

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Физические основы технологии нанесения тонких пленок
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 15 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составили:

В.С. Столяров, д-р физ.-мат. наук

М.А. Тархов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
18.02.2025

Аннотация

Курс направлен на обучение студентов основам технологий изготовления тонких пленок с использованием современных методов и подходов. В рамках курса студенты изучат современные методы формирования пленок, их преимущества и ограничения. Особое внимание будет уделено анализу физических процессов, происходящих на различных этапах осаждения и роста пленок, а также особенностям оборудования, определяемым природой пленок и применяемыми методами их нанесения. Кроме того, будут рассмотрены процессы транспорта вещества от источника к поверхности роста, конденсации, зарождения и роста пленок.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Формирование у студентов представления о технологиях изготовления тонких пленок, включая изучение современных методов их формирования, анализ физических процессов, сопровождающих осаждение и рост пленок, а также особенностей оборудования, используемого для их нанесения. В рамках курса изучаются физические и химические процессы, протекающие на различных стадиях осаждения и роста пленок, с учетом особенностей оборудования, определяемых свойствами пленок и выбранными методами их нанесения. Рассматриваются технологии физического и химического осаждения, включая термическое и лазерное испарение, ионное и ионно-плазменное распыление, химическое осаждение из газовой фазы, а также процессы транспорта вещества от источника к поверхности роста, конденсации, зарождения и формирования пленок.

Задачи дисциплины

- расширение кругозора учащихся в области физики осаждения пленок, включая ознакомление с достижениями последнего десятилетия в этой области;
- обучение общим принципам физических и химических технологий осаждения, включая устройство технологического оборудования, управление свойствами технологического процесса осаждения, сравнительный анализ альтернативных технологий, организацию метрологического контроля;
- демонстрация тесной взаимосвязи фундаментальных основ химии и физики с конкретными задачами формирования тонких пленок.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- теоретические основы формирования тонких пленок;
- физико-химические основы процессов формирования тонких пленок;
- процессы транспорта вещества, конденсации, зарождения и формирования пленок;
- устройство технологического оборудования, применяемого для нанесения тонких пленок;
- принципы управления параметрами оборудования для достижения заданных свойств пленок;
- методы метрологического контроля параметров пленок и технологического процесса их осаждения.

уметь:

- управлять параметрами оборудования для достижения заданных свойств пленок;
- оценивать технологические риски;
- находить и использовать справочную информацию.

владеть:

- приемами проведения количественных оценок в связи с различными нанотехнологическими задачами.

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	Пленки и покрытия.	1			2
2	Материалы подложек, их роль в формировании тонких пленок	1		2	4
3	Механизмы формирования тонкопленочного покрытия	2		4	2
4	Технологии физического осаждения: испарение и распыление	9		6	5
5	Химическое осаждение из газовой фазы	2		3	2
Итого часов		15		15	15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Пленки и покрытия.

Термины "пленка" и "тонкая пленка". Эпитаксиальные покрытия. Примеры свойств и области применения тонких пленок. Этапы процесса осаждения пленок и их физико-химические особенности. Основные стадии разработки тонкопленочных приборов и устройств.

2. Материалы подложек, их роль в формировании тонких пленок

Методы подготовки поверхности: механическая, химическая, плазмохимическая и ионная обработка. Вакуумно-термическая и химико-термическая подготовка. Удаление естественных оксидов с кремниевых пластин, а также водородная и кислородная пассивация. Методы нагрева и охлаждения подложек, а также измерение температуры. Геометрия внеосевого осаждения.

3. Механизмы формирования тонкопленочного покрытия

Конденсация, образование зародышей и рост тонких пленок. Четыре стадии роста пленки. Влияние процесса зарождения пленок на их структуру. Рост монокристаллических пленок. Послойный, островковый и смешанный режимы роста. Гетероэпитаксия, дислокации несовместимости. Монокристаллические пленки на неориентированных и аморфных подложках, графоэпитаксия, ионно-стимулированный рост.

4. Технологии физического осаждения: испарение и распыление

Термическое испарение, ионное распыление, катодное распыление, магнетронное распыление, импульсно-лазерное осаждение.

5. Химическое осаждение из газовой фазы

Методы кристаллизации с участием химических реакций, атомно-слоевое осаждение, химическое осаждение из паровой фазы с использованием металлоорганических соединений, молекулярно-лучевая эпитаксия, эпитаксиальный рост.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

Научно-исследовательское оборудование центра перспективных методов мезофизики и нанотехнологий и ЦКП МФТИ.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в физику поверхности [Текст]/К. Оура [и др.] , -М., Наука, 2006
1. Л. А. Сейдман, Е. В. Берлин, Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением.
2. Fabrication engineering at the micro- and nanoscale / Stephen A. Campbell.— 3rd ed
3. Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications ISBN: 978-0-85404-465-8

Дополнительная литература

1. Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications-Led Growth of Functional Materials Online ISBN:9780470052129 |DOI:10.1002/0470052120
2. Технология СБИС : в 2 кн Могэб К., Фрейзер Д., Фичтнер У; под ред. С. Зи ; пер. с англ. В. Н. Лейкина ; под ред. Ю. Д. Чистякова [и др.]. - Москва : Мир, 1986.

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

Базы данных Web of Science и Scopus,
<https://studfile.net/>,
<https://www.isuct.ru/conf/plasma/index.htm>.

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

Стандартное оборудование для мультимедийных презентаций и проведения видеоконференций, компьютерное оборудование для поиска информации.
Библиотечный фонд МФТИ.
[Google.meet.com](https://google.meet.com)

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

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчики:

В.С. Столяров, д-р физ.-мат. наук

М.А. Тархов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

технологии	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физические основы технологии нанесения тонких пленок» обучающийся должен:

знать:

- теоретические основы формирования тонких пленок;
- физико-химические основы процессов формирования тонких пленок;
- процессы транспорта вещества, конденсации, зарождения и формирования пленок;
- устройство технологического оборудования, применяемого для нанесения тонких пленок;
- принципы управления параметрами оборудования для достижения заданных свойств пленок;
- методы метрологического контроля параметров пленок и технологического процесса их осаждения.

уметь:

- управлять параметрами оборудования для достижения заданных свойств пленок;
- оценивать технологические риски;
- находить и использовать справочную информацию.

владеть:

- приемами проведения количественных оценок в связи с различными нанотехнологическими задачами.

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

Полученные знания оцениваются по результатам решения задач, выданных студенту для самостоятельного решения и контрольных вопросов по содержанию курса.

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

1. Обосновать выбор технологии физического или химического осаждения.
2. Физическое осаждение тонких пленок: методы и их сравнение.
3. Роль материалов подложек в формировании тонкопленочных структур.
4. Химическое осаждение из газовой фазы и атомно-слоевое осаждение.
5. Механизмы формирования тонкопленочного покрытия и стадии роста пленок.
6. Что представляет собой такое пленка и тонкая пленка? Приведите примеры их свойств и областей применения.
7. В чем заключается процесс эпитаксиального покрытия?
8. Каковы основные этапы осаждения тонких пленок и их физико-химические особенности?
9. Какие методы подготовки поверхности подложек вы знаете? Опишите их различия.
10. Какие методы применяются для удаления естественных оксидов с кремниевых пластин?

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Какие существуют методы физического осаждения пленок? Охарактеризуйте хотя бы два из них.
2. Что такое атомно-слоевое осаждение, и в чем его преимущества?

Билет 2.

1. Какие факторы влияют на механизмы конденсации, образования зародышей и роста тонких пленок?
2. В чем различие между послойным, островковым и смешанным режимами роста тонких пленок?

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Дифференцированный зачет проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса и подготовленный в печатном виде отчет по практическим занятиям. При проведении зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.