

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Введение в радиационную физику твердого тела

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.04.03 Введение в радиационную физику твердого тела относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен осваивать принципы работы и методы эксплуатации современной и перспективной радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры	ПК-1.1: Применяет теоретические основы создания и принципы функционирования радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры ПК-1.2: Осваивает новые технологии радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры, используя специальную, научную и учебную литературу	ПК-1.1: Знать основные принципы взаимодействия корпускулярных и фотонных излучений с полупроводниками. Уметь рационально выбирать методы физико-технологического и физико-топологического моделирования для конкретных изделий микроэлектроники. ПК-1.2: Владеть навыком анализа изменений параметров изделий микроэлектроники, подвергнутых воздействию радиации.	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы
ПК-2: Способен осваивать и применять современные и перспективные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	ПК-2.1: Анализирует современное состояние исследований в области физики и радиофизики, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов ПК-2.2: Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом	ПК-2.1: Знать основные механизмы образования дефектов в твердых телах. ПК-2.2: Уметь выбирать методы исследования радиационных дефектов. ПК-2.3: Владеть навыком оценки влияния дефектов на электрофизические	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы

	поставленной задачи ПК-2.3: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации. в ходе планирования, подготовки, проведения НИР в области радиофизики	характеристики полупроводниковых приборов.		
ПК-3: Способен обрабатывать, оформлять и представлять результаты исследований и разработок в области радиофизики	ПК-3.1: Обрабатывает результаты радиофизических исследований ПК-3.2: Представляет результаты НИР академическому и бизнес- сообществу	ПК-3.1: Знать основные способы обработки данных на компьютере. Уметь выбирать подходящее программное обеспечение для моделирования радиационного воздействия на специальную аппаратуру. ПК-3.2: Владеть навыком моделирования изделий микроэлектроники физико- технологическим и физико- топологическим методами.	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	0
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	22
- КСР	1
самостоятельная работа	49
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем),	Самостоятельная работа

		часы из них			обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора торные работы), часы	Всего	
	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О
Введение в радиационную физику твердого тела и радиационные технологии электроники.	10		3	3	7
Взаимодействие корпускулярного и фотонного излучений с веществом.	10		3	3	7
Образование дефектов в твердых телах.	10		3	3	7
Ионная имплантация. Импульсный отжиг.	10		3	3	7
Методы физико-технологического и физико-топологического моделирования изделий микроэлектроники.	10		3	3	7
Особенности проведения радиационных испытаний.	13		3	3	10
Возможности применения малых электрофизических установок для проведения предварительной отбраковки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.	8		4	4	4
Аттестация	0				
КСР	1				1
Итого	72	0	22	23	49

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение в радиационную физику твердого тела и радиационные технологии электроники.
2. Взаимодействие корпускулярного и фотонного излучений с веществом.
3. Образование дефектов в твердых телах.
4. Ионная имплантация. Импульсный отжиг.
5. Методы физико-технологического и физико-топологического моделирования изделий микроэлектроники.
6. Особенности проведения радиационных испытаний.
7. Возможности применения малых электрофизических установок для проведения предварительной отбраковки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Практические занятия / лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Темы занятий, по которым дается домашнее задание

1. Взаимодействие нейтронов с веществом
2. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом
3. Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом
4. Взаимодействие квантов высоких энергий с веществом
5. Энергетический спектр некоторых радиационных дефектов
6. Влияние дефектов на электрофизические характеристики полупроводниковых приборов
7. Метод обратного рассеяния легких частиц как способ определения профиля внедренной примеси
8. Высокопроизводительные параллельные вычисления в задачах физико-технологического и физико-топологического моделирования изделий микроэлектроники.
9. Влияние разброса электрических характеристик дискретных полупроводниковых приборов на порог катастрофического отказа при воздействии ионизирующих излучений

Выполнение домашних заданий проверяется на занятиях. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

1. Взаимодействие корпускулярного и фотонного излучений с веществом
2. Радиационная среда и ее основные характеристики.
3. Методы исследования радиационных дефектов.
4. Пробеги ионов. Распределение примесных атомов после процесса внедрения.
5. Особенности диффузии примесей при лазерном отжиге.
6. Отжиг точечных дефектов и слабо разупорядоченных слоев.
7. Особенности поведения неосновных носителей заряда. Геттерирование.
8. Метод обратного рассеяния легких частиц как способ определения профиля внедренной примеси.
9. Понятие физико-технологического моделирования изделий микроэлектроники
10. Анализ данных о механизме воздействия радиационных факторов на свойства изделий электронной техники.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

Совпадают с вопросами промежуточной аттестации

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Совпадают с вопросами промежуточной аттестации

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Совпадают с вопросами промежуточной аттестации

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами,	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

				с недочетами	.	выполнены все задания в полном объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Радиационная среда и ее основные характеристики.
2. Общие положения. Трансформация излучений. Взаимодействие нейтронов с веществом. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом.

3. Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом. Взаимодействие квантов высоких энергий с веществом.
4. Пороговая энергия образования точечных дефектов. Пары Френкеля.
5. Методы исследования радиационных дефектов. Энергетический спектр некоторых радиационных дефектов. Влияние дефектов на электрофизические характеристики полупроводниковых приборов.
6. Ионное легирование полупроводников. Общие положения. Оборудование для проведения процесса ионной имплантации.
7. Пробег ионов. Распределение примесных атомов после процесса внедрения. Образование радиационных дефектов при внедрении атомов примеси.
8. Импульсный отжиг. Особенности диффузии примесей при лазерном отжиге. Отжиг точечных дефектов и слабо разупорядоченных слоев. Создание мелких переходов.
9. Электрические свойства ионно-легированных полупроводников. Особенности поведения неосновных носителей заряда. Геттерирование. Метод обратного рассеяния легких частиц как способ определения профиля внедренной примеси.
10. Методология комплексных исследований и радиационных испытаний. Анализ данных о механизме воздействия радиационных факторов на свойства изделий электронной техники.
11. Организация и проведение радиационных испытаний. Анализ экспериментальных результатов.
12. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС-структурах.
13. Влияние разброса электрических характеристик полупроводниковых приборов на пробы при воздействии экстремальных факторов.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Тонкий (толщиной менее 1 мм) кремниевый образец n-типа облучается потоком гамма-квантов с энергией 1 МэВ. В некоторый момент времени облучение прекращается. Найти зависимость концентрации дырок в объеме образца от времени.
2. Тонкий (толщиной менее 1 мм) кремниевый образец n-типа облучается потоком гамма-квантов с энергией 1 МэВ. Учитывая явление поверхностной рекомбинации, найти распределение концентрации дырок в объеме образца.
3. Кремниевый образец n-типа освещается ультрафиолетовым излучением в стационарном режиме. Найти пространственное распределение концентрации дырок в объеме образца.
4. Кремниевый образец n-типа подвергается воздействию короткого пространственно-локализованного лазерного импульса (длительность импульса лазера существенно короче времени жизни неосновных носителей заряда, ширина пучка излучения существенно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда). Найти пространственно-временное распределение концентрации дырок в образце.
5. Ионный пучок с величиной тока 10 мкА имеет полуугловое расхождение 10° после прохождения квадратной апертурной диафрагмы 8×8 см, расположенной на расстоянии 6 см от мишени. Используя амперметр, определите время процесса, необходимое для ионной имплантации с

дозой 10^{13} см^{-2} : а) для однократно ионизованных одноатомных частиц; б) для трижды ионизованных двухатомных частиц.

6. Величина тока ионного пучка ускорителя составляет 10 мкА. Расстояние между отклоняющими пластинами равно 2 см, на них подается пилообразное напряжение развертки величиной 2 кВ. Энергия имплантируемых ионов мышьяка 10 кэВ. Оцените: а) какова величина снижения напряженности электрического поля в центре пучка; б) может ли эта установка быть перенастроена на величину тока пучка ионов 1 мА без изменения ее размеров.
7. Рассчитайте величины поверхностного сопротивления кремниевых структур, полученных имплантацией As и BF_2 с энергией 30 кэВ и дозой 10^{15} см^{-2} , с учетом предположения о полной активности примеси, внедренной в соответствии с неразмытым профилем распределения Гаусса. Профиль может быть аппроксимирован участками постоянной концентрации и подвижности.

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Постройте профили вертикального и бокового легирования при $x = R_p$ для дозы имплантации 10^{15} см^{-2} с энергией 60 кэВ. Используйте, соответственно гауссово распределение и распределение дополнительной функции ошибок с учетом резкости края маски большой толщины в вертикальном направлении.
2. Покажите, что глубина перехода в вертикальном направлении определяется соотношением , где n_B – фоновая концентрация легирующей примеси.
3. Постройте профили распределения легирующей примеси (доза имплантации 10^{15} см^{-2} с энергией 60 кэВ) в вертикальном направлении для отжига течение 30 минут при температуре 850 и 1000 °С, используя коэффициенты диффузии примеси $5 \times 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$ и $8 \times 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$.
4. Покажите, что маска толщиной d обладает коэффициентом пропускания . Какова должна быть толщина аморфной поликремниевой маски, чтобы коэффициент пропускания был равен 10^{-4} для ионов бора с энергией 150 кэВ?
5. Анализ методом просвечивающей электронной микроскопии показывает, что дефектная область, формируемая одиночным ионом, имеет диаметр 3 нм. Используя значения длины пробега и линейных потерь энергии для ионов мышьяка с энергией 30 кэВ, докажите, что дефектная область траектории иона является аморфным слоем.
6. Найдите решение для интеграла рассеяния для отталкивающего кулоновского потенциала , $C > 0$ и рассчитайте дифференциальное сечение рассеяния.
7. Найдите решение для интеграла рассеяния и рассчитайте сечение рассеяния для потенциала в приближении «жесткой сердцевинки» . Какой физический смысл имеет полученное решение?
8. Рассчитайте энергию, передаваемую в среднем атомам бора, кремния и мышьяка, при их упругом взаимодействии с нейтроном с энергией 1 МэВ и их линейные потери энергии на начальном участке траектории. Как будут меняться линейные потери энергии указанных атомов в процессе движения в среде?

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны

Оценка	Критерии оценивания
	негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1977. - 672 с. : ил. - 72.00., 67 экз.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 : 2.00., 7 экз.

Дополнительная литература:

1. Вавилов Виктор Сергеевич. Действие излучения на полупроводники . - М. : Наука, 1988. - 191 с. : ил. - 1.20., 3 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Пузанов Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Осипов Григорий Владимирович, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.