

**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
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ**

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
2	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 «Физические основы нанотехнологии» – дать студентам базовые знания по основным разделам нанотехнологии полупроводников: методы и подходы, обеспечивающие создание материалов (структур), содержащие элементы с размерами нанометрового диапазона (1-100 нм), приводящими к принципиально новым свойствам и характеристикам, методы формирования наноструктур на поверхности полупроводниковых кристаллов в рамках развития технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом, химическом и плазменном осаждении материала, микролитографии, анизотропном селективном травлении.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

1. Овладение физическими основами, являющимися основами нанотехнологий в полупроводниках.
2. Изучение круга явлений, используемых для анализа структуры и состава объемных материалов, тонких пленок и многослойных структур (в том числе наноструктур) на основе нанотехнологий, используемых для создания новых материалов и приборов.
3. Ознакомление с физическими принципами работы приборов, основанных на нанотехнологиях 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 на основе нанотехнологии, понимать принципы действия, функциональные возможности систем и установок (установки молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, ионного и плазменного травления, термического и плазменного отжига, литографии) обеспечивающих формирование полупроводниковых наноструктур; базовые разделы физики конденсированного состояния, физики полупроводников и квантовых явлений в полупроводниках: основные понятия, законы и теории; основы микроскопического описания механизмов электронных, оптических и спиновых явлений в полупроводниковых наноструктурах, основы технологии получения наноструктур.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах с использованием современной аппаратуры; применять результаты исследования полупроводниковых материалов и структур с использованием нанотехнологии в инновационной деятельности. Владеть основными понятиями нанотехнологий, основными физическими явлениями, лежащими в основе процессов получения наноструктур; информацией об основных достоинствах и недостатках методов осаждения материалов, методов микролитографий, методов травления материалов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Физические основы нанотехнологий» реализуется в весеннем 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 «Физические основы нанотехнологий» магистранты должны обладать предварительными знаниями основ электродинамики, квантовой механики, статистической физики в объеме бакалавриата физического факультета НГУ. В свою очередь, учебный курс «Физические основы нанотехнологий» 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 методов нанотехнологий для создания материалов и приборов микро- и нанoeлектроники, нанофотоники.

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: 2 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			2
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. Фронт нанотехнологических исследований: естественные границы развития существующей микроэлектроники; создание объектов по принципам «сверху-вниз» и «снизу-вверх» (2 часа).

Размерные зависимости свойств материалов. Особенности термодинамических свойств наносред. Изменение фазовых равновесий в наноразмерных системах. Изменение температуры плавления в наноматериалах. Зависимость периода кристаллической решетки от размера материала. Поверхность, границы, морфология наноматериалов.

Раздел 2. Эпитаксия, нанесение металлов и диэлектриков. Ионная имплантация. (2 часа)

Методы молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Получение дельта-легированных слоев, латеральных сверхрешеток. Физические причины размытия границ раздела слоев и примесных профилей. Предельные возможности создания атомарно-гладких гетерограниц и сверх резких примесных профилей при эпитаксии. Получение структур с квантовыми нитями и квантовыми точками. Спонтанное упорядочение полупроводниковых наноструктур (самоорганизация). Трехмерные массивы когерентно напряженных островков. Нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом распылении. Стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы.

Раздел 3. Микролитография (2 часа).

Позитивные и негативные резисты. Фоторезисты: фотохимические свойства, фоточувствительность, растворимость, разрешающая способность. Радиационные резисты: рентгеновские, ионные, электронные. Нанесение резистных пленок: центрифугирование, способ Ленгмюра - Блоджет, осаждение из газовой фазы

Раздел 4. Оптическая литография (2 часа).

Элементы дифракционной теории формирования изображений; разрешение, практическое разрешение; экспонирование фоторезистов; контактная печать и печать с зазором, проекционная печать, совмещение, фотошаблоны, сенситометрия. Внутренний и внешний эффекты близости. Перспективы развития оптической литографии.

Раздел 5. Электронная литография (2 часа). Рассеяние пучка электронов при экспонировании резистов, коэффициенты прохождения пучка электронов сквозь тонкую пленку и отражения от

мишени; распределение плотности энергии, выделенной электронами в слое резиста; эффект близости, методы коррекции эффекта близости; передаточная функция трафаретных масок.

Раздел 6. Рентгеновская литография (2 часа).

Элементы рентгеновской оптики; источники излучения; свойства синхротронного излучения; рентгено-литографические системы теневого переноса изображения с зазором; системы совмещения, контраст теневых масок, рентгеновские резисты, разрешающая способность.

Раздел 7 Ионно-лучевая литография (2 часа)

Физические процессы ионно-лучевой литографии; источники: жидкометаллические, плазменные; экспонирование резистов ионными пучками; проекционные ионно-лучевые системы. Травление под действием ультрафиолетового излучения. Формирование наноструктур с помощью сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Раздел 8. Анизотропное селективное травление (2 часа).

Ионно-лучевое травление и реактивное ионно-лучевое травление. Физико-химические основы, ионные источники, применение. Физика ионно-лучевого распыления (травления), зависимость коэффициента распыления от угла падения пучка, переосаждение материала; области применения, оборудование. Чистые комнаты. их классификация

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Нарисовать качественно схемы устройств, обеспечивающих повышение разрешения оптической литографии: смещение фазы, иммерсионная литография. Проблемы иммерсионной литографии. (1 час)

Занятие 2. Определить длину свободного пробега молекулярного пучка из эффузионной ячейки в условиях сверхвысокого вакуума (решение задач). (3 часа).

Занятие 3. Контрольная работа. (2 час)

Занятие 4. Внутренний и внешний эффекты близости. Перспективы развития оптической литографии. (3 часа).

Занятие 5. В чем заключается физический механизм управления скоростью травления при реактивном ионном травлении. (3 часа).

Занятие 6. Свойства синхротронного излучения; рентгено-литографические системы теневого переноса изображения с зазором; системы совмещения, контраст теневых масок, рентгеновские резисты, разрешающая способность. Оценить предел разрешения при использовании в литографических процессах пучков синхротронного излучения. Реактивное ионно-лучевое травление: параметры процесса, селективность, анизотропность, скорость травления, оборудование. (2 часа).

Занятие 7. Контрольная работа (2 часа).

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	6
Подготовка к контрольным работам	6

Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Нанотехнологии : [Учеб. пособие для вузов по направлению "Нанотехнологии"] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс ; Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина = Introduction to Nanotechnology. М. : Техносфера, 2004. 327 с., ISBN 5-94836-021-0 (5 экз.)
2. Драгунов, Валерий Павлович. Основы наноэлектроники : [Учеб. пособие для вузов по спец. "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы"] / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2000. 331 с., ISBN 5-7782-0281-4 (10 экз.)
3. Кравченко, Александр Филиппович. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности / А.Ф. Кравченко, В.Н. Овсяк. Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. 447 с., ISBN 5-7615-0498-7 (5 экз.)
4. Методы получения и свойства нанообъектов : учебное пособие : [для студентов, обучающихся по специальности "Нанотехнологии"] / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев]. Москва : Флинта : Наука, 2009. 162., ISBN 978-5-9765-0326-7, ISBN 978-5-02-034741-0 (5 экз.)
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Под ред. Л.Ченга и К.Плога. М.: Мир, 1989., ISBN 5-03-000737-7 (2 экз.)
6. Плазменная технология в производстве СБИС. Под ред. Н.Айспруна и Д.Брауна. М.: Мир, 1987. (2 экз.)
7. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий : [учебное пособие для вузов] : в 2 т. / [под общ. ред. Ю.Н. Коркишко] Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2010-22 см(Нанотехнологии) ISBN 978-5-9963-0341-0 Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова Т1. Физико-химические основы технологии микроэлектроники 2010. 392 с. (2 экз.)
8. Валиев, Камил Ахметович. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К. А. Валиев, А. В. Раков. Москва : Радио и связь, 1984. 350 с. (2 экз.)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

9. А.В. Двуреченский, А.И. Якимов. Наногетероструктуры с квантовыми точками на основе кремния. 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. 76 - 102.

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 полупроводниковых наноструктур 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.

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 решении 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 на основе нанотехнологии, понимать принципы действия, функциональные возможности систем и установок (установки молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, ионного и плазменного травления, термического и плазменного отжига, литографии) обеспечивающих формирование полупроводниковых наноструктур; базовые разделы физики конденсированного состояния, физики полупроводников и квантовых явлений в полупроводниках: основные понятия, законы и теории; основы микроскопического описания механизмов электронных, оптических и спиновых явлений в полупроводниковых наноструктурах, основы технологии получения наноструктур.	Опрос в начале каждой лекции, проведение контрольных работ, экзамен.

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.	Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах с использованием современной аппаратуры; применять результаты исследования полупроводниковых материалов и структур с использованием нанотехнологии в инновационной деятельности. Владеть основными понятиями нанотехнологий, основными физическими явлениями, лежащими в основе процессов получения наноструктур; информацией об основных достоинствах и недостатках методов осаждения материалов, методов микролитографий, методов травления материалов.	Опрос в начале каждой лекции, проведение контрольных работ, экзамен.
---	--	---

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физические основы нанотехнологии».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Экзамен:</u> – 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>
<u>Экзамен:</u> – 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.	Удовлетворительно
Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	Неудовлетворительно

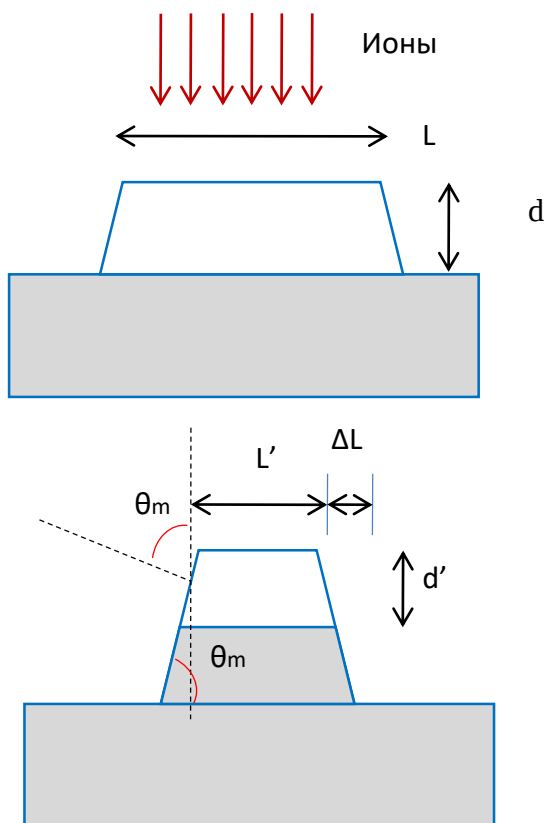
10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример контрольной работы

1. Нарисовать качественно схему источника экстремального ультрафиолета.
2. Показать, что разрешение при ионно-лучевом травлении описывается формулой:

$$\frac{L - L'}{2} = \Delta L = (d - d') \left[\frac{S(\theta_m) / (S(0) - 1)}{\operatorname{tg} \theta_m} \right]$$

где L и d длина и толщина маски в исходном состоянии и после ионного травления (L' , d'), S – коэффициент физического распыления материала маски при нормальном падении пучка ионов и при угле θ_m , соответствующем максимальному коэффициенту распыления маски (см. рис.).



Перечень задач для самостоятельного решения

1. Оценить силы тяжести для нанообъекта и сопоставить гравитационное и электромагнитное взаимодействие.
2. Оценить отношение силы тяжести и поверхностного натяжения для нано- и макрообъектов.
3. Нарисовать качественно структуру ближнего порядка молекул воды. Какой тип связи ответственен за ближний порядок в воде.
4. Оцените длину свободного пробега молекулярного пучка из эффузионной ячейки в условиях сверхвысокого вакуума.
5. Каков физический механизм улучшения адгезии при стимулированном плазмой осаждении пленок из газовой фазы. Движущие силы проявления этого механизма.
6. На поверхность полупроводника с ямками прямоугольной формы проводится осаждение пленки какого-либо материала. При каких физических параметрах системы осаждаемая пленка будет следовать рельефу поверхности по толщине.
7. Нарисовать качественно схемы устройств, обеспечивающих повышение разрешения оптической литографии: смещение фазы, иммерсионная литография. Проблемы иммерсионной литографии
8. Нарисовать качественно схему источника экстремального ультрафиолета.
9. Характерный размер пространственного распределения энергии в резисте при электронной литографии с обычно используемыми энергиями электронов (десятки кэВ) составляет порядка десяти микрон. Как в таких условиях достичь разрешения на уровне 10 нм?
10. В чем заключается природа внутреннего и внешнего эффектов близости при оптической литографии. Сравнить с ионной литографией.

11. Сравнить вклады скоростей физического и химического травления материала при реактивном ионном травлении.
12. В чем заключается физический механизм управления скоростью травления при реактивном ионном травлении.

Вопросы на экзамен

1. Оценить силы тяжести для нанообъекта и сопоставить гравитационное и электромагнитное взаимодействие.
2. Оценить отношение силы тяжести и поверхностного натяжения для нано- и макрообъектов.
3. Нарисовать качественно структуру ближнего порядка молекул воды. Какой тип связи ответственен за ближний порядок в воде.
4. Оцените длину свободного пробега молекулярного пучка из эффузионной ячейки в условиях сверхвысокого вакуума.
5. Каков физический механизм улучшения адгезии при стимулированном плазмой осаждении пленок из газовой фазы. Движущие силы проявления этого механизма.
6. На поверхность полупроводника с ямками прямоугольной формы проводится осаждение пленки какого-либо материала. При каких физических параметрах системы осаждаемая пленка будет следовать рельефу поверхности по толщине.
7. Нарисовать качественно схемы устройств, обеспечивающих повышение разрешения оптической литографии: смещение фазы, иммерсионная литография. Проблемы иммерсионной литографии.
8. Характерный размер пространственного распределения энергии в резисте при электронной литографии с обычно используемыми энергиями электронов (десятки кэВ) составляет порядка десяти микрон. Как в таких условиях достичь разрешения на уровне 10 нм?
9. В чем заключается природа внутреннего и внешнего эффектов близости при оптической литографии. Сравнить с ионной литографией.
10. Сравнить вклады скоростей физического и химического травления материала при реактивном ионном травлении.
11. В чем заключается физический механизм управления скоростью травления при реактивном ионном травлении.
12. Оценить предел разрешения при использовании в литографических процессах пучков синхротронного излучения.

Пример билета на экзамен

1. Ионно-лучевая литография: физические процессы ионно-лучевой литографии; источники: жидкометаллические, плазменные; экспонирование резистов ионными пучками.
2. Экспонирование фоторезистов; контактная печать и печать с зазором, проекционная печать, совмещение, фотошаблоны, сенситометрия.

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.