

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

«Атомно-слоевое осаждение тонких пленок»

Цель: изучение физических принципов технологии атомно-слоевого осаждения тонких плёнок

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с физическими основами технологии атомно-слоевого осаждения (АСО) тонких плёнок. На примере роста пленок диоксида титана демонстрируются возможности метода АСО для прецизионного управления толщиной, химического состава и структурой получаемых пленок. На примере осаждения оксида алюминия из триметилалюминия (ТМА) и воды проводится лабораторный практикум по развитию практических навыков по работе с современным технологическим оборудованием АСО тонких пленок и покрытий.

Требования к уровню освоения учебного курса

Преподаватели должны:

- Знать:
 - область применения технологии атомно-слоевого осаждения (АСО);
 - физико-химические основы метода АСО;
 - устройство установки АСО тонких плёнок.
- Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области технологий АСО тонких плёнок;
 - включать приобретенные знания о технологии АСО тонких плёнок в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
 - переносить полученных знания о технологии АСО тонких плёнок на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
 - о теоретических моделях АСО;
 - о принципе самоконтролируемости процесса АСО;
 - о возможных механизмах хемосорбционных поверхностных реакций: обмене лигандами, диссоциации, ассоциации;
 - об уравнении баланса на основе закона сохранения массы для процесса АСО;
 - о методах анализа результатов АСО тонких плёнок.

Научные работники должны:

- 1.Знать:
 - область применения технологии АСО;
 - физико-химические основы метода атомно-слоевого осаждения;
 - устройство установки АСО тонких плёнок;
 - теоретические модели АСО и область их применимости;
 - уравнение баланса на основе закона сохранения массы для процесса АСО.

- 2. Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области технологий АСО тонких плёнок;
 - планирования и проведения исследований и экспериментов с использованием технологии АСО тонких плёнок;
 - генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием технологии АСО;
 - переносить полученные знания о технологии АСО 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 принципе самоконтролируемости процесса АСО;
 - о возможных механизмах хемосорбционных поверхностных реакций: обмене лигандами, диссоциации, ассоциации;
 - о методах анализа результатов АСО тонких плёнок.

Учебный курс «Атомно-слоевое осаждение тонких пленок» 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 метода атомно-слоевого осаждения (АСО), получившего в последнее время широкое распространение как новый технологический метод, обеспечивающий рост тонких пленок высокого качества на больших площадях подложек. Теоретическая часть учебного курса состоит из четырех лекций:

Лекция 1: Основные закономерности процесса атомно слоевого осаждения

Атомно-слоевое осаждение - новая технология получения тонких пленок высокого качества. Основные понятия. Реакционный цикл. Принцип самоконтролируемости процесса атомно-слоевого осаждения. Физико-химические основы метода атомно-слоевого осаждения. Возможные механизмы хемосорбционных поверхностных реакций: обмен лигандами, диссоциация, ассоциация. Причины возникновения насыщения.

Лекция 2: Теоретические модели атомно-слоевого осаждения

Модель плотной упаковки исходных молекул. Модель с учетом длин и углов связей молекул реагентов. Модель по числу и размерам лигандов (модель плотной упаковки лигандов). Уравнение баланса на основе закона сохранения массы для процесса атомно-слоевого осаждения. Расчет максимально возможной плотной упаковки лигандов на поверхности подложки. Прирост слоя за один реакционный цикл.

Лекция 3: Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида титана

Реагенты для атомно-слоевого осаждения диоксида титана. Параметры процесса. Определение прироста толщины пленки за реакционный цикл. Элементный и химический состав формируемых пленок. Фурье-ИК спектроскопический и рентгено- дифракционный анализ структуры диоксида титана, формируемого методом атомно-слоевого осаждения. Расчет прироста толщины диоксида титана за один экспериментальный цикл.

Лекция 4: Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида алюминия

Установка атомно-слоевого осаждения тонких пленок: основные узлы и принцип работы. Применение модели плотной упаковки лигандов для расчета прироста толщины оксида алюминия за один экспериментальный цикл.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении принципов функционирования установки атомно-слоевого осаждения АСО SUNALE™ R-150 (Финляндия). Основные задания на лабораторный практикум:

- Разработать и заполнить в управляющем компьютере установки атомно-слоевого осаждения (АСО) Sunale R-150 технологический маршрут осаждения оксида алюминия;
- Провести эксперимент по АСО оксида алюминия (Al_2O_3) из триметилалюминия (ТМА, $Al(CH_3)_3$) и воды при температуре подложки $300\text{ }^\circ\text{C}$, количество циклов-500;
- по результатам определения толщины сформированной пленки оксида алюминия определить прирост толщины слоя за цикл.

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

«Атомно-слоевое осаждение тонких пленок»

Лекция 1: Основные закономерности процесса атомно-слоевого осаждения

- Отличительной чертой АСО является?

А) Высокая скорость роста	Б) Работа в широком диапазоне температур
В) Импульсная попеременная подача	Г) Получение большого числа материалов
- В результате какого механизма образуются летучие продукты?

А) Обмен лигандами	Б) Диссоциация
В) Ассоциация	Г) Во всех
- Возникновение насыщения зависит?

А) От размеров лигандов	Б) От количества лигандов
В) От размеров и от количества лигандов	Г) не зависит от размеров и количества лигандов
- От чего зависит преобладание того или иного механизма?

А) От концентрации ОН- групп	Б) От размеров лигандов
В) От количества подаваемого реагента	Г) От всего вышеперечисленного

Лекция 2: Теоретические модели атомно-слоевого осаждения

- Какая из моделей учитывает размеры исходных молекул?

А) Модель 1 (Морозов и Ритала)	Б) Модель 2 (Юлиламми)
В) Модель 3 (Сиимон, Аарик и Пуурумен)	Г) Все вышеперечисленные
- Какое значение принимает θ на практике?

А) >1	Б) <1
В) 1	Г) 0
- Чему равно количество освобожденных лигандов в молекуле ML_n в случае, если

реакция идет по механизму диссоциации?

- A) 1
- B) n

- Б) 0
- Г) Количеству реагирующих ОН - групп на поверхности

4. Какая величина связывает между собой количество ОН - групп перед началом реакции и количество ОН- групп поверхности, реагирующих с ML_n - реагентом?

- A) θ
- B) f

- Б) C_A
- Г) ΔC_A

5. Каким законом описывается хемосорбция?

- A) Законом сохранения импульса
- B) Законом сохранения масс

- Б) Законом сохранения энергии
- Г) Законом сохранения заряда

Лекция 3: Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида титана

1. Каким методом исследовали показатель преломления полученных пленок?

- A) ОРПИ
- B) АСМ

- Б) РФС
- Г) Эллипсометрия

2. Какова степень окисления титана в диоксиде титана?

- A) +2
- B) +4

- Б) -2
- Г) -4

3. Возможно ли получение аморфного диоксида титана методом АСО?

- A) Нет, TiO_2 всегда кристаллический
- B) Да, если количество циклов >400

- Б) Да, если количество циклов < 400
- Г) Всегда

4. Какая кристаллическая модификация наблюдается при осаждении диоксида титана методом АСО в указанных условиях процесса?

- A) Анатаз
- B) Брукит

- Б) Рутил
- Г) Все вышеперечисленное

5. С ростом толщины пленки размеры кристаллитов?

- A) Увеличиваются
- B) Остаются неизменными

- Б) Уменьшаются
- Г) В зависимости от температуры

6. Какую модель мы использовали для расчета Δh ?

- A) Учитывающую размеры исходных молекул
- B) Учитывающую размеры и число лигандов

- Б) Учитывающую размеры и геометрию хемосорбированных молекул
- Г) Никакую

7. Число лигандов в $Ti(OC_2H_5)_4$ равно?

А) 1

В) 3

Б) 2

Г) 4

Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 18 вопросов

- 1) Расскажите об особенностях АСО.
- 2) Что является причиной высокой однородности и конформности пленок, получаемых методом АСО?
- 3) Каковы основные механизмы хемосорбции ?
- 4) Что может являться причинами насыщения в хемосорбционных процессах?
- 5) Каковы преимущества метода АСО в сравнении с другими методами осаждения?
- 6) Назовите основные этапы реакционного цикла АСО?
- 7) Перечислите основные теоретические модели АСО?
- 8) Каков основной недостаток модели, описывающей процесс АСО на основе плотной упаковки исходных молекул реагентов?
- 9) Напишите на основе закона сохранения массы уравнение баланса для процесса АСО?
- 10) Как рассчитывается максимально возможная концентрация хемисорбированных лигандов?
- 11) Какими методами может быть исследована кристаллическая структура тонких пленок?
- 12) Какими методами может быть исследован химический состав тонких пленок?
- 13) Какая теоретическая модель процесса АСО была использована для расчета прироста за цикл в данной работе?
- 14) Каковы основные узлы установки АСО тонких пленок?
- 15) Напишите реакцию образования Al_2O_3 из ТМА и воды?
- 16) Если процесс определяется самонасыщением, то какова будет зависимость Δh от длительности импульса подачи реагента ?
- 17) Как влияет температура подложки на процесс АСО из ТМА и воды?
- 18) Какими по-вашему свойствами должны обладать исходные реагенты для других процессов АСО?

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 **«Атомно-слоевое осаждение тонких пленок»**

1. Применение атомно-слоевого осаждения в технологии современной микроэлектроники
2. Сравнение метода атомно-слоевого осаждения с другими методами получения тонких пленок.
3. Реализация реакций в хемисорбированных слоях – основа высокого качества тонких пленок, формируемых методом атомно-слоевого осаждения.
4. Основные хемосорбционные процессы, протекающие при атомно-слоевом осаждении тонких пленок.
5. Теоретические модели процесса атомно-слоевого осаждения тонких пленок.
6. Структура и свойства тонких пленок диоксида титана, формируемого атомно-слоевым осаждением
7. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида алюминия.
8. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью.
9. Оборудование для атомно-слоевого осаждения тонких пленок.
10. Обзор наиболее применяемых исходных реагентов в процессах атомно-слоевого осаждения. Основные требования к исходным реагентам.

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	
	<u>«Атомно-слоевое осаждение тонких пленок»</u>	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1: Основные закономерности процесса атомно-слоевого осаждения		2,5 ч.	0,5 ч.		Реферат
2.	Лекция 2: Теоретические модели атомно-слоевого осаждения		2,5 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3: Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида титана		2,5 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4: Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида алюминия		2,5 ч.	0,5 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 – 8.

- 1 А.П.Алехин, Физико-химические основы субмикронной технологии: Учебное пособие. -М.: МФТИ, 2007, с.45.
- 2 R.L.Puurunen, J.Appl.Phys, 2005,97,p. 121301.
- 3 F.A. Cotton, G.Wilkinson, Basic Inorganic Chemistry, John Wiley&Sons, New York 1976,p.88.
- 4 H. Knözinger, P.Ratnasamy, Catal.Rev.-Sci.Eng. 1978,17,31.
5. Ritala M., Leskela M., Rauhala E.// Chem. Mater. 1994. V.6. P.556.
6. Puurunen R.L.// Chem. Vap. Deposition. 2003. V.9. №5. P.249.
7. Puurunen R.L.// Chem. Vap. Deposition. 2003. V.9. №6. P.327.
8. Lusvardi V.S., Barteau M.A., Dolinger W.R., Farneth W.E.// J. Phys. Chem. 1996. V.100. P.18183

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

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