

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Физико-химические основы процессов наноструктурирования
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра наноэлектроники и квантовых компьютеров
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.Ф. Лукичев, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры наноэлектроники и квантовых компьютеров 29.05.2020

Аннотация

Курс "Физико-химические основы процессов наноструктурирования" предусматривает обеспечение понимания студентами бакалавриата физико-химических основ плазменных процессов в технологии микро- и нанoeлектроники.

Задачи курса:

- приобретение слушателями знаний о роли плазменных процессов в технологии приборов микро- и нанoeлектроники;
- приобретение студентами знаний об основных механизмах взаимодействия низкотемпературной плазмы с материалами микро- и нанoeлектроники;
- приобретение студентами знаний о принципах построения широкоапертурных источников плотной плазмы и плазменных установок.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Основные концепции
2. Травление материалов микроэлектроники в плазме высокочастотного разряда
3. Формирование глубоких тренчей в кремнии при реактивном ионном травлении
4. Модификация поверхности и приповерхностных слоев кремния в процессе травления в плазме
5. Методы мониторинга плазменных процессов и определения момента окончания травления
6. Широкоапертурные источники плотной низкотемпературной плазмы

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- обеспечить понимание студентами бакалавриата физико-химических основ плазменных процессов в технологии микро- и нанoeлектроники.

Задачи дисциплины

- приобретение слушателями знаний о роли плазменных процессов в технологии приборов микро- и нанoeлектроники;
- приобретение студентами знаний об основных механизмах взаимодействия низкотемпературной плазмы с материалами микро- и нанoeлектроники;
- приобретение студентами знаний о принципах построения широкоапертурных источников плотной плазмы и плазменных установок.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- физико-химические основы плазменных процессов наноструктурирования.

уметь:

- применять полученные знания в практической (эксплуатация установок) и исследовательской (постановка эксперимента, разработка нового процесса) деятельности.

владеть:

- теоретическими знаниями возможностей совершенствования и создания новых плазменных процессов.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Основные концепции	10			5
2	Травление материалов микроэлектроники в плазме высокочастотного разряда	10			5
3	Формирование глубоких тренчей в кремнии при реактивном ионном травлении	10			5
4	Модификация поверхности и приповерхностных слоев кремния в процессе травления в плазме	10			5
5	Методы мониторинга плазменных процессов и определения момента окончания травления	10			5
6	Широкоапертурные источники плотной низкотемпературной плазмы	10			5
Итого часов		60			30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Основные концепции

Основные концепции. Плазменное и реактивное ионное травление. Плазмостимулированное осаждение тонких пленок, плазменное окисление, плазменная очистка поверхности, стриппинг, ионная имплантация.

2. Травление материалов микроэлектроники в плазме высокочастотного разряда

Травление. Жидкостное травление. Газофазное травление низкого давления. Ионное травление. Плазменное травление. Основные характеристики: анизотропия, селективность, скорость травления.

3. Формирование глубоких тренчей в кремнии при реактивном ионном травлении

Плазма в микроэлектронном производстве. Плотность плазмы. Температуры электронов и ионов. Потенциал плазмы. Генерация частиц в плазме. Генерация ионов, электронов, атомов и радикалов. Ионизация и прилипание. Диссоциативная ионизация. Ионизация Пеннинга. Рекомбинация и отлипание. Диссоциативная рекомбинация. Рекомбинация на стенке. Распределение электронов по энергиям. Роль высокоэнергетичных электронов. Частота столкновений.

Семестр: 8 (Весенний)

4. Модификация поверхности и приповерхностных слоев кремния в процессе травления в плазме

Основные параметры процесса травления материалов микроэлектроники в плазме. Частота и мощность ВЧ источника. Плазмохимическое и реактивное ионное травление в диодном реакторе. Основные механизмы травления в плазме: физическое и химическое распыление, ионностимулированное травление, травление с участием ингибитора, образование летучих продуктов.

5. Методы мониторинга плазменных процессов и определения момента окончания травления

Механизмы травления кремния в атомарном фторе. Вероятность потерь атомов фтора на различных материалах. Константа скорости реакции. Влияние температуры. Селективность. Поток частиц на поверхность подложки при травлении. Энергетичные ионы. Тепловые молекулы, атомы и радикалы. Горячие нейтралы. Реакции перезарядки. Распределения ионов по энергиям и углам. Влияние ионов и горячих нейтралов на профиль травления.

6. Широкоапертурные источники плотной низкотемпературной плазмы

Формирование глубоких тренчей в кремнии при реактивном ионном травлении. Моделирование глубокого анизотропного травления кремния в многокомпонентной плазме. Апертурный и обратный апертурный эффекты. Предельные возможности процесса плазмохимического травления как инструмента наноструктурирования.

Модификация поверхности и приповерхностных слоев кремния в процессе травления. Методы исследования. Спектроскопия глубоких уровней для анализа радиационных повреждений приповерхностных слоев. Эффект деактивации атомов бора в процессе травления. Физика образования глубоких центров. Эффект зарядки подзатворного диэлектрика.

Методы мониторинга плазменных процессов. Квадрупольная масс-спектрометрия. Оптическая эмиссионная спектроскопия. Лазерная интерферометрия. Спектральная эллипсометрия. Зонд Ленгмюра. Метод СВЧ-резонатора.

Широкоапертурные источники плотной низкотемпературной плазмы. ЭЦР СВЧ- реакторы. Плазменные реакторы с геликонными волнами. Реакторы с индуктивным возбуждением плазмы. ИС и ТС источники.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. пособие/ ГОУВПО. - Иваново: Иван. Гос. хим.-технол. ун-т, 2006. - 260 с.
2. Орликовский А. А. Плазма в субмикронной технологии микроэлектроники. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV / под ред. В.Е.Фортова. - 2000. - сс. 370 - 386

Дополнительная литература

1. С.Н.Аверкин и др. В кн.: Труды ФТИАН. Гл. ред. К.А.Валиев. Т.18. под ред. А.А.Орликовского, 2005, с.121 - 137

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.ftian.ru>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

на лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

- 1) посещение всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: В.Ф. Лукичев, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физико-химические основы процессов наноструктурирования» обучающийся должен:

знать:

- физико-химические основы плазменных процессов наноструктурирования.

уметь:

- применять полученные знания в практической (эксплуатация установок) и исследовательской (постановка эксперимента, разработка нового процесса) деятельности.

владеть:

- теоретическими знаниями возможностей совершенствования и создания новых плазменных процессов.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Почему плазменные процессы заменили жидкостные в технологии микро- и нанoeлектроники?
2. Каковы механизмы образования частиц в низкотемпературной плазме?
3. Объясните разницу между РИТ и плазменным травлением.
4. Каковы основные механизмы травления в плазме?
5. В чем заключается апертурный эффект?
6. Почему аспектное отношение тренчей, получаемых травлением в плазме, ограничено?
7. В чем заключаются радиационные повреждения приповерхностных слоев полупроводника в плазменных процессах?
8. Какие методы мониторинга плазменных процессов вы знаете?
9. Какие вы знаете типы широкоапертурных источников плотной плазмы для микроэлектронной технологии?

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;

- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.