

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ИФФВТ
от 21 мая 2024 г. протокол № 10
Председатель _____ (Рыбин В.В.)
(по тексту, расшифровка подписи)



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина	Физика полупроводников
Факультет	Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра	Кафедра радиофизики и электроники
Курс	3 - очная форма обучения

Направление (специальность): 03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль/специализация): Твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения: очная

Дата введения в учебный процесс УлГУ: 01.09.2024 г.

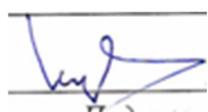
Программа актуализирована на заседании кафедры: протокол № _____ от _____ 20__ г.

Программа актуализирована на заседании кафедры: протокол № _____ от _____ 20__ г.

Программа актуализирована на заседании кафедры: протокол № _____ от _____ 20__ г.

Сведения о разработчиках:

ФИО	КАФЕДРА	Должность, ученая степень, звание
Семенцов Дмитрий Игоревич	Кафедра радиофизики и электроники	Профессор, Доктор физико-математических наук, Профессор

СОГЛАСОВАНО
Заведующий выпускающей кафедрой
 _____ / Гурин Н.Т./ Подпись ФИО
« 16 » 05 2024 г.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины:

Целью курса «Физика полупроводников» является изучение природы полупроводников, физических процессов, которые в них протекают при различных внешних воздействиях, современных методов их описания. Кроме того, курс «Физика полупроводников» позволяет сформировать у студентов представления о принципах работы полупроводниковых приборов, способах их изготовления и применении.

Задачи освоения дисциплины:

Задачи дисциплины:

- изучение основных представлений физики полупроводников;
- ознакомление студентов с физическими основами работы современных полупроводниковых устройств;
- развитие способностей и интереса к исследованию полупроводниковых материалов и приборов на их основе, к самостоятельному мышлению и творческой деятельности.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к числу дисциплин блока Б1.О, предназначенного для студентов, обучающихся по направлению: 03.03.03 Радиофизика.

В процессе изучения дисциплины формируются компетенции: ОПК-1.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении таких дисциплин как: Интегральные уравнения и вариационное исчисление, Электродинамика, Квантовая электроника, Полупроводниковая электроника, Статистическая радиофизика и нанооптика, Основы радиолокации, Физическая электроника, Теория колебаний, Психология и педагогика, Педагогическая практика, Научно-исследовательская работа, Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена, Введение в физику.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОСНОВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Код и наименование реализуемой компетенции	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций
ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	знать: основные понятия, связанные с физикой полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями

Код и наименование реализуемой компетенции	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций
	<p>на контактах полупроводника с металлами, полупроводниками, диэлектриками, применением этих явлений в приборных устройствах с применением этих явлений в приборных устройствах.</p> <p>уметь: применять полученные знания для анализа работы приборных объектов, использовать физические законы для предсказания поведения физических параметров полупроводниковых объемных и контактных приборов, оперировать физическими и технологическими терминами и величинами, анализировать задачи по переносу носителей заряда в полупроводниковых системах различной природы.</p> <p>владеть: информацией об областях применения полупроводников в приборных системах, а также информацией о методах измерения основных параметров полупроводников</p>

4. ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Объем дисциплины в зачетных единицах (всего): 5 ЗЕТ

4.2. Объем дисциплины по видам учебной работы (в часах): 180 часов

Форма обучения: очная

Вид учебной работы	Количество часов (форма обучения <u>очная</u>)	
	Всего по плану	В т.ч. по семестрам
1	2	3
Контактная работа обучающихся с преподавателем в соответствии с УП	72	72
Аудиторные занятия:	72	72
Лекции	36	36
Семинары и практические занятия	-	-
Лабораторные работы, практикумы	36	36
Самостоятельная работа	72	72
Форма текущего контроля знаний и контроля самостоятельной работы: тестирование, контр. работа, коллоквиум, реферат и др. (не менее 2 видов)	Тестирование	Тестирование
Курсовая работа	-	-
Виды промежуточной аттестации (экзамен, зачет)	Экзамен (18)	Экзамен

Вид учебной работы	Количество часов (форма обучения <u>очная</u>)	
	Всего по плану	В т.ч. по семестрам
		5
1	2	3
Всего часов по дисциплине	180	180

4.3. Содержание дисциплины. Распределение часов по темам и видам учебной работы

Форма обучения: очная

Название разделов и тем	Всего	Виды учебных занятий					Форма текущего контроля знаний
		Аудиторные занятия			Занятия в интерактивной форме	Самостоятельная работа	
		Лекции	Практические занятия, семинары	Лабораторные работы, практикумы			
1	2	3	4	5	6	7	8
Раздел 1. Физика полупроводников							
Тема 1.1. Введение	8	2	0	0	0	6	Тестирование
Тема 1.2. Статистика носителей заряда в полупроводниках	18	4	0	4	3	10	Тестирование
Тема 1.3. Кинетические явления в полупроводниках	24	6	0	8	3	10	Тестирование
Тема 1.4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы	24	6	0	6	3	12	Тестирование
Тема 1.5. Поверхностные явления в полупроводниках	24	6	0	6	3	12	Тестирование

Название разделов и тем	Всего	Виды учебных занятий					Форма текущего контроля знаний
		Аудиторные занятия			Занятия в интерактивной форме	Самостоятельная работа	
		Лекции	Практические занятия, семинары	Лабораторные работы, практикумы			
1	2	3	4	5	6	7	8
Тема 1.6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления	16	6	0	0	3	10	Тестирование
Тема 1.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.	30	6	0	12	3	12	Тестирование
Итого подлежит изучению	144	36	0	36	18	72	

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Физика полупроводников

Тема 1.1. Введение

Роль полупроводников в современной физике и технике. Вещества, относящиеся к полупроводникам. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Зонная структура полупроводниковых материалов. Основные особенности электрических свойств полупроводников. Влияние примесей. Основы практического использования полупроводников.

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

Тема 1.2. Статистика носителей заряда в полупроводниках

Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака. Невырожденные, вырожденные и примесные полупроводники. Степень заполнения примесных уровней. Концентрация электронов и дырок. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Закон действующих масс. Уравнение электронейтральности. Температурная зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси, в компенсированном полупроводнике.

Тема 1.3. Кинетические явления в полупроводниках

Электропроводность полупроводников в слабых электрических полях. Подвижность электронов и дырок. Электропроводность собственного и примесного полупроводников. Температурная зависимость подвижности и электропроводности при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Закон полного тока. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.

Тема 1.4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы

4.1 Электронно-дырочный переход. Распределение примесей, объемного заряда, свободных носителей, напряженности поля и потенциала на р-п – переходе. Энергетические диаграммы р-п – перехода в равновесном состоянии и под влиянием внешнего поля. Выпрямление на р-п-переходе. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода. Пробой р-п-перехода. Дифференциальное сопротивление и емкость р-п-перехода. 4.2 Контакт «металл-полупроводник». Переход Шоттки. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте металл-полупроводник. 4.3 Контакт между полупроводниками одного типа проводимости. 4.4. Гетеропереходы. 4.5. Свойства омических переходов.

Тема 1.5. Поверхностные явления в полупроводниках

Уравнение Пуассона. Поверхностный потенциал. Поверхностная проводимость. Эффект поля. МДП-структура. Емкость МДП-структуры.

Тема 1.6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления

Эффект Холла, эффект Холла в полупроводниках с двумя типами носителей заряда. Магниторезистивный эффект. Эффект Пельтье, эффект Томсона и эффект Зеебека.

Тема 1.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

Спектр отражения и спектр поглощения оптического излучения. Собственное поглощение света, прямые и непрямые переходы. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников. Экситонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Фоторезистивный эффект, квантовый выход, коэффициент усиления. Зависимость фототока от интенсивности света, кинетика фототока.

6. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ И СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

7. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ, ПРАКТИКУМЫ

Определение ширины запрещенной зоны полупроводника

Цели: изучить статистику электронов и дырок собственного полупроводника, знакомство с зонной теорией полупроводника

Содержание: 1. Изучить лабораторную установку. 2. Выставить на вольтметре напряжение 1 В. Это напряжение поддерживать ПОСТОЯННЫМ при изменении температуры. 3. Исследовать зависимость тока металла М и полупроводника ПП от температуры Т через каждые 3 оС (20 точек). 4. По измеренным значениям тока и напряжения рассчитать сопротивление образца, используя закон Ома: $R=U/I$. 5. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу, отдельную для каждого образца: № Т, К $1/T, K^{-1}$ I, А R, Ом 1 2 6. График зависимости сопротивления металла R_m от температуры Т. Сравнить полученный график с выражением (29). 7. По графику $R_m(T)$ определить температурный коэффициент сопротивления металла α по формуле $\alpha = (R_2 - R_1) / (R_1 T_2 - R_2 T_1)$ (30) Сравнить полученный результат с табличными значениями. 8. График зависимости сопротивления полупроводника $R_{пп}$ от температуры Т. 9. График зависимости $\ln R_{пп} (1/T)$, с помощью которого определить ширину запрещенной зоны полупроводника. Сравнить полученный результат с табличными значениями (таблица 1) и установить вид полупроводника.

Результаты: Результатом выполнения работы являются навыки анализа температурной зависимости сопротивления собственного полупроводника, соотнесения экспериментальных результатов с зонной теорией и статистикой электронов и дырок в полупроводнике.

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Определение диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках

Цели: определение диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей заряда. Метод основан на измерении пространственного распределения концентрации неравновесных носителей заряда, возбужденных светом

Содержание: Рекомендуется следующий порядок выполнения работы. 1. Включить источник питания, милливольтметр, осциллограф, модулятор. 2. Задать напряжение на образце 30 В. 3. Определить положение световой полосы на образце по отношению к электродам. 4. Пользуясь регулятором сдвига предметного столика определить диапазон координат измерения – напряжение должно измениться в диапазоне от max до min. 5. При выключенной лампе (отсутствии световой полосы) измерить уровень шумов на образце. 6. Включить лампу – источник света для формирования световой полосы на образце. 7. Провести измерение распределения напряжения U по образцу, изменяя расстояние x между коллектором и границей светового пятна через 0,1 мм. 8. Измерения необходимо провести не менее трех раз. Результаты измерений оформить в виде

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

таблицы. 9. Выключить лампы. 10. По данным таблицы построить график зависимости логарифма напряжения $\lg(U)$ от расстояния x . По наклону прямолинейного участка графика определить диффузионную длину неосновных носителей заряда. 11. Воспользовавшись осциллограммой, определить время жизни неосновных носителей заряда.

Результаты: Результатом выполнения работы являются знакомство с понятием неравновесные носители заряда, формирования понимания влияния параметров процессов генерации и рекомбинации в полупроводнике на быстродействие полупроводниковых структур, формирование навыков измерения параметров кинетических процессов.

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Определение контактной разности р-п- перехода

Цели: из вольт-фарадной характеристики резкого р-п-перехода определить контактную разность р-п-перехода, концентрацию легирующей примеси

Содержание: кнопки из группы “ЭКВИВ. СХЕМА” задать автоматический выбор эквивалентной схемы. Признаком включения режима автоматического выбора предела измерений является горящий светодиод на нажатой кнопке В случае необходимости последовательная или параллельная эквивалентные схемы выбираются вручную кнопками “ПОСЛЕД” и “ПАРАЛ” соответственно. Выбранная Вами (или автоматически прибором) эквивалентная схема отмечается включением светодиода. 7. Нажатием кнопки из группы “ПРЕДЕЛ ИЗМЕР” перевести прибор в режим автоматического выбора предела измерения. Признаком включения режима автоматического выбора предела измерений является горящий светодиод на нажатой кнопке. 8. Последовательным нажатием кнопки “УСРЕДНЕНИЕ” задать режим усреднения по 10 измерениям в цикле. Выбранный Вами режим усреднения отмечается включением светодиода. Усреднение результатов измерений предназначено для повышения разрешающей способности прибора. Операции усреднения прибором выполняются автоматически; на цифровом индикаторе высвечивается конечный результат. Рис. 7 Блок схема экспериментальной установки 10. Подключить к присоединительному устройству измерительную ячейку с исследуемым объектом. 11. Нажатием кнопки “С” из группы “ПАРАМЕТРЫ” подгруппы “А” настроить прибор для измерения емкости. 12. Задать требуемое значение напряжения смещения. **ВНИМАНИЕ!** Программное обеспечение прибора требует корректной работы пользователя. В случае неправильных действий возможны ситуации, при которых прибор искажает измеренную величину либо не реагирует на нажатие кнопок на передней панели. В этих случаях следует выключить прибор и через 20–30 секунд включить его с последующей калибровкой согласно пунктам 2, 3 инструкции.

Результаты: знакомство с теорией барьерной емкости в р-п0 переходе, формирование навыка анализа экспериментальных зависимости емкости полупроводниковой структуры от напряжения.

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Исследование электрических характеристик контакта металл-полупроводник

Цели: Изучение принципа работы диодов Шоттки, измерение и анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ), определение основных параметров диодов

Содержание: 1. Собрать схему для исследования диода Шоттки VD2 на постоянном токе (Рис.3). Соединить перемычкой гнезда X2, X7. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1000$ (максимальный ток 100 мА) между гнездами XI, X10. Для измерения анодного напряжения включить мультиметр («Модуль мультиметров») на пределе =20 В между гнездами X3, X15. Переключить тумблер SA1 в положение «+». 2. Снять вольт-амперную характеристику диода на постоянном токе сначала для прямой, а затем обратной ветви, переключив переключатель SA1 на «—». При смене ветви не забыть изменить

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

полярность миллиамперметра и его предел измерения. 3. Собрать схему для исследования диода Шоттки на переменном токе для получения ВАХ диода на экране осциллографа. Для этого установить SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0». Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту Rш (гнездо X13), а корпус осциллографа « » соединить с гнездом X12. Вход X (CH1) осциллографа подключить к гнезду X3. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Подать питание - переключатель SA1 установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра RP1 до положения «5». Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению. 4. Определить по осциллограмме параметры диода: напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии $U_{ам}$ при максимальном анодном токе $I_{ам}$, пороговое напряжение U_0 и дифференциальное сопротивление g_d .

Результаты: знакомство с принципом работы структур на основе барьера Шоттки, формирования навыков экспериментального анализа электрических характеристик подобных структур.

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Исследование статических вольт-амперных характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом

Цели: ознакомиться с ВАХ и основными дифференциальными статическими параметрами полевых транзисторов с изолированным затвором (МДП-транзисторов)

Содержание: 1. Для нормального включения транзистора (режим N) при напряжении $U_{пи} = 0$ снять и построить стоковые характеристики $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ для шести значений $U_{зи}$. Используя стоковые характеристики, построить стоко-затворные характеристики $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ для двух значений $U_{си} = 3 \text{ В}$, $U_{си} = 8 \text{ В}$. 2. Снять и построить стоковые характеристики при $U_{пи} = 2 \text{ В}$; 6 В . По данным п. п. 1 и 2 построить на одном графике стоко-затворные характеристики при $U_{си} = 8 \text{ В}$ и $U_{пи} = 0, 2, 6 \text{ В}$. 3. Снять и построить зависимость напряжения отсечки от напряжения $U_{пи}$ при прямом и инверсном включениях. 4. Для инверсного включения транзистора (режим I) снять и построить выходные характеристики $I_i = f(U_{ис})$ при $U_{зс} = \text{const}$ для трех значений $U_{зс}$ и двух значений $U_{пс} 0,6 \text{ В}$. 5. Включить подогрев. Повторить действия, начиная с п. 1. Определить температурный коэффициент ТКІ для трех значений $U_{зс}$. Время подогрева 3-4 мин. $T = 60^\circ$. 6. По результатам экспериментов определить дифференциальные параметры малосигнальной эквивалентной схемы полевого транзистора: S , μ , P при $U_{зи} = U_{зс} = 0$ для нормального и инверсного включений.

Результаты: формирование навыка измерения порогового напряжения МОПТ, его передаточных и выходных вольт-амперных характеристик, определения статических дифференциальных параметров

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Исследование спектров поглощения света в полупроводниках

Цели: Определение спектральной зависимости коэффициента поглощения света в полупроводниках. Выявление области собственного поглощения. Определение ширины запрещенной зоны образца

Содержание: Измерение коэффициента пропускания в области хорошего пропускания (область слабого поглощения) позволяет использовать наиболее простые формулы для определения коэффициента отражения. Поэтому проведите измерение коэффициента пропускания и в этой области тоже. Измеренные значения запишите в таблицу 1. Запишите ширину щели спектрометра. Рассчитайте спектральную ширину щели. Таблица 1 Длина волны, нм Коэффициент пропускания, % Коэффициент поглощения, см⁻¹ $\hbar\omega$, эВ $(\hbar\omega)^2$ $(\hbar\omega)^{1/2}$ Измерение коэффициента пропускания света в широком спектральном диапазоне позволяет определить коэффициент поглощения света материала, коэффициент отражения и коэффициент преломления. Как известно,

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

уменьшение интенсивности света на единице длины пути вдоль оси x происходит в соответствии с законом Бугера: $J(x)=J(0) e^{(-\alpha x)}$ Коэффициент пропускания пластинки толщиной d определяется как отношение интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего: $T=J(d)/J(0)$ С учетом того, что в процессе прохождения света через пластинку толщиной d происходит многократное отражение света на границах раздела, суммарная величина пропускания может быть выражена через коэффициент поглощения α и коэффициент отражения R следующим образом: $T=((1-R)^2 e^{(-\alpha d)})/(1-R^2 e^{(-2\alpha d)})$ (1). Определите по графику область длин волн, в которой коэффициент пропускания наибольший и слабо зависит от длины волны. Это область, в которой поглощение минимально. Если в формуле для T положить $\alpha=0$, то получим: $T=(1-R)^2/(1-R^2)=(1-R)^2/(1-R)(1+R)=(1-R)/(1+R)$. Из этого соотношения выразим R : $R_0=(1-T)/(1+T)$. Такой коэффициент отражения имеет индекс 0, так как он определен в приближении нулевого поглощения. В таком же приближении можно рассчитать коэффициент преломления n для этой области длин волн, используя известное соотношение между R и n : $R=(n-1)^2/(n+1)^2$, $n=(1+\sqrt{R_0})/(1-\sqrt{R_0})$. Рассчитайте R_0 и n по измеренным значениям T и укажите область длин волн, для которых произведен расчет. Решая уравнение (1) относительно коэффициента поглощения α , получим: $\alpha=1/d \ln\left(\frac{(1-R)^2}{2T+\sqrt{((1-R)^2/2T)^2+R^2}}\right)$. Вместо коэффициента отражения R в расчетах можно использовать определенный выше коэффициент R_0 . Исследование спектральной зависимости коэффициента поглощения света позволяет определить механизм межзонного поглощения света, а именно осуществляются ли такие переходы напрямую (прямые переходы), либо с участием фононов (непрямые переходы). $\alpha(\omega)=A_{\text{П}}/\hbar\omega (\hbar\omega-E_g)^{(1/2)}$ - для прямых переходов $\alpha(\omega)=A_{\text{Н}}/\hbar\omega (\hbar\omega-E_g)^2$ - для непрямых переходов Энергия фотона с длиной волны λ может быть определена по формуле: $\hbar\omega(\text{эВ})=1240/\lambda(\text{нм})$. Если построить график спектральной зависимости α в координатах $(\alpha\hbar\omega)^2$ от $\hbar\omega$ для прямозонных полупроводников и $(\alpha\hbar\omega)^{(1/2)}$ от $\hbar\omega$ для непрямозонных полупроводников, то экспериментальные точки будут располагаться на прямой линии. Пересечение этой прямой линии с осью абсцисс даст энергию ширины запрещенной зоны. Определите это значение. Определить, прямозонным или непрямозонным является данный полупроводник, можно, сравнивая, какая из двух теоретических зависимостей лучше (точнее) описывает экспериментальные результаты. Для этого для каждого экспериментального образца необходимо построить полученные данные в координатах $(\alpha\hbar\omega)^2$ от $\hbar\omega$ и $(\alpha\hbar\omega)^{(1/2)}$ от $\hbar\omega$ и определить, в каком случае линия, образованная из экспериментальных точек, лучше соответствует прямой линии.

Результаты: формирование навыков работы с спектрометром СФ-46, представлений о зонной структуре прямозонного и непрямозонного полупроводника, экспериментального анализа спектров поглощения полупроводника

Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

Исследование фотопроводимости в полупроводниках

Цели: изучение фотоэлектрических в полупроводниках. Измерение спектральной зависимости полупроводникового фотоприемника, определение красной границы фотоэффекта. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда

Содержание: Излучатель мощностью $P=20$ Вт имеет изотропный характер излучения. Исходя из этого, через линзу с диафрагмой проходит световой поток, равный некоторой доле от общего светового потока. Эта доля определяется отношением площади линзы к площади сферы радиусом, равным расстоянию от излучателя до линзы. Запишите расстояние от излучателя до линзы с диафрагмой, рассчитайте площадь сферы и измерьте площадь линзы. $\Phi=P$ (площадь линзы)/(площадь сферы) Далее весь прошедший через линзу световой поток направляется (фокусируется) на чувствительную зону фоторезистора. Дополнительной диафрагмой можно

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

уменьшить величину светового потока. Коэффициент уменьшения рассчитывается как отношение площади диафрагмы к площади линзы без диафрагмы. Последовательно задавайте значения светового потока с помощью диафрагм и измерьте значения фототока в измерительной цепи с помощью цифрового вольтметра. Величина сопротивления измерительного резистора 10 кОм. Результаты измерений запишите в таблицу 1. Рассчитайте значения светового потока и фототока для каждого измерения. Постройте график – ватт-амперную характеристику. По углу наклона определите чувствительность фоторезистора. Таблица 1 Диафрагма Площадь, см² Коэффициент уменьшения светового потока Световой поток, Вт Напряжение на измерительном резисторе, В Фототок, мА Соберите установку для измерения спектральной зависимости фотопроводимости, как показано на рис. 2. Последовательно задавайте значения длины волны излучения в диапазоне от 350 до 900 нм с шагом 20 нм и измерьте значения напряжения на измерительном резисторе. Результаты измерений запишите в таблицу 2. Интенсивность излучения галогенной лампы излучателя имеет неравномерный характер в заданном спектральном диапазоне. На рис. 3 приведен спектр излучения вольфрама при температуре 2450 К. Рис. 2. Блок – схема экспериментальной установки для измерения спектров фотопроводимости. 1 – источник питания; 2 – источник света (лампа накаливания); 3 - объективы; 4 – светофильтр; 5 – монохроматор МСД – 2; 6 – поляризатор; 7 – исследуемый образец; 8 – источник питания типа Б5 – 50; 9 – электрометрический усилитель; 10 – цифровой вольтметр. Рис. 3 Спектр излучения нагретого вольфрама. В области 300 – 1000 нм спектральную интенсивность излучения можно приблизительно аппроксимировать линейной функцией. Если считать, что интенсивность излучения лампы при 300 нм равна нулю, а при 1000 нм равна 1, его выравнивающий спектральный коэффициент можно описать формулой: $K(\lambda) = (\lambda - 300) / 700$ Для определения спектральной зависимости фототока необходимо учесть неравномерность спектра излучения галогенной лампы с помощью выравнивающего коэффициента. Для измеренных значений фототока рассчитайте его скорректированное значение. Результаты занесите в таблицу 2. Таблица 2 Длина волны, нм Напряжение, В Фототок, мА Выравнивающий спектральный коэффициент Скорректированный фототок, мА Постройте график спектральной зависимости фотопроводимости. Графически определите длину волны, соответствующую красной границе фотоэффекта $\lambda_{кг}$, в нанометрах. По ее значению определите ширину запрещенной зоны полупроводника в эВ: $E_g = 1240 / \lambda_{кг}$ (эВ) Сравните полученное значение со справочными данными для разных полупроводников. Какой полупроводник использован для фоторезистора? Результаты: формирование представление о фотопроводимости в полупроводнике, механизмов образования неравновесных носителей заряда, навыков экспериментального определения времени жизни неравновесных носителей заряда методом фотопроводимости
Ссылка: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Download/MObject/6493>

8. ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ, КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ, РЕФЕРАТОВ

Данный вид работы не предусмотрен УП.

9. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

1. Строение полупроводников. Кристаллическая решетка. Классификация кристаллических решеток по характеру химической связи.
2. Кристаллическая решетка полупроводников. Симметрия кристаллов. Решетки Бравэ. Классификация кристаллических решеток по отношению к операциям симметрии

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

3. Кристаллическая решетка полупроводников. Решетки Бравэ. Положение узлов кристаллической решетки. Положение и ориентация плоскостей и направлений в кристалле. Индексы Миллера.
4. Кристаллическая решетка полупроводников. Дефекты кристаллической решетки. Классификация дефектов.
5. Обобществление электронов в кристалле. Образование энергетических зон. Деление твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики.
6. Обобществление электронов в кристалле. Образование энергетических зон. Влияние дефектов на зонную структуру твердых тел.
7. Квантовомеханическое описание электронов в кристаллах. Приближение сильной и слабой связи. Волновые функции и энергетический спектр почти свободных электронов.
8. Волновые функции и энергия электронов, движущихся в периодическом поле кристалла. Эффективная масса электронов.
9. Функция распределение электронов в металле. Уровень Ферми и энергия Ферми. Связь энергии Ферми с концентрацией электронного газа в металле.
10. Положение уровня Ферми и концентрация свободных носителей в собственных полупроводниках. Зависимость концентрации свободных носителей от температуры.
11. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в примесных полупроводниках n-типа. Область низких температур, область истощения примеси, область собственной проводимости.
12. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в примесных полупроводниках p-типа. Область низких температур, область истощения примеси, область собственной проводимости.
13. Положение уровня Ферми и концентрация свободных носителей в собственных и примесных полупроводниках. Закон действующих масс.
14. Неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми
15. Генерация неравновесных носителей заряда
16. Рекомбинация носителей заряда. Классификация видов рекомбинации
17. Зона-зонная рекомбинация. Время жизни неравновесных носителей заряда
18. Оже-рекомбинация. Время жизни неравновесных носителей заряда
19. Ловушечная рекомбинация.. Время жизни неравновесных носителей заряда
20. Дрейф электронов под действием внешнего поля. Подвижность носителей заряда. Связь подвижности с временем релаксации и длиной свободного пробега.
21. Удельная электропроводность проводников. Связь электропроводности с подвижностью носителей заряда. Электропроводность невырожденного и вырожденного газов.
22. Удельная электропроводность проводников. Электропроводность невырожденного и вырожденного газов. Закон Видемана-Франца-Лоренца
23. Удельная электропроводность проводников. Связь электропроводности с подвижностью носителей заряда. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры.
24. Электропроводность чистых металлов и сплавов. Закон Нордгейма. Правило Матиссена об аддитивности удельного сопротивления.
25. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Закон действующих масс. Зависимость примесной проводимости от температуры.
26. Эффекты сильного поля (разогрев электронного газа; эффект дрейфового насыщения; термоэлектронная ионизация; ударная ионизация; электростатическая ионизация).
27. Эффект Ганна. Отрицательная дифференциальная проводимость. Физические принципы работы диодов Ганна.
28. Контакт двух металлов. Контактная разность потенциалов. Внешняя и внутренняя контактная разность потенциалов. Толщина двойного электрического слоя, возникающего в месте контакта

двух металлов.

29. Контакт металла с полупроводником. Влияние контактного поля на энергетические уровни полупроводника. Выпрямляющие свойства контакта металла с полупроводником. Диоды Шоттки.
30. P-n-переход. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода.
31. Гетеропереходы. Вольт-амперная характеристика гетероперехода
32. Поверхностные явления в полупроводниках. Уровни Тамма
33. Перенос зарядов через тонкие полупроводниковые пленки.
34. Принцип работы МДП-структуры
35. Проводимость канала в МДП-структуре
36. Гальваномагнитные явления. Эффект Холла. Связь постоянной Холла с концентрацией и знаком носителей заряда
37. Гальваномагнитные явления. Эффекты Плетье и Томпсона.
38. Изменение электропроводности проводников в магнитном поле.
39. Гальваномагнитные явления. Эффект Зеебека
40. Взаимодействие света с веществом. Коэффициенты отражения и поглощения. Закон Бугера-Ламберта
41. Взаимодействие света с веществом. Собственное поглощение света в полупроводниках, поглощение свободными носителями заряда и поглощение примесными центрами
42. Взаимодействие света с веществом. Фотопроводимость полупроводников и ее использование в электронике
43. Фотовольтаические эффекты. Эффект Дембера
44. Вентильный эффект. Фото- ЭДС и её практическое использование

10. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА ОБУЧАЮЩИХСЯ

Содержание, требования, условия и порядок организации самостоятельной работы обучающихся с учетом формы обучения определяются в соответствии с «Положением об организации самостоятельной работы обучающихся», утвержденным Ученым советом УлГУ (протокол №8/268 от 26.03.2019г.).

По каждой форме обучения: очная/заочная/очно-заочная заполняется отдельная таблица

Форма обучения: очная

Название разделов и тем	Вид самостоятельной работы (проработка учебного материала, решение задач, реферат, доклад, контрольная работа, подготовка к сдаче зачета, экзамена и др).	Объем в часах	Форма контроля (проверка решения задач, реферата и др.)
Раздел 1. Физика полупроводников			
Тема 1.1. Введение	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения	6	Вопросы к экзамену, Тестирование

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

Название разделов и тем	Вид самостоятельной работы (проработка учебного материала, решение задач, реферат, доклад, контрольная работа, подготовка к сдаче зачета, экзамена и др).	Объем в часах	Форма контроля (проверка решения задач, реферата и др.)
	дисциплины.		
Тема 1.2. Статистика носителей заряда в полупроводниках	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	10	Вопросы к экзамену, Тестирование
Тема 1.3. Кинетические явления в полупроводниках	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	10	Вопросы к экзамену, Тестирование
Тема 1.4. Контактные явления в полупроводниках. Электрические переходы	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	12	Вопросы к экзамену, Тестирование
Тема 1.5. Поверхностные явления в полупроводниках	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	12	Вопросы к экзамену, Тестирование
Тема 1.6. Термоэлектрические и термомагнитные явления, эффект Холла, гальваномагнитные явления	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	10	Вопросы к экзамену, Тестирование
Тема 1.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты. Спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.	Проработка учебного материала с использованием ресурсов учебно-методического и информационного обеспечения дисциплины.	12	Вопросы к экзамену, Тестирование

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) Список рекомендуемой литературы основная

1. Старосельский Виктор Игоревич. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие для вузов / В.И. Старосельский ; В. И. Старосельский. - Москва : Юрайт, 2022. - 463 с. - (Бакалавр. Академический курс). - URL: <https://urait.ru/bcode/509181> . - Режим доступа: Электронно-библиотечная система Юрайт, для авториз. пользователей. - Электрон. дан. - ISBN

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

978-5-9916-0808-4 : 1419.00. / .— ISBN 0_412188

2. Червяков Г. Г. Электронная техника : учебное пособие / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. - 2-е изд. ; пер. и доп. - Москва : Юрайт, 2024. - 235 с. - (Высшее образование). - URL: <https://urait.ru/bcode/534566> . - Режим доступа: Электронно-библиотечная система Юрайт, для авториз. пользователей. - ISBN 978-5-534-18226-2 : 1019.00. / .— ISBN 0_521083

дополнительная

1. Горлач В. В. Физика: квантовая физика. Лабораторный практикум : учебное пособие / В. В. Горлач. - 2-е изд. ; испр. и доп. - Москва : Юрайт, 2024. - 114 с. - (Высшее образование). - URL: <https://urait.ru/bcode/538539> . - Режим доступа: Электронно-библиотечная система Юрайт, для авториз. пользователей. - ISBN 978-5-534-10137-9 : 399.00. / .— ISBN 0_521921

2. Ланге, П. К. Физика полупроводников и нанотехнологий : учебно-методическое пособие / П. К. Ланге ; П. К. Ланге. - Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. - 88 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - Текст. - Гарантированный срок размещения в ЭБС до 06.02.2025 (автопродлонгация). - электронный. - Электрон. дан. (1 файл). - URL: <http://www.iprbookshop.ru/91129.html>. - Режим доступа: ЭБС IPR BOOKS; для авторизир. пользователей. - ISBN 2227-8397. / .— ISBN 0_151466

3. Филиппов В. В. Физика полупроводниковых приборов / В. В. Филиппов, С. В. Мицук ; Филиппов В. В., Мицук С. В. - Липецк : Липецкий ГПУ, 2016. - 125 с. - Библиогр.: доступна в карточке книги, на сайте ЭБС Лань. - Книга из коллекции Липецкий ГПУ - Физика. - <https://e.lanbook.com/book/126986>. - <https://e.lanbook.com/img/cover/book/126986.jpg>. - Режим доступа: ЭБС "Лань"; для авторизир. пользователей. - ISBN 978-5-88526-787-8. / .— ISBN 0_370656

4. Физика полупроводниковых приборов : учебное пособие / Д. Я. Вострецов, Л. Н. Вострецова, Д. А. Богданова [и др.] ; УлГУ, ИФФВТ, Каф. инженерной физики. - Ульяновск : УлГУ, 2019. - ил. - Загл. с экрана. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 2,93 Мб). - Режим доступа: ЭБС УлГУ. - Текст : электронный. / .— ISBN 0_36135

учебно-методическая

1. Вострецова Л. Н. Физика полупроводников : учебно-методические указания для выполнения лабораторных работ для студентов направлений бакалавриата и магистратуры / Л. Н. Вострецова ; УлГУ, ИФФВТ. - 2019. - Загл. с экрана. - Неопубликованный ресурс. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 867 КБ). - Режим доступа: ЭБС УлГУ. - Текст : электронный. / .— ISBN 0_40056.

2. Вострецова Л. Н. Методические указания для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика полупроводников» для направлений бакалавриата / Л. Н. Вострецова ; УлГУ, ИФФВТ, Каф. инж. физики. - 2019. - Загл. с экрана. - Неопубликованный ресурс. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 899 КБ). - Режим доступа: ЭБС УлГУ. - Текст : электронный. / .— ISBN 0_40055.

б) Программное обеспечение

- Операционная система "Альт образование"

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

- Офисный пакет "Мой офис"

в) Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы

1. Электронно-библиотечные системы:

1.1. Цифровой образовательный ресурс IPRsmart : электронно-библиотечная система : сайт / ООО Компания «Ай Пи Ар Медиа». - Саратов, [2024]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru>. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. - Текст : электронный.

1.2. Образовательная платформа ЮРАЙТ : образовательный ресурс, электронная библиотека : сайт / ООО Электронное издательство ЮРАЙТ. – Москва, [2024]. - URL: <https://urait.ru>. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. - Текст : электронный.

1.3. База данных «Электронная библиотека технического ВУЗа (ЭБС «Консультант студента») : электронно-библиотечная система : сайт / ООО Политехресурс. – Москва, [2024]. – URL: <https://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.

1.4. Консультант врача. Электронная медицинская библиотека : база данных : сайт / ООО Высшая школа организации и управления здравоохранением-Комплексный медицинский консалтинг. – Москва, [2024]. – URL: <https://www.rosmedlib.ru>. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.

1.5. Большая медицинская библиотека : электронно-библиотечная система : сайт / ООО Букап. – Томск, [2024]. – URL: <https://www.books-up.ru/ru/library/> . – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.

1.6. ЭБС Лань : электронно-библиотечная система : сайт / ООО ЭБС Лань. – Санкт-Петербург, [2024]. – URL: <https://e.lanbook.com>. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.

1.7. ЭБС **Znanium.com** : электронно-библиотечная система : сайт / ООО Знаниум. - Москва, [2024]. - URL: <http://znanium.com> . – Режим доступа : для зарегистрир. пользователей. - Текст : электронный.

2. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]: справочная правовая система. /ООО «Консультант Плюс» - Электрон. дан. - Москва : КонсультантПлюс, [2024].

3. eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека : сайт / ООО «Научная Электронная Библиотека». – Москва, [2024]. – URL: <http://elibrary.ru>. – Режим доступа : для авториз. пользователей. – Текст : электронный

4. Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» : электронная библиотека : сайт / ФГБУ РГБ. – Москва, [2024]. – URL: <https://нэб.рф>. – Режим доступа : для пользователей научной библиотеки. – Текст : электронный.

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

5. Российское образование : федеральный портал / учредитель ФГАУ «ФИЦТО». – URL: <http://www.edu.ru>. – Текст : электронный.

6. Электронная библиотечная система УлГУ : модуль «Электронная библиотека» АБИС Мега-ПРО / ООО «Дата Экспресс». – URL: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Web>. – Режим доступа : для пользователей научной библиотеки. – Текст : электронный.

12. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ:

Аудитории для проведения лекций, семинарских занятий, для выполнения лабораторных работ и практикумов, для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации, курсового проектирования, групповых и индивидуальных консультаций (*выбрать необходимое*)

Аудитории укомплектованы специализированной мебелью, учебной доской. Аудитории для проведения лекций оборудованы мультимедийным оборудованием для представления информации большой аудитории. Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде, электронно-библиотечной системе. Перечень оборудования, используемого в учебном процессе:

- Мультимедийное оборудование: компьютер/ноутбук, экран, проектор/телевизор
- Компьютерная техника
- Блок питания PPS-1007
- Вольтметр В7-57/1
- Лабораторный комплекс ЛКО-6
- Осциллограф С1-157
- Осциллограф С1-159
- Осциллограф С8-33
- Прибор В 7-46-1 (Вольтметр)
- Прибор Е7-14
- Спектрофотометр ДФС 458С
- Модуль GPIB интерфейса DS2-GPIB
- Осциллограф GDS-72104
- Вольтметр В7-78/3
- Опция GPIB для И7-78/1
- Измеритель индуктивности, емкости, сопротивления RLC WK 4320

13. СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ

В случае необходимости, обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося) могут предлагаться одни из следующих вариантов восприятия информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей:

Министерство науки и высшего образования РФ Ульяновский государственный университет Ф – Рабочая программа дисциплины	Форма	
--	-------	--

- для лиц с нарушениями зрения: в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); в печатной форме на языке Брайля; индивидуальные консультации с привлечением тифлосурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации;

- для лиц с нарушениями слуха: в печатной форме; в форме электронного документа; видеоматериалы с субтитрами; индивидуальные консультации с привлечением сурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации;

- для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата: в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.

В случае необходимости использования в учебном процессе частично/исключительно дистанционных образовательных технологий, организация работы ППС с обучающимися с ОВЗ и инвалидами предусматривается в электронной информационно-образовательной среде с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

Разработчик	Доктор физико-математических наук, Профессор	Семенцов Дмитрий Игоревич
	Должность, ученая степень, звание	ФИО

