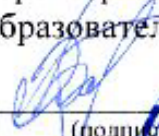


Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям



(подпись)

30 апреля 2020 г.

(дата утверждения)

Регистрационный № УД *0033* /уч.



НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

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

1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий

Минск 2020

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 07-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88; учебных планов №G31-143/уч. и №G31и-179/уч. от 30.05.2013

СОСТАВИТЕЛЬ:

В. С. Просолович – доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

А. И. Ковалев – старший преподаватель кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук.

РЕЦЕНЗЕНТ:

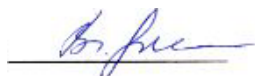
С. П. Сернов – доцент кафедры интеллектуальных систем приборостроительного факультета БНТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 7 от 16 марта 2020 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 4 от 25 марта 2020 г.).

Заведующий кафедрой



Оджаев В.Б.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины "Нанотехнологии в электронике" разработана для специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – ознакомление студентов с современными достижениями физики и технологии полупроводников и наноэлектроники.

Основные *задачи учебной дисциплины* – дать представление об особенностях применения нанотехнологий в электронике (в том числе и молекулярной), об основных направлениях развития наноэлектроники и сферах ее использования.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования.

Нанотехнология – это сумма технологических процессов и методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами с целью получения новых материалов, элементов и приборов. Основой нанотехнологических процессов является проведение локальных атомно-молекулярных взаимодействий, которые формируют наноэлектронные системы путем самосборок или путем самоорганизации сложных структур. В настоящее время наиболее распространены групповые технологии создания объектов нано- метровых размеров с помощью осаждения и литографии. Применение методов эпитаксии позволяет преодолеть присущие групповым методам недостатки, такие как формирование зерен, дислокаций, пор и других дефектов. На основе техники сканирующей зондовой микроскопии созданы методы нанотехнологии, использующие частицы с величинами энергий, определяемых не энергией, необходимой для их фокусировки, а оптимальной энергией стимуляции нанотехнологических процессов. Наноэлектроника является логическим развитием субмикронной электроники.

В курсе рассматриваются также элементы и приборы наноэлектроники, и их свойства. Наноэлектроника исследует квантованные электронные, фотонные и атомные процессы в функциональных элементах электрических, магнитных и оптических цепей. Примером таких элементов являются искусственные и природные структуры, размер которых сопоставим со средней длиной свободного пробега и/или длиной волны де Бройля электрона проводимости. В этих структурах проявляются квантовые эффекты (например, интерференция и резонансное туннелирование электронов). К устройствам наноэлектроники относятся: квантоворазмерные полупроводниковые лазеры, одноэлектронные и молекулярные транзисторы, источники и приемники одиночных фотонов, элементы квантовых компьютеров и др. Они создаются на основе нанотехнологии.

Данный курс обобщает, систематизирует и развивает имеющиеся представления о приборных структурах наноэлектроники и необходим для последующей учебно-научно-производственной деятельности.

В курсе применяются активные методы обучения. Основу составляют технологии проблемного и контекстного обучения, предполагающие наряду с приобщением студентов к объективным противоречиям научного знания и способам их решения также последовательное моделирование условий профессиональной деятельности специалистов.

Связи с другими учебными дисциплинами (включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации). Учебная дисциплина "Нанотехнологии в электронике" основана на знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах: «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Атомная физика», «Ядерная физика» и «Квантовая механика»; спецкурсах: «Зонная теория полупроводников» и «Статистическая физика полупроводников».

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- основные понятия физики конденсированного состояния;
- особенности нанотехнологических процессов;
- влияние квантоворазмерных эффектов на характер протекания физических процессов;
- основы физики современных технологий полупроводниковой электроники;
- основные элементы и приборы наноэлектроники;
- новейшие достижения в области наноэлектроники;

уметь:

- проводить анализ возможности использования в конкретных случаях тех или иных приборов в зависимости от их основных эксплуатационных параметров;
- анализировать перспективы создания устройств электроники на базе полимеров;
- анализировать рынки электронных компонентов наноэлектроники;
- рассчитывать основные параметры функциональных элементов наноэлектроники;

владеть:

- базовыми принципами работы устройств наноэлектроники;
- основами теории наноэлектроники.

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины "Нанотехнологии в электронике" направлено на формирование следующих 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-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

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

АК-8. Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

Социально-личностные компетенции:

СЛК-1. Обладать качествами гражданственности.

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-4. Владеть навыками здорового образа жизни.

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

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.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 9 семестре дневной формы получения высшего образования. Всего на изучение учебной дисциплины "Нанотехнологии в электронике" отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 120 часов, в том числе 48 аудиторных часов, из них: лекции – 40 часов, управляемая самостоятельная работа – 8 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Введение в нанотехнологию в электронике.

Тема 1.1 Объекты нанонауки и нанотехнологии. Основные задачи нанотехнологии. Объекты элементной базы нанoeлектроники. Гетероструктура, сверхрешетка, «искусственный атом». Квантовые ямы, нити, точки.

Раздел 2. Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях.

Тема 2.1 Понятие поверхности, атомно-чистая поверхность, покрытая поверхность, контактная поверхность. Размерные эффекты. Атомная структура поверхностного слоя. Массоперенос на поверхности. Межфазные характеристики.

Тема 2.2 Термодинамика поверхности. Принцип локального равновесия и самоорганизация систем. Поверхностная энергия, поверхностная ионизация,

поверхностное натяжение. Капиллярные явления. Адсорбция, десорбция и испарение с поверхности.

Раздел 3. Гетерогенные процессы формирования наноструктур.

Тема 3.1 Общие сведения об эпитаксии. Прямые процессы. Непрямые процессы. Основные методы эпитаксиального наращивания. Модели эпитаксиального роста пленок.

Тема 3.2 Химическое осаждение из паровой фазы. Испарение в вакууме. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Влияние параметров процесса эпитаксии на скорость роста пленок.

Тема 3.3 Жидкофазная эпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Методы молекулярного наслаивания и атомно-слоевой эпитаксии. Использование эпитаксии при изготовлении приборных структур, структуры активных приборов.

Тема 3.4 Формирование структур на основе коллоидных растворов. Золь-гель технология. Сверхтонкие пленки металлов и диэлектриков. Гетероэпитаксия.

Раздел 4. Методы получения упорядоченных наноструктур.

Тема 4.1 Искусственное наноформирование. Гетероструктуры как основа наноструктур. Формирование полупроводниковых гетеротрубок. Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей.

Тема 4.2 Самоорганизация при эпитаксиальном росте. Наногофрированные структуры. Самоорганизация и самосборка наноструктур. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур.

Раздел 5. Пучковые методы нанолитографии.

Тема 5.1 Основные процессы фотолитографии. Фоторезисты. Фотохимические процессы, происходящие в фоторезистах под действием света. Па-

раметры фоторезистов. Фотошаблоны и их свойства. Литографические методы формирования структур. Рентгеновская литография. Источники импульсного рентгеновского излучения.

Тема 5.2 Электронная литография. Резисты в электронно-лучевой литографии. Экспонирование в электронно-лучевой литографии. Ионная литография. Возможности пучковых методов нанолитографии в нанoeлектронике. Особенности и свойства ренгенолитографии и ионнографии. Нанопечатная литография. Ионный синтез квантовых наноструктур.

Раздел 6. Методы зондовой нанотехнологии.

Тема 6.1 Физические основы зондовой нанотехнологии. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ). СТМ-литография. Совместное использование лазера и СТМ в нанолитографии. Эффект полевой эмиссии. Поляризационные эффекты и модификация среды в зазоре. Полевое испарение.

Тема 6.2 Контактное формирование нанорельефа. Бесконтактное формирование нанорельефа. Локальная глубинная модификация поверхности. Межэлектродный массоперенос. Электрохимический массоперенос. Массоперенос из газовой фазы. Локальное анодное окисление.

Раздел 7. Нанотранзисторы.

Тема 7.1 Теоретические и технологические проблемы скейлинга. Кремниевые транзисторы. КНИ-транзисторы. Транзисторы с двойным затвором.

Тема 7.2 Гетеротранзисторы. Полевые транзисторы. НЕМТ-транзисторы. MODFET-транзисторы. Резонансно-туннельные транзисторы. Гетероструктурный транзистор на квантовых точках.

Тема 7.3 Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Успехи и перспективы транзисторостроения.

Раздел 8. Основы одноэлектроники.

Тема 8.1 Эффект одноэлектронного туннелирования.

Тема 8.2 Транспорт носителей.

Тема 8.3 Приборные структуры одноэлектроники. Одноэлектронные транзисторные структуры. Устройства на одноэлектронных транзисторах

Раздел 9. Введение в квантовые компьютеры.

Тема 9.1 Переход от битов к кубитам. Квантовые вычисления.

Тема 9.2 Элементная база квантовых компьютеров.

Тема 9.3 Квантовые компьютеры на ядерно-магнитном резонансе.

Тема 9.4 Квантовые компьютеры на квантовых точках.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение в нанотехнологию в электронике.	2						
1.1	Объекты нанонауки и нанотехнологии. Основные задачи нанотехнологии. Объекты элементной базы нанoeлектроники. Гетероструктура, сверхрешетка, «искусственный атом». Квантовые ямы, нити, точки.	2					[1], [3]	Опрос
2	Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях	4						
2.1	Понятие поверхности, атомно-чистая поверхность, покрытая поверхность, контактная поверхность. Размерные эффекты. Атомная структура поверхностного слоя. Массоперенос на поверхности. Межфазные характеристики.	2					[2], [3]	Опрос, Реферат
2.2	Термодинамика поверхности. Принцип локального равновесия и самоорганизация систем. Поверхностная энергия, поверхностная ионизация, поверхностное натяжение. Капиллярные явления. Адсорбция, десорбция и испарение с поверхности.	2					[2], [3]	Опрос
3	Гетерогенные процессы формирования наноструктур	8				2		
3.1	Общие сведения об эпитаксии. Прямые процессы. Непрямые процессы. Основные методы эпитаксиального наращивания. Модели эпитаксиального роста пленок.	2					[3], [5]	Опрос
3.2	Химическое осаждение из паровой фазы. Испарение в вакууме. Газофазная эпитаксия из металлорганических соединений. Влияние параметров процесса эпитаксии на скорость роста пленок.	2					[1], [4]	Опрос, Реферат
3.3	Жидкофазная эпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Методы молекулярного наслаивания и атомно-слоевой эпитаксии. Использование эпитаксии при изготовлении приборных структур, структуры активных приборов.	2					[1], [4]	Опрос, Реферат

3.4	Формирование структур на основе коллоидных растворов. Золь-гель технология. Сверхтонкие пленки металлов и диэлектриков. Гетероэпитаксия.	2					[4]	
	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Общая характеристика нанотехнологий», «Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях», «Гетерогенные процессы формирования наноструктур»					2		Письменное тестирование
4	Методы получения упорядоченных наноструктур	4						
4.1	Искусственное наноформирование. Гетероструктуры как основа наноструктур. Формирование полупроводниковых гетеротрубок. Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей.	2					[1], [5]	Опрос, Реферат
4.2	Самоорганизация при эпитаксиальном росте. Наногофрированные структуры. Самоорганизация и самосборка наноструктур. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур.	2					[1], [3]	Опрос
5	Пучковые методы нанолитографии	4						
5.1	Основные процессы фотолитографии. Фоторезисты. Фотохимические процессы, происходящие в фоторезистах под действием света. Параметры фоторезистов. Фотошаблоны и их свойства. Литографические методы формирования структур. Рентгеновская литография. Источники импульсного рентгеновского излучения.	2					[3], [4]	Опрос
5.2	Электронная литография. Резисты в электронно-лучевой литографии. Экспонирование в электронно-лучевой литографии. Ионная литография. Возможности пучковых методов нанолитографии в нанoeлектронике. Особенности и свойства ренгенолитографии и ионнографии. Нанопечатная литография. Ионный синтез квантовых наноструктур.	2					[1], [3]	Опрос
6	Методы зондовой нанотехнологии	2				2		
6.1	Физические основы зондовой нанотехнологии. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ). СТМ-литография. Совместное использование лазера и СТМ в нанолитографии. Эффект полевой эмиссии. Поляризационные эффекты и модификация среды в зазоре. Полевое испарение.	2					[5], [6]	Опрос
6.2	Контактное формирование нанорельефа. Бесконтактное формирование нанорельефа. Локальная глубинная модификация поверхности. Межэлектродный массоперенос. Электрохимический массоперенос. Массоперенос из газовой фазы. Локальное анодное окисление.	2					[5], [6]	Опрос, Реферат
	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Методы получения упорядоченных наноструктур», «Пучковые методы нанолитографии», «Методы зондовой нанотехнологии»					2	[5], [6]	Письменное тестирование
7	Нанотранзисторы	6				2		
7.1	Теоретические и технологические проблемы скейлинга. Кремниевые тран-	2					[5]	Опрос

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Пул Ч., Оуэне Ф. Нанотехнологии. – М: Техносфера, 2004. –328 с.
2. Нанотехнология в полупроводниковой электронике /Отв. ред. А.Л. Асеев.– Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004.–368 с.
3. Нанотехнологии в электронике/ Под. ред Ю.А.Чаплыгина. -М.: Техносфера, 2005. –348 с.
4. Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. -М.: Ком-Книга, 2006.
5. Щука А.А. Нанoeлектроника. –М.: Физматкнига, 2007, 464 с.
6. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. –М.: Техносфера, 2005.
7. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем.-СПб.: Наука, 2001.–160 с.
8. Драгунов, В.П. Основы нанoeлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – Новосибирск: НГТУ, 2000. – 322 с.
9. Материалы современной электроники: [учеб. пособие] / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева; [под общ.ред. В. Ф. Маркова]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал, федер. ун-т. - Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. - 272 с.
10. Пилипенко, В. А. Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства / В.А. Пилипенко, А.П. Достанко, С.М. Аваков, В.И. Плебанович, С.Н. Мельников, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Е.В. Телеш, В.А. Солодуха, И.Б. Петухов, И.Б. Ковальчук, С.Б. Школык, В.Л. Ланин, А.И. Лаппо, А.Н. Петлицкий— Минск: Беларуская навука, 2020. – 368 с.

Перечень дополнительной литературы

1. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Высшая школа, 1976.
2. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники: Учеб. Пособие, 2-е изд. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
3. Ежовский И.К. Поверхностные наноструктуры – перспективы синтеза и использования // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т.6. №1.
4. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры //ФТП, т.32, №4, с.385 (1998).
5. В.К. Неволин. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. М.: МИЭТД996 –90 с. (Переработанное и дополненное пособие размещено на сайте: www.nanotube.ru)
6. Дьячков, П.Н. Углеродные нанотрубки. Материалы для компьютеров XXI века / П.Н. Дьячков // Природа. – 2000. – №11. – С. – 23–30.
7. Sariciftci, N. S. Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells / N.S. Sariciftci,

D. Braun, C. Zhang, V.I. Srdanov, A.J. Heeger, G. Stucky, F. Wudl // Appl. Phys. Lett. – 1993. –V. 62, No. 6. – P. 585–587.

8. Сайт журнала «Российские нанотехнологии»: <http://www.nanorf.ru/>

9. Сайт журнала «Российский электронный наножурнал»: <http://www.nanojournal.ru/>

10. Сайт журнала «Компоненты и Технологии»: www.kit-e.ru

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать тестовые задания по разделам дисциплины, защиту реферативных работ, устные опросы. 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.

Тестирование проводится в письменной форме. Каждый из письменных тестов включает в себя 10–40 заданий в открытой форме. На выполнение теста отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания.

Оценка каждого из тестов проводится по десятибалльной шкале, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 — Критерии оценки теста

Оценка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1 [*]
Процент от максимально возможной суммы баллов	≥ 95 %	≥ 90%, но <95%	≥ 85%, но <90%	≥ 80%, но <85%	≥ 70%, но <80%	≥ 60%, но <70%	≥ 50%, но <60%	≥ 30%, но <50%	≥ 10%, но <30%	<10 %

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждое из письменных тестирований и оценки за защиту реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзаменационная оценка ($O_{\text{Э}}$) и оценка текущей успеваемости ($O_{\text{ТУ}}$) служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине ($O_{\text{Р}}$), которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и эк-

заменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости: $K_{\text{ТУ}} = 0,4$; для экзаменационной оценки: $K_{\text{Э}} = 0,6$. Расчет проводится по формуле:

$$O_p = K_{\text{ТУ}}O_{\text{ТУ}} + K_{\text{Э}}O_{\text{Э}}.$$

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Рекомендуемые разделы для составления тестовых заданий

Разделы 1-3.

Общая характеристика нанотехнологий. Процессы на поверхности и в приповерхностных слоях. Гетерогенные процессы формирования nano-структур.

1. Электронные свойства поверхности.
2. Процессы молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии.
3. Параметры пластин, контролируемые после механической обработки
4. Основные группы реакций, происходящие при эпитаксии из газовой фазы
5. Основные операции процесса эпитаксиального наращивания из газовой фазы.
6. Основные виды дефектов эпитаксиального процесса.
Форма контроля – письменное тестирование.

Разделы 4-6.

Методы получения упорядоченных наноструктур. Пучковые методы нанолитографии. Методы зондовой нанотехнологии.

1. Оптическая литография.
2. Электронная литография.
3. Рентгеновская литография.
4. Ионная литография.
5. Процессы зондовой технологии, СТМ-литография.
6. Виды фотошаблонов.
7. Основные виды дефектов фотолитографического процесса.
Форма контроля – письменное тестирование.

Раздел 7.

Нанотранзисторы.

1. Скейлинг параметров. Влияние масштабирования на параметры транзисторов и параметры линий межсоединений
2. КНИ-транзисторы и их параметры.
3. Структура транзисторов с двойным затвором. Основные параметры.
4. Принцип работы гетеротранзисторов.
5. Структура полевых транзисторов. Основные параметры.

6. НЕМТ-транзисторы и их основные параметры.
 7. Гетеро-структурный транзистор на квантовых точках.
 10. Отличительные черты современного транзисторостроения.
- Форма контроля – письменное тестирование.

Разделы 8-9.

Основы одноэлектроники. Введение в квантовые компьютеры.

1. В чем состоит эффект одноэлектронного туннелирования?
 2. Что такое «кулоновская блокада»? Процесс одноэлектронного туннелирования.
 3. «Кулоновская лестница».
 4. Структура кремниевого одноэлектронного транзистора.
 5. Структура одноэлектронного гетеротранзистора.
 6. Одноэлектронная ячейка памяти.
 7. Что такое одноэлектронный механический транзистор?
 8. Выражение энтропии в битах.
 9. Понятия «бит» и «кубит». Их особенности.
 10. Какие физические системы можно использовать в качестве кубита?
 11. Структура квантового компьютера.
 12. Требования для физической реализации квантового компьютера.
- Форма контроля – письменное тестирование.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

При организации образовательного процесса используются **методы и приёмы развития критического мышления**, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией, понимании информации как отправного, а не конечного пункта критического мышления. Формой реализации метода может служить подготовка и защита реферативных работ.

Желательным является применение **метода учебной дискуссии**, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования соответствующих позиций по определенной проблеме. Реализацию метода рекомендуется осуществлять во время защиты реферативных работ, организовав дискуссию

обучающихся, а также во время лекций. Использование метода обеспечит появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний при решении проблем, определение способов их решения.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления, углубления и расширения полученных теоретических знаний обучающихся;
- формирования умений использовать специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности обучающихся: творческой инициативы, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации. Аудиторная самостоятельная работа по учебной дисциплине на учебных занятиях выполняется под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя без его непосредственного участия.

Основным видом аудиторной самостоятельной работы при изучении учебной дисциплины являются подготовка ответов на тесты, решение качественных задач, предложенных в ходе занятия, участие в дискуссиях на занятиях и в ходе защиты реферативных работ.

Основным видом внеаудиторной самостоятельной работы при изучении учебной дисциплины являются подготовка реферативных работ, решение ситуационных задач, предложенных преподавателем.

Темы реферативных работ выбираются студентами из списка, предложенного преподавателем, не позднее, чем через две недели после начала занятий. Примерный перечень тем рефератов представлен ниже. 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.

Для организации самостоятельной работы студентов по учебной дисциплине будет использоваться информационный ресурс **vk.com/kafedrafizikipp** для размещения комплекса учебных и учебно-методических материалов: учебно-программные материалы, Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Бринкевич Д.И. Основы современных технологических процессов. Курс лекций. – Минск: БГУ, 2011 – 135 с. для теоретического изучения дисциплины, материалы текущего контроля и текущей аттестации, позволяющие определить соответствие учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации, в т.ч. вопросы для подготовки к зачету, тесты, тематика рефератов., список рекомендуемой литературы, информационных ресурсов и др.

Примерная тематика реферативных работ

1. Особенности процессов физической и химической адсорбции.
2. Поверхностные дефекты кристаллов.
3. Гетерогенные системы и их классификация.
4. Капиллярные явления и их зависимость от смачивания поверхности.
5. Физическая сущность процессов адсорбции, абсорбции и десорбции.
6. Процессы самоорганизации гетероэпитаксиальных структур.
7. Методы получения наногофрированных структур.
8. Основные параметры литографических процессов.
9. Преимущества и недостатки рентгеновской литографии.
11. Технологии межэлектронного переноса.
12. Процессы контактного формирования нанорельефа.
13. Органические транзисторы и светоизлучающие диоды.
14. Нанопроводники.
15. Нанoeлектронные запоминающие устройства.
16. Вычислители на основе ДНК.
17. Дробный квантовый эффект Холла.
18. Фуллерены и нанотрубки как функциональные элементы наноэлектроники.
19. Одноэлектронный транзистор.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Объекты нанонауки и нанотехнологии. Основные задачи нанотехнологии. Объекты элементной базы наноэлектроники.
2. Понятие поверхности, атомно-чистая поверхность, покрытая поверхность, контактная поверхность.
3. Атомная структура поверхностного слоя. Электронные, оптические и магнитные свойства поверхности.
4. Массоперенос на поверхности. Межфазные характеристики. Термодинамика поверхности. Принцип локального равновесия и самоорганизация систем.
5. Поверхностная энергия, поверхностная ионизация, поверхностное натяжение. Капиллярные явления.
6. Адсорбция, десорбция и испарение с поверхности.
7. Общие сведения об эпитаксии. Прямые процессы. Непрямые процессы.
8. Основные методы эпитаксиального наращивания. Химическое осаждение из паровой фазы.
9. Жидкофазная эпитаксия. Модель эпитаксиального роста пленок. Влияние параметров процесса эпитаксии на скорость роста пленок.
10. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

11. Формирование структур на основе коллоидных растворов. Золь-гель технология.
12. Методы молекулярного наслаивания и атомно-слоевой эпитаксии. Гетероэпитаксия.
13. Искусственное наноформирование. Гетероструктуры как основа наноструктур.
14. Формирование полупроводниковых гетеротрубок. Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей.
15. Самоорганизация при эпитаксиальном росте. Наногофрированные структуры.
16. Самоорганизация и самосборка наноструктур. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур.
17. Основные процессы фотолитографии. Фоторезисты. Параметры фоторезистов. Фотошаблоны и их свойства.
18. Литографические методы формирования структур. Рентгеновская литография.
19. Электронная литография. Резисты в электронно-лучевой литографии.
20. Ионная литография. Нанопечатная литография. Ионный синтез квантовых наноструктур.
21. Физические основы зондовой нанотехнологии. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ).
22. Эффект полевой эмиссии. Контактный перенос. Полевое испарение. Электромиграция
23. Скейлинг параметров. Влияние масштабирования на параметры транзисторов.
24. КНИ-транзисторы и их параметры. Транзисторы с двойным затвором.
25. Гетеротранзисторы и их параметры. НЕМТ-транзисторы.
26. Транзистор на квантовых точках
27. В чем состоит эффект одноэлектронного туннелирования?
28. Что такое «кулоновская блокада»? Стадии процесса одноэлектронного туннелирования.
29. Что такое «кулоновская лестница»?
30. Кремниевый одноэлектронный транзистор.
31. Одноэлектронный гетеротранзистор.
32. Одноэлектронная ячейка памяти. Способ реализации.
33. Одноэлектронный механический транзистор.
34. Что такое бит информации? Выражение энтропии в битах.
35. Что такое кубит? Модель кубита и его особенности.
36. Какие физические системы можно использовать в качестве кубитов.
37. Квантовый параллелизм
38. Что означает термин «запутанные состояния»? Что такое «сцепленные кубиты»?

- 39. Структура квантового компьютера
- 40. Какие требования необходимо выполнить для физической реализации квантового компьютера?
- 41. Квантовый компьютер на ЯМР.
- 42. Квантовый компьютер на квантовых точках.

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)
Методы создания наноструктур и наноматериалов	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 7 от 16.03.2020)
Фундаментальные принципы нанотехнологий	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 7 от 16.03.2020)
Методы диагностики наноструктур и наноматериалов	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 7 от 16.03.2020)
Нанoeлектроника	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 7 от 16.03.2020)

