

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



ТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н
В.Е.Блинов
2022 г.

Рабочая программа дисциплины

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ СЛОЕВ
И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ 1**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	16		22			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 50 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу,
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Учебный курс «Физика полупроводниковых тонких слоёв и низкоразмерных систем-1» формирует умения и навыки по основам физики тонких полупроводниковых слоёв, знакомит с ключевыми физическими свойствами полупроводниковых структур, определяющими работу больших интегральных схем.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

1. Владение феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию квазиклассических свойств электронов и дырок в тонких слоях на основе полупроводников.
2. Изучение различных разновидностей областей пространственного заряда в полупроводниковых структурах, а также их роли в работе полупроводниковых приборов на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать методы и способы постановки и решения задач исследования полупроводниковых структур с областями пространственного заряда; принципы действия полупроводниковых приборов на основе указанных структур.</p> <p>Уметь применять эти способы и методы для оценки положения уровня Ферми на поверхности полупроводника; решать стандартные задачи по электростатике приповерхностной области пространственного заряда на основе решения уравнения Пуассона.</p> <p>Владеть методами построения зонной диаграммы структуры металл-диэлектрик-полупроводник при приложении к ней затворного напряжения; методами расчёта приповерхностной области пространственного заряда полупроводника в условия обогащения, обеднения, слабой и сильной инверсии.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Физика полупроводниковых тонких слоёв и низкоразмерных систем 1» реализуется в осеннем семестре 4-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**. Для успешного освоения курса обучающиеся должны обладать предварительными знаниями основ электродинамики, квантовой механики, статистической физики в объеме бакалавриата физического факультета НГУ.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	16		22			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 50 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, зачёт.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: зачёт.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 22 часа;
- промежуточная аттестация (зачёт) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, зачёт) составляет 50 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)	Промежуточ-
-------	-------------------	-----------------	--	-------------

			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Введение в курс. Полупроводниковые тонкие слои и низкоразмерные системы. Роль поверхности полупроводника. Размерные эффекты. Мезоскопика	1	4	2	1	1	
2.	Атомарно-чистая поверхность полупроводника. Реальная поверхность. Границы раздела. Поверхностные состояния (ПС). Модели Тамма и Шокли. Феноменологическое описание ПС. Распределение ПС по энергии.	2–3	8	4	2	2	
3.	Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника. Зонная диаграмма ОПЗ. Поверхностный потенциал. Слои инверсии, обогащения и обеднения. Статистика электронов и дырок в ОПЗ. Уравнение Пуассона. Решение для случая невырожденной статистики. Заряд и емкость ОПЗ. Статистика заполнения поверхностных состояний. Заряд и емкость ПС.	4	4	2	1	1	
4.	Контакт металл-полупроводник. Зонная диаграмма. ОПЗ в контакте металл-полупроводник. Влияние ПС. Барьер Шоттки. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.	5	4	2	1	1	
5.	Гетеропереход. Зонная диаграмма гетероперехода. Разрывы зон. ОПЗ в гетеропереходе. Вольт-амперная характеристика гетероперехода.	6	4	2	1	1	
6.	Поверхностный захват и рекомбинация. Модель Шокли-Рида. Скорость поверхностной рекомбинации. Фотопроводимость тонкой полупроводниковой пластины.	7–8	8	4	2	2	
7.	Поверхностная проводимость и поверхностное рассеяние. Кинетическое уравнение Больцмана и граничное условие Фукса. Решение Шрифера. Поверхностная подвижность.	9	4	2	1	1	
8.	Технология МДП-структур. Зонная диаграмма МДП-структуры. МДП-структура при наличии внешнего смещения. Связь затворного напряжения и изгиба зон.	10	5	2	1	2	
9.	Влияние контактной разности потенциалов, встроенного заряда и поверхностных состояний.	11	4	2	1	1	

10.	Емкость МДП-структуры. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ). ВФХ в присутствии поверхностных состояний. Определение плотности ПС из измерений ВФХ.	12	5	2	1	2	
11.	Характерные времена релаксации заряда в ОПЗ полупроводника. Неравновесное обеднение. Связь инжектированного заряда с изгибом зон	13	5	2	1	2	
12.	Прибор с зарядовой связью. канал. ПЗС как линия задержки. ПЗС видикон.	14	5	2	1	2	
13.	Инверсионный Слабая и сильная инверсия. Проводимость инверсионного канала.	15	5	2	1	2	
14.	МДП-транзистор. Вольтамперная характеристика. Инвертор на основе МДП-транзисторов. Большая интегральная схема.	16	5	2	1	2	
15.	Зачет		2				2
Всего			72	32	16	22	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. Электронные процессы у поверхности полупроводников. (18 часов)

- 1.1. Атомарно-чистая поверхность полупроводника. Реальная поверхность. Границы раздела.
- 1.2. Поверхностные состояния (ПС). Модели Тамма и Шокли. Феноменологическое описание ПС. Распределение ПС по энергии.
- 1.3. Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника. Зонная диаграмма ОПЗ. Поверхностный потенциал. Слои инверсии, обогащения и обеднения. Статистика электронов и дырок в ОПЗ. Уравнение Пуассона. Решение для случая невырожденной статистики. Заряд и емкость ОПЗ. Статистика заполнения поверхностных состояний. Заряд и емкость ПС.
- 1.4. Контакт металл-полупроводник. Зонная диаграмма. ОПЗ в контакте металл-полупроводник. Влияние ПС. Вольт-амперная характеристика.
- 1.5. Гетеропереход. Зонная диаграмма гетероперехода. ОПЗ в гетеропереходе. Вольт-амперная характеристика.
- 1.6. Поверхностный захват и рекомбинация. Скорость поверхностной рекомбинации.
- 1.7. Поверхностная проводимость и поверхностное рассеяние.

2. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (14 часов).

- 2.1. Технология. Зонная диаграмма МДП-структуры. МДП-структура при наличии внешнего смещения. Затворное напряжение. Влияние контактной разности потенциалов, встроенного заряда и поверхностных состояний.
- 2.2. Емкость МДП-структуры. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ). ВФХ в присутствии поверхностных состояний. Определение плотности ПС из измерений ВФХ. Неравновесное обеднение. Прибор с зарядовой связью.
- 2.3. Инверсионный канал. Слабая и сильная инверсия. Проводимость инверсионного канала. МДП-транзистор. Вольтамперная характеристика. Инвертор. Большая интегральная схема.

Программа практических занятий (16 часов)

1. Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника. Зонная диаграмма ОПЗ. Поверхностный потенциал. Слои инверсии, обогащения и обеднения. Статистика электронов и дырок в ОПЗ. Уравнение Пуассона. Решение для случая невырожденной

- статистики. Заряд и емкость ОПЗ. Решение задач (Нахождение изгиба зон, определение типс ОПЗ) – 2 часа
2. Статистика заполнения поверхностных состояний. Заряд и емкость ПС. Решение задач (Определение изгиба зон при наличии ПС, расчет поверхностной емкости) – 2 часа
 3. Контакт металл-полупроводник. Зонная диаграмма. ОПЗ в контакте металл-полупроводник. Влияние ПС. Вольт-амперная характеристика. Решение задач (Построение зонной диаграммы, расчет ВАХ) – 2 часа.
 4. Гетеропереход. Зонная диаграмма гетероперехода. ОПЗ в гетеропереходе. Вольт-амперная характеристика. Решение задач (построение зонной диаграммы, расчет ВАХ) – 2 часа
 5. Поверхностный захват и рекомбинация. Скорость поверхностной рекомбинации. Решение задач (Влияние СПР на фотопроводимость) – 2 часа
 6. Поверхностная проводимость и рассеяние. Решение задач (Определение изгиба зон, влияние поверхностного рассеяния) – 2 часа
 7. Зонная диаграмма МДП-структуры. МДП-структура при наличии внешнего смещения. Затворное напряжение. Влияние контактной разности потенциалов, встроенного заряда и поверхностных состояний. Решение задач (Нахождение связи между затворным напряжением и поверхностным потенциалом) – 2 часа
 8. Емкость МДП-структуры. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ). ВФХ в присутствии поверхностных состояний. Определение плотности ПС из измерений ВФХ. Решение задач (Определение параметров полупроводника и ОПЗ из ВФХ). Инверсионный канал. Слабая и сильная инверсия. Проводимость инверсионного канала. МДП-транзистор. Вольтамперная характеристика. Решение задач (Определение проводимости инверсионного канала как функции затворного напряжения) – 2 часа

Самостоятельная работа студентов (22 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	11
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	11

5. Перечень учебной литературы.

1. З. Д. Квон, Л. К. Попов "Электронны и дырки в тонких слоях полупроводников", изд-во Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 2010. (Ч.1-2010, 121 с. : ил., ISBN 978-5-94356-959-3 (6 экз.)
2. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. / С.М. Зи ; Пер. с англ. В.А. Гергеля, В.В. Ракитина / Под ред.Р.А. Суриса. [Кн.]1. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Мир, 1984. 455.(2 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

3. З. Д. Квон, Л. К. Попов "Электронны и дырки в тонких слоях полупроводников", изд-во Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 2010.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в виде вопросов на знание материала предыдущих занятий и решения задач из задания.

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация — зачёт. Он проходит в конце семестра по билетам в устной форме. Оценка знаний, умений, навыков и освоения компетенций обучающимися в рамках промежуточной аттестации проводится с учетом оценки за работу в семестре (РС).

Оценка за РС учитывает активность студента на занятиях, оцениваемую преподавателем, посещение занятий, а также количество сданных задач из задания для самостоятельного решения. За РС выставляется оценка «незачтено» в случае сдачи менее 80% задач из заданий.

Для получения зачета необходимо сдать не менее 2/3 задач из задания в установленные программой курса сроки.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка «зачтено» по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физики полупроводниковых тонких слоёв и низкоразмерных систем.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Получение «зачёта» означает успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать методы и способы постановки и решения задач исследования полупроводниковых структур с областями пространственного заряда; принципы действия полупроводниковых приборов на основе указанных структур.	Решение задач, зачет.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь применять эти способы и методы для оценки положения уровня Ферми на поверхности полупроводника; решать стандартные задачи по электростатике приповерхностной области пространственного заряда на основе решения уравнения Пуассона.	Решение задач, зачет.

<p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Владеть методами построения зонной диаграммы структуры металл-диэлектрик-полупроводник при приложении к ней затворного напряжения; методами расчёта приповерхностной области пространственного заряда полупроводника в условия обогащения, обеднения, слабой и сильной инверсии.</p>	<p>Решение задач, зачет.</p>
--	--	------------------------------

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физика полупроводниковых тонких слоёв и низкоразмерных систем 1».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Задачи для самостоятельного решения

Задание 1

1. Дан полупроводник n-типа с работой выхода Φ_n . При появлении на поверхности этого полупроводника акцептороподобного дискретного уровня с энергией ϵ_t , отсчитанной от середины запрещенной зоны, она изменилась на $\Delta\Phi_n$. Определить концентрацию этих уровней, считая, что ОПЗ полупроводника описывается в приближении обеднения.
2. Построить зонную диаграмму контакта металл-полупроводник, если $\Phi_M = 4.6$ эВ, $\chi = 4.4$ эВ, $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $E_g = 0.7$ эВ. Как изменится эта диаграмма, если $N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. $T = 300$ К.
3. Имеется гетеропереход, зонная диаграмма которого показана на рисунке. Найти отношение концентраций электронов n_1 и n_2 в невырожденном случае и при сильном вырождении. n_1 – концентрация электронов в узкозонном полупроводнике, n_2 – концентрация электронов в широкозонном полупроводнике.
4. Построить зонную диаграмму гетероперехода. Полупроводник1: $E_{g1} = 1.7$ эВ, $\chi = 3.8$ эВ, $n_i = 10^3 \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Полупроводник2: $E_{g2} = 0.7$ эВ, $\chi = 3.6$ эВ, $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. $T = 300$ К. Как изменится диаграмма, если полупроводник2 станет полупроводником p-типа.
5. Имеется два n-p гетероперехода с одинаковым легированием обоих полупроводников, одинаковыми полупроводниками n-типа, но с разными полупроводниками p-типа. Чем будут отличаться их ВАХ?

Задание 2

1. Имеются два полупроводника с разными запрещенными зонами, но с одинаковым уровнем легирования. Провести сравнительный анализ поведения ВФХ МДП-структуры на основе этих п/п, если емкости диэлектриков равны.
2. Имеется МДП-структура с постоянной плотностью ПС (акцептороподобных, расположенных в диапазоне $E_i < E < E_c$ и донороподобных E - в диапазоне $E_i > E > E_v$) на границе раздела диэлектрик-п/п $N_{ss} = 2 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$. На сколько вольт необходимо изменить затворное напряжение V_g , чтобы перейти от $Y_s = \ln \lambda$ к $Y_s = 2 \ln \lambda$ (использовать приближение обеднения для ОПЗ)? $C_i = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2$, $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T = 300$ К, $\epsilon_s = 10$.
3. На затвор Si-МДП-структуры с п/п n-типа подано напряжение, которое сформировало слой обеднения с $Y_s = 2 \ln \lambda$. Чему равно это напряжение, если на границе раздела п/п-диэлектрик есть ПС (акцептороподобные, расположенных в диапазоне $E_i < E < E_c$ и донороподобные - в диапазоне $E_i > E > E_v$) с постоянной плотностью N_{ss} . Все необходимые параметры даны.
4. Как изменится Y_s , если увеличить N_D в 10 раз. При охлаждении МДП-структуры от 300 К до 200 К ВФХ сдвинулась таким образом, что напряжение плоских зон изменилось на 1 В. Определить изменение заряда ПС при $Y_s = 0$. $C_i = 3.8 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2$, $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при 300 К, $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$

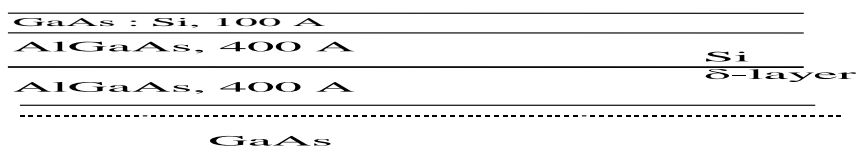
5. На границе раздела п/п-окись в Si МДП-структуре имеются дискретные акцептороподобный и донороподобный уровни, расположенные, соответственно на расстоянии 0.4 эВ выше и ниже середины запрещенной зоны. $N_A = N_D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $C_D = 2 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2$, $\epsilon_{Si} = 12$, $T = 300 \text{ К}$. Какой вид имеет ВФХ такой МДП-структуры? Чему равна ее емкость, когда уровень Ферми пересекает поверхностные уровни.

Задание 3

1. Нарисовать зонную структуру многослойной системы, состоящей из следующих слоев:

легированный донорами GaAs – 100 нм, $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
 нелегированный GaAs – 100 нм
 легированный акцепторами AlGaAs – 10 нм, $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$
 легированный акцепторами AlGaAs – 100 нм, $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
 нелегированный AlGaAs – 10 нм
 легированный донорами GaAs – 500 нм, $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

2. Нарисовать зонную структуру многослойной системы, показанной ниже.



без учета пиннинга уровня Ферми и с учетом него.

Примерные вопросы на зачёт:

1. Решение уравнения Пуассона для приповерхностной ОПЗ полупроводника.
2. Поверхностные состояния. Модель Тамма и Шокли.
3. Поверхностное рассеяние.
4. Электростатика МДП-структуры.
5. МДП-транзистор.
6. Контакт металл-полупроводник.

Пример билета на зачёт

1. Статистика приповерхностной ОПЗ.
2. Поверхностная рекомбинация.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Физика полупроводниковых тонких слоёв
и низкоразмерных систем 1»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного