

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением
Ученого совета ННГУ
протокол от
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Основы полупроводниковых технологий

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Основы полупроводниковой технологии» относится к дисциплинам вариативной части основной образовательной программы по направлению подготовки 03.04.02 Физика, преподается в первом семестре первого года обучения в магистратуре.

Целями освоения дисциплины являются:

- ознакомление студентов с уровнем развития современной полупроводниковой технологией, используемыми методами и подходами, с основными проблемами и задачами, стоящими на пути дальнейшего развития полупроводниковой микро и наноэлектроники;
- формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-4 Способен принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в инженерно-конструкторской, инженерно-технологической, инновационной и проектной деятельности	<i>З1 (ПК-4)</i> Знать основные материалы, используемые в современной технологии, их достоинства и недостатки; физические основы методов, используемых в полупроводниковой технологии. <i>У1 (ПК-4)</i> Уметь применять полученные знания для решения практических задач в своей научно-исследовательской работе. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам полупроводниковой технологии. <i>В1 (ПК-4)</i> Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часов занятия лекционного типа, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Тема 1. Основные тенденции и проблемы развития электроники	12	6			6	6
Тема 2. Основные материалы современной полупроводниковой микро и наноэлектроники	14	6			6	8
Тема 3. Основные этапы формирования микросхем	14	6			6	8
Тема 4. Использование SiGe гетероструктур в современной микро- и наноэлектронике	14	6			6	8
Тема 5. Новые материалы полупроводниковой микроэлектроники	17	8			8	9
в т.ч. текущий контроль			1			
Промежуточная аттестация – зачёт					1	39

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных

достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних контрольных работ и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, проводимых в Институте физике микроструктур Российской академии наук.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является зачет, в ходе которого оценивается уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к зачету по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

Типовые задачи, предлагаемые студентам в качестве домашних контрольных работ:

Задача 1.1

Рассчитать распределение бора в кремнии при его введении из неограниченного диффузионного источника при температуре 1000 С в течении 1 часа.

Задача 1.2

Оценить критическую толщину псевдоморфного роста пленки SiGe с долей Ge 50% на подложке Si(001).

Задача 1.3

Рассчитать распределение фосфора при введении его в кремний с помощью ионной имплантации с энергией 100 кэВ и дозой 10^{14} см^{-2} .

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-4: Способен принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в инженерно-конструкторской, инженерно-технологической, инновационной и проектной деятельности

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«незачет»		«зачет»				
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания.</u> Знать новейшие достижения физики твердотельного магнетизма и современные проблемы физики твердотельного магнетизма	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, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u> Уметь использовать новейшие достижения современной физики твердотельного магнетизма в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе	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 и ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми и ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	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, выполнены все задания в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u> Владеть передовыми современными методами решения практических задач твердотельного магнетизма	Отсутствие владения материалом. 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 некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми 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 оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть зачета заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть экзамена предусматривает решение задач по различным разделам курса.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на допол-

	<p>нительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>
Плохо	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.</p>

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют

поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

1. Основные материалы современной полупроводниковой микро и наноэлектроники. Получение монокристаллических слитков кремния методом безтигельной зонной плавки и методом Чохральского.
2. Подготовка полупроводниковых пластин. Кинетика жидкостного травления полупроводников. Основные параметры пластин.
3. Методы получения диэлектрических пленок. Термическое окисление. Кинетика термического окисления кремния. Осаждение диэлектрических пленок из газовой фазы.
4. Методы формирования топологии микросхем. Оптическая, электронно-лучевая и рентгеновская литографии. Достоинства и ограничения различных литографических методик.
5. Методы травления в современных полупроводниковых технологиях. Достоинства и недостатки различных методов.
6. Диффузионное легирование полупроводников. Профили распределения легирующей примеси. Методы проведения диффузии. Основные примеси, используемые для легирования Si.
7. Маскирующие свойства диэлектрических слоев. Ионное легирование полупроводников. Ядерная и электронная тормозные способности. Распределение примеси при ионной имплантации. Радиационные дефекты.
8. Основные представления о методе молекулярно-пучковой эпитаксии. Вакуумные условия, необходимые для проведения МПЭ.
9. Механизмы эпитаксиального роста. Основные процессы, происходящие на ростовой поверхности при эпитаксии.
10. Эпитаксия из газовых и металлоорганических соединений. Методы контроля параметров тонких пленок при эпитаксии.
11. Особенности эпитаксии гетероструктур. Пластическая и упругая релаксация упругих напряжений. Критическая толщина. Получение буферных слоев. Процессы самоорганизации.
12. Использование SiGe гетероструктур в современной микроэлектронике. Гетероструктурные биполярные транзисторы.
13. Увеличение подвижности носителей заряда в Si/SiGe гетероструктурах. Проблемы роста напряженных Si/Ge гетероструктур.
14. Новые материалы в полупроводниковых технологиях: их достоинства, основные проблемы, связанные с их использованием и пути их решения.
15. Тенденции и проблемы развития современной микро и наноэлектроники.

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности компетенции ПК-4: способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта:

Задача 1

Рассчитать распределение бора в кремнии при его введении из неограниченного диффузионного источника при температуре 1000 С в течении 1 часа.

Задача 2

Оценить критическую толщину псевдоморфного роста пленки SiGe с долей Ge 50% на подложке Si(001).

Задача 3

Рассчитать распределение фосфора при введении его в кремний с помощью ионной имплантации с энергией 100 кэВ и дозой 10^{14} см^{-2} .

Задача 4

Оценить ток утечки в кремниевом МОП транзисторе с подзатворным диэлектриком из SiO₂ толщиной в 1 нм при напряжении на затворе 2 вольта.

Задача 5

Определить увеличение коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером для кремниевого биполярного транзистора при замене базы из слоя кремния на базу из слоя SiGe с долей Ge 30% с тем же уровнем легирования.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Основы полупроводниковой технологии»

а) основная литература:

- 1) *Готра З. Ю.* Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Радио и связь 1991. 528 с.
- 2) *Малышева И.А.* Технология производства интегральных микросхем, Радио и связь 1991. 344с
- 3) Арсенид галлия. Получения, свойства и применение, под ред. *Ф.П.Кесаманлы и Д.Н.Наследова*, Наука, 1973, 472с.
- 4) Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Под редакцией *Л.Ченга и К.Плога*, «Мир», 1989, 584с.
- 5) Технология тонких пленок, Справочник под редакцией *Л.Майссела и Р.Гленга*, «Советское радио», 1977, 664с.
- 6) Физико-технологические основы электроники, *Барыбин А.А., Сидоров В.Г.*, Издательство «Лань», 2001, 272с.

б) дополнительная литература:

- 1) Технология СБИС / Под ред. *Зи С. М.* - М.: Мир, 1986. 1, 2 т.
- 2) *Аваев Н. А., Наумов Ю. Е.* Элементы сверхбольших интегральных схем. - М.: Радио и связь, 1986. - 168 с.: ил.
- 3) *Тилл У., Лаксон Дж.* Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление - М.: Мир, 1985. 504 с.
- 4) *Броудай И., Мерей Дж.* Физические основы микротехнологии. - М.: Мир, 1985. 496 с.
- 5) *Таури Я.* Основы технологии СБИС. - М.: Радио и связь. 1985. 480 с.
- 6) *Маллер Р., Кейминс Т.* Элементы интегральных схем. - М.: 1989. 630 с.
- 7) Проектирование СБИС: Пер. с япон./Ватанабэ М., Асада К., Кани К., Оцуки Т. - М.: Мир, 1988. 304 с., ил.
- 8) *Зи С. М.* Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ./Под ред. А. Ф. Трутко. - М.: Энергия, 1973. - 655 с.
- 9) *Алексеев А. Г., Шагурин И. И.* Микросхемотехника. - М.: Радио и связь, 1982. - 414 с.
- 10) Введение в фотолитографию / Под ред. *Лаврищева В. П.* - М.: Энергия, 1977. 400 с.
- 11) *Курносков А. И., Юдин В. В.* Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высш. шк., 1979. 272 с.
- 12) Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Под ред. *Луфт Б. Д.* - М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
- 13) Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов / Под ред. *Дж. Р. Брюэра.* М.: Радио и связь. 1984. 336 с.
- 14) *S.C. Jain and M. Willander* Silicon-Germanium strained layers and heterostructures. – Semiconductors and Semimetals V.74, Elsevier, 2003, 308 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) Учебник по курсу «Технология СБИС»,
http://media.karelia.ru/~kfft/sbis_1/sbis/mainfile.htm
- 2) International Technology Roadmap for Semiconductors - <http://public.itrs.net/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

_____ / Новиков А.В. /

Рецензент(ы):

Зав. межфакультетской базовой кафедрой
«Физика наноструктур и нанoeлектроника»,
д. ф.-м. н., профессор,
чл.-корр. РАН

_____ / Красильник З.Ф. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ от «___» _____ 202_ года,
протокол № б/н.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /