

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Физические основы нанотехнологий

по направлению подготовки

12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки:
Приборы и устройства нанофотоники

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:

ПК-1 Способен к анализу состояния научно-технической проблемы, технического задания и постановке цели и задач проводимых научных исследований на основе подбора и изучения литературных и патентных источников.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 1.1 Составляет план поиска научно-технической информации по разработке оптических систем связи

ИПК 1.2 Проводит поиск и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по разработке оптических систем связи

ИПК 1.3 Представляет информацию в систематизированном виде, оформляет научно-технические отчёты

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины **Физические основы нанотехнологий** являются приобретение магистрантами:

- глубоких знаний о методах изготовления устройств современной наноэлектроники и нанофотоники, развитие понимания физики процессов, лежащих в основе нанотехнологий, и навыков анализа возможностей их реализации применительно к конкретным практическим задачам;
- способности применять полученные знания для постановки, анализа, решения инновационных, научно-исследовательских и инженерно-физических проблем создания и использования наноструктурированных материалов и приборов на их основе.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП МАГИСТРА

Данная дисциплина относится к базовой части Блока 1 «Дисциплины (модули).

Для освоения дисциплины магистрант должен обладать:

- способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности;
- способностью владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере;
- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования;
- готовностью вести исследования основных физико-химических свойств оптических материалов, применить методики прогнозирования оптических и физико-химических параметров новых материалов.

Студент должен знать основные термины, понятия, законы, принципы, модели, методы дисциплин: «Физика», «Основы фотоники», «Атомная и ядерная физика», «Оптическое материаловедение», «Квантовая теория» или аналогичных по содержанию. Освоение данной дисциплины необходимо для проведения научно-исследовательской работы и дальнейшей профессиональной деятельности.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины:

способность к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию (ОК-1);

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);
способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере (ПК-2);
способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования (ПК-3);
способность применять современные методики исследования основных физико-химических свойств оптических стекол и кристаллов, методики прогнозирования оптических и физико-химических параметров новых материалов (ПК-7);
способность владеть современными методами проектирования объектов в профессиональной сфере (ПК-11);
способность владеть современными методами проектирования производственно-технологических процессов в профессиональной области (ПК-19);
способность оценивать инновационно-технологические риски при внедрении новых технологий (ПК-21);
готовность к быстрой перестройке производственного процесса в соответствии с потребностями рынка (ПК-32).

В соответствии с требованиями профессионального стандарта формируются также профессионально-специализированные компетенции

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 владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-2);

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);

способность применять современные методики исследования *и прогнозирования* оптических и физико-химических свойств наноструктурированных материалов (ПСК-4);

Способность владеть современными методами проектирования объектов в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-6).

3.2 Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**

современные проблемы и тенденции развития промышленных нанотехнологий электроники и фотоники;

состав и устройство современных лазерных и пучковых приборов и систем;

содержание и задачи основных этапов планарной технологии;

технологические возможности лазерных, электронных и ионных пучков.

- **Уметь:**

пользоваться полученными знаниями для анализа и поиска путей решения технологических задач в области нанофотоники.

- **Владеть:**

навыками оценки технологичности конструкторских решений в области нанофотоники; нахождения оптимальных решений при создании продукции с учетом требований качества, стоимости и конкурентоспособности.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных 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	консультации	семинары	Самост. работа	
1	Материалы микро- и нанофотоники	8	1-2 8-9	5	-	10	8	Выступление на семинаре
2	Физические основы взаимодействия излучения с веществом.	8	2-4 9-11	6	-	14	8	Выступление на семинаре
3	Технологии создания наночастиц и приборных структур	8	4-6 11-13	6	-	14	8	Выступление на семинаре
4	Литографические процессы.	8	6-7 14-15	2	-	8	6	Выступление на семинаре
5	Тенденции развития наноэлектроники и нанофотоники.	8	7 17-18	1	-	6	4	Выступление на семинаре
6	Итоговый контроль по дисциплине	8	20		2		36	экзамен
ИТОГО				20	2	52	70	

Самостоятельная работа магистрантов направлена на активизацию учебно-познавательной деятельности студентов и заключается в подготовке к выступлениям на семинарах и подготовке к сдаче экзамена.

Содержание разделов дисциплины

1. Материалы микро- и нанофотоники. Механические, электрические и оптические характеристики наноструктурированных материалов. Причины изменений свойств материалов при уменьшении размеров. Физико-химические характеристики углеродных наночастиц. Физико-химические характеристики полупроводниковых структур на основе кремния, германия, соединений A_3B_5 и A_2B_6 . Влияние структуры и

чистоты материалов на характеристики приборов микро- и нанoeлектроники. Гетероструктуры. Квантово-размерные структуры и их свойства.

2. Физические основы взаимодействия излучения с веществом. Оптические процессы в конденсированных средах: качественная схема механизмов и последовательности процессов поглощения света и перехода поглощенной энергии в тепло. Связь оптических постоянных с микрохарактеристиками материала. Влияние диффузионно-рекомбинационных процессов на поглощение в полупроводниковых материалах. Обратные связи между оптическими и фотофизическими характеристиками при лазерном нагревании металлов и полупроводников. Температурные зависимости поглощательной способности и коэффициентов объемного поглощения, скачки поглощения при плавлении для металлов и полупроводников. Тепловая неустойчивость и стабилизация. Нетермические эффекты при лазерном воздействии. Взаимодействие частиц с твердым телом. Двухчастичное взаимодействие. Пробеги электронов и ионов в твердых телах. Термическое и нетермическое воздействие электронов. Образование дефектов кристаллической решетки. Модель Кинчина-Пиза. Сравнение лазерного и электронного воздействия. Особенности ионного воздействия. Формула Резерфорда. Теория Линхарда-Шарфа-Шиотта. Каналирование. Сравнение ионного воздействия с воздействием лазерных и электронных пучков.

3. Технологии создания наночастиц и приборных структур. Технологии «снизу-вверх» и «сверху-вниз». Химические методы создания наночастиц. Основные этапы планарной технологии. Очистка поверхности: механическая и химическая полировка, лазерная очистка, электронное и ионное травление. Способы создания диэлектрических и проводящих покрытий. Формирование барьерных структур. Термодиффузия и ионная имплантация. Сравнение возможностей классических и лучевых технологий: характеристики, области применения. Атомные манипуляции и формирование наноструктур. Лазерная абляция. Эпитаксиальные способы получения полупроводниковых материалов. Процессы самоорганизации. Диэлектрические покрытия в нанoeлектронике и нанофотонике.

4. Литографические процессы. Возможности фотолитографии, рентгеновской, электронной и ионной литографии. Контактная и проекционная литография. Фоторезистивные материалы. Наноимпринт-литография. Автоматизация литографических процессов.

5. Тенденции развития нанoeлектроники и нанофотоники. Современные возможности нанотехнологий в электронике и фотонике. Главные направления перспективных исследований. Фундаментальные ограничения нанотехнологий. Экономические аспекты нанотехнологий.

Темы семинаров

1. Способы получения полупроводниковых материалов.
2. Полупроводниковые соединения A_3B_5 и A_2B_6 .
3. Тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с веществом: достоинства и недостатки.
4. Сравнение ионного воздействия с воздействием лазерных и электронных пучков.
5. Нетермические процессы при лазерном и лучевом воздействии.
6. Зондовые и лучевые технологии создания наноструктур.
7. Сравнение классических и лучевых технологий.
8. Перспективы приборного применения наноструктур в фотонике.
9. Литографические методы в нанoeлектронике
10. Эффекты самоорганизации в нанотехнологиях
11. Создание наноструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии
12. Сверхрешетки и квантово-размерные структуры и их свойства.
13. Фундаментальные ограничения нанотехнологий.

14. Экспериментальные методы исследования наноструктур
15. Радиационные дефекты в твердом теле.
16. Применение ионных и электронных пучков в технологиях микроэлектроники.
17. Физические основы работы лазерных 3d-принтеров и возможность их применения в фотонике.
18. Фотолитографическая в электронике и фотонике.
19. Сравнение лазерных и лучевых технологий

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Перечень контрольных вопросов

1. Основные приближения тепловой модели взаимодействия излучения с веществом.
2. Способы учета потерь на переизлучение и конвекцию.
3. Особенности уравнения теплопроводности для полупроводников.
4. Сравнение характеристик лазерного и лучевого воздействия для микроэлектроники.
5. Эффективность дефектообразования для разных видов воздействия.
6. Принципы и перспективы фотолитографии.
7. Перспективы замещения сложных полупроводниковых материалов квантово-размерными структурами.
8. Материалы для ИК-диапазона: требования и возможности.
9. Типы дефектов в твердом теле.
10. Основные проблемы электронной, ионной и рентгеновской литографии и пути их решения.
11. Перспективы применения мощных пучков частиц для создания наноструктур.
12. Эпитаксиальные методы создания полупроводниковых наноструктур.
13. Углеродные наночастицы в электронике и фотонике.
14. Применение и перспективы зондовых методов создания наноструктур.
15. Причины изменений свойств материалов при уменьшении размеров.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Взаимодействие частиц с твердым телом. Формула Резерфорда.
2. Типы дефектов в твердых телах.
3. Образование радиационных дефектов. Модель Кинчина и Пиза.
4. Тепловая модель лазерного воздействия.
6. Термическое и нетермическое воздействие электронов.
7. Ионное распыление материалов.
9. Легирование полупроводников. Ионная имплантация.
10. Лазерный и электронный отжиг полупроводников.
11. Основные ограничения развития микроэлектроники.
12. Взаимодействие частиц с твердым телом. Двухчастичное взаимодействие.
13. Преимущества и недостатки лазерных и ионно-лучевых технологий.
14. Пробеги электронов в твердых телах.
15. Требования к фоторезистивным материалам.
16. Пробеги ионов в твердых телах. Теория ЛШШ.

- 17 Метод молекулярно-лучевой эпитаксии.
- 18 Возможности фотолитографии.
- 19 Каналирование ионов высокой энергии.
- 20 Рентгеновская литография.
- 21 Лазерное испарение.
- 22 Связь оптических постоянных с микрохарактеристиками материалов.
- 23 Тепловые эффекты в конденсированных средах.
- 24 Жидкофазная и газофазная эпитаксия.
- 25 Бесконтактная литография.
- 26 Гетероструктуры: понятие и свойства.
- 27 Способы создания диэлектрических покрытий.
- 28 Основные этапы планарной технологии.
- 29 Свойства квантово-размерных структур.
- 30 Связь между оптическими и фотофизическими характеристиками при лазерном воздействии.
- 31 Фундаментальные ограничения технологий нанoeлектроники.
- 32 Характеристики полупроводниковых соединений A_3B_5 .
- 33 Характеристики полупроводниковых соединений A_2B_6 .
- 34 Физико-химические характеристики углеродных наночастиц.
- 35 Способы нанесения тонких пленок.
- 36 Технологии «снизу-вверх» и «сверху-вниз».
- 37 Причины изменений свойств материалов при уменьшении размеров.
- 38 Зондовые методы создания наноструктур.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ, МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

а) основная литература:

1. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2009.
2. М. А. Бубенчиков, Е. Э. Газиева, А. О. Гафуров и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий: учебное пособие.- Томск : Изд-во Том. ун-та, 2010.
3. А. В. Войцеховский, И. И. Ижнин, В. П. Савчин, Н. М. Вакив Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники: учебное пособие.- Томск : Издательский дом ТГУ, 2013.
4. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника/уч. пособие.- М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009, 223 с.

б) дополнительная литература:

1. Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. - М.: КомКнига, 2006, 589 с.
2. Ратнер М. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. - М.: Техносфера, 2007, 234 с.
3. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. - М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2007, 134 с.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. - М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 663 с.
5. Михайлов Н.Н., Смирнов Р.Н., Дворецкий С.А. и др. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007, 367 с.
6. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров. – М.: Мир, 1981, 638 с.
7. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.-М. Физматлит, 2005, 410 с.
8. Пул Ч.П. Нанотехнологии.-М.: Техносфера, 2006, 334 с., 2009
9. Рыжонков Д.И. Наноматериалы/уч. пособие.- М. БИНОМ. Лаб. знаний, 2008, 365 с.

10. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Сырямкин В. И. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий : учебное пособие / В. И. Сырямкин ; Том. гос. ун-т, Ин-т дистанционного образования. - Томск: ИДО ТГУ, 2010.

URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000405282>

2. Борисенко С. И. Физика полупроводниковых наноструктур : учебно-методический комплекс / С. И. Борисенко, Ю. В. Вячистая ; Том. гос. ун-т, [Ин-т дистанционного образования]. - Томск: [ИДО ТГУ], 2011.

URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000427308>

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

4. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru/>

5. Электронный ресурс American Institute of Physics <http://scitation.aip.org/>.

6. Электронный ресурс American Physical Society <http://publish.aps.org/>

7. Электронный ресурс Optics Infobase <http://www.opticsinfobase.org/>.

8. Электронный ресурс SPIE Digital Library <http://www.spiedigitallibrary.org>.

9. Электронный ресурс SpringerLink. <http://link.springer.com/>.

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.