурами.

Действие большинства полупроводниковых приборов основывается на процессах, происходящих с участием неравновесных носителей заряда. Неравновесные носители заряда, их генерация и рекомбинация играют также существенную роль в методах исследования полупроводниковых материалов. В связи с этим понимание генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках является необходимым условием успешной профессиональной деятельности специалиста, имеющего квалификацию «Физик. Исследователь» и работающего в области физики полупроводников, микро- и нанoeлектронике.

В курсе рассматриваются основные понятия физики неравновесных процессов в полупроводниках, механизмы генерации и рекомбинации, диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда. Анализируются спектральные зависимости поглощения оптического излучения и фотопроводимости. Изучаются фотоэлектрические явления в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Рассматривается влияние процессов захвата и рекомбинации на пространственное распределение неравновесных носителей заряда, диффузию и дрейф в стационарных и нестационарных состояниях.

*Материал курса основан* на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Физика полупроводников», «Электронные состояния и процессы в конденсированных средах», «Статистическая физика полупроводников».

*В результате изучения дисциплины студент должен:*

***знать:***

- основы физики генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках,
- физические основы функционирования биполярных полупроводниковых приборов,
- принципы построения и физические основы функционирования оптоэлектронных приборов;

***уметь:***

- анализировать спектральные зависимости характеристик и параметров полупроводников, кинетику процессов рекомбинации неравновесных носителей заряда;

**владеть:**

- базовыми принципами моделирования генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводниках.

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

*Академические компетенции:*

1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
2. Владеть системным и сравнительным анализом.
3. Владеть исследовательскими навыками.
4. Уметь работать самостоятельно.
5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).
6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.
7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.
8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.
9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

*Социально-личностные компетенции:*

1. Быть способным к социальному взаимодействию.
2. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.
3. Быть способным к критике и самокритике.
4. Уметь работать в команде.

*Профессиональные компетенции:*

1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики, современных технологий и материалов, методы исследования физических объектов, методы измерения физических величин, методы автоматизации эксперимента.
2. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, научное оборудование и аппаратуру.
3. Проводить планирование и реализацию физического эксперимента, оценивать функциональные возможности сложного физического оборудования.
4. Пользоваться глобальными информационными ресурсами, компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.
5. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.
6. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-исследовательской, научно-производственной и научно-педагогической работы.

7. Применять знания физических основ современных технологий, средств автоматизации, методов планирования и организации производства, правового обеспечения хозяйственной деятельности и налоговой системы, современного предпринимательства, государственного регулирования экономики и экономической политики.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 110 (3 зачетные единицы), из них количество аудиторных часов — 44.

Форма получения высшего образования — очная, дневная,

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и семинарских занятий. На проведение лекционных занятий отводится 34 часа, на аудиторный контроль управляемой самостоятельной работы — 10 часов.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1. Равновесные и неравновесные носители заряда.

*Основные термины и определения.* Принцип детального равновесия. Стационарное состояние, потоки. Концентрация равновесных носителей заряда. Легированные полупроводники, уравнение электронейтральности. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике.

*Неравновесные носители заряда.* Генерация и рекомбинация носителей заряда. Закон действующих масс. Низкий и высокий уровни возбуждения.

*Статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда.* Линейная рекомбинация. Время жизни неравновесных носителей заряда. Квадратичная рекомбинация. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда

*Квазиуровни Ферми.* Определение понятия "квазиуровни Ферми". Инжекция неравновесных носителей заряда. Экстракция неравновесных носителей заряда. Текущий контроль знаний студентов по разделам «Равновесные и неравновесные носители заряда».

### 2. Генерация неравновесных носителей заряда

*Взаимодействие электромагнитного излучения с полупроводниками.* Фотометрические понятия и единицы измерения. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения и его вероятностный смысл. Спектр поглощения оптического излучения полупроводниками.

*Механизмы поглощение света полупроводниками.* Прямые межзонные переходы электронов. Коэффициент поглощения при разрешенных и запрещенных переходах. Непрямые межзонные переходы электронов. Переходы с испусканием и поглощением фононов. Влияние температуры, давления на спектр фундаментального поглощения. Эффект Бурштейна-Мосса. Поглощение света кристаллической решеткой. Поглощение света свободными носителями заряда. Экситонное и примесное поглощение.

*Взаимодействие жесткого электромагнитного излучения с полупроводниками.* Внутренний фотоэффект. Комтон-эффект. Генерация электрон-позитронных пар.

*Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.* Термоэлектрическая ионизация. Разогрев носителей заряда в сильном электрическом поле. Туннельный эффект. Ударная ионизация. Токовые неустойчивости в однородном и неоднородном полупроводнике.

### 3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда

*Токи в полупроводниках.* Модель Друде Лоренца, тепловая и дрейфовая скорости носителей заряда. Дрейфовый ток, подвижность носителей заряда. Время релаксации энергии и квазиимпульса, рассеяние носителей заряда, правило Матиссена. Кинетическое уравнение Больцмана. Диффузионный ток, законы Фика. Полная плотность тока. Диффузионно-дрейфовое равновесие. Соотношение Эйнштейна.

*Уравнение непрерывности.* Общий случай уравнения непрерывности. Изменение концентрации неравновесных носителей заряда во времени (уравнения баланса).

*Максвелловская релаксация.* Кинетика релаксации объемного заряда, время релаксации Максвелла. Релаксация заряда основных носителей. Релаксация заряда не основных носителей. Длина экранирования Дебая

*Диффузия неравновесных носителей заряда.* Уравнение, описывающие диффузию неравновесных носителей заряда из освещенной области. Диффузионная длина. Влияние внешнего электрического поля на диффузионные потоки неравновесных носителей заряда. Длина (глубина) затягивания по (против) полю(я)

*Биполярная диффузия.* Уравнение биполярной диффузии. Коэффициент биполярной диффузии. Биполярная дрейфовая и диффузионная подвижности.

#### **4. Рекомбинация неравновесных носителей заряда**

*Типы и механизмы рекомбинации.* Законы сохранения энергии и импульса при рекомбинации неравновесных носителей заряда. Механизмы электронных переходов при рекомбинации.

*Межзонная ударная рекомбинация.* Условия существования и доминирования ударной (Оже) рекомбинации. Оже-рекомбинация при низком и высоком уровне возбуждения.

*Излучательная рекомбинация.* Межзонная излучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда при межзонной излучательной рекомбинации от ширины запрещенной зоны, уровня легирования и температуры. Модель Ван Русбрека Шокли, определение коэффициента межзонной излучательной рекомбинации. Излучательная рекомбинация с участием примесей. Полупроводниковые материалы для светодиодов и лазеров.

*Рекомбинация с участием локализованных состояний.* Центры рекомбинации, сечение захвата. Ловушки захвата и ловушки рекомбинации. Демаркационные уровни. Модель Шокли-Рида-Холла. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от уровня легирования и температуры. Механизмы передачи энергии при рекомбинации электронодырочных пар на локализованных состояниях. Рекомбинация на многозарядных центрах

*Поверхностная рекомбинация.* Быстрые и медленные состояния. Скорость поверхностной рекомбинации. Статистика поверхностной рекомбинации. Влияние поверхностной рекомбинации на распределение неравновесных носителей заряда по глубине полупроводника.

#### **5. Фотоэлектрические эффекты**

*Фотопроводимость.* Определение фотопроводимости. Спектральное распределение фотопроводимости: фотопроводимость при межзонном поглощении света, примесная фотопроводимость, фототермическая ионизация. Квантовый выход фотоэффекта. Стационарная фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости. Фотопроводимость в случае неоднородного поглощения света и поверхностной рекомбинации. Влияние центров захвата на релаксацию фотопроводимости. Люксамперные характеристики фототока. Примесная фотопроводимость. Материалы для фоторезисторов.

*Фотовольтаические эффекты.* ЭДС Дембера в случае биполярной проводимости. ЭДС Дембера при монополярной проводимости. Фотоэффект на *pn*-переходе и барьере Шоттки. Фотоэффекты в неоднородных полупроводниках. Эффект Кикоина-Носкова. ФЭМ при высоком уровне возбуждения. ФЭМ при низком уровне возбуждения. Фотоприемники на основе барьерных структур.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Внеаудиторная УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Аудиторный контроль УСР			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<b>1</b>	<b>Равновесные и неравновесные носители заряда</b>	<b>8</b>				<b>2</b>			
1.1	<i>Равновесные и стационарные состояния.</i> 1. Основные термины и определения. 2. Принцип детального равновесия. 3. Стационарное состояние, потоки. 4. Концентрация равновесных носителей заряда. 5. Легированные полупроводники, уравнение электронейтральности. 6. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике.	2					[1] [2] [3]		
1.2	<i>Неравновесные носители заряда</i> 1. Генерация и рекомбинация носителей заряда 2. Закон действующих масс. 3. Низкий и высокий уровни возбуждения	2					[1] [3] [4]		
1.3	<i>Статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда</i> 1. Линейная рекомбинация. 2. Время жизни неравновесных носителей заряда. 3. Квадратичная рекомбинация. 4. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда	2					[1] [5] [9]		
1.4	<i>Квазиуровни Ферми</i> 1. Определение понятия "квазиуровни Ферми" 2. Инжекция неравновесных носителей заряда 3. Экстракция неравновесных носителей заряда	2					[2] [5]		
1.5	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Равновесные и неравновесные носители заряда»					2	[1] -[11]	Письменное тестирование	



<b>2</b>	<b>Генерация неравновесных носителей заряда</b>	<b>4</b>				<b>2</b>			
2.1	<i>Взаимодействие электромагнитного излучения с полупроводниками</i> 1. Фотометрические понятия и единицы измерения. 2. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения и его вероятностный смысл. 3. Спектр поглощения оптического излучения полупроводниками.	1						[1] [2] [3] [6] [7]	
2.2	<i>Механизмы поглощения света полупроводниками</i> 1. Прямые межзонные переходы электронов. 2. Коэффициент поглощения при разрешенных и запрещенных переходах. 3. Непрямые межзонные переходы электронов. 4. Переходы с испусканием и поглощением фононов 5. Влияние температуры, давления на спектр фундаментального поглощения 6. Эффект Бурштейна-Мосса. 7. Поглощение света кристаллической решеткой 8. Поглощение света свободными носителями заряда. 9. Экситонное и примесное поглощение.	1						[1] [2] [3] [8]	
2.3.	<i>Взаимодействие жесткого электромагнитного излучения с полупроводниками.</i> 1. Внутренний фотоэффект 2. Комтон-эффект 3. Генерация электрон-позитронных пар.	1						[4]	
2.4	<i>Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях</i> 1. Термоэлектрическая ионизация. 2. Разогрев носителей заряда в сильном электрическом поле. 3. Туннельный эффект. 4. Ударная ионизация. 5. Токовые неустойчивости в однородном и неоднородном полупроводнике.	1						[2] [3] [5]	
5.5	Текущий контроль знаний студентов по разделу «Генерация неравновесных носителей заряда»					2		[1] -[11]	Письменное тестирование
<b>3</b>	<b>Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда</b>	<b>10</b>				<b>2</b>			
3.1.	<i>Токи в полупроводниках</i> 1. Модель Друде Лоренца, тепловая и дрейфовая скорости носителей заряда. 2. Дрейфовый ток, подвижность носителей заряда. 3. Время релаксации энергии и квазиимпульса, рассеяние носителей заряда, правило Матиссена. 4. Кинетическое уравнение Больцмана.	2						[1] [5]	

	5. Диффузионный ток, законы Фика. 6. Полная плотность тока. 7. Диффузионно-дрейфовое равновесие. Соотношение Эйнштейна.								
3.2	<i>Уравнение непрерывности</i> 1. Общий случай уравнения непрерывности. 2. Изменение концентрации неравновесных носителей заряда во времени (уравнения баланса)	2						[1] [5] [9]	
3.3	<i>Максвелловская релаксация</i> 1. Кинетика релаксации объемного заряда, время релаксации Максвелла. 2. Релаксация заряда основных носителей. 3. Релаксация заряда не основных носителей. 4. Длина экранирования Дебая	2						[1] [5]	
3.4	<i>Диффузия неравновесных носителей заряда</i> 1. Уравнение, описывающие диффузию неравновесных носителей заряда из освещенной области. 2. Диффузионная длина. 3. Влияние внешнего электрического поля на диффузионные потоки неравновесных носителей заряда. 4. Длина (глубина) затягивания по (против) полю(я)	2						[1] [5]	
3.5	<i>Биполярная диффузия.</i> 1. Уравнение биполярной диффузии 2. Коэффициент биполярной диффузии 3. Биполярная дрейфовая и диффузионная подвижности	2						[1] [5]	
3.6	Текущий контроль знаний студентов по разделу «Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда»					2		[1] -[11]	Письменное тестирование
<b>4</b>	<b>Рекомбинация неравновесных носителей заряда</b>	<b>8</b>							
4.1	<i>Типы и механизмы рекомбинации</i> 1. Законы сохранения энергии и импульса при рекомбинации неравновесных носителей заряда 2. Механизмы электронных переходов при рекомбинации.	1						[1] [3] [11]	
4.2	<i>Межзонная ударная рекомбинация</i> 1. Условия существования и доминирования ударной (Оже) рекомбинации. 2. Оже-рекомбинация при низком и высоком уровне возбуждения.	1						[1] [3] [10]	
4.3.	<i>Излучательная рекомбинация</i> 1. Межзонная излучательная рекомбинация 2. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда при межзонной излучательной рекомбинации от ширины запрещенной зоны, уровня легирования и температуры	1						[1] [3] [7] [10] [11]	

	3. Модель Ван Русбрека Шокли, определение коэффициента межзонной излучательной рекомбинации 4. Излучательная рекомбинация с участием примесей 5. Полупроводниковые материалы для светодиодов и лазеров.								
4.4	<i>Рекомбинация с участием локализованных состояний.</i> 1. Центры рекомбинации, сечение захвата 2. Ловушки захвата и ловушки рекомбинации. Демаркационные уровни 3. Модель Шокли-Рида-Холла 4. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от уровня легирования и температуры 5. Механизмы передачи энергии при рекомбинации электронодырочных пар на локализованных состояниях. 6. Рекомбинация на многозарядных центрах	4						[1] [2] [5]	
4.5	<i>Поверхностная рекомбинация</i> 1. Быстрые и медленные состояния 2. Скорость поверхностной рекомбинации. 3. Статистика поверхностной рекомбинации. 4. Влияние поверхностной рекомбинации на распределение неравновесных носителей заряда по глубине полупроводника	1						[1] [5] [12]	
<b>5</b>	<b>Фотоэлектрические эффекты</b>	<b>4</b>				<b>4</b>			
5.1.	<i>Фотопроводимость</i> 1. Определение фотопроводимости. 2. Спектральное распределение фотопроводимости: фотопроводимость при межзонном поглощении света, примесная фотопроводимость, фототермическая ионизация. 3. Квантовый выход фотоэффекта 4. Стационарная фотопроводимость 5. Релаксация фотопроводимости 6. Фотопроводимость в случае неоднородного поглощения света и поверхностной рекомбинации 7. Влияние центров захвата на релаксацию фотопроводимости 8. Люксамперные характеристики фототока. 9. Примесная фотопроводимость. 10. Материалы для фоторезисторов.	2						[1] [3] [5] [8] [12]	



## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной и дополнительной литературы

#### *Основная*

1. Шалимова, К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова.— М.: Энергия, 1976.— 392 с.
2. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников — М.: Наука, 1990.— 688 с.
3. Фистуль, В.И. Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль.— М.: Высшая школа, 1975.— 352 с.
4. Вавилов, В.С. Действие излучений на полупроводники / В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов.— М.: Наука, 1988.— 192 с.
5. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин.— М.: Высшая школа, 1977.— 448 с.
6. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг.— М.: Наука, 1976.— 926 с.
7. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин.— М.: Мир, 2001.— 573 с.
8. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер.— М.: Мир, 1977.— 615 с.
9. Киреев, П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев.— М.: Высш. шк., 1975.— 584 с.
10. Аут, И. Фотоэлектрические явления / И. Аут, Д. Генцов, К. Герман.— М.: Мир, 1980.— 208 с.
11. Мосс, Т. Полупроводниковая оптоэлектроника / Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Элис.— М.: Мир, 1976.— 431 с.
12. Сердюк, В.В. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках / В.В. Сердюк, Г.Г. Чемересюк, М. Терек.— Киев; Одесса: Вища школа, 1982.— 151 с.

#### *Дополнительная*

1. Рывкин, С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках / С.М. Рывкин. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963.— 496 с.
2. Булярский С.В. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах / С.В. Булярский, Н.С. Грушко.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.— 399 с.
3. Грибковский, В.П. Полупроводниковые лазеры / Грибковский В.П.— Мн.: Университетское, 1988.
4. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт.— М.: Физматлит, 2008.— 496 с.
5. Розеншер, Э. Оптоэлектроника / Э. Розеншер, Б.Винтер.— М.: Техносфера, 2006.— 592 с.
6. Ю, П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона.— М.: Физматлит, 2002.— 560 с.
7. Алферов, Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии / Ж.И. Алферов // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1068—1086.

8. Кремер, Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам / Г. Кремер // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1087—1101.
9. Килби, Дж.С. Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем / Дж.С. Килби // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1102—1109.
10. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.М. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. // ФТП. —1998. —Т. 32, № 4. —С. 385—410.
11. Алферов, Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж.И. Алферов // ФТП. —1998. —Т. 32, № 1. —С. 3—18.
12. Захарченя, Б.П. Открытие экситонов / Б.П. Захарченя // УФН.— 1994.— Т. 164, № 4.— С. 346—348.
13. Вавилов, В.С. Алмаз в твердотельной электронике / В.С. Вавилов // УФН.— 1997.— Т. 167, № 1.— С. 17—22.
14. Вавилов, В.С. Особенности физики широкозонных полупроводников и их практических применений / В.С. Вавилов // УФН.— 1994.— Т. 164, № 3.— С. 287—296.
15. Бланк, Т.В. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // ФТП. — 2003. —Т. 37, № 9. —С. 1025—1055.
16. Органические материалы для фотовольтаики / Т.А. Юрре, Л.И. Рудая, Н.В. Климова, В.В. Шаманин // ФТП. —2003. —Т. 37, № 7. —С. 73—81.
17. Агекян, В.Ф. Внутрицентровые переходы ионов группы железа в полупроводниковых матрицах / В.Ф. Агекян // ФТП. —2002. —Т. 44, № 11. — С. 1921—1939.
18. Смирнов, Л.С. Атомные процессы в полупроводниковых кристаллах / Л.С. Смирнов // ФТП. —2001. —Т. 35, № 9. —С. 1029—1031.

### **Примерные перечни заданий управляемой самостоятельной работы**

*Рекомендуемые разделы для составления тестовых заданий*

1. Равновесные и неравновесные носители заряда.
2. Генерация неравновесных носителей заряда.
3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.
4. Рекомбинация неравновесных носителей заряда.
5. Фотоэлектрические эффекты.

### *Примерная тематика реферативных работ*

1. Поглощение света примесями в полупроводниковых кристаллах.
2. Поглощение света кристаллической решеткой полупроводников.
3. Поглощение света свободными носителями заряда.
4. Оптические переходы во внешнем электрическом поле (эффект Келдыша—Франца).
5. Магнитоплазменные эффекты.
6. Переходы в квантующем магнитном поле.

7. Экситонная излучательная рекомбинация.
8. Излучение многоэкситонных примесных комплексов.
9. Экситоны в низкоразмерных структурах.
10. Излучательная рекомбинация с участием примесей: переходы между зоной и примесным уровнем.
11. Излучательная рекомбинация с участием примесей: излучение донорно-акцепторных пар.
12. Токовые неустойчивости в однородном и неоднородном полупроводнике.
13. Нелинейная электропроводность,  $N$ - и  $S$ -образные вольт-амперные характеристики.
14. Термостимулированная проводимость полупроводников.
15. Воздействие радиации на полупроводники.

### **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

1. Тестовые задания по разделам дисциплины;
2. Защита реферативных работ.
3. Устные опросы.

### **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать тестовые задания по разделам дисциплины, защиту реферативных работ, устные опросы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Тестирование проводится в письменной форме. Каждый из письменных тестов включает в себя 10-40 заданий в открытой форме. На выполнение теста отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка каждого из тестов проводится по десятибалльной шкале, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 — Критерии оценки теста

Оценка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Процент от максимальной возможной суммы баллов	≥95%	≥ 90%, но <95%	≥ 85%, но <90%	≥ 80%, но <85%	≥ 70%, но <80%	≥ 60%, но <70%	≥ 50%, но <60%	≥ 30%, но <50%	≥ 10%, но <30%	<10 %

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждое из письменных тестирований и оценки за защиту реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзаменационная оценка ( $O_{\text{Э}}$ ) и оценка текущей успеваемости ( $O_{\text{ТУ}}$ ) служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине ( $O_{\text{Р}}$ ), которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости:  $K_{\text{ТУ}} = 0,4$ ; для экзаменационной оценки:  $K_{\text{Э}} = 0,6$ . Расчет проводится по формуле:

$$O_{\text{Р}} = K_{\text{ТУ}}O_{\text{ТУ}} + K_{\text{Э}}O_{\text{Э}}$$



## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Физика полупроводников	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	
Электронные состояния и процессы в конденсированных средах	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	
Статистическая физика полупроводников	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	



## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ на 2017-2018 уч.г.

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Внеаудиторная УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Аудиторный контроль УСР			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<b>1</b>	<b>Равновесные и неравновесные носители заряда</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	<b>6</b>		
1.1	<i>Равновесные и стационарные состояния.</i> 1. Основные термины и определения. 2. Принцип детального равновесия. 3. Стационарное состояние, потоки. 4. Концентрация равновесных носителей заряда. 5. Легированные полупроводники, уравнение электронейтральности. 6. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике.	2						[1] [2] [3]	
1.2	<i>Неравновесные носители заряда</i> 1. Генерация и рекомбинация носителей заряда 2. Закон действующих масс. 3. Низкий и высокий уровни возбуждения						2	[1] [3] [4]	
1.3	<i>Статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда</i> 1. Линейная рекомбинация. 2. Время жизни неравновесных носителей заряда. 3. Квадратичная рекомбинация. 4. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда						2	[1] [5] [9]	
1.4	<i>Квазиуровни Ферми</i> 1. Определение понятия "квазиуровни Ферми" 2. Инжекция неравновесных носителей заряда 3. Экстракция неравновесных носителей заряда						2	[2] [5]	
1.5	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Равновесные и неравновесные носители заряда»					2		[1] -[11]	Письменное тестирование

<b>2</b>	<b>Генерация неравновесных носителей заряда</b>					<b>2</b>	<b>4</b>		
2.1	<i>Взаимодействие электромагнитного излучения с полупроводниками</i> 1. Фотометрические понятия и единицы измерения. 2. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения и его вероятностный смысл. 3. Спектр поглощения оптического излучения полупроводниками.						1	[1] [2] [3] [6] [7]	
2.2	<i>Механизмы поглощения света полупроводниками</i> 1. Прямые межзонные переходы электронов. 2. Коэффициент поглощения при разрешенных и запрещенных переходах. 3. Непрямые межзонные переходы электронов. 4. Переходы с испусканием и поглощением фононов 5. Влияние температуры, давления на спектр фундаментального поглощения 6. Эффект Бурштейна-Мосса. 7. Поглощение света кристаллической решеткой 8. Поглощение света свободными носителями заряда. 9. Экситонное и примесное поглощение.						1	[1] [2] [3] [8]	
2.3.	<i>Взаимодействие жесткого электромагнитного излучения с полупроводниками.</i> 1. Внутренний фотоэффект 2. Комтон-эффект 3. Генерация электрон-позитронных пар.						1	[4]	
2.4	<i>Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях</i> 1. Термоэлектрическая ионизация. 2. Разогрев носителей заряда в сильном электрическом поле. 3. Туннельный эффект. 4. Ударная ионизация. 5. Токовые неустойчивости в однородном и неоднородном полупроводнике.						1	[2] [3] [5]	
5.5	Текущий контроль знаний студентов по разделу «Генерация неравновесных носителей заряда»					2		[1] - [11]	Письменное тестирование
<b>3</b>	<b>Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	<b>8</b>		
3.1.	<i>Токи в полупроводниках</i> 1. Модель Друде Лоренца, тепловая и дрейфовая скорости носителей заряда. 2. Дрейфовый ток, подвижность носителей заряда. 3. Время релаксации энергии и квазиимпульса, рассеяние носителей заряда, правило Матиссена. 4. Кинетическое уравнение Больцмана.	2						[1] [5]	

	5. Диффузионный ток, законы Фика. 6. Полная плотность тока. 7. Диффузионно-дрейфовое равновесие. Соотношение Эйнштейна.								
3.2	<i>Уравнение непрерывности</i> 1. Общий случай уравнения непрерывности. 2. Изменение концентрации неравновесных носителей заряда во времени (уравнения баланса)						2	[1] [5] [9]	
3.3	<i>Максвелловская релаксация</i> 1. Кинетика релаксации объемного заряда, время релаксации Максвелла. 2. Релаксация заряда основных носителей. 3. Релаксация заряда не основных носителей. 4. Длина экранирования Дебая						2	[1] [5]	
3.4	<i>Диффузия неравновесных носителей заряда</i> 1. Уравнение, описывающие диффузию неравновесных носителей заряда из освещенной области. 2. Диффузионная длина. 3. Влияние внешнего электрического поля на диффузионные потоки неравновесных носителей заряда. 4. Длина (глубина) затягивания по (против) полю(я)						2	[1] [5]	
3.5	<i>Биполярная диффузия.</i> 1. Уравнение биполярной диффузии 2. Коэффициент биполярной диффузии 3. Биполярная дрейфовая и диффузионная подвижности						2	[1] [5]	
3.6	Текущий контроль знаний студентов по разделу «Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда»					2		[1] -[11]	Письменное тестирование
<b>4</b>	<b>Рекомбинация неравновесных носителей заряда</b>	<b>2</b>					<b>6</b>		
4.1	<i>Типы и механизмы рекомбинации</i> 1. Законы сохранения энергии и импульса при рекомбинации неравновесных носителей заряда 2. Механизмы электронных переходов при рекомбинации.	1						[1] [3] [11]	
4.2	<i>Межзонная ударная рекомбинация</i> 1. Условия существования и доминирования ударной (Оже) рекомбинации. 2. Оже-рекомбинация при низком и высоком уровне возбуждения.						1	[1] [3] [10]	
4.3.	<i>Излучательная рекомбинация</i> 1. Межзонная излучательная рекомбинация 2. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда при межзонной излучательной рекомбинации от ширины запрещенной зоны, уровня легирования и температуры	1						[1] [3] [7] [10] [11]	

	3. Модель Ван Русбрека Шокли, определение коэффициента межзонной излучательной рекомбинации 4. Излучательная рекомбинация с участием примесей 5. Полупроводниковые материалы для светодиодов и лазеров.								
4.4	<i>Рекомбинация с участием локализованных состояний.</i> 1. Центры рекомбинации, сечение захвата 2. Ловушки захвата и ловушки рекомбинации. Демаркационные уровни 3. Модель Шокли-Рида-Холла 4. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от уровня легирования и температуры 5. Механизмы передачи энергии при рекомбинации электронодырочных пар на локализованных состояниях. 6. Рекомбинация на многозарядных центрах						4	[1] [2] [5]	
4.5	<i>Поверхностная рекомбинация</i> 1. Быстрые и медленные состояния 2. Скорость поверхностной рекомбинации. 3. Статистика поверхностной рекомбинации. 4. Влияние поверхностной рекомбинации на распределение неравновесных носителей заряда по глубине полупроводника						1	[1] [5] [12]	
<b>5</b>	<b>Фотоэлектрические эффекты</b>					<b>4</b>	<b>4</b>		
5.1.	<i>Фотопроводимость</i> 1. Определение фотопроводимости. 2. Спектральное распределение фотопроводимости: фотопроводимость при межзонном поглощении света, примесная фотопроводимость, фототермическая ионизация. 3. Квантовый выход фотоэффекта 4. Стационарная фотопроводимость 5. Релаксация фотопроводимости 6. Фотопроводимость в случае неоднородного поглощения света и поверхностной рекомбинации 7. Влияние центров захвата на релаксацию фотопроводимости 8. Люксамперные характеристики фототока. 9. Примесная фотопроводимость. 10. Материалы для фоторезисторов.						2	[1] [3] [5] [8] [12]	
5.2.	<i>Фотовольтаические эффекты</i> 1. ЭДС Дембера в случае биполярной проводимости 2. ЭДС Дембера при монополярной проводимости 3. Фотоэффект на <i>pn</i> -переходе и барьере Шоттки 4. Фотоэффекты в неоднородных полупроводниках						2	[1] [2] [5]	

