

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»

УТВЕРЖДАЮ

Ректор МФТИ

_____ Н.Н. Кудрявцев

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных
работников высшей школы по направлению
«Планарные материалы (пленки и покрытия, интерфейсы, молекулярные
слои, гетероструктуры) и технологии их получения»
на базе учебного курса
«Напыление тонких плёнок»

Цель Изучение физических принципов технологии вакуумного напыления тонких плёнок различных материалов.

Категория слушателей специалисты

Срок обучения 24 часа

Форма обучения с частичным отрывом от работы

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с физическими принципами технологий и основными этапами напыления тонких пленок в вакууме.

Требования к уровню освоения учебного курса

Преподаватели должны:

- Знать:
 - область применения технологий напыления тонких плёнок;
 - физические основы технологий напыления тонких плёнок;
 - устройство установки напыления тонких плёнок;
 - базовые понятия молекулярно-кинетической теории газов.
- Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области технологий напыления тонких плёнок;

- включать приобретенные знания о технологии напыления тонких плёнок в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
- переносить полученные знания о технологии напыления тонких плёнок на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
 - о основах вакуумной техники;
 - о основных этапах напыления тонких плёнок;
 - о методах контроля параметров тонких плёнок и технологических режимов их нанесения;
 - об электронно-вакуумной гигиене.

Научные работники должны:

- 1.Знать:
 - область применения технологий напыления тонких плёнок;
 - физические основы технологий напыления тонких плёнок;
 - устройство установки напыления тонких плёнок;
 - базовые понятия молекулярно-кинетической теории газов;
 - основы вакуумной техники.
- 2.Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области технологий напыления тонких плёнок;
 - планирования и проведения исследований и экспериментов с использованием технологии напыления тонких плёнок;
 - генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием технологии напыления тонких плёнок;
 - переносить полученные знания о технологии напыления тонких плёнок на смежные предметные области и к использованию этих знаний для создания новых объектов техники и технологии и для инновационной деятельности;
- 3.Иметь представление:
 - о основных этапах напыления тонких плёнок;
 - о методах контроля параметров тонких плёнок и технологических режимов их нанесения;
 - об электронно-вакуумной гигиене.

Учебный курс «Напыление тонких плёнок» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Московском физико-техническом институте.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы технологии вакуумного напыления тонких плёнок, основы вакуумной техники, общее устройство вакуумных напылительных систем, электронно-лучевое напыление, напыление при помощи DC и RF магнетронов, а также способы измерения толщин пленок.

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

Лекция 1: Базовые понятия молекулярно-кинетической теории газов

Некоторые сведения из теории вероятностей. Статистика скоростей газовых молекул. Длина свободного пробега молекулы и степени вакуума. Течение газа.

Лекция 2: Основы вакуумной техники

Трубопроводы и их соединения. Вакуумные насосы и их основные характеристики. Вакуумные насосы. Форвакуумные насосы. Турбомолекулярные насосы. Приборы для измерения вакуума. Тепловые манометры (вакуумметры). Магнитные электроразрядные манометры.

Лекция 3: Устройство вакуумных напылительных систем

Вакуумная установка напыления VOC EDWARDS AUTO 500. Устройство и принцип работы вакуумной установки. Откачка. Система термического распыления. Система магнетронного напыления. Устройство магнетрона. Напуск газа. Измерение толщины и скорости нанесения тонких плёнок.

Лекция 4: Напыление пленок

Влияние вакуума на процесс нанесения пленок. Получение конфигураций тонкопленочных элементов. Нанесение пленок методом термического испарения. Испарители с электронно-лучевым нагревом. Нанесение пленок методом ионного испарения. Диодные системы ионного распыления. Магнетронные системы ионного распыления. Высокочастотный и реактивный метод ионного распыления

Лекция 5: Контроль параметров пленок и технологических режимов их нанесения

Измерение толщины пленок. Измерение электрического сопротивления пленок. Измерение адгезии пленок. Измерение скорости нанесения пленок.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении принципов физического распыления на основе установки VOC EDWARDS AUTO 500. В ходе работы слушатель знакомится:

- 1) с вакуумной системой установки для напыления,
 - 2) с системой напуска газов
 - 3) с системой электронно-лучевого распыления
 - 4) с системой магнетронного распыления
 - 5) с системой измерения толщины
- и обучается:
- 6) управлению контрольно измерительной системой напылительной установки
 - 7) получению вакуума и вакуумной гигиене
 - 8) напылению пленок посредством электронно-лучевого распыления
 - 9) напылению пленок посредством магнетронного распыления
 - 10) измерению толщин пленок различными способами

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу

«Напыление тонких пленок»

Лекция 1: Базовые понятия молекулярно-кинетической теории газов

1.1. $\Delta_i = x_i - \langle x \rangle$, x — случайная величина. Чему равно $\langle \Delta_i \rangle$?

- А) 1
 Б) $\langle x \rangle^2 - \langle x^2 \rangle$
 В) $\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$
 Г) 0

1.2. Каким законом выражается вероятность того, что молекула газа имеет проекцию скорости в интервале $[v_x, v_x + dv_x]$?

- А) Больцмана
 Б) Максвелла
 В) Гаусса
 Г) Ферми

1.3. Каким давлением характеризуется средний технический вакуум?

- А) $1 \text{ Торр} \leq P < 760 \text{ Торр}$
 Б) $10^{-3} \text{ Торр} \leq P < 1 \text{ Торр}$
 В) $10^{-6} \text{ Торр} \leq P < 10^{-3} \text{ Торр}$
 Г) $P < 10^{-6} \text{ Торр}$

1.4. Каким соотношением между длиной свободного пробега l и характерным размером сосуда d определяет вязкостное течение?

- А) $l/d \ll 1$
 Б) $l/d \gg 1$
 В) $l/d \approx 1$

1.5. Какой формулой определяется число Рейнольдса?

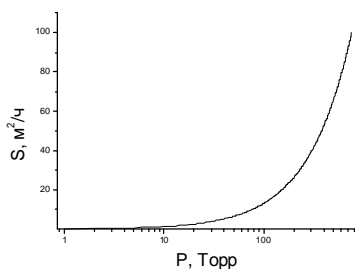
- А) $Re = \frac{hrd}{\nu}$
 Б) $Re = \nu rd$
 В) $Re = \frac{\nu rd}{h}$
 Г) $Re = \frac{1}{3} l \langle v \rangle$

Лекция 2: Основы вакуумной техники

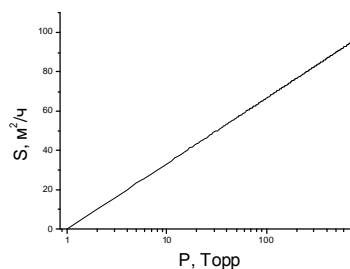
2.1. Какой формулой описывается производительность насоса?

- А) $\frac{RT}{M} G$
 Б) $-V \frac{d(\ln P)}{dt}$
 В) $\frac{\Delta V}{t}$
 Г) $\frac{pd^3 \langle v \rangle}{12l}$

2.2. Какой вид имеет зависимость быстроты действия насоса от впускного давления?



А)



Б)

частиц до подложки

В) Увеличение скорости напыления

Г) Придание подложке сферической формы

4.3. Из какого материала рекомендуют изготавливать маски-трафареты?

А) Нержавеющая сталь

Б) Олово

В) Свинец

Г) Пластик

4.4. Какой из металлов имеет наибольшую скорость распыления при электронно-лучевом методе напыления?

А) Титан

Б) Вольфрам

В) Молибден

Г) Алюминий

4.5. Какой толщины за одну минуту напылится пленка алюминия на плоскопараллельную подложку, отстоящую от испарителя площадью 1 см^2 на расстоянии 10 см ?

А) 100 \AA

Б) 16 \AA

В) 10 \AA

Г) 160 \AA

4.6. При каком давлении производится ионное распыление в диодной системе?

А) 760 Торр

Б) порядка 10^{-3} Торр

В) менее 10^{-6} Торр

Г) порядка 10^{-5} Торр

4.7. Что не относится к преимуществам напыления пленок методом ионного распыления?

А) Большая площадь распыляемой мишени

Б) Мишень представляет собой источник длительного действия частиц наносимого материала

В) Поток осаждаемых на поверхность

Г) Большая энергия конденсирующихся атомов

подложки частиц является хаотическим

4.8. Какой способ применяется для распыления диэлектрических материалов?

А) Радиочастотный магнетрон

Б) Диодная конструкция

В) Магнетрон

4.9. Какой способ применяется для реактивного распыления?

А) Термический

Б) Диодная конструкция

В) Магнетрон

Г) Радиочастотный магнетрон

4.9. Недостаток реактивного распыления?

А) Неравномерность наносимой пленки

Б) Внутренние дефекты пленки

В) Низкая скорость распыления

Г) Шероховатость полученной пленки

4.10. В какой области магнетронного распылителя концентрация плазмы наибольшая?

А) По всей поверхности катода

Б) Возле анода

В) Во всем промежутке между подложкой и катодом

Г) В области максимальной концентрации электрического и магнитного поля

Лекция 5: Контроль параметров пленок

5.1. При каком свете измерение толщины пленки методом многолучевой интерферометрии будет точнее?

А) Красный

Б) Зеленый

В) Синий

5.2. Для чего охлаждают кварцевый датчик?

- А) Для увеличения адгезии пленки
Б) Для исключения погрешности связанной с резонансной частотой кварцевого элемента
В) Для повышения равномерности пленки

5.3. Какой толщиной будет пленка, если при использовании кварцевого датчика изменение резонансной частоты составило 9,2 кГц? Плотность пленки $2,7 \text{ г/м}^3$, масса и резонансная частота кварцевого элемента до нанесения пленки 2 г и 6 МГц соответственно, диаметр кварцевого элемента 6 мм.

- А) 100 нм
Б) 1 мкм
В) 10 мкм
Г) 100 мкм

5.4. Какой из факторов не влияет на величину адгезии пленки к подложке?

- А) Толщина полученной пленки
Б) Материал пленки
В) Скорость напыления
Г) Температура подложки

Контрольные вопросы для проверки понимания материала в количестве 30 вопросов

1. Что такое вакуум?
2. Распределение молекул газа по абсолютным значениям скоростей?
3. Каким давлением и средней длиной пробега молекул газа характеризуются низкий, средний, высокий и сверх высокий вакуум?
4. Какие существуют основные режимы течения газа по трубопроводу?
5. Что характеризуется числом Рейнольдса?
6. Каковы основные параметры вакуумных насосов?
7. Каковы принципы работы механического спирального насоса?
8. Каковы принципы работы турбомолекулярного насоса?
9. Какие вакуумметры применяют для измерения низкого вакуума? Каковы принципы работы вакуумметра «PIRANI»?
10. Какие вакуумметры применяют для измерения низкого вакуума? Каковы принципы работы магнитного электроразрядного вакуумметра?
11. Каков принцип действия установок для нанесения тонких пленок?
12. Как происходит рост тонкой пленки на подложке?
13. Как получают рисунки тонкопленочных слоев ИМС?
14. Каковы методы повышения равномерности распределения толщины пленки по подложке?
15. Что такое термоэмиссия?
16. Как происходит ускорение электронов?
17. Каковы устройства и принцип действия электронно-лучевого испарителя?
18. Как происходит ионизация и возникает тлеющий разряд?

19. Каков механизм ионного распыления веществ?
20. Каков принцип действия диодной распылительной системы?
21. Каковы особенности магнетронного распыления?
22. Как устроен и работает кольцевой планарный магнетрон?
23. Чем отличается овалльно-протяженный магнетрон от кольцевого?
24. Какими методами наносят диэлектрические пленки?
25. Как измеряют толщину наносимых пленок микровзвешиванием?
26. Каков принцип измерения толщины пленок методом лучевой интерферометрии?
28. Каковы особенности измерения сопротивления пленок с помощью резистивного датчика?
29. Как измеряют адгезию пленок?
30. На чем основано измерение скорости нанесения пленок с помощью кварцевого датчика?

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы контрольных рефератов по курсу
«Напыление тонких плёнок»

1. История развития вакуумных насосов.
2. Методы измерения давления.
3. Современные методы напыления тонких пленок.
4. Газовый разряд. Магнетрон.
5. Обзор современных напылительных установок и их основных параметров.
6. Обзор статей по исследованию тонких пленок.
7. Обзор статей по методам напыления диэлектрических пленок.
8. Сравнение и анализ различных методов напыления тонких пленок.
9. Современные методы исследования параметров тонких пленок.
10. Применение тонкопленочных технологий.

Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Напыление тонких плёнок»	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка) Реферат
1.	Лекция 1: Базовые понятия молекулярно-кинетической теории газов		2 ч.	0,5 ч.		
2.	Лекция 2: Основы вакуумной техники		2 ч.	0,25 ч.		
3.	Лекция 3: Устройство вакуумных напылительных систем		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4: Напыление пленок		2 ч.	0,5 ч.		
5.	Лекция 5: Контроль параметров пленок и технологических режимов их нанесения		2 ч.	0,25 ч.		
	Итоговый контроль			Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

Список литературы (основной и дополнительной), а также других видов учебно-методологических материалов и пособий, необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных дисков и др.).

Список литературы и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 4.

1. *Хасса Г., Туна Р.Э.* Физика тонких пленок. – М.: Мир, 1967
2. *Шешин Е.П.* Вакуумные технологии: Учебное пособие. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009
3. *Минайчев В.Е.* Нанесение пленок в вакууме. – М.: Высшая школа, 1989

4. *Берлин Е.В., Двинин С.А., Сейдман Л.А.* Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. – М.: Техносфера, 2007

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части
учебного курса на сайте www.nanoobr.ru**