

Белорусский государственный университет



УТВЕРЖДАЮ

Декан Физического факультета БГУ

В.М. Анищик

26.06.09г.

Регистрационный № УД- 2039 /баз.

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ:
НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

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

СОСТАВИТЕЛИ:

В. Ю. Явид — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, ст.научн.сотр.

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

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А.Г. Литвинко — доцент кафедры технической физики Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент;

Ю.М. Покатило — доцент кафедры атомной физики и физической информатики 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.);

Ответственные за редакцию: В.Ю. Явид, Н.И. Горбачук

Ответственные за выпуск: В.Ю. Явид, Н.И. Горбачук

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа "Физика полупроводниковых приборов: неравновесные процессы в полупроводниках" 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, их последовательное углубление в области физики уни- и биполярных приборов микроэлектроники, а также формирование у студентов представлений о основах технологии производства полупроводниковых приборов.

Проектирование и изготовление современных микроэлектронных 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, технологии его изготовления является необходимым условием успешной профессиональной деятельности специалиста, имеющего квалификацию «Физик. Инженер» и работающего в области микро- и нанoeлектроники.

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. Особое внимание уделено физическим процессам, протекающим в базовых элементах полупроводниковых приборов, механизмам прохождения тока в барьерных структурах, конструкции и принципу действия различных полупроводниковых приборов. Рассматриваются также основные технологические этапы производства полупроводниковых приборов.

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 – 180; аудиторное количество часов — 88, из них: лекции — 70, контролируемая самостоятельная работа студентов — 18. Форма отчетности — экзамен.

ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

№ п/п	Название темы	Лекции	Контролируемая самостоятельная работа	Всего
1	2	3	4	5
1.	Равновесные и стационарные состояния	4	2	6
2.	Генерация неравновесных носителей заряда	2		2
3.	Статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда	2		2
4.	Токи в полупроводниках	4		4
5.	Уравнение непрерывности	4		4
6.	Диффузия неравновесных носителей заряда	2	2	4
7.	Излучательная и ударная межзонные рекомбинации	2		2
8.	Рекомбинация с участием локализованных состояний	8	2	10
9.	Токи в полупроводниковых барьерных структурах	6	2	8
10.	Биполярные диоды	12	4	18
11.	Биполярные транзисторы	10	2	12
12.	Униполярные приборы	6	2	8
13.	Полевые транзисторы	2		2
14.	Фотопроводимость	4		4
15.	Фотовольтаические эффекты	2	2	4
	Итого	70	18	88

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Равновесные и стационарные состояния.

Принцип детального равновесия. Стационарное состояние, потоки. Уравнение электронейтральности. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Определение понятий генерация и рекомбинация носителей заряда. Закон действующих масс. Низкий и высокий уровни возбуждения. Квазиуровни Ферми. Инжекция и экстракция носителей заряда.

2. Генерация неравновесных носителей заряда

Фотометрические понятия и единицы измерения. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения и его вероятностный смысл. Спектр поглощения оптического излучения полупроводниками. Фундаментальное поглощение. Примесное поглощение света. Поглощение света кристаллической решеткой и свободными носителями заряда.

3. Статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда

Линейная рекомбинация. Время жизни неравновесных носителей заряда. Квадратичная рекомбинация. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда

4. Токи в полупроводниках

Модель Друде Лоренца, тепловая и дрейфовая скорости носителей заряда. Дрейфовый ток, подвижность носителей заряда. Время релаксации энергии и

квазиимпульса. Кинетическое уравнение Больцмана. Диффузионный ток. Полная плотность тока. Диффузионно-дрейфовое равновесие. Соотношение Эйнштейна.

5. Уравнение непрерывности

Кинетика релаксации объемного заряда, время релаксации Максвелла. Релаксация заряда основных носителей. Релаксация заряда не основных носителей. Длина экранирования Дебая. Общий случай уравнения непрерывности.

6. Диффузия неравновесных носителей заряда

Уравнение непрерывности для случая диффузии неравновесных носителей заряда. 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.

7. Излучательная и ударная межзонные рекомбинации

Законы сохранения энергии и импульса при рекомбинации неравновесных носителей заряда. Механизмы электронных переходов при рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Модель Ван Русбрика Шокли. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от ширины запрещенной зоны, уровня легирования и температуры. Полупроводниковые источники излучения. Условия существования и доминирования ударной (Оже) рекомбинации. Оже-рекомбинация при низком и высоком уровне возбуждения.

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

9. Токи в полупроводниковых барьерных структурах

Распределение равновесных носителей заряда в окрестности pn -перехода. Ток насыщения: диффузионная модель. Токи через pn -переход при прямом и обратном смещении. Роль диффузионной длины, толщина базы и pn -перехода в определении функциональной зависимости тока насыщения. Генерационно-рекомбинационные токи. Диффузионный потенциал и ширина обедненного слоя. Барьерная емкость. Формула Шокли. Диффузионная емкость. Лавинный, туннельный и тепловой пробой p - n -перехода.

10. Биполярные диоды

Определение понятия полупроводниковый прибор. Классификация полупроводниковых приборов. Основные технологические приемы при изготовлении биполярных диодов. Переходные процессы и шумы. Выпрямительные диоды, стабилитроны. Туннельные диоды. Диод Ганна. Гетеропереходы; модель Андерсона; сверхрешетки; технология создания гетеропереходов.

11. Биполярные транзисторы.

Что такое транзистор? Вольт-амперные характеристики транзистора. Дрейфовый транзистор. Коэффициенты усиления по току. Рекомбинационные процессы в базе транзистора. Выходные характеристики. СВЧ-транзисторы; частота отсечки. Методы формирования транзисторных структур. Планарная технология. Масштабирование транзисторов.

12. Униполярные приборы

Контакт металл-полупроводник. Обедненный слой. Эффект Шоттки. Теория переноса заряда через контакт металл-полупроводник. Диод Шоттки. Омический контакт.

13. Полевые транзисторы

Основные характеристики полевых транзисторов с р-п-переходом в качестве затвора. Однородно легированный канал.

14. Фотопроводимость

Определение фотопроводимости. Спектральное распределение фотопроводимости: фотопроводимость при межзонном поглощении света, примесная фотопроводимость, фототермическая ионизация. Квантовый выход фотоэффекта. Стационарная фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости при низком и высоком уровнях возбуждения. Фотопроводимость в случае неоднородного поглощения света и поверхностной рекомбинации. Люксамперные характеристики фототока. Примесная фотопроводимость. Материалы для фоторезисторов.

15. Фотовольтаические эффекты

ЭДС Дембера в случае биполярной проводимости. ЭДС Дембера при монополярной проводимости. Фотоэффект на рп-переходе. Фотоэффект на барьере Шоттки. Фотоэффект в варизонных полупроводниках. Эффект Кикоина-Носкова. Анализ выражения для фотомагнитоЭДС.

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. Биполярные диоды.
5. Биполярные транзисторы.
6. Фотоэлектрические эффекты.

Рекомендуемые темы реферативных работ

1. Токи в рп-переходах и их анализ на основе положения квазиуровней Ферми.
2. Энергии связывания носителей заряда в экситон.
3. Спектр экситонного поглощения.
4. Экситонная излучательная рекомбинация.
5. Критерии выбора полупроводниковых материалов для светоизлучающих приборов.
6. Полупроводниковые материалы для фоторезисторов
7. Температурная зависимость фототока.
8. Вольтамперные характеристики фототока.
9. Примесное поглощение света и использование легирования глубокими примесями в полупроводниковых приемниках излучения.
10. Влияние ловушек захвата на релаксацию фототока.

11. Технологические приемы управления временем жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых приборах.
12. Солнечные элементы и энергосберегающие технологии.
13. Туннельные диоды.
14. Варикапы.
15. Тиристоры.
16. Диоды Ганна.
17. Варисторы.
18. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.
19. Лавинно-пролетные диоды.
20. МОП-транзисторы.
21. Полупроводниковые гальваномагнитные приборы.
22. Полупроводниковые детекторы проникающей радиации.
23. Оптопары и оптоэлектронные микросхемы.
24. Терморезисторы.
25. Биполярные транзисторы с изолированным затвором.
26. Полупроводниковые термоэлектрические устройства.
27. Энергонезависимые элементы памяти.
28. Статическое электричество и полупроводниковая электроника.
29. Борьба с остаточными нарушениями в имплантированном кремнии в процессе производства полупроводниковых приборов.
30. Будущее технологии КМОП.
31. Двойные гетероструктуры.
32. Нанoeлектроника уровня 100 – 50 нм.
33. Миниатюризация позавчера, вчера, сегодня и завтра.
34. Тензоэлектрические полупроводниковые приборы.
35. Радиационная технология в микроэлектронике.

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. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин.— М.: Высшая школа, 1977.— 448 с.
5. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг.— М.: Наука, 1976.— 926 с.
6. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин.— М.: Мир, 2001.— 573 с.
7. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер.— М.: Мир, 1977.— 615 с.
8. Аут, И. Фотоэлектрические явления / И. Аут, Д. Генцов, К. Герман.— М.: Мир, 1980.— 208 с.
9. Сердюк, В.В. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках / В.В. Сердюк, Г.Г. Чемересюк, М. Терек.— Киев; Одесса: Вища школа, 1982.— 151 с.
10. Викулин, И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев — М.: Советское радио, 1980. — 296 с.
11. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов (в двух частях) / С.М. Зи. — М.: Мир, 1984. Ч1 – 455 с. Ч2 – 455 с.

12. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – М.: Высшая школа, 1981, 1987, С.Петербург, 2001. –480 с.
13. Шур, М.С. Физика полупроводниковых приборов / М.С. Шур. – М.: Мир, 1992. – 460 с.
14. Курносков, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. / А.И. Курносков, В.В.Юдин. – М.: Высшая школа, 1979. – 368 с.
15. Технология СБИС (под редакцией С.Зи) в двух книгах. – М.:Мир,1986. Ч1 – 406 с. Ч2 – 456 с.
16. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин Ю.М.Таиров. – М.: Высшая школа, 1985. – 288 с.
17. Курс лекций по твердотельной электронике Московского энергетического института (ТУ) – <http://WWW.pilab.ru/csi/AUK/Microelectr/page.html>
18. Броудай, И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей – М.: Мир, 1985. – 494 с.
19. Милнс, А. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт – М.: Мир, 1975. – 432 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. Возможно становится реальным: изобретение интегральных схем / Дж.С. Килби // УФН.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1102—1109.
10. Леденцов, Н.М. 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. Юрре, Т.А. 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. Агемян, В.Ф. Внутрицентровые переходы ионов группы железа в полупроводниковых матрицах / В.Ф. Агемян // ФТТ. —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.
19. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.
20. Блихер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / А. Блихер – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
21. Федоров, Л.П. Производство полупроводниковых приборов / Л.П. Федоров, В.М. Багров, Ю.Н. Тихонов – М: Энергия, 1979. – 432 с.
22. Янченко, А.М. Современные силовые полупроводниковые приборы / А.М. Янченко, М.И. Тарасик. – Минск: БГУ, 2005 – 44 с.
23. Готра, З.Ю. Технология микроэлектронных устройств / З.Ю. Готра – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
24. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов – М.: Высшая школа, 1986. – 486 с.