

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Материаловедение наноструктурированных материалов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

В.В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д.А. Свинцов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры нанометрологии и наноматериалов 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Материаловедение наноструктурированных материалов" предусматривает изучение физических и химических свойств наноматериалов и ознакомление с принципами работы приборов на их основе.

Задачи курса:

- знакомство с электронными свойствами полупроводниковых наноматериалов;
- знакомство с принципами работы нанoeлектронных приборов на основе полупроводниковых материалов;
- знакомство с химическими свойствами наноструктурированных материалов.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- теоретические основы описания физических свойств наноразмерных материалов;
- принципы работы электронных приборов на основе полупроводниковых наноструктур (полевые транзисторы, полупроводниковые лазеры).

Уметь:

- анализировать работу современных приборов на основе наноструктур.

Владеть:

- теоретическими моделями, используемыми для описания физических свойств наноструктурированных материалов.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Общие представления об изменении свойств твердых тел при переходе от макро- к наномасштабу.
2. Принципы работы полевых транзисторов и законы масштабирования.
3. Ограничения законов масштабирования и новые материалы для полевых транзисторов.
4. Новые материалы для межсоединений в интегральных схемах.
5. Полупроводниковые наноструктуры для лазерных применений.
6. Лазерные наноструктуры для генерации терагерцового излучения.
7. Механические свойства материалов.
8. Основы химии наноматериалов.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение физических и химических свойств наноматериалов и ознакомление с принципами работы приборов на их основе.

### Задачи дисциплины

- знакомство с электронными свойствами полупроводниковых наноматериалов;
- знакомство с принципами работы нанoeлектронных приборов на основе полупроводниковых материалов;
- знакомство с химическими свойствами наноструктурированных материалов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки

ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- теоретические основы описания физических свойств наноразмерных материалов;
- принципы работы электронных приборов на основе полупроводниковых наноструктур (полевые транзисторы, полупроводниковые лазеры).

уметь:

- анализировать работу современных приборов на основе наноструктур.

владеть:

- теоретическими моделями, используемыми для описания физических свойств наноструктурированных материалов.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Общие представления об изменении свойств твердых тел при переходе от макро- к наномасштабу.	4			10
2	Принципы работы полевых транзисторов и законы масштабирования.	4			10
3	Ограничения законов масштабирования и новые материалы для полевых транзисторов.	4			10
4	Новые материалы для межсоединений в интегральных схемах.	4			10
5	Полупроводниковые наноструктуры для лазерных применений.	4			10
6	Лазерные наноструктуры для генерации терагерцового излучения.	4			10
7	Механические свойства материалов.	4			5
8	Основы химии наноматериалов.	2			10
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Общие представления об изменении свойств твердых тел при переходе от макро- к наномасштабу.

Влияние конечного размера кристалла на электронный спектр. Размерное квантование и его экспериментально измеряемые проявления. Электрическое сопротивление наноструктур. Спектры оптического поглощения и люминесценции наноматериалов. Химическая активность наноматериалов.

2. Принципы работы полевых транзисторов и законы масштабирования.

Эффект поля в полупроводниках. Устройство МДП - транзистора и его характеристики. Технологические операции для создания полевого транзистора на основе кремния: литография, нанесение тонких диэлектрических слоев, легирование, металлизация (обзорно). Схема логического инвертора на основе МДП-транзисторов. Связь максимальной частоты переключения с длиной канала и подвижностью носителей заряда. Зависимости максимальной частоты переключения, напряжения питания и мощности тепловыделения от размера транзистора (законы масштабирования).

3. Ограничения законов масштабирования и новые материалы для полевых транзисторов.

Ограничения законов масштабирования и новые материалы для полевых транзисторов. Эффекты, ограничивающие рост предельной частоты переключения полевых нанотранзисторов: снижение высоты барьера напряжением стока, паразитные емкости, туннельные токи утечки через диэлектрик. Проблема энерговыделения и теплоотвода в быстродействующих интегральных схемах. Ограничение подвижности носителей заряда, связанное с рассеянием на легирующих примесях. Новые материалы с высокой электронной подвижностью. Транзисторы на основе объемных соединений  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ . Проблема омического контакта и различия электронной и дырочной подвижности. Транзисторы с высокой подвижностью электронов на двумерных электродах. Электронные свойства графена и нанотрубок, квази-релятивистский закон дисперсии электронов, подавление обратного рассеяния как причина высокой электронной подвижности. Экспериментальные методы получения графена. Межзонное туннелирование в графене и проблема закрытого состояния в транзисторах на основе графена. Модификации графена, обладающие запрещенной зоной: двухслойный графен и наноленты. Гетероструктуры на основе слоистых материалов ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{WS}_2$ ) и туннельные транзисторы на их основе.

4. Новые материалы для межсоединений в интегральных схемах.

Новые материалы для межсоединений в интегральных схемах. Оптические и плазмонные межсоединения. Электрическое сопротивление тонких металлических межсоединений. Модель распространения электрического сигнала по RC-цепочке и задержки, вносимые межсоединениями. Фотонные волноводы на основе структур «кремний на изоляторе» для межсоединений на кристалле и ограничения в их масштабируемости. Понятие о плазмонных волноводах, проблема компенсации потерь плазмонов.

5. Полупроводниковые наноструктуры для лазерных применений.

Лазеры на квантовых ямах и квантовые каскадные лазеры. Инверсная населенность в полупроводниках и необходимое условие лазерной генерации. Полупроводниковый лазер на основе сильно легированного p-n-перехода, пороговый ток лазерной генерации. Лазеры на основе гетероструктур и их преимущества: локализация поля, снижение токов утечки. Лазеры на основе квантовых ям и управление частотой межзонного перехода с помощью размерного квантования. Полупроводниковые сверхрешетки и их электрические свойства. Туннелирование в сверхрешетках. Возможность усиления электромагнитного излучения при переходах между подзонами размерного квантования. Квантовые каскадные лазеры.

## 6. Лазерные наноструктуры для генерации терагерцового излучения.

Проблема генерации и детектирования терагерцового излучения («терагерцовая щель»). Квантовые каскадные структуры с близко расположенными уровнями для терагерцовой лазерной генерации. Возможность терагерцовой лазерной генерации в узкощелевых и бесщелевых полупроводниках (графен, HgTe). Усиление рекомбинации в узкощелевых полупроводниках и поглощение на свободных электронах как основные проблемы создания терагерцовых лазеров. Подход к генерации терагерцового излучения со стороны радиоэлектронных приборов. Полупроводниковые приборы с высокочастотной отрицательной проводимостью: резонансно-туннельные диоды, пролетные диоды. Плазменные неустойчивости в полевых транзисторах с высокой электронной подвижностью и их использование для генерации терагерцового излучения.

## 7. Механические свойства материалов.

Нанoeлектромеханические системы. Изменение механических свойств материалов при переходе к наномасштабу. Собственные частоты колебаний закрепленной балки. Наномеханические системы для детектирования высокочастотных сигналов: упрощенная RCL – модель. Нанoeлектромеханические системы на основе графена.

## 8. Основы химии наноматериалов.

Материалы для химических сенсоров. Химическая активность наноматериалов и их применения для катализа. Химические сенсоры на основе наноструктур. Изменение электрических и оптических свойств наноматериалов при адсорбции на поверхности. Химически чувствительные полевые транзисторы.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Ханнинк Р., Хилл А. Наноструктурные материалы. - М.: Техносфера, 2009.
2. Материаловедение наноструктурированных материалов / Д. А. Свинцов, С. В. Захарченко, С. А. Зайцев, А. Ю. Озерин. - М.: Изд-во МФТИ, 2011.
3. Орликовский А. А. Введение в нанoeлектронику. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009.

### Дополнительная литература

1. L. Venema «Silicon electronics and beyond» Nature, том 479 (2011).
2. K.S. Novoselov et. al. «A roadmap for graphene» Nature, том 490 (2012).

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.nature.com/>
2. <http://www.opticsinfobase.org/>
3. <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl>

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

на лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса требует посещения занятий и напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

В.В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д.А. Свинцов, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Материаловедение наноструктурированных материалов» обучающийся должен:

### знать:

- теоретические основы описания физических свойств наноразмерных материалов;
- принципы работы электронных приборов на основе полупроводниковых наноструктур (полевые транзисторы, полупроводниковые лазеры).

### уметь:

- анализировать работу современных приборов на основе наноструктур.

### владеть:

- теоретическими моделями, используемыми для описания физических свойств наноструктурированных материалов.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Общие представления об изменении свойств твердых тел при переходе от макро- к наномасштабу
2. Принципы работы полевых транзисторов и законы масштабирования
3. Ограничения законов масштабирования и новые материалы для полевых транзисторов
4. Новые материалы для межсоединений в интегральных схемах
5. Полупроводниковые наноструктуры для лазерных применений
6. Лазерные наноструктуры для генерации терагерцового излучения
7. Механические свойства материалов
8. Основы химии наноматериалов

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Общие представления об изменении свойств твердых тел при переходе от макро- к наномасштабу



## 2. Принципы работы полевых транзисторов и законы масштабирования

### Пример 2.

1. Лазерные наноструктуры для генерации терагерцового излучения
2. Механические свойства материалов

### Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;

- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.