

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета БГУ

\_\_\_\_\_ В.М. Анищик

26.06.2009 г.

Регистрационный № УД-2049/баз.

**НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ И  
СТРУКТУРАХ**

**Учебная программа для специальности  
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»  
(1-31 04 01-02 производственная деятельность)**

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

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

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**С.Б. Ластовский** — старший научный сотрудник Научно производственного центра НАН Беларуси по материаловедению, кандидат физико-математических наук;

**Н.А. Дроздов** — доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 5 от 27 мая 2009 г.);

Ученым Советом физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 11 от 26 июня 2009 г.);

Ответственный за редакцию: Н.И. Горбачук

Ответственный за выпуск: Н.И. Горбачук

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа "Неравновесные процессы в полупроводниковых материалах и структурах" разработана для специальности 1-31 04 01 Физика.

Целью курса является обучение студентов основам физики неравновесных электрических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборных структурах, развитие полученных знаний и навыков применительно к физике полупроводниковых приборов.

Проектирование и изготовление современных микрoeлектронных устройств невозможно без глубокого понимания сути неравновесных электронных процессов, протекающих при их функционировании. Это особенно актуально в условиях непрерывного совершенствования технологии изготовления и уменьшения линейных размеров элементов интегральных микросхем. В электронике полупроводниковые приборы используются в устройствах для обработки электрических сигналов, а также для преобразования одних видов энергии в другие. Глубокое понимание принципа действия и свойств конкретного полупроводникового прибора является необходимым условием успешной профессиональной деятельности специалиста, имеющего квалификацию «Физик. Инженер» и работающего в области микро- и наноэлектроники.

В курсе рассматриваются процессы диффузии и дрейфа неравновесных носителей зарядов, их межзонной, поверхностной рекомбинации, рекомбинации с участием дефектов кристаллической решетки. Излагаются физические основы фотоэлектрических процессов, анализируется роль генерационно-рекомбинационных процессов в функционировании приборов полупроводниковой электроники. Представлены базовые подходы к анализу спектральных зависимостей, люксамперных и переходных характеристик фототока в полупроводниках в полупроводниках.

Студенты должны знать основы физики неравновесных процессов в полупроводниках, физические принципы действия и свойства базовых элементов, полупроводниковых приборов и интегральных схем, элементы технологии их изготовления, уметь анализировать спектральные зависимости фотопроводимости, кинетики рекомбинации неравновесных носителей заряда, вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов, уметь также рационально использовать конкретные приборы в той или иной электронной схеме.

Материал курса основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах по электричеству, оптике, атомной физике, квантовой механике, спецкурсах по зонной теории полупроводников и статистической физике полупроводников. Он является базовым для последующих спецкурсов по технологии производства интегральных микросхем электронике наноструктур.

Программа курса составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Общее количество часов – 131; аудиторное количество часов — 58, из них: лекции — 44, контролируемая самостоятельная работа студентов — 14. Форма отчетности — экзамен.

## ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

№ п/п	Название темы	Лекции	Контролируемая самостоятельная работа	Всего
1	2	3	4	5
1.	Равновесные и неравновесные носители заряда	8	2	10

1	2	3	4	5
2.	Взаимодействие электромагнитного излучения с полупроводниками	6	2	4
3.	Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда	8	2	4
4.	Межзонная рекомбинация	4	2	4
5.	Рекомбинация неравновесных носителей заряда с участием дефектов	8	2	8
6.	Фотоэлектрические эффекты	8	2	8
7.	Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях	2	2	4
	Итого	44	14	48

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1. Равновесные и неравновесные носители заряда.

Принцип детального равновесия. Стационарные состояния. Равновесные и неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Определение низкого и высокого уровней возбуждения. Линейная и квадратичная рекомбинация. Время жизни неравновесных носителей заряда. Квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Инжекция и экстракция носителей заряда.

### 2. Взаимодействие электромагнитного излучения с полупроводниками.

Фотометрические понятия и единицы измерения. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения и его вероятностный смысл. Спектр поглощения оптического излучения полупроводниками. Фундаментальное поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Эффект Бурштейна-Мосса. Влияние внешних воздействий на процессы фундаментального поглощения. Поглощение света кристаллической решеткой. Спектр поглощения свободными носителями заряда. Взаимодействие жесткого электромагнитного излучения с полупроводниками.

### 3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.

Дрейфовый и диффузионный ток. Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации энергии и квазиимпульса носителей заряда. Диффузионно-дрейфовое равновесие. Соотношение Эйнштейна. Максвелловская релаксация. Дебаевская длина экранирования. Общий случай уравнения непрерывности. Явления, связанные с пространственным распределением неравновесных носителей заряда в кристалле. Диффузионная длина. Длина дрейфа. Длина затягивания по(против) полю(я). Биполярная диффузия.

### 4. Межзонная рекомбинация.

Излучательная межзонная рекомбинация. Фундаментальные переходы. Теория Ван Русбрека – Шокли. Время жизни при излучательной рекомбинации и его зависимость, от уровня легирования, ширины запрещенной зоны полупроводников, температуры. Полупроводниковые материалы для светодиодов и лазеров. Излучательная рекомбинация с участием примесей. Ударная межзонная рекомбинация. Условия существования и доминирования ударной (Оже) рекомбинации. Оже-рекомбинация при низком и высоком уровне возбуждения.

### 5. Рекомбинация неравновесных носителей заряда с участием дефектов.

Захват неравновесных носителей заряда дефектами, сечение захвата. Модель Шокли-Рида-Холла. Центры рекомбинации, и центры захвата. Демаркацион-

ные уровни. Зависимость времени жизни от равновесной концентрации носителей заряда и температуры. Поверхностная рекомбинация. Быстрые и медленные состояния. Влияние поверхностной рекомбинации на распределение неравновесных носителей заряда.

#### 6. *Фотоэлектрические эффекты.*

Фотопроводимость. Квантовый выход фотоэффекта. Релаксация фотопроводимости и стационарная фотопроводимость. Полупроводниковые материалы для фоторезисторов. Спектральное распределение фотопроводимости. Люксамперные характеристики фототока. Примесная фотопроводимость. Влияние ловушек на релаксацию фототока. Термостимулированная проводимость полупроводников. Эффект Дембера. Вентильный фотоэффект, фото-ЭДС на *pn*-переходе и барьере Шоттки. Фотомагнитоэлектрический эффект. Полупроводниковые материалы для фотоэлектрических преобразователей.

#### 7. *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.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *Рекомендуемые формы контроля знаний*

1. Тестовые задания
2. Реферативные работы

### *Рекомендуемые темы тестовых заданий*

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

### *Рекомендуемые темы реферативных работ*

1. Полупроводниковые материалы для фотоприемников ИК-диапазона электромагнитного излучения.
2. Полупроводниковые материалы для фотоприемников УФ-диапазона электромагнитного излучения.
3. Полупроводниковые датчики ионизирующих излучений.
4. Электролюминесценция.
5. Примесная излучательная рекомбинация.
6. Материалы для порошковых излучателей.
7. Материалы для светоизлучающих диодов.
8. Полупроводниковые лазеры.
9. Полупроводниковые сенсоры.
10. Задержка сигнала в цепях интегральных схем и разработка материалов с низким значением диэлектрической проницаемости.
11. Физические причины нелинейной электропроводности полупроводниковых материалов.
12. Токовые неустойчивости в однородном и неоднородном полупроводнике.

13. Радиационные дефекты в кремнии и их роль в управлении электрическими параметрами полупроводниковых приборов.

### *Рекомендуемая литература*

#### **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. Щукин, 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.