

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных
работников высшей школы по направлению
«Нанотехнологии»
на базе учебного курса

«Лазерная технология синтеза тонких наноразмерных пленок»

Цель: изучение физических принципов и применений лазерной нанотехнологии

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 учебного курса является изучение физических основ современной лазерной технологии синтеза тонких пленок. Рассматриваются физические процессы взаимодействия лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими непрозрачными средами, устройство лазерной напылительной установки, методы лазерного напыления полупроводниковых материалов и высокотемпературных сверхпроводников.

Требования к уровню освоения учебного курса

Преподаватели должны:

- Знать:
 - область применения лазерной нанотехнологии;
 - физические основы лазерной физики и физики твердого тела;
 - экспериментальные и технологические методы современной лазерной нанотехнологии.
- Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области лазерной физики и физики твердого тела;
 - включать приобретенные знания в области лазерной физики и физики твердого тела в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
 - переносить полученные знания в области лазерной физики и физики твердого тела на смежные предметные области и использовать эти знания для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
 - о теоретических моделях лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - о технологических процессах синтеза тонких наноразмерных пленок, экспериментальных методах для их исследования и о применении достижений лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок в смежных областях;

- о взаимодействии мощного лазерного излучения с наноструктурами и конденсированными средами;
- о методах анализа результатов в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок.

Научные работники должны:

- 1.Знать:
 - область применения лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - физические основы лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - экспериментальные методы и принципиальное устройство приборов используемых в лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - теоретические модели в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок и их применимость;
 - физические механизмы взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами и конденсированными средами.
- 2.Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - планирования и проведения исследований и экспериментов в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок;
 - переносить полученные знания в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок на смежные предметные области и использовать эти знаний для создания новых объектов техники и технологии и для инновационной деятельности;
- 3.Иметь представление:
 - о технологических процессах лазерного синтеза тонких наноразмерных пленок, экспериментальных методах лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок и их исследования и о применении достижений лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок в смежных областях;
 - о взаимодействии лазерного излучения с наноструктурами и конденсированными средами;
 - о методах анализа результатов в области лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок.

Учебный курс «Лазерная технология синтеза тонких наноразмерных 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 Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок, получившей в последнее время широкое распространение как новая методология и новый подход к созданию наноразмерных слоев с высоким качеством поверхности и высокими электрофизическими параметрами.

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

- Лекция №1. Классификация лазерных технологических процессов.
- Лекция №2. Взаимодействие мощного лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими непрозрачными средами.
- Лекция №3. Физические основы метода лазерного напыления тонких пленок.
- Лекция №4. Лазерно-вакуумная эпитаксия полупроводниковых материалов.
- Лекция №5. Особенности лазерного напыления тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Лекция №1. Классификация лазерных технологических процессов.

Лазерные технологии с использованием непрерывных, импульсных и импульсно-периодических лазеров. Понятие критической плотности мощности лазерного излучения. Классификация лазерных технологических процессов по плотности мощности, плотности энергии и времени действия импульса.

Лекция №2. Взаимодействие мощного лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими непрозрачными средами.

Физические процессы передачи энергии лазерного излучения металлам. Закон поглощения Бугера-Ламберта. Модель свободных электронов. Характерные частоты электрон- фотонного, электрон- электронного, электрон- фононного и фонон- фононного взаимодействия.

Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниками. Металлический, примесный, индуцированный металлический, полупроводниковый и диэлектрический механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниками. Взаимодействие лазерного излучения с диэлектриками.

Тепловые эффекты при взаимодействии лазерного излучения с металлами. Закон теплопроводности Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Распределение температурного поля.

Критические плотности мощности, порог разрушения, скорости нагрева и охлаждения, градиент температуры при нагреве металлов лазерным излучением. Нелинейные случаи нагрева материалов лазерным излучением.

Лекция №3. Физические основы метода лазерного напыления тонких пленок.

Понятие эпитаксии. Взаимодействие мощного лазерного излучения с поверхностью распыляемого материала. Распыление материала мишени под действием мощного лазерного излучения. Разлет продуктов распыления в вакууме. Конденсация распыленного вещества на подложке с образованием пленки. Установка для лазерного напыления наноразмерных пленок. Применение скоростного сепаратора.

Лекция №4. Лазерно-вакуумная эпитаксия полупроводниковых материалов.

Метод лазерного напыления пленок и пленочных структур - лазерная вакуумная эпитаксия (ЛВЭ). Новые импульсные методы вакуумной гетероэпитаксии в микроэлектронике. Совмещенная кремниевая и арсенид-галлиевая технологии.

Особенности и преимущества ЛВЭ. Процесс лазерного синтеза многослойной наноструктуры. Схема МОП- нанотранзистора.

Лекция №5. Особенности лазерного напыления тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Оптимальные условия эпитаксиального роста пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Формирование стехиометрического потока частиц. Методы сепарации крупных фрагментов в лазерном эрозионном факеле. Типы подложек для эпитаксиального роста пленок ВТСП— соединений. Оптимизация параметров напыления. Особенности технологии напыления тонких ВТСП пленок для прикладных задач.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении экспериментальных методов лазерной технологии синтеза тонких наноразмерных пленок. Основные задания на лабораторный практикум:

**Сценарий проведения лабораторных занятий
Лабораторная работа 1 “Лазерная технология”.**

Работа знакомит с современными проблемами лазерной технологии. Приводится классификация лазерных технологических процессов по плотности потока и времени действия лазерных импульсов. Обсуждаются физические процессы взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, аналитические решения краевых задач теплопроводности, находятся аналитические выражения для критических плотностей потока, скоростей нагрева и охлаждения, градиента температуры. Изучаются результаты взаимодействия мощного импульсного лазерного излучения с металлами для реализации ряда технологических процессов.

Лабораторная работа 2 "Физические основы и технологические особенности лазерной сварки"

Рассмотрены физические основы и технологические особенности лазерной сварки излучением импульсного Nd–YAG лазера с регулируемой длительностью и частотой следования импульсов, а также временным профилированием импульсов излучения. В описание работы включены основные теоретические положения взаимодействия лазерного излучения с металлами, приведены основные принципы выбора энергетических и оптических параметров установки для лазерной сварки.

Лабораторная работа 3 "Физические основы лазерной резки металлов "

Рассмотрены физические основы процесса резки металлов излучением импульсного Nd–YAG лазера с регулируемой длительностью и частотой следования импульсов, а также временным профилированием импульсов излучения. В описание работы включены основные теоретические положения взаимодействия лазерного излучения с металлами, приведены основные принципы выбора энергетических и оптических параметров установки для лазерной резки.

Лабораторная работа 4 "Физические основы лазерного напыления тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников."

Работа знакомит с современными проблемами получения качественных эпитаксиальных наноразмерных слоев высокотемпературных сверхпроводников с использованием лазерного излучения. Обсуждаются физические принципы работы ультрафиолетового эксимерного Kr-F лазера. Исследуются оптимальные параметры напыления ВТСП- пленок.

Подробное описание лабораторных работ приведено в Лабораторных практикумах:

1. А.П.Менушенков, Б.М.Жиряков, В.Н.Петровский Лабораторная работа."Лазерная технология. " Уч. пособие. М.: МИФИ, 2006. – 24 с.
2. Петровский В.Н., Менушенков А.П. Лабораторная работа «Физические основы лазерной резки металлов»: Уч. пособие. М.: МИФИ, 2006. – 36 с.
3. Петровский В.Н., Менушенков А.П. Лабораторная работа «Физические основы лазерной сварки»: Уч. пособие. М.: МИФИ, 2006. – 36 с.

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

Вопрос 1.

Какая часть свободных электронов в металле принимает участие в поглощении лазерного излучения?

- (а) все свободные электроны
- (б) электроны, имеющие кинетическую энергию в интервале $h\nu$ от энергии Ферми.
- (в) электроны, имеющие кинетическую энергию в интервале kT от энергии Ферми.
- (г) электроны, имеющие кинетическую энергию в $E_F/2$.

Вопрос 2.

Какая часть свободных электронов в металле принимает участие в электрон-электронной релаксации?

- (а) все свободные электроны
- (б) электроны, имеющие кинетическую энергию в интервале $h\nu$ от энергии Ферми.
- (в) электроны, имеющие кинетическую энергию в интервале kT от энергии Ферми.
- (г) электроны, имеющие кинетическую энергию в $E_F/2$.

Вопрос 3

При каких условиях функция распределения электронов по энергии в металле остается равновесной в процессе поглощения лазерного излучения?

- (а) частота электрон-электронных столкновений меньше частоты электрон-фотонного взаимодействия
- (б) частота электрон-электронных столкновений больше частоты электрон-фотонного взаимодействия
- (в) частота электрон-электронных столкновений равна частоте электрон-фотонного взаимодействия
- (г) никогда.

Вопрос 4

Какие процессы препятствуют нагреву материала при реализации полупроводникового механизма поглощения?

- (а) безизлучательная рекомбинация
- (б) излучательная рекомбинация
- (в) ударная рекомбинация

(г) амбиполярная диффузия

Вопрос 5

Что такое неравновесные носители заряда в полупроводнике?

- (а) носители, возбужденные теплом
- (б) носители, возбужденные светом
- (в) электроны на донорных уровнях
- (г) дырки на акцепторных уровнях

Вопрос 6

Какова зависимость поглощающей способности металлов от длины волны?

- (а) уменьшается с ростом длины волны
- (б) растёт с ростом длины волны
- (в) не зависит от длины волны

Вопрос 7

Физический смысл дифференциального уравнения теплопроводности

- (а) закон сохранения импульса
- (б) закон сохранения энергии
- (в) закон сохранения тепла
- (г) ни то, ни другое, ни третье.

Вопрос 8

Какой тип нелинейности наиболее важен при воздействии лазерного излучения?

- (а) нелинейность 1-го рода
- (б) нелинейность 2-го рода
- (в) нелинейность 3-го рода

Вопрос 9

Сколько рабочих уровней в рубиновом лазере?

- (а) 1
- (б) 2
- (в) 3
- (г) 4

Вопрос 10

Сколько рабочих уровней в неодимовом лазере?

- (а) 1
- (б) 2
- (в) 3
- (г) 4

Вопрос 11

Чему равен порог инверсной населенности неодимового лазера?

- (а) порогу генерации
- (б) нет порога
- (в) порогу дифракции
- (г) порогу флуоресценции

Контрольные вопросы для проверки материала

Лекция 1

1. Каковы принципы классификации лазерных технологических процессов?
2. Что такое лазерное легирование, плакирование, аморфизация?
3. На каких принципах основана лазерно-плазменная технология?
4. Какие существуют возможности использования лазерного излучения в микроэлектронике?
5. Какие свойства лазерного излучения наиболее важны для технологии?

Лекция 2

1. Какая часть свободных электронов в металле принимает участие в поглощении лазерного излучения?
2. Какая часть свободных электронов в металле принимает участие в электрон-электронной релаксации?
3. При каких условиях функция распределения электронов по энергии в металле остается равновесной в процессе поглощения лазерного излучения?
4. Какие процессы препятствуют нагреву материала при реализации полупроводникового механизма поглощения?
5. Что такое амбиполярная диффузия?

Лекция 3

1. Что такое «эпитаксия»?
2. В чем отличие эпитаксиальной пленки от монокристаллической?
3. Какой результат Вы ожидаете при напылении многокомпонентного соединения термическим испарением?
4. Что такое кристаллографическое несоответствие?
5. Что означает сохранение стехиометрии при напылении?
6. Почему лазерное напыление пленок многокомпонентных соединений обеспечивает сохранение стехиометрического состава?

Лекция 4

1. Какие признаки эпитаксиального роста пленочных структур полупроводников?
2. Что такое лазерно-вакуумная эпитаксия?
3. Что такое гибридная GaAs/Si технология?
4. В каких процессах используется лазерная технология в микроэлектронике?
5. Приведите примеры использования лазерно-вакуумной эпитаксии в микроэлектронике и в наноэлектронике.

Лекция 5

1. В чем принципиальные отличия технологии напыления тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) от лазерно-вакуумной эпитаксии полупроводников?
2. Какие методы сепарации плазменного эрозионного потока вы знаете?
3. В чем преимущества метода прямого экранирования плазменного эрозионного потока?
4. В чем преимущества эксимерных лазеров перед твердотельными при напылении тонких ВТСП-пленок?
5. В чем отличие методов синтеза тонких ВТСП-пленок *in situ* и *ex situ*?

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.

Примерные темы контрольных заданий – рефератов

1. Физические процессы передачи энергии лазерного излучения металлам.
2. Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниковыми материалами.
3. Физические свойства лазерной эрозионной плазмы.
4. Физические основы эпитаксиального роста тонких пленок в неравновесных условиях..
5. Основные преимущества лазерного излучения при получении тонких пленок многокомпонентных соединений.
6. Преимущества и недостатки твердотельных ИАГ(Nd) лазеров для напыления тонких пленок.
7. Преимущества и недостатки эксимерных лазеров для напыления тонких пленок.
8. Возможности реализации гибридной GaAs/Si технологии с использованием лазерного излучения.
9. Лазерно-вакуумная эпитаксия полупроводниковых материалов..
10. Лазерная технология в микро- и наноэлектронике.
11. Лазерная технология синтеза наноразмерных пленок высокотемпературных сверхпроводников.
12. Методы сепарации плазменного эрозионного потока при лазерном напылении.

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 | |
| | Лазерная технология синтеза тонких наноразмерных пленок. | 24 ч. | 10 ч. | 2 ч. | 12 ч. | Контрольные вопросы (электронная зачётка) Реферат |
| 1. | Лекция 1: Классификация лазерных технологических процессов. | | 2 ч. | 0,4 ч. | | |
| 2. | Лекция 2: Взаимодействие мощного лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими | | 2 ч. | 0,4 ч. | | |

| | | | | | |
|-------------------|--|--|------|---|---------|
| | непрозрачными средами. | | | | |
| 3. | Лекция 3: Физические основы метода лазерного напыления тонких пленок. | | 2 ч. | 0,4 ч. | |
| 4. | Лекция 4: Лазерно-вакуумная эпитаксия полупроводниковых материалов. | | 2 ч. | 0,4 ч. | |
| 5. | Лекция 5: Особенности лазерного напыления тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). | | 2ч | 0,4 ч | |
| Итоговый контроль | | | | Контрольные вопросы (электронная зачётка) | Реферат |

Список литературы

1. А.П.Менушенков, В.Н.Неволин Лазерная технология ч.1. М.: МИФИ, 1992.
2. У.Дьюли Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986.
3. Н.Н.Рыкалин, А.АУглов, И.В.Зуев, А.И.Кокора Лазерная и электронно- лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
4. Дж.Реди Промышленные применения лазеров М.: Мир, 1981.
5. G.Koren, E.Polturak, B.Fisher, D.Cohen, and G.Kimel, "Highly Oriented as-Deposited Superconducting Laser Ablated Thin Films of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ on SrTiO₃, Zirconia, and Si Substrates", Appl. Phys. Lett. 53(23), pp. 2330-2332 (1988).
6. А.А.Ivanov, S.G.Galkin, A.V.Kuznetsov, A.P.Menushenkov Smooth homogeneous HTSC thin films produced by laser deposition with flux separation. Physica C, 180, 1991, pp. 69-72/
7. R. Bormann and J.Noelting, "Stability Limits of the Perovskite Structure in the Y-Ba-Cu-O System", Appl. Phys. Lett. 54(21), pp.2148-2150(1989)
8. H. Jiang, A. J. Drehman, R. J. Andrews, J. A. Horrigan, and C. Vittoria, "High Quality $YBa_2Cu_3O_7$ Films Prepared in Air Using Pulsed Laser Deposition", Appl. Phys. Lett. 65(24), pp. 3132-3134 (1994).

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