

**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**



**Рабочая программа дисциплины
РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

направление подготовки: **03.04.02 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 ра- бота, не включая период сессии	Самостоятельная подго- товка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
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.....	7
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.

Цель учебного курса «Радиационная физика полупроводников» – дать магистрантам базовые знания умения и навыки по основам физики взаимодействия радиационного излучения с твердыми телами, ознакомить с радиационными методами исследования полупроводников, а также с современными полупроводниковыми материалами и приборами, производимыми на основе радиационных технологий.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

Овладение феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию радиационных явлений в кристаллических полупроводниках, диэлектриках и металлах.

Изучение круга радиационных явлений, используемых для анализа структуры и состава объемных материалов, тонких пленок и многослойных структур (в том числе наноструктур) на основе радиационных процессов, изучение радиационных технологий, используемых для создания новых материалов и приборов.

Ознакомление с физическими принципами работы приборов, основанных на радиационных технологиях в полупроводниках: полупроводниковых транзисторов, элементов памяти, излучателей света, фотоприемников.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и подходы решения задач формирования полупроводниковых структур радиационными методами: ионное и нейтронное легирование, ионное травление, отжиг (пассивация) радиационных дефектов, понимать принципы действия, функциональные возможности систем и установок (ионные имплантеры, ядерные реакторы, установки ионного травления, термического и плазменного отжига) обеспечивающих формирование полупроводниковых структур радиационными методами; базовые разделы физики конденсированного состояния, физики полупроводников и радиационных явлений в полупроводниках; физику явлений каналирования ионов в кристалле, явлений нейтронного легирования, ионного травления, термического и лазерного отжига. Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в об-

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		ласти физики радиационных явлений в полупроводниках и полупроводниковых структурах с использованием современной аппаратуры; применять результаты исследования полупроводниковых материалов и структур с использованием радиационных методов в инновационной деятельности. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики полупроводников и физики твердого тела с помощью современных радиационных методов; основными понятиями радиационной физики твёрдого тела и физики полупроводников; информацией об основных достоинствах и недостатках важнейших радиационных технологий; основными методами анализа структуры и состава полупроводников на основе радиационных процессов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Радиационная физика полупроводников» реализуется в осеннем семестре 1-го курса магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников. Для успешного освоения курса «Радиационная физика полупроводников» магистранты должны обладать предварительными знаниями основ электродинамики, квантовой механики, статистической физики в объеме бакалавриата физического факультета НГУ. В свою очередь, учебный курс «Радиационная физика полупроводников» предоставляет магистрантам теоретические знания и практические навыки, необходимые для обучения в аспирантуре по специальностям "физика полупроводников" и "физика конденсированного состояния", а также для успешного использования радиационных методов для исследования полупроводниковых материалов и наноструктур и радиационных технологий для создания материалов и приборов микро- и нанoeлектроники.

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

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			1
1		Лекции, ч	16
2		Практические занятия, ч	16
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	36
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	38
10		Всего, ч	72

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.

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

Раздел 1. Физические процессы в твердых телах при радиационных воздействиях. (2 часа).

Виды радиационных воздействий: фотоны, мягкое рентгеновское излучение, низкоэнергетические электроны, тяжелые заряженные частицы, быстрые нейтроны, высокоэнергетические электроны, гамма – кванты, медленные нейтроны. Первичные и вторичные процессы. Условия классического и квантовомеханического описания взаимодействия быстрых частиц с твердым телом; приближение парных столкновений, пределы применимости приближения. Кинематика упругих соударений. Максимальная переданная энергия атомам мишени. Пороговая энергия смещения атома в твердом теле.

Раздел 2. Потенциалы ионно-атомного взаимодействия, заряд иона при движении в твердом теле; пробеги ионов в твердых телах. (4 часа).

Потенциал ионно-атомного взаимодействия при определении неупругих и упругих потерь энергии в твердом теле для быстрых частиц (приближение Н.Бора). Обоснование приближения. Потенциалы ионно-атомного взаимодействия в модели атома Томаса-Ферми, заряд иона при движении в твердом теле, определение неупругих и упругих потерь энергии в твердом теле для любых значений энергий. Распределение пробегов ионов; пробеги ионов в твердых телах, пространственное распределение пробегов; распределение имплантируемых элементов по глубине; эффект каналирования, распределение имплантируемых элементов по глубине с учетом эффекта каналирования.

Раздел 3. Радиационные дефекты при облучении ионами и нейтронами. Пространственное распределение радиационных дефектов. (4 часа).

Атомная конфигурация точечных дефектов. Классификация точечных дефектов. Предельная концентрация точечных дефектов при продолжительном облучении полупроводников. Подпороговое дефектообразование в полупроводниках:

а) электростатический: примесно- ионизационный механизм; б) ионизационный механизм. Термическая стабильность радиационных изменений кристаллов. Механизмы отжига. Лазерный отжиг полупроводников. Процессы на поверхности полупроводников при облучении ионами низких энергий. пространственное распределение вводимых дефектов.

Раздел 4. Основные методы анализа структуры и состава материалов, основанные на радиационных эффектах. (2 часа).

Метод обратного Резерфордского рассеяния- каналирования, активационный анализ, метод анализа протяженной тонкой структуры (Extended X-ray Absorption Fine Structure).

Раздел 5. Ионное и трансмутационное легирование. Основные преимущества методов. (4 часа).

Основные достоинства ионного легирования: низкая температура процесса ионной имплантации; имплантация нерастворимых/плохо растворимых элементов; контролируемость процесса путем измерения ионного тока; однородность легирования; управление профилями распределения элементов по глубине (многократная имплантация); Простота маскирования; имплантация через тонкие окислы, нитриды. Эффективность ядерных реакций при облучении кремния нейтронами; выход реакции синтеза фосфора при облучении кремния тепловыми нейтронами, однородность трансмутационного легирования в сравнении с другими методами.

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Потери энергии на единицу длины пробега ускоренной частицы в полупроводниках в упругих и неупругих взаимодействиях. Максимальная переданная энергия атому мишени в упругих столкновениях. (решение задач). (4 часа)

Занятие 2. Пробеги ионов в твердых телах, пространственное распределение пробегов с учетом каналирования. (2 час).

Занятие 3. Контрольная работа. (1 час)

Занятие 4. Качественное построение спектра обратного Резерфордского рассеяния легированного слоя полупроводника. Определение состава и структуры легированного слоя (4 часа).

Занятие 5. Качественное построение пространственного распределения потерь энергии иона в твердом теле на единицу длины для высокой, средней и малых энергий иона. Определение количество смещенных атомов при внедрении единичного иона. (2 часа).

Занятие 6. Типы точечных дефектов и их атомная конфигурация при радиационных воздействиях на полупроводники. Анализ возможностей различных методов радиационного легирования полупроводников. (2 час).

Занятие 7. Контрольная работа. (1 час).

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	6
Подготовка к заданиям для самостоятельного решения	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела : [учебное пособие для вузов] / Г.И. Епифанов. Москва : Высшая школа, 1965. 276 с. : ил. ; 22 см. (8 экз.)
2. Юбилейный сборник избранных трудов института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (1964-2014). Отв. ред. А.В. Латышев, А.В. Двуреченский, А.Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. с.504 - 517. (2 экз.)
3. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация / Ф.Ф.Комаров, А.П.Новиков, А.Ф.Буренков ; Под.ред. Ф.Ф.Комарова. Минск : Университетское, 1994. 303 с. : ил. ISBN 9850900369 (2 экз.)
4. Эланго М.А. Элементарные неупругие радиационные процессы. М.: Наука, 1988., ISBN 5-02-013831-2 (2 экз.)
5. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория. М.: Мир, 1984. (2 экз.)
6. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М. Мир, 1985. (2 экз.)
7. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989., ISBN 5030010173 (2 экз.)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

8. Епифанов Г.И. Физика твёрдого тела: учеб. пособие.
9. А.В. Двуреченский, Открытие явления импульсной ориентированной кристаллизации твердых тел («Лазерный отжиг»). Юбилейный сборник избранных трудов института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (1964-2014). Отв. ред. А.В. Латышев, А.В. Двуреченский, А.Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. с.504 - 517.

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.

Интернет-ресурсы:

1. Электронный архив: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>
2. Раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL: http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=81

7.1 Современные профессиональные базы данных

New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. Электронный архив ФТИ им. А.Ф. Иоффе: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/> (свободный доступ)
<http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-291/page001.pdf> (свободный доступ)

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 ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения контрольных работ. В течение семестра студентам необходимо успешно решить и сдать преподавателю задачи из обязательного задания.

Промежуточная аттестация

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка 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 радиационных явлений в полупроводниках и полупроводниковых структурах в профессиональной деятельности.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Радиационная физика полупроводников».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
Экзамен: – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>

Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>
--	-----------------------------------

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

Пример контрольной работы

1. Каналирование в монокристаллах. Рассеяние быстрых частиц на дефектах и примесях, смещенных из узлов решетки.
2. Атомная конфигурация точечных дефектов. Типы точечных дефектов в твердом теле при облучении быстрыми частицами и взаимодействии компонентов пар Френкеля между собой и с примесями: вакансии, дивакансии, тетра-, пентавакансии, расщепленные междоузельные атомы, димеждоузельные конфигурации, цепочки междоузельных атомов.
3. Механизмы введения дефектов при облучении быстрыми и тепловыми нейтронами.
4. Нарисуйте последовательность технологических процессов для получения самосовмещенного затвора в МДП-транзисторе.

Перечень задач для самостоятельного решения

1. Пучок ионов гелия с энергией 2 МэВ падает на серебряную фольгу и испытывает кулоновское рассеяние в соответствии с формулой Резерфорда.
Каково расстояние наибольшего сближения атомов гелия с атомами мишени?
Какая часть падающих ионов рассеивается назад (т.е. под углом, большим 90°)
2. Пользуясь законами сохранения энергии и импульса, вывести выражение для энергии, передаваемой от падающего на мишень иона атому мишени.
3. Нарисовать (качественно) зависимость потерь на единицу длины энергии быстрого иона, движущегося в твердом теле, в зависимости от его скорости.
4. Определить количество смещенных атомов при внедрении единичного иона фосфора с энергией 100 кэВ в кремний.
5. Найти пробег ионов мышьяка в германии с энергией 20 кэВ в предположении, что преобладают ядерные потери энергии и что сечение торможения не зависит от энергии.
6. Нарисуйте качественно пространственное распределение пробегов ионов в твердом теле и вводимых дефектов для двух случаев: а) масса налетающего иона много меньше массы атома мишени; б) обратный случай.

Перечень вопросов на экзамен

1. Пленка углерода содержит поверхностные примеси Au, Ag и Si. Нарисуйте спектр обратного рассеяния, указав энергии и относительные амплитуды различных пиков.
2. Используя потенциалы ионно-атомного взаимодействия в модели атома Томаса-Ферми, нарисуйте зависимость неупругих и упругих потерь энергии в твердом теле в зависимости от скорости иона.

3. В чем заключается механизм подпорогового дефектообразования в полупроводниках.
4. Нарисовать атомную конфигурацию радиационных точечных дефектов.
5. Каким методом можно определить появление на поверхности полупроводника тонкого расплавленного слоя в результате лазерного отжига.
6. В чем заключается метод Резерфордовского обратного рассеяния в анализе структуры и состава материала. Рассеяние быстрых частиц на дефектах и примесях, смещенных из узлов решетки.
7. Ионное легирование. Основные преимущества метода. МОП-приборы: самосовмещенный затвор, снижение порогового напряжения; КМОП-транзисторы. Синтез захороненных слоев. Ионное перемешивание.
8. Трансмутационное легирование полупроводников при облучении нейтронами. Активационный анализ.

Пример билета на экзамен

1. Потери энергии быстрых частиц в веществе на неупругие и упругие соударения.
2. Импульсный лазерный отжиг полупроводников: рекристаллизация имплантированных слоев, диффузия и растворимость и сегрегация примесей.
3. Процессы на поверхности полупроводников при облучении ионами низких энергий.

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.