

**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>	Приборы полупроводниковой микро- и наноэлектроники
<b>по направлению:</b>	Электроника и наноэлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и наноэлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра наноэлектроники и квантовых компьютеров
<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 составил: В.В. Вьюрков, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры наноэлектроники и квантовых компьютеров 30.05.2022

## Аннотация

Курс "Приборы полупроводниковой микро- и нанoeлектроники" предназначен дать представление о принципах работы современных и перспективных приборов микро- и нанoeлектроники.

Указать на основные физические процессы, которые определяют работу приборов.

Рассмотреть различные методы и модели для расчета характеристик приборов.

Задачи дисциплины:

- ознакомление с принципами работы основных приборов микро- и нанoeлектроники;
- дать навыки расчета характеристик приборов;
- рассмотреть перспективные приборы, работающие на новых физических принципах.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- физические принципы работы современных и перспективных приборов микро- и нанoeлектроники.

Уметь:

- выбирать подходящую модель для расчета характеристик приборов с учетом области ее применимости.

Владеть:

- способностью совершенствования существующих приборов и конструирования новых приборов.

Темы и разделы курса:

1. Основные сведения из физики полупроводников.
2. Гидродинамические, классические кинетические модели и квантовые модели.
3. Теория p-n перехода.
4. Контакт металл-полупроводник.
5. Гетеропереходы.
6. Биполярные транзисторы.
7. Полевые транзисторы на основе МОП-структур.
8. Низкоразмерные структуры.
9. Новые принципы работы и конструкции приборов нанoeлектроники.
10. Квантовые компьютеры и квантовая коммуникация.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- дать представление о принципах работы современных и перспективных приборов микро- и нанoeлектроники;
- указать на основные физические процессы, которые определяют работу приборов;
- рассмотреть различные методы и модели для расчета характеристик приборов.

### Задачи дисциплины

- ознакомление с принципами работы основных приборов микро- и нанoeлектроники;
- дать навыки расчета характеристик приборов;
- рассмотреть перспективные приборы, работающие на новых физических принципах.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики

предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- физические принципы работы современных и перспективных приборов микро- и наноэлектроники.

уметь:

- выбирать подходящую модель для расчета характеристик приборов с учетом области ее применимости.

владеть:

- способностью совершенствования существующих приборов и конструирования новых приборов.

### 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	Основные сведения из физики полупроводников.	2			9
2	Гидродинамические, классические кинетические модели и квантовые модели.	4			8
3	Теория p-n перехода.	2			9
4	Контакт металл-полупроводник.	2			8
5	Гетеропереходы.	2			9
6	Биполярные транзисторы.	4			6
7	Полевые транзисторы на основе МОП-структур.	4			7
8	Низкоразмерные структуры.	4			6
9	Новые принципы работы и конструкции приборов наноэлектроники.	4			6
10	Квантовые компьютеры и квантовая коммуникация.	2			7
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)

Семестр: 8 (Весенний)

##### 1. Основные сведения из физики полупроводников.

Основные сведения из физики полупроводников: зонная структура, зонная диаграмма, законы дисперсии электронов и дырок, статистика, примеси, механизмы рассеяния, генерация и рекомбинация.

##### 2. Гидродинамические, классические кинетические модели и квантовые модели.

Гидродинамические модели (диффузионно-дрейфовые уравнения), классические кинетические модели (уравнение Больцмана, уравнение Власова), квантовые модели (уравнение Ландауэра-Бюттикера). Уравнение Пуассона для самосогласованного поля.

##### 3. Теория p-n перехода.

P-n переход: высота барьера, обедненные области, вольтамперная характеристика (квазиуровни Ферми электронов и дырок, формула Шокли). Высоочастотные свойства p-n перехода.

##### 4. Контакт металл-полупроводник.

Контакт металл-полупроводник. Омический контакт. Контакт Шоттки: обедненный слой, эффект Шоттки. Вольт-амперные характеристики контакта Шоттки: термоэлектронный, рекомбинационный и туннельные токи.

##### 5. Гетеропереходы.

Гетеропереходы, их свойства и применения.

##### 6. Биполярные транзисторы.

Биполярные транзисторы. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора. Коэффициент усиления тока, частота отсечки. Гетероструктурные биполярные транзисторы.

##### 7. Полевые транзисторы на основе МОП-структур.

Полевые транзисторы на основе МОП-структур. Образование инверсионного слоя, вольт-амперные характеристики, высокочастотные свойства, полевая зависимость подвижности, эффекты деградации. Пороговое напряжение, подпороговый и надпороговый режимы работы. Эффекты короткого канала. Полевые транзисторы на подложке «кремний на изоляторе».

##### 8. Низкоразмерные структуры.

Низкоразмерные структуры: квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки. Искусственные структуры и природные структуры: кремниевые нанопровода, графен, углеродные нанотрубки, фуллерены, молекулы.

##### 9. Новые принципы работы и конструкции приборов наноэлектроники.

Новые принципы работы и конструкции приборов нанoeлектроники: туннельные структуры, структуры с резонансным туннелированием, интерференционные структуры, структуры с одномерной и ноль-мерной проводимостью, одноэлектронные структуры, спиновые структуры.

#### 10. Квантовые компьютеры и квантовая коммуникация.

Квантовые компьютеры: квантовые алгоритмы, квантовые биты, запутанные состояния, декогеренция, теорема о запрете клонирования квантовой системы, универсальный квантовый компьютер, структуры твердотельного квантового компьютера. Квантовая коммуникация.

### **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. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 томах. - Москва: Мир, 1984
2. Зеегер К. Физика полупроводников. - Москва: Мир, 1977
3. Математическое и компьютерное моделирование наносистем / Д. В. Негров, А. Ю. Озёрин, Д. А. Свинцов, В. В. Вьюрков, А. А. Орликовский, И. А. Семенихин. - Издательство МФТИ, 2011
4. Нанoeлектроника / К.А. Валиев, В.В. Вьюрков, В.А.Гриджин, В.П. Драгунов, А.А.Кокин, И.Г. Неизвестный, А. А. Орликовский, Ю.С. Протасов, И.А. Семенихин. - Изд. МВТУ им. Баумана, 2009

#### Дополнительная литература

1. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН, т. 175(1) - сс. 1-39, 2005.
2. Валиев К. А., Вьюрков В. В., Орликовский А. А. Кремниевая нанoeлектроника: проблемы и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники; вып. 6. - сс. 7-22, 2010.

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

1. <http://en.wikipedia.org>
2. <http://ru.arxiv.org>
3. <http://scholar.google.ru/>

### **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)**

Студент, прослушавший курс лекций, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;

2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

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

**Разработчик:** В.В. Вьюрков, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Приборы полупроводниковой микро- и нанoeлектроники» обучающийся должен:

### знать:

- физические принципы работы современных и перспективных приборов микро- и нанoeлектроники.

### уметь:

- выбирать подходящую модель для расчета характеристик приборов с учетом области ее применимости.

### владеть:

- способностью совершенствования существующих приборов и конструирования новых приборов.

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

В целях проведения текущего контроля успеваемости проводится краткий опрос по темам предыдущей лекции.

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

Вопросы к экзамену:

1. Как возникает зонная структура кристаллов?
2. Примеры реальных законов дисперсии электронов и дырок в полупроводниках.
3. Классическая и квантовая статистика.
4. Механизмы рассеяния носителей в полупроводниках.
5. Генерация и рекомбинация.
6. Написать диффузионно-дрейфовые уравнения.
7. Классическая кинетическая модель на основе уравнения Власова.
8. Квантовая модель на основе уравнения Ландауэра-Бюттикера.
9. Написать уравнение Пуассона для самосогласованного поля.
10. Нарисовать вольтамперную характеристику p-n перехода и объяснить ее происхождение.
11. Что определяет высокочастотные свойства p-n перехода?



12. Что такое контакт Шоттки и эффект Шоттки?
13. Компоненты тока в контакте металл-полупроводник.
14. Нарисовать вольтамперную характеристику контакта металл-полупроводник и объяснить ее происхождение.
15. Как можно создать омический контакт металла с полупроводником?
16. Что такое гетеропереходы?
17. Привести примеры применения гетеропереходов.
18. Чем обусловлено название «биполярные транзисторы»?
19. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора.
20. Коэффициент усиления тока для различных схем включения.
21. Что такое частота отсечки и чем она определяется?
22. Каким образом гетероструктуры улучшили характеристики биполярных транзисторов?
23. Как устроены полевые транзисторы на основе МОП-структур?
24. Как возникает инверсионный канал?
25. Какие параметры транзисторов определяют высокочастотные свойства цифровых схем на их основе?
26. Происхождение полевой зависимости подвижности в различных полупроводниках.
27. Эффекты деградации полевых транзисторов.
28. Что такое пороговое напряжение, подпороговый и надпороговый режимы работы.
29. Чем вызвана необходимость легирования короткого канала транзистора на объемной подложке?
30. Чем вызван переход к транзисторам на основе подложки «кремний на изоляторе»?
31. Что такое квантовая яма?
32. Что такое квантовая нить?
33. Что такое квантовая точка?
34. Получить кванты абсолютной и дифференциальной проводимости в одномерном проводнике.
35. Закон дисперсии носителей в графене.
36. Закон дисперсии носителей в углеродных нанотрубках.
37. Привести примеры структур с туннельными переходами.
38. Привести структуры с управляемыми туннельными переходами.
39. Что такое резонансное туннелирование?
40. Как работают интерференционные транзисторы?
41. Как работают спиновые транзисторы?
42. Чем отличаются квантовые компьютеры от классических компьютеров?
43. Что такое квантовые алгоритмы?
44. Что такое квантовые биты?
45. Что такое запутанные состояния квантовой системы?
46. Какой принцип классической физики нарушает парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена?
47. Какой принцип классической физики нарушает «парадокс бомбы»?
48. Что такое декогеренция в квантовом компьютере?
49. Доказать теорему о запрете клонирования квантовой системы.
50. Чем обусловлена сложность процедур исправления ошибок в квантовом компьютере?
51. Привести пример структуры твердотельного квантового компьютера.
52. Каким образом квантовая коммуникация обеспечивает секретность?

Примеры экзаменационных билетов:

Пример 1.

1. Привести пример структуры твердотельного квантового компьютера.
2. Каким образом квантовая коммуникация обеспечивает секретность?

Пример 2.

1. Эффекты деградации полевых транзисторов.
2. Что такое пороговое напряжение, подпороговый

## 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.