

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Эпитаксиальные методы получения материалов и структур нанوفотоники

по направлению подготовки

12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки:
Приборы и устройства нанوفотоники

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
А.П. Коханенко

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-3 Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.

ПК-2 Способность к построению математических моделей объектов исследования и выбору численного метода их моделирования, разработке нового или выбору готового алгоритма решения задачи.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 3.2 Предлагает новые идеи и подходы к решению инженерных задач с использованием информационных систем и технологий

ИПК 2.2 Определяет выходные параметры и функции разрабатываемой оптической системы связи, которые должны быть определены в результате моделирования его функционирования на основе физических процессов и явлений

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «**Эпитаксиальные методы получения материалов и структур нанофотоники**» являются:

- приобретение студентами глубоких знаний о методах получения эпитаксиальных пленок полупроводников для создания приборов нанофотоники;
- формирование системы взглядов на роль эпитаксиальных методов получения материалов и структур нанофотоники в развитии современного приборостроения.

2. Место дисциплины в структуре магистерской подготовки

Данная дисциплина относится к курсам по выбору Блока 1 «Дисциплины (модули) профессионального цикла магистерской программы **Приборы и устройства нанофотоники**.

Для освоения дисциплины студент должен обладать:

- способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способностью владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области микро и наноэлектроники;
- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования;
- способностью проектировать микроэлементы и микроустройства, основанные на различных физических принципах действия;
- способностью разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы микро и наноэлектроники.

От студента требуется знания из общей физики, физики твердого тела, квантовой механики, нелинейной оптики и оптического материаловедения, приобретенные в процессе бакалаврской подготовки.

Освоение данной дисциплины необходимо для проведения научно-исследовательской работы в области нанофотоники.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

- способность к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию (ОК-1);
- способность действовать в нестандартных ситуациях, нести ответственность за принятые решения (ОК-2);

- способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3).
- способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки (ОПК-1);
- способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы (ОПК-2);
- готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-1);
- способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере (ПК-2);
- способность владеть современными методами проектирования производственно-технологических процессов в профессиональной области (ПК-19);
- готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-1);
- способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**

базовые концепции физики низкоразмерных электронных систем как междисциплинарной дисциплины, развивающейся на самом передовом рубеже современной физики твердого тела;

основные закономерности роста эпитаксиальных пленок различных материалов для создания низкоразмерных структур;

основные направления практического применения уникальных физических свойств эпитаксиальных пленок и структур в фотонике и оптоэлектронике.

- **Уметь:**

выбрать технологию синтеза эпитаксиальных пленок для получения низкоразмерных электронных систем и проанализировать характеристики этих структур;

адекватно интерпретировать и обобщать полученные результаты.

- **Владеть:**

методами оценки параметров синтезированных пленок и структур;

методами проектирования эпитаксиальных материалов наноэлектроники и нанофотоники.

4. Структура и содержание дисциплины

1. Введение. Тенденции развития современного материаловедения. Принципы классификации функциональных материалов (по составу, структуре, свойствам и областям применения, многофункциональные материалы). Наносистемы, наноматериалы и нанотехнологии. Классификация наноматериалов. Методы получения наноматериалов «снизу - вверх» и «сверху - вниз». История нанотехнологии.

2. Основы теории гетероэпитаксиального роста.

Сверхрешетки и квантовые ямы. Эффекты самоорганизации. Квантовые точки. Термодинамический анализ процесса роста при эпитаксии. Термодинамика поверхности. Термодинамические функции поверхности. Поверхностная энергия и поверхностное

натяжение. Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях; адсорбция и десорбция; реконструкция и релаксация поверхностей.

3. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Конструкции установок по молекулярно-лучевой эпитаксии. Требования к давлению в установках по молекулярно-лучевой эпитаксии. Молекулярные источники для установок по молекулярно-лучевой эпитаксии. Устройства нагрева подложки и контроль температуры подложки. Подготовка пластин к эпитаксии. Методы контроля: дифракция быстрых электронов, эллипсометрия, масс-спектрометрия.

4. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОС-гидридная технология).

Общие принципы, лежащие в основе метода ГФЭ МОС при пониженном давлении: аналогия с кремниевой технологией. Конструкции установок по газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Требования к давлению в установках по газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Устройства контроля параметров технологии газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Достоинства метода. Недостатки метода.

5. Атомно-слоевая эпитаксия. (Atomic Layer Epitaxy – ALE). Исходные ростовые материалы в атомно-слоевой эпитаксии. Особенности роста при атомно-слоевой эпитаксии. Рост идет не непрерывно, а послойно, Оборудование для АСЭ. Стадии роста эпитаксиальных пленок. Достоинства метода атомно-слоевой эпитаксии. Недостатки метода.

6. Применение гетероэпитаксиальных материалов и структур в нанoeлектронике. Эпитаксиальные гетероструктуры – свойства и применения. Современные приборы нанофотоники. Метод изготовления нанотрубок самосворачиванием полупроводниковых гетероструктур. Перспективы дальнейшего развития эпитаксиальных методов получения наноструктур для приема и передачи оптического излучения.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы (144 часа)

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				лекции	Лаб. работы	семинары	Самост. работа	
1	Введение	3	1-2	2	-	-4	12	
2	Основы теории гетероэпитаксиального роста	3	3-4	2	-	4	12	Устный опрос
3	Молекулярно-лучевая эпитаксия	3	5-6	2	-	4	12	Устный опрос
4	Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	3	7-8	2	-	4	12	Устный опрос
5	Атомно-слоевая эпитаксия	3	9-10	2	-	4	12	Устный опрос
6	Сканирующая зондовая микроскопия	3	11-12	2		4	12	Устный опрос
7	Итоговый контроль по дисциплине	8	20	-	-	-	36	экзамен
ИТОГО				12		24	108	

5. Образовательные технологии

При реализации дисциплины используются проблемные лекции, лекции-дискуссии, занятия с применением затрудняющих условий. При проведении семинаров предусматривается участие ведущих специалистов НОЦ «Функциональные материалы радио- и оптоэлектроники».

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Видами самостоятельной работы обучающегося по данной дисциплине являются:

- подготовка ответов на контрольные вопросы;
- подготовка докладов на семинарах;
- подготовка к экзамену.

Темы семинаров

1. Тенденции развития современного материаловедения.

2. Методы получения наноматериалов «снизу - вверх» и «сверху - вниз». История нанотехнологии.
3. Термодинамический анализ процесса роста при эпитаксии.
4. Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях; адсорбция и десорбция; реконструкция и релаксация поверхностей.
5. Конструкции установок по молекулярно-лучевой эпитаксии.
6. Методы контроля: дифракция быстрых электронов, эллипсометрия, масс-спектрометрия.
7. Общие принципы, лежащие в основе метода ГФЭ МОС при пониженном давлении: аналогия с кремниевой технологией.
8. Конструкции установок по газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.
9. Атомно-слоевая эпитаксия. (Atomic Layer Epitaxy – ALE).
10. Стадии роста эпитаксиальных пленок. Достоинства метода атомно-слоевой эпитаксии. Недостатки метода.
11. Эпитаксиальные гетероструктуры – свойства и применения.
12. Современные приборы нанофотоники на основе эпитаксиальных гетероструктур.

Перечень контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы

1. Тенденции развития современного материаловедения.
2. Методы получения наноматериалов «снизу - вверх» и «сверху - вниз».
3. История нанотехнологии.
4. Термодинамический анализ процесса роста при эпитаксии.
5. Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях; адсорбция и десорбция; реконструкция и релаксация поверхностей.
6. Конструкции установок по молекулярно-лучевой эпитаксии.
7. Методы контроля: дифракция быстрых электронов, эллипсометрия, масс-спектрометрия.
8. Общие принципы, лежащие в основе метода ГФЭ МОС при пониженном давлении: аналогия с кремниевой технологией.
9. Конструкции установок по газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.
10. Атомно-слоевая эпитаксия. (Atomic Layer Epitaxy – ALE).
11. Стадии роста эпитаксиальных пленок. Достоинства метода атомно-слоевой эпитаксии. Недостатки метода.
12. Эпитаксиальные гетероструктуры – свойства и применения.
13. Современные приборы нанофотоники на основе эпитаксиальных гетероструктур.
14. Назначение эпитаксии.
15. Виды эпитаксии; их особенности.
16. Эпитаксия из газовой фазы.
17. Какими характерными особенностями обладает эпитаксиальный процесс и в какой последовательности он производится.
18. Хлоридно-гидридная газофазная эпитаксия.
19. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.
20. Металлоорганические соединения, используемые при выращивании тонких пленок полупроводников
21. Легирование при эпитаксии.
22. Что такое автолегирование.
23. Гетеропары: химические аналоги, согласование постоянных решеток.
24. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

25. С помощью какого метода можно получить наиболее резкие границы легируемых областей?
26. Из чего изготавливаются тигли молекулярных источников в установках МЛЭ?
14. Какие скорости роста характерны для процесса МЛЭ?
27. Что относят к основным достоинствам МЛЭ?
28. Какой процесс преобладает на поверхности подложки при МЛЭ?
29. Что понимают под критической толщиной слоя?
30. Что является перспективным направлением развития МЛЭ?
31. Что относят к основным недостаткам или ограничениям МЛЭ?
32. Механизм роста эпитаксиальной пленки.
33. Оптимальная скорость роста пленок.
34. Рост на фасетированных поверхностях.
35. Рост на вицинальных гранях.
36. Рост массива квантовых точек.
37. В чем заключается сущность метода ЖФЭ?
38. Чем обусловлен выбор материала растворителя при ЖФЭ?
39. Этапы процесса ЖФЭ при отсутствии принудительного перемешивания.
40. Особенности легирования при ЖФЭ по сравнению с ростом монокристаллов из стехиометрических расплавов.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Назначение эпитаксии.
2. Виды эпитаксии; их особенности.
3. Эпитаксия из газовой фазы.
4. Какими характерными особенностями обладает эпитаксиальный процесс и в какой последовательности он производится.
5. Хлоридно-гидридная газофазная эпитаксия.
6. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.
7. Металлоорганические соединения, используемые при выращивании тонких пленок полупроводников
8. Легирование при эпитаксии.
9. Что такое автолегирование.
10. Гетеропары: химические аналоги, согласование постоянных решеток.
11. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
12. С помощью какого метода можно получить наиболее резкие границы легируемых областей?
13. Из чего изготавливаются тигли молекулярных источников в установках МЛЭ?
14. Какие скорости роста характерны для процесса МЛЭ?
15. Что относят к основным достоинствам МЛЭ?
16. Какой процесс преобладает на поверхности подложки при МЛЭ?
17. Что понимают под критической толщиной слоя?
18. Что является перспективным направлением развития МЛЭ?
19. Что относят к основным недостаткам или ограничениям МЛЭ?
20. Механизм роста эпитаксиальной пленки.
21. Оптимальная скорость роста пленок.
22. Рост на фасетированных поверхностях.
23. Рост на вицинальных гранях.
24. Рост массива квантовых точек.
25. В чем заключается сущность метода ЖФЭ?
26. Чем обусловлен выбор материала растворителя при ЖФЭ?
27. Этапы процесса ЖФЭ при отсутствии принудительного перемешивания.

28. Особенности легирования при ЖФЭ по сравнению с ростом монокристаллов из стехиометрических расплавов.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. Елисеев А.А., Лукашин А.В., Функциональные наноматериалы, М.:Физматлит, 2010, 456 с.

2. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2013. - 560 с.

3. Калинин Б.А., Волков Н.В., Скрытный В.И. и др. Физическое материаловедение Т. 3: [учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению "Ядерная физика и технологии"] / под общ ред. Б. А. Калина; НИЯУ МИФИ, 2012, 798 с.

4. Смирнова Т.П., Кузнецов Ф.А., Воронков М.Г., Борисов В.О. Фундаментальные основы процессов химического осаждения пленок и структур для нанoeлектроники / отв. ред. Т. П. Смирнов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т неорганической химии им. А. В. Николаева Публикация Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013, 175 с.

5. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологий: учебное пособие БИНОМ. Лаб. знаний, 2010 431 с.

б) дополнительная литература

1. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: [учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки "Электроника и наноэлектроника" и "Телекоммуникации"] / Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2011, 538 с.

2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / Москва: ЛИБРОКОМ, 2013, 589 с

3. Матухин В.Л., Ермаков В.Л. Физика твердого тела: учебное пособие / Санкт-Петербург: Лань, 2010, 218 с

4. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ./Под ред. Л. Ченга, К. Плога. – М.: Мир, 1989. – 584 с.

5. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 352 с.

6. Шретер Ю.Г., Ребане Ю.Т., Зыков В.А., Сидоров В.Г. Широкозонные полупроводники. – СПб.: Наука, 2001. – 125 с.

7. Неверов В.Н., Титов А.Н. Физика низкоразмерных систем. Учебное пособие. – Екатеринбург, 2008. – 232 с.

8. Уфимцев В.Б., Акчурин Р.Х. Физико-химические основы жидкофазовой эпитаксии. – М.: Металлургия, 1983. – 224с

9. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. – М.: Мир, 1989. – 240 с.

10. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем / Под ред. А.Я. Шика. – СПб.: Наука, 2001. – 160 с.

программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Пакет «Microsoft Office»

2. Электронно-библиотечная система издательства Лань» <http://e.lanbook.com/>

3. Электронная библиотека ТГУ: <http://www.lib.tsu.ru/ru>.

4. [http: eLIBRARY.RU](http://eLIBRARY.RU)

5. <http://lib.e-science.ru/>

6. Электронная библиотека диссертаций (РГБ) <http://diss.rsl.ru/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

При освоении дисциплины используются видеофильмы и презентации по отдельным разделам дисциплины, компьютерные классы РФФ ТГУ с доступом к ресурсам Научной библиотеки ТГУ, в том числе отечественным и зарубежным периодическим изданиям, и сети Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО по направлению подготовки 200700 «Фотоника и оптоинформатика».