

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

_____ С. И. Здрок

«02» июля 2021 г.

Регистрационный № УД – 9967/уч.



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности**

1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий

Минск 2021

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 07-2013, утвержденного 30.08.2013 г. и учебных планов № G31-218/уч. и № G31и-219/уч., утвержденных от 20.02.2018 г.

СОСТАВИТЕЛЬ:

В.К. Ксенович — заведующий НИЛ физики электронных материалов кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

С.В. Шпаковский — начальник отделения «Т» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», кандидат физико-математических наук;

А.В. Мазаник — заведующий кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 13 от 29.06.2021 г.);

Научно-методическим советом БГУ (протокол № 7 от 30.06.2021 г.)

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и наноэлектроники


В.Б. Оджаев

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Методы создания наноструктур и наноматериалов» разработана для специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины — формирование у студентов знаний о современных методах создания наноструктурированных материалов и приборных структур на их основе для дальнейшей возможности работы в научно-исследовательских организациях и в nanoиндустрии.

Задачи учебной дисциплины:

1. Формирование у обучающихся знаний об основных методах создания наноматериалов различной геометрии, состава и назначения, преимуществах и недостатках их применения при создании функциональных приборных структур.
2. Выработка у обучающихся умения самостоятельно приобретать и развивать знания в области наноматериалов и нанотехнологий для последующей работы в научно-исследовательских организациях и в nanoиндустрии.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к циклу специальных дисциплин (государственный компонент).

Развитие современных технологических процессов привело к возможности создания материалов и структур с характерными размерами элементов в субмикронном и нанометровом диапазоне. Наноструктурированные материалы и системы уже сейчас используются в экологических, энергетических, электронных и других технологиях, а в будущем сфера их применения будет постоянно расширяться. К настоящему времени известны десятки методов создания наноструктурированных материалов. Рассматриваются основные методы получения наноструктур, которые возможно условно разделить на два больших класса – физические и химические методы, кроме того можно выделить подходы получения наноматериалов «снизу-вверх» и «сверху-вниз». Представлен анализ различных нанотехнологических процессов, в основе которых лежит реализация локальных атомно-молекулярных взаимодействий, которые формируют наноразмерные системы путем самосборок или путем самоорганизации сложных структур. Изделия создаются на основе оптимальной сборки атомов и молекул или их групп, поэтому позволяют реализовывать предельно возможные характеристики, по сравнению с которыми выпускаемые в настоящее время изделия будут в будущем неконкурентноспособны. Рассмотрены возможные области применения структур, созданных на основе нанотехнологии, позволяющие реализовать многократное увеличение быстродействия, уровня интеграции и расширение функциональных возможностей в электронике, оптике, робо-

тотехнике, материаловедении, биологии, информатике и других областях науки и техники.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации: дисциплина основана на базовых знаниях и представлениях, заложенных во время изучения дисциплины «Введение в физику наноструктур». Она является базовой для последующей дисциплины «Фундаментальные принципы нанотехнологий».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Методы создания наноструктур и наноматериалов» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций:

Академические компетенции:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

Социально-личностные компетенции:

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции:

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы.

ПК-2. Осуществлять на основе методов математического моделирования оценку эксплуатационных параметров функциональных наноматериалов и технологических процессов их получения.

ПК-3. Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

ПК-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы.

ПК-6. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, включая нанотехнологии.

ПК-8. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

ПК-11. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

ПК-12. Определять цели инноваций и способы их достижения.

ПК-13. Применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- основные технологии создания наносистем и наноматериалов;
- главные закономерности в зависимостях эксплуатационных параметров наносистем и наноматериалов от особенностей технологических процессов их формирования;

уметь:

- ориентироваться в аппаратно-техническом обеспечении технологических процессов;
- планировать технологические эксперименты;

владеть:

- информацией по аппаратно-техническому обеспечению технологических процессов создания наноструктур и наноматериалов.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 7 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Методы создания наноструктур и наноматериалов» отведено:

- для очной формы получения высшего образования — 58 часов, в том числе 36 аудиторных часов, из них: лекции — 30 часов, аудиторная управляемая самостоятельная работа — 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 1,5 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации — зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Методы синтеза наночастиц и компактирования наноматериалов

Тема 1.1 *Наночастицы, наноматериалы и наноструктуры. Основные термины и определения*

Общие сведения о наноструктурированных материалах и наноразмерных объектах. Физико-химические особенности наноструктурированных материалов. Размерная зависимость физических свойств наноматериалов. Классификация наноматериалов. Классификация методов создания наноструктур и наноматериалов.

Тема 1.2 *Синтез наночастиц*

Химические и физические методы синтеза наночастиц. Осаждение из коллоидных растворов. Золь-гель технология. Технологические процессы получения нанодисперсных систем оксидов и гидроксидов различных металлов. Газофазный синтез. Получение наночастиц методом термолиза. Физическое диспергирование.

Тема 1.3 *Компактирование наноматериалов*

Консолидированные наноструктурные материалы. Особенности объемных наноструктурных материалов, роль границ зерен. Порошковые технологии компактирования материалов. Магнитно-импульсное и взрывное прессование. Ультразвуковое компактирование. Керамика. Ситаллы. Технологии послойного и селективного формирования объемных наноматериалов. Аддитивные технологии.

Раздел 2. Методы получения углеродных наноматериалов

Тема 2.1 *Синтез фуллеренов и эндофуллеренов*

Структура фуллеренов. Получение фуллеренов и эндоэдральных фуллеренов методом лазерного распыления графита. Электродуговой метод синтеза фуллеренов и эндоэдральных фуллеренов. Газовый метод синтеза. Получение эндоэдральных фуллеренов методом ионной имплантации. Электрофизические свойства и применение фуллеренов.

Тема 2.2 *Методы синтеза углеродных нанотрубок*

Классификация углеродных нанотрубок и их строение. Синтез углеродных нанотрубок методом электродугового распыления графита. Лазерная абляция графита. Химическое осаждение из газовой фазы. Формирование ориентированных массивов углеродных нанотрубок. Функционализация углеродных нанотрубок. Формирование тонких слоев из углеродных нанотрубок. Формирование волокон из углеродных нанотрубок. Электрофизические свойства и применение углеродных нанотрубок.

Тема 2.3 *Методы получения графена*

Кристаллическая структура графена. Структурные дефекты в графене. Получение графена методом микромеханического расслоения графита. Жидкофазное расслоение графита. Синтез графена посредством окисления графита.

Синтез графена методом химического осаждения паров. Получение графена в электрической дуге. Термическое разложение карбида кремния. Эпитаксиальный рост графена на металлической поверхности. Получение графена из этилена. Электрофизические свойства и применение графена.

Тема 2.4 Методы получения углеродных нанокomпозиционных материалов

Формирование нанокomпозитов на основе эпоксидной смолы с углеродными нанотрубками в качестве наполнителя. Формирование гибридных пленок из углеродными нанотрубок и неорганических нанотрубок или наночастиц. Электрофизические свойства и углеродных нанокomпозиционных материалов.

Раздел 3. Электрохимические методы синтеза наноструктурированных материалов

Тема 3.1 Формирование диэлектрических матриц с упорядоченной пористой структурой

Получение пористого кремния. Морфология пористого кремния. Получение пористого оксида алюминия посредством анодирования. Строение пленок оксида алюминия. Механизм синтеза. Двухстадийное анодирование. Применение пористого кремния и пористого оксида алюминия.

Тема 3.2 Получение массивов нанопроволок в пористых матрицах

Получение упорядоченных массивов нанопроволок посредством электрохимического осаждения металлов в пористые диэлектрические матрицы. Электрохимические процессы на электродах. Получение массивов металлооксидных нанопроволок в матрице пористого оксида алюминия методом двухступенчатого анодирования. Применение упорядоченных массивов нанопроволок.

Раздел 4. Методы синтеза тонких пленок

Тема 4.1 Общие сведения об эпитаксии

Термодинамика поверхности, процессы на поверхности и в приповерхностных слоях. Физические процессы при эпитаксиальном росте пленок. Модели эпитаксиального роста пленок Фольмера-Вебера, Франка-ван дер Мерве и Странски-Крастанова. Физические процессы при синтезе многокомпонентной пленки.

Тема 4.2 Методы эпитаксиального роста

Основные методы эпитаксиального наращивания. Эпитаксия из газовой фазы. Метод диссоциации и восстановления газообразных химических соединений. Метод газотранспортных реакций. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Влияние параметров процесса эпитаксии на скорость роста пленок. Физические методы газофазной эпитаксии. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Особенности молекулярно-лучевой эпитаксии. Приборы и техника молекулярно-лучевой эпитаксии. Жидкофазная эпитаксия. Устройства для жидкофазной эпитаксии. Использование эпитаксии при изготовлении приборных структур, структуры активных приборов.

Тема 4.3 *Получение ультратонких пленок и монослоев*

Основные принципы метода молекулярного наслаивания. Осаждаемые материалы. Прекурсоры. Матрицы. Фундаментальные закономерности метода молекулярного наслаивания. Аппаратура для технологии молекулярного наслаивания. Преимущества метода молекулярного наслаивания. Применение пленок, полученных методом молекулярного наслаивания. Технология пленок Ленгмюра-Блоджетт.

Раздел 5. Самоорганизация и самосборка наноструктур

Тема 5.1 *Процессы самоорганизации и самосборки в нанотехнологиях*

Самоорганизация при эпитаксиальном росте. Гетероструктуры как основа наноструктур. Синтез квантовых точек и квантовых проволок. Формирование полупроводниковых гетеротрубок. Полупроводниковые нанопленки и нанопроволоки, металлические нанопленки и нанопроволоки. Механизм синтеза нанопроволок и нановискеров. Формирование нановолокон и наноспиралей. Наногофрированные структуры. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур. Ионный синтез квантовых наноструктур.

Тема 5.2 *Формирование двумерных и трехмерных упорядоченных массивов нанокристаллов металлов, сплавов металлов, полупроводников*

Формирование массивов наночастиц. Формирование наноструктур на основе опаловых матриц. Формирование упорядоченных полимерных структур на основе явления самосборки и их использование в качестве масок и шаблонов для формирования углеродных и полупроводниковых наноразмерных структур.

Раздел 6. Литографические методы формирования наноструктур

Тема 6.1 *Сущность процессов литографии. Фотолитография*

Основные этапы процесса фотолитографии. Фоторезисты и их параметры. Химические процессы, протекающие в фоторезистах. Материалы для фоторезистов. Фотошаблоны и их свойства. Взрывная фотолитография. Ограничения фотолитографии.

Тема 6.2 *Развитие литографических методов в электронике*

Литография глубокого УФ диапазона. Использование фазосдвигающих масок и оптическая коррекция близости. Иммерсионная литография. Рентгеновская литография. Электронная литография. Резисты в электронно-лучевой литографии. Особенности экспонирования в электронно-лучевой литографии. Ионная литография. Нанопечатная литография. Сравнение нанолитографических методов.

Тема 6.3 *Современные этапы развития технологий производства интегральных схем*

Замена алюминиевых межсоединений медными. Технология кремний-на-изоляторе. Применение напряженного кремния. Технологии двойного структурирования. Изоляторы с высокой диэлектрической проницаемостью и металли-

ческие затворы. Технология воздушного зазора. Технология производства биполярных и МОП-транзисторов.

Раздел 7. Формирование наноструктур зондовыми методами

Тема 7.1 *Физические основы зондовых нанотехнологий*

Физические эффекты в туннельно-зондовых нанотехнологиях. Полевая эмиссия. Пондеромоторные силы. Поляризационные эффекты и модификация среды в зазоре. Принципы работы зондовых микроскопов. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ). Атомная инженерия. Локальное окисление металлов и полупроводников. Локальное химическое осаждение из газовой фазы. Локальная глубинная модификация поверхности. Межэлектродный массоперенос. Локальное анодное окисление.

Тема 7.2 *Сканирующая зондовая литография*

СТМ литография. АСМ анодно-окислительная литография. АСМ силовая литография. Термомеханическая нанолитография. Перьевая нанолитография. Электростатическая зарядовая литография. Зондовое формирование полимерных микропроводников. Создание элементов металлической наноэлектроники. Углеродная наноэлектроника. Локальное анодное окисление пиролитического графита.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
 Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Аудиторный кон- троль УСР		
1	2	3	4	5	6	7	9	
1	Методы синтеза наночастиц и компактирования наноматериалов	4						
1.1	<i>Наночастицы, наноматериалы и наноструктуры. Основные термины и определения</i> Общие сведения о наноструктурированных материалах и наноразмерных объектах. Физико-химические особенности наноструктурированных материалов. Размерная зависимость физических свойств наноматериалов. Классификация наноматериалов. Классификация методов создания наноструктур и наноматериалов.	2					Устный опрос	
1.2.	<i>Синтез наночастиц</i> Химические и физические методы синтеза наночастиц. Осаждение из коллоидных растворов. Золь-гель технология. Технологические процессы получения нанодисперсных систем оксидов и гидроксидов различных металлов. Газофазный синтез. Получение наночастиц методом термоллиза. Физическое диспергирование.	1					Устный опрос. Защита рефератов	
1.3	<i>Компактирование наноматериалов</i> Консолидированные наноструктурные материалы. Особенно-	1					Устный опрос	

	сти объемных наноструктурных материалов, роль границ зерен. Порошковые технологии компактирования материалов. Магнитно-импульсное и взрывное прессование. Ультразвуковое компактирование. Керамика. Ситаллы. Технологии послойного и селективного формирования объемных наноматериалов. Аддитивные технологии.							
2	Методы получения углеродных наноматериалов	6						
2.1	<i>Синтез фуллеренов и эндофуллеренов</i> Структура фуллеренов. Получение фуллеренов и эндоэдральных фуллеренов методом лазерного распыления графита. Электродуговой метод синтеза фуллеренов и эндоэдральных фуллеренов. Газовый метод синтеза. Получение эндоэдральных фуллеренов методом ионной имплантации. Электрофизические свойства и применение фуллеренов.	2						Защита рефератов
2.2	<i>Методы синтеза углеродных нанотрубок</i> Классификация углеродных нанотрубок и их строение. Синтез углеродных нанотрубок методом электродугового распыления графита. Лазерная абляция графита. Химическое осаждение из газовой фазы. Формирование ориентированных массивов углеродных нанотрубок. Функционализация углеродных нанотрубок. Формирование тонких слоев из углеродных нанотрубок. Формирование волокон из углеродных нанотрубок. Электрофизические свойства и применение углеродных нанотрубок.	2						Устный опрос. Защита рефератов
2.3	<i>Методы получения графена</i> Кристаллическая структура графена. Структурные дефекты в графене. Получение графена методом микромеханического расслоения графита. Жидкофазное расслоение графита. Синтез графена посредством окисления графита. Синтез графена методом химического осаждения паров. Получение графена в электрической дуге. Термическое разложение карбида кремния. Эпитаксиальный рост графена на металлической поверхности. Получение графена из этилена. Электрофизические	1						Устный опрос. Защита рефератов

	свойства и применение графена.							
2.4	<i>Методы получения углеродных нанокomпозиционных материалов</i> Формирование нанокomпозитов на основе эпоксидной смолы с углеродными нанотрубками в качестве наполнителя. Формирование гибридных пленок из углеродными нанотрубок и неорганических нанотрубок или наночастиц. Электрофизические свойства и углеродных нанокomпозиционных материалов.	1						Устный опрос
3	Электрохимические методы синтеза наноструктурированных материалов	2						
3.1	<i>Формирование диэлектрических матриц с упорядоченной пористой структурой</i> Получение пористого кремния. Морфология пористого кремния. Получение пористого оксида алюминия посредством анодирования. Строение пленок оксида алюминия. Механизм синтеза. Двухстадийное анодирование. Применение пористого кремния и пористого оксида алюминия.	1						Устный опрос. Защита рефератов
3.2	<i>Получение массивов нанопроволок в пористых матрицах</i> Получение упорядоченных массивов нанопроволок посредством электрохимического осаждения металлов в пористые диэлектрические матрицы. Электрохимические процессы на электродах. Получение массивов металлооксидных нанопроволок в матрице пористого оксида алюминия методом двухступенчатого анодирования. Применение упорядоченных массивов нанопроволок.	1						Устный опрос
4	Методы синтеза тонких пленок	4					2	
4.1	<i>Общие сведения об эпитаксии</i> Термодинамика поверхности, процессы на поверхности и в приповерхностных слоях. Физические процессы при эпитаксиальном росте пленок. Модели эпитаксиального роста пленок Фольмера-Вебера, Франка-ван дер Мерве и Странски-Крастанова. Физические процессы при синтезе многокомпо-	1						Защита рефератов

	нентной пленки.							
4.2	<i>Методы эпитаксиального роста</i> Основные методы эпитаксиального наращивания. Эпитаксия из газовой фазы. Метод диссоциации и восстановления газообразных химических соединений. Метод газотранспортных реакций. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Влияние параметров процесса эпитаксии на скорость роста пленок. Физические методы газофазной эпитаксии. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Особенности молекулярно-лучевой эпитаксии. Приборы и техника молекулярно-лучевой эпитаксии. Жидкофазная эпитаксия. Устройства для жидкофазной эпитаксии. Использование эпитаксии при изготовлении приборных структур, структуры активных приборов.	1						Устный опрос. Защита рефератов
4.3	<i>Получение ультратонких пленок и монослоев</i> Основные принципы метода молекулярного наслаивания. Осаждаемые материалы. Прекурсоры. Матрицы. Фундаментальные закономерности метода молекулярного наслаивания. Аппаратура для технологии молекулярного наслаивания. Преимущества метода молекулярного наслаивания. Применение пленок, полученных методом молекулярного наслаивания. Технология пленок Ленгмюра-Блоджетт.	2						Устный опрос. Защита рефератов
	Текущий контроль знаний студентов по разделам 1-4						2	Контрольная работа №1 по разделам 1-4
5	Самоорганизация и самосборка наноструктур	4						
5.1	<i>Процессы самоорганизации и самосборки в нанотехнологиях</i> Самоорганизация при эпитаксиальном росте. Гетероструктуры как основа наноструктур. Синтез квантовых точек и квантовых проволок. Формирование полупроводниковых гетеротрубок. Полупроводниковые нанопленки и нанопроволоки, металлические нанопленки и нанопроволоки. Механизм синтеза нанопроволок и нановискеров. Формирование нановолокон и нано-	2						Защита рефератов

	спиралей. Наногофрированные структуры. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур. Ионный синтез квантовых наноструктур.							
5.2	<i>Формирование двухмерных и трехмерных упорядоченных массивов нанокристаллов металлов, сплавов металлов, полупроводников</i> Формирование массивов наночастиц. Формирование наноструктур на основе опаловых матриц. Формирование упорядоченных полимерных структур на основе явления самосборки и их использование в качестве масок и шаблонов для формирования углеродных и полупроводниковых наноразмерных структур.	2						Устный опрос
6	Литографические методы формирования наноструктур	6						
6.1	<i>Сущность процессов литографии. Фотолитография</i> Основные этапы процесса фотолитографии. Фоторезисты и их параметры. Химические процессы, протекающие в фоторезистах. Материалы для фоторезистов. Фотошаблоны и их свойства. Взрывная фотолитография. Ограничения фотолитографии.	2						Устный опрос. Защита рефератов
6.2	<i>Развитие литографических методов в электронике</i> Литография глубокого УФ диапазона. Использование фазосдвигающих масок и оптическая коррекция близости. Иммерсионная литография. Рентгеновская литография. Электронная литография. Резисты в электронно-лучевой литографии. Особенности экспонирования в электронно-лучевой литографии. Ионная литография. Нанопечатная литография. Сравнение нанолитографических методов.	2						Защита рефератов
6.3	<i>Современные этапы развития технологий производства интегральных схем</i> Замена алюминиевых межсоединений медными. Технология кремний-на-изоляторе. Применение напряженного кремния. Технологии двойного структурирования. Изоляторы с высокой	2						Устный опрос

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Старостин, В.В. Материалы и методы нанотехнологий : учеб. пособие / В.В. Старостин ; под общ. ред. Л.Н. Патрикеева. – 2-е изд. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. – 431 с.
2. Щука, А.А. Наноэлектроника : учебник для бакалавриата и магистратуры, для студ. вузов, обуч. по инж.-техн. напр. / А.А. Щука ; под общ. ред. А.С. Сигова. – Москва : Юрайт, 2017. – 297 с.
3. Нанотехнологии в электронике – 3.1 / под ред. Ю. А. Чаплыгина. – Москва : Техносфера, 2016. – 479 с.
4. Неволин, В.К. Квантовая физика и нанотехнологии / В. Неволин. – Москва : Техносфера, 2011. – 126 с.
5. Неволин, В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике : учеб. пособие / В.К. Неволин. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2006. – 160 с.
6. Борисенко, В.Е. Наноэлектроника : учеб. пособие / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина. – Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 224 с.
7. Наноматериалы и нанотехнологии / Под ред. В.Е. Борисенко, Н.К. Толочко. – Минск : Издательский центр БГУ, 2008. – 372 с.
8. Пул, Ч.П. Нанотехнологии : учеб. пособие / Ч. Пул, Ф. Оуэнс ; пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина. – Изд. 5-е, испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2010. – 330 с.
9. Кирчанов, В.С. Наноматериалы и нанотехнологии : учебное пособие / В.С. Кирчанов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та, 2016. – 193 с.
10. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; пер. с яп. А.В. Хачояна ; под ред. Л.Н. Патрикеева. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 135с.

Перечень дополнительной литературы

1. Смирнов, Б.М. Металлические наноструктуры: от кластеров к нанокатализу и сенсорам / Б.М. Смирнов // УФН.– 2017.– Т.187, №12.– с. 1329-1364.
2. Азаренков, Н.А. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учебное пособие / Н.А. Азаренков, А.А. Веревкин, Г.П. Ковтун . – Харьков: Изд-во Харьк. нац. ун-та им. В.Н. Карамзина, 2016. – 69 с.
3. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – Изд. 2-е, испр. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
4. Хасанов, О.Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, З.Г. Бикбаева – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 212 с.

5. Фрицлер, К.Б. Методы трехмерной печати микро- и наноструктур / К.Б. Фрицлер, В. Я Принц // УФН.– 2019.– Т.189, №1.– с. 55-71.
6. Дьячков, П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П.Н. Дьячков. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 488 с.
7. Елецкий, А.В. Эндоэдральные структуры / А.В. Елецкий // УФН.– 2000.– Т.170, №2.– с. 113-142.
8. Елецкий, А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / А.В. Елецкий // УФН.– 2002.– Т.172, №4.– с. 401-438.
9. Елецкий, А.В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок / А.В. Елецкий // УФН.– 2009.– Т.179, №3.– с. 225-242.
10. Графен: методы получения и теплофизические свойства / А.В. Елецкий, И.М. Искандарова, А.А. Книжник, Д.Н. Красиков. // УФН.– 2011.– Т.181, №3.– с. 233-268.
11. Ратников, П.В. Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы / П.В. Ратников, А.П. Силин // УФН.– 2018.– Т.188, №12.– с. 1249-1287.
12. Пористый кремний: технология, свойства, применение : моногр. / В.В. Трегулов. – Рязань: Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина, 2011. – 124 с.
13. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.Н.Леденцов и др. // ФТП.– 1998.– т.32, №4.– с.385.
14. Лапшинов, Б.А. Технология литографических процессов: учебное пособие / В.С. Кирчанов. – Москва: Изд-во Московского государственного института электроники и математики, 2011. – 95 с.
15. Ратушный, В.И. Методы получения эпитаксиальных гетерокомпозиций: учебное пособие / В.И. Ратушный, Н.В. Ермолаева, А.Ю. Смолин. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. – 200 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для оценки качества усвоения обучающимися учебного материала рекомендуется использовать устные опросы, защиту реферативных работ в форме презентаций и последующих дискуссий, контрольные работы по разделам дисциплины. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Оценка за ответы на лекциях (опрос) может включать в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики и т.д.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций (докладов) с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале. При оценивании реферата (доклада) внимание обращается на: содержание и полноту раскрытия темы, структуру и последовательность изложения, источники информации (предпочтение должно отдаваться статьям в научных журналах) и корректность их использования, точность используемой терминологии в тексте реферата и при докладе, качество оформления реферата и т.д.

Контрольные работы проводятся в письменной форме. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные, научные и учебные издания, электронные источники информации. Оценка каждой контрольной работы проводится по десятибалльной шкале. Каждое задание оценивается в 1 балл (если ответ верен и точен), 0,5 балла (если в ответе содержатся неточности, но в целом он верен, или же в ответе присутствуют почти завершённые рассуждения, которые при их продолжении могли бы привести к верному ответу), 0 баллов (если ответ не верен или отсутствует). Оценка теста проводится по сумме баллов, набранных за все задания, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 — Критерии оценки теста

Оценка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Процент от максимальной но возможной суммы баллов	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$, но $< 95\%$	$\geq 85\%$, но $< 90\%$	$\geq 80\%$, но $< 85\%$	$\geq 70\%$, но $< 80\%$	$\geq 60\%$, но $< 70\%$	$\geq 50\%$, но $< 60\%$	$\geq 30\%$, но $< 50\%$	$\geq 10\%$, но $< 30\%$	$< 10\%$

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждую из контрольных работ и оценки за защиту реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме зачета.

Оценка текущей успеваемости служит для определения допуска студентов к зачету. В случае получения неудовлетворительной (ниже 4 баллов) оценки при текущем контроле качества усвоения знаний по дисциплине обучающийся не допускается к зачету.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

По разделам 1–4 студенты выполняют контрольную работа № 1 в соответствии с учебно-методической картой дисциплины (2 часа).

Примерный перечень вопросов к контрольной работе

1. В чем состоит суть размерных эффектов, приведите примеры.
2. Назовите основные физические процессы, происходящие при газофазном синтезе наночастиц.
3. Что означает термин «компактирование наноматериалов»? Назовите основные методы компактирования наноматериалов.
4. Поясните суть метода электродугового распыления графита, используемого для получения углеродных наноструктур.
5. Кратко охарактеризуйте суть метода каталитического разложения углеводородов (химического осаждения из газовой фазы), используемого для получения углеродных наноструктур.
6. Поясните, в чем состоит сущность методов получения графена посредством термического разложения карбида кремния и посредством жидкофазного расслоения графита.
7. Какие физические и химические процессы происходят при формировании пористого кремния?
8. С какой целью используется двухстадийное анодирование при получении пористого оксида алюминия.
9. Что такое самосборка? Приведите примеры использования процессов самосборки в нанотехнологиях.
10. Поясните, в чем состоит сущность метода наносферной литографии.
11. Какие вещества называют гидрофобными, гидрофильными и амфифильными. Поясните, в чем состоит сущность метода Ленгмюра-Блоджетт.
12. Назовите основные стадии формирования нанопроволок по механизму ПЖК (Пар-Жидкость-Кристалл).
13. Чем отличаются химические и физические методы эпитаксии из газовой фазы?
14. В чем состоит суть метода эпитаксии из твердой фазы?
15. Назовите и кратко охарактеризуйте основные режимы роста тонких эпитаксиальных пленок.
16. Поясните суть метода газотранспортных реакций. Укажите достоинства и недостатки этого метода.
17. Поясните суть метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Эпитаксиальные пленки каких соединений можно получать этим методом?
18. В чем состоит суть метода молекулярного наслаивания? Назовите общие черты и различия методов молекулярного наслаивания и химического осаждения из газовой фазы.
19. Что такое квантовые точки, квантовые проволоки и квантовые ямы. Каким образом их можно получать?

20. Какими факторами определяются электрические свойства углеродных нанотрубок?

По разделам 5–7 студенты выполняют контрольную работу № 2 в соответствии с учебно-методической картой дисциплины (2 часа).

Примерный перечень вопросов к контрольной работе

1. Что такое литография? Назовите основные стадии литографического процесса.
2. Функциональное назначение резистов в литографическом процессе. Назовите и кратко охарактеризуйте типы фоторезистов.
3. Перечислите основные методы нанесения фоторезистов.
4. Назовите и кратко охарактеризуйте основные способы экспонирования при фотолитографическом процессе.
5. Назовите основные используемые в литографии методы переноса рельефа резиста на технологический слой, имеющийся на подложке.
6. Чем определяется разрешающая способность литографического процесса?
7. Объясните суть процесса взрывной фотолитографии.
8. Что такое иммерсионная литография?
9. Что такое электронная литография? Чем определяется разрешающая способность электронной литографии?
10. Назовите и кратко охарактеризуйте основные типы экспонирования, используемые в процессе электронной литографии.
11. Что такое рентгеновская литография?
12. Что такое ионная литография? Назовите ее преимущества по сравнению с другими литографическими процессами.
13. Назовите и кратко охарактеризуйте основные типы нанопечатной литографии.
14. Назовите, какие физико-химические явления и эффекты используются в зондовых нанотехнологиях.
15. Поясните принцип работы атомного силового микроскопа.
16. Назовите основные режимы работы сканирующего туннельного микроскопа и поясните, чем они отличаются.
17. В чем состоит суть метода локального химического осаждения из газовой фазы?
18. Поясните суть метода локальной глубинной модификации поверхности.
19. Сущность процессов СТМ-литографии и АСМ-литографии.
20. Поясните принцип формирования наноструктур методом анодно-окислительной литографии.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций (докладов) с последующей дискуссией (2 часа).

Темы реферативных работ

1. Размерные эффекты в наноструктурах.
2. Физико-химические особенности наноструктурированных материалов.
3. Гетерогенные системы и их классификация.
4. Физические и химические методы синтеза наночастиц.
5. Порошковые технологии получения наноматериалов.
6. Золь-гель технология.
7. Методы компактирования наноматериалов.
8. Методы получения углеродных наноматериалов и нанокompозитов.
9. Синтез и применение графена.
10. Получение и применение пористого кремния.
11. Получение и применение пористого оксида алюминия.
12. Электрохимические процессы формирования упорядоченных массивов нанопроволок в пористых матрицах.
13. Физические и химические методы синтеза эпитаксиальных пленок.
14. Технологические особенности молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений.
15. Метод молекулярного наслаивания.
16. Физико-химические основы технологии пленок Ленгмюра-Блоджетт.
17. Процессы самоорганизации гетероэпитаксиальных структур.
18. Формирование и применение квантовых точек.
19. Методы получения наногофрированных структур.
20. Методы создания нанопроволок и нановискеров.
21. Процессы самосборки биологических объектов.
22. Литографические методы создания наноструктур. Основные этапы литографических процессов.
23. Физические и технологические ограничения литографических процессов.
24. Физические основы электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии.
25. Методы нанопечатной литографии.
26. Преимущества и недостатки рентгеновской литографии.
27. Физические основы зондовых нанотехнологий.
28. Процессы контактного формирования нанорельефа.
29. Сканирующая туннельная микроскопия в нанотехнологиях.
30. Атомно-силовая микроскопия в нанотехнологиях.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется *метод учебной дискуссии*, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или со-

гласования существующих позиций по определенной проблеме. Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения;

метод группового обучения, который представляет собой форму организации учебно-познавательной деятельности обучающихся, предполагающую функционирование разных типов малых групп, работающих как над общими, так и специфическими учебными заданиями.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- написание рефератов на заданные темы, подготовка презентаций по ним;
- подготовка к контрольным работам;
- изучение материала, предложенного для самостоятельной проработки;
- поиск и изучение научной литературы для углубленного изучения выбранных разделов учебной дисциплины;
- подготовка к зачету.

Аудиторная самостоятельная работа по учебной дисциплине на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя без его непосредственного участия.

Темы реферативных работ студентами выбираются из предложенного преподавателем списка. Студенты имеют право по согласованию с преподавателем сформулировать тему реферативной работы самостоятельно.

При выполнении внеаудиторной самостоятельной работы обучающийся имеет право обращаться к преподавателю за консультацией.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Нанотехнологии. Классификация методов создания наноструктур. Сущность размерных эффектов.
2. Физические и химические методы синтеза наночастиц. Золь-гель технология.
3. Методы компактирования наноматериалов.
4. Методы синтеза углеродных нанотрубок и фуллеренов.
5. Методы синтеза графена и углеродных нанокомпозитов.
6. Электрохимические методы синтеза наноматериалов. Получение пористого кремния.
7. Электрохимические методы синтеза наноматериалов. Получение пористого оксида алюминия.

8. Получение упорядоченных массивов нанопроволок посредством заполнения пористых диэлектрических матриц различными металлами.
9. Основные методы эпитакциального роста тонких пленок. Модели эпитакциального роста пленок Фольмера-Вебера, Франка-ван дер Мерве и Странски-Крастанова.
10. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
11. Химические методы газофазной эпитаксии.
12. Физические методы газофазной эпитаксии.
13. Жидкофазная эпитаксия.
14. Метод молекулярного наслаивания.
15. Технология пленок Ленгмюра-Блоджетт.
16. Процессы самоорганизации и самосборки в нанотехнологиях.
17. Процессы самоорганизации при эпитакциальном росте тонких пленок.
18. Сущность процессов литографии. Фотолитография.
19. Основные этапы процесса фотолитографии.
20. Типы и основные свойства фоторезистов.
21. Метод взрывной фотолитографии.
22. Ограничения фотолитографии.
23. Литография глубокого УФ диапазона.
24. Иммерсионная литография.
25. Электронная и ионная литография.
26. Рентгеновская литография.
27. Нанопечатная литография.
28. Современные этапы развития технологии производства интегральных схем. Технология «Кремний на изоляторе».
29. Физические основы зондовых нанотехнологий.
30. Сканирующая туннельная микроскопия.
31. Атомно-силовая микроскопия.
32. Методы сканирующей зондовой литографии.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Введение в физику наноструктур	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 13 от 29.06.2021 г.)
Фундаментальные принципы нанотехнологий	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 13 от 29.06.2021 г.)

