

**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>	Электроника
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра вакуумной электроники
<b>курс:</b>	2
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

3 (осенний) - Экзамен

4 (весенний) - Дифференцированный зачет

5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 210 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 150 час.

Самостоятельная работа: 390 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 630, всего зач. ед.: 14

Программу составили:

А.С. Батурин, канд. физ.-мат. наук

Л.А. Кириченко, канд. физ.-мат. наук

Н.Е. Никитин, канд. физ.-мат. наук, доцент

Е.П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, профессор

А.А. Чуприк, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры вакуумной электроники 29.05.2020

## **Аннотация**

Курс "Электроника" предназначен для студентов, обучающихся по образовательной программе "Электроника, фотоника и нанотехнологии".

**Цель дисциплины:**

изучение физических основ современной электроники.

**Задачи дисциплины:**

Знакомство с элементами конструкции электронных приборов и систем.

Изучение основных источников СВЧ-излучения.

Изучение основных приборов, используемых для получения, поддержания и изучения свойств материалов

**По результатам освоения дисциплины студент должен:**

**Знать:**

Теоретические основы описания взаимодействия электронов с веществом и физические механизмы их возникновения в электрическом и магнитном полях.

**Уметь:**

Рассчитывать распределение электрического и магнитного полей в вакуумных системах и влияние этих полей на движение электронных пучков.

**Владеть:**

Теоретическими моделями, используемыми для расчётов и описания распределения электрического и магнитного полей в вакуумных системах, и влияние этих полей на движение электронных пучков.

Основное содержание дисциплины изложено в следующих разделах:

1. Представления о квантовых свойствах электрона.
2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
3. Задача об электроде, налетающем на прямоугольную потенциальную ступеньку.
4. Неразличимость элементарных частиц и принцип запрета Паули.
5. Элементы зонной теории кристаллического твердого тела.
6. Классификация твердых тел металлы, диэлектрики, полупроводники.
7. Энергетическая диаграмма твердое тело-вакуум.
8. Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов и полупроводников.
9. Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.
10. Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.
11. Фотоэлектронная эмиссия.
12. Автоэлектронная эмиссия.
13. Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.
14. Поверхностная ионизация.
15. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

## **1. Цели и задачи**

### **Цель дисциплины**

- изучение физических основ современной электроники.

### **Задачи дисциплины**

- знакомство с элементами конструкции электронных приборов и систем;
- изучение основных источников СВЧ-излучения;
- изучение основных приборов, используемых для получения, поддержания и изучения свойств материалов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	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 взаимодействия электронов с веществом и физические механизмы их возникновения в электрическом и магнитном полях.

уметь:

- рассчитывать распределение электрического и магнитного полей в вакуумных системах и влияние этих полей на движение электронных пучков.

владеть:

- теоретическими моделями, используемыми для расчётов и описания распределения электрического и магнитного полей в вакуумных системах, и влияние этих полей на движение электронных пучков.

## 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	Представления о квантовых свойствах электрона.		4		20
2	Соотношение неопределенностей Гейзенберга.	4	4	4	20
3	Задача об электроны, налетающем на прямоугольную потенциальную ступеньку.	6	4	4	20
4	Неразличимость элементарных частиц и принцип запрета Паули.	6	4	4	20

5	Элементы зонной теории кристаллического твердого тела.	6	4	4	20
6	Классификация твердых тел металлы, диэлектрики, полупроводники.	4	4	4	20
7	Энергетическая диаграмма твердое тело-вакуум.	4	6	10	30
8	Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов и полупроводников.			15	30
9	Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.			15	30
10	Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.			15	30
11	Фотоэлектронная эмиссия.			15	30
12	Автоэлектронная эмиссия.			15	30
13	Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.			15	30
14	Поверхностная ионизация.			15	30
15	Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).			15	30
Итого часов		30	30	150	390
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		630 час., 14 зач.ед.			

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

##### Семестр: 3 (Осенний)

##### 1. Представления о квантовых свойствах электрона.

Гипотеза Планка. Гипотеза де-Бройля (волновая гипотеза). Принцип соответствия Бора. Корпускулярно-волновой дуализм.

##### 2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Свойства свободных электронов в вакууме. Волны де-Бройля. Уравнение Шредингера в декартовых координатах для одной частицы и для системы из двух различных частиц. Многочастичная и одночастичная волновые функции, их физический смысл. Стационарные состояния. Разрешенные уровни энергии. Волновая функция электрона, имеющего постоянную потенциальную энергию. Граничные условия для волновой функции.

##### 3. Задача об электроном, налетающем на прямоугольную потенциальную ступеньку.

Надбарьерное отражение. Проникновение квантовой частицы под барьер. Туннельный эффект. Точное выражение для прозрачности прямоугольного потенциального барьера конечной ширины. Приближенное выражение для прозрачности барьера произвольной формы. Прозрачность треугольного барьера.

##### 4. Неразличимость элементарных частиц и принцип запрета Паули.

Классические частицы; квантовые частицы (фермионы и бозоны). Статистика Ферми-Дирака. Функция распределения Ферми-Дирака, ее свойства, график функции. Связь статистики Ферми-Дирака с классической статистикой Больцмана. Уровень Ферми, его физический смысл. Нахождение уровня Ферми в модельных двухуровневых задачах; зависимость положения уровня Ферми от температуры.

## 5. Элементы зонной теории кристаллического твердого тела.

Энергетические зоны. Квантовые числа: номер зоны и квазиимпульс. Период энергетической зоны в пространстве квазиимпульсов. Представление о зонах Бриллюэна. Количество электронных состояний в одной энергетической зоне. Эффективная масса в экстремумах энергетических зон. Запрещенная зона. Перекрывание зон.

## 6. Классификация твердых тел металлы, диэлектрики, полупроводники.

Собственный, донорный и акцепторный полупроводники. Уровень Ферми и работа выхода электронов для металла, собственного полупроводника, донорного полупроводника, акцепторного полупроводника. Зависимость уровня Ферми от температуры для металлов и полупроводников.

## 7. Энергетическая диаграмма твердое тело-вакуум.

Потенциальный барьер на границе раздела металл-вакуум. Уровень энергии вакуума. Контактная разность потенциалов (КРП) между двумя проводящими телами, находящимися в электрическом контакте; природа КРП. Методы измерения контактной разности потенциалов.

### Семестр: 4 (Весенний)

## 8. Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов и полупроводников.

Вывод формулы Ричардсона-Дэшмана. Ток насыщения. Вольтамперные характеристики (ВАХ) вакуумного термоэмиссионного диода. Токопрохождение в вакууме. Начальные токи. Ток термоэлектронной эмиссии, ограниченный пространственным зарядом (закон трех вторых). Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию. Эффект Шоттки. Влияние КРП на вольтамперную характеристику вакуумного диода с термокатодом. Термодинамическая работа выхода. Эффективная работа выхода. Ричардсоновская работа выхода; метод прямых Ричардсона. Средняя по току и средняя по поверхности работа выхода. Методы измерения работы выхода электронов.

## 9. Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.

Энергетические диаграммы для разных режимов ТЭПЭ. Компенсация пространственного заряда. ТЭПЭ, как тепловая машина. КПД идеального ТЭПЭ.

## 10. Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.

Эмиссионная способность, эффективность и срок службы термоэлектронных катодов. Пленочные эмиссионные системы. Эффективные термоэлектронные катоды. Металлопленочные катоды; торий на вольфраме. Оксидный катод.

## 11. Фотоэлектронная эмиссия.

Законы внешнего фотоэффекта; уравнение Эйнштейна. Пороговая длина волны (красная граница). Влияние КРП на вольтамперную характеристику вакуумного диода с фотокатодом. Выражение (без вывода) для плотности тока фотоэмиссии в модели Фаулера вблизи пороговой длины волны. Фотоэлектронная работа выхода, ее опытное определение по методу кривых Фаулера и кривых Дюбриджа. Фотоэлектронная работа выхода для полупроводниковых катодов с различными типами проводимости. Основные характеристики фотоэмиттеров: интегральная чувствительность, спектральная чувствительность, квантовый выход. Эффективные фотоэмиттеры. Представление о фотоэмиттерах с отрицательным электронным сродством.

### Семестр: 5 (Осенний)

## 12. Автоэлектронная эмиссия.

Вывод формулы Фаулера-Нордгейма. Функция Нордгейма. Экспериментальное наблюдение автоэлектронной эмиссии. Определение параметров автокатодов из экспериментальных данных; метод прямых Фаулера-Нордгейма; количественные оценки. Ионная бомбардировка. Типы автоэммиттеров: острый, лезвийный, пленочный, стержневой; особенности их работы. Формфактор. Эффективные автоэлектронные катоды. Природа неустойчивости тока автоэмиссии.

## 13. Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ); автоэлектронный проектор (АЭП); автоионный проектор (АИП); атомный зонд; сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) — принцип действия, конструкция, разрешающая способность, особенности их работы и экспериментальные возможности. Природа высокой разрешающей способности этих приборов.

## 14. Поверхностная ионизация.

Термоионная эмиссия. Формула Саха -Ленгмюра.

## 15. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

Схема экспериментальной установки для исследования ВЭЭ. Кривая задержки и функция распределения электронов по энергиям. Истинно вторичные, упруго отраженные и рассеянные электроны. Особенности вторичной электронной эмиссии полупроводников и диэлектриков по сравнению с металлами. Формула Брюининга (без вывода), ее физический смысл. Кривые подобия. Эффективные вторично-эмиссионные катоды. Электронные умножители, коэффициент усиления. Фотоэлектронные умножители.

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

Учебные лаборатории, оснащенные специализированным экспериментальным оборудованием, предназначенным для практикума по электронике.

Учебные аудитории, оснащенные ученической доской, проектором, экраном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Основы вакуумной техники [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е. П. Шешин ; М-во образования Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2001 .— 124 с.

### Дополнительная литература

1. Вакуумные технологии [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Е. П. Шешин .— Долгопрудный : Интеллект, 2009 .— 504 с.
2. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы [Текст] = [учеб. пособие для вузов] / Н. В. Егоров, Е. П. Шешин .— Долгопрудный : Интеллект, 2011 .— 704 с. - Библиогр. в конце глав. - 800 экз. - ISBN 978-5-91559-027-3 (в пер.).

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

Не используются

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

не предусмотрены.

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

Студент, прослушавший курс лекций и семинаров, выполнивший все лабораторные работы, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций и семинаров, выполнения лабораторных работ, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий и журнала лабораторных работ; активное участие в обсуждении лекций и семинаров;
- 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 и лабораторной работе или к докладчику на семинаре.

**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 вакуумной электроники
<b>курс:</b>	2
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 3 (осенний) - Экзамен
- 4 (весенний) - Дифференцированный зачет
- 5 (осенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчики:**

А.С. Батурин, канд. физ.-мат. наук  
Л.А. Кириченко, канд. физ.-мат. наук  
Н.Е. Никитин, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Е.П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, профессор  
А.А. Чуприк, канд. физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Электроника» обучающийся должен:

### знать:

- теоретические основы описания взаимодействия электронов с веществом и физические механизмы их возникновения в электрическом и магнитном полях.

### уметь:

- рассчитывать распределение электрического и магнитного полей в вакуумных системах и влияние этих полей на движение электронных пучков.

### владеть:

- теоретическими моделями, используемыми для расчётов и описания распределения электрического и магнитного полей в вакуумных системах, и влияние этих полей на движение электронных пучков.

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

Вопросы к коллоквиумам для защиты лабораторных работ:

1. Представления о квантовых свойствах электрона.
2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
3. Задача об электроны, налетающем на прямоугольную потенциальную ступеньку.
4. Неразличимость элементарных частиц и принцип запрета Паули.
5. Элементы зонной теории кристаллического твердого тела.
6. Классификация твердых тел металлы, диэлектрики, полупроводники.
7. Энергетическая диаграмма твердое тело-вакуум.
8. Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов и полупроводников.
9. Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.
10. Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.
11. Фотоэлектронная эмиссия.
12. Автоэлектронная эмиссия.
13. Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.
14. Поверхностная ионизация.
15. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

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

Вопросы к экзамену в 3 семестре

1. Представления о квантовых свойствах электрона.
2. Характеристики плоской монохроматической волны.
3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
4. Задача об электроне, налетающем на прямоугольную потенциальную ступеньку.
5. Элементарные частицы и принцип запрета Паули.
6. Элементы зонной теории кристаллического твердого тела.
7. Классификация твердых тел металлы, диэлектрики, полупроводники.
8. Энергетическая диаграмма твердое тело-вакуум.
9. Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов и полупроводников.
10. Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.
11. Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.
12. Фотоэлектронная эмиссия.
13. Автоэлектронная эмиссия.
14. Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.
15. Поверхностная ионизация.
16. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

Примеры билетов.

Пример №1:

1. Принципы термоэмиссионного преобразования энергии.
2. Основные типы термоэлектронных катодов и их характеристики.
3. Фотоэлектронная эмиссия.

Пример № 2:

1. Приборы, предназначенные для исследований поверхности твердых тел.
2. Поверхностная ионизация.
3. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

#### Критерии оценивания

Оценка отлично (10 баллов) - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (9 баллов) - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (8 баллов) - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо (7 баллов) - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо (6 баллов) - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо (5 баллов) - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно (4 балла) - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно (3 балла) - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно (2 балла) - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно (1 балл) - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

В 3 семестре промежуточная аттестация проводится в ходе экзамена. На экзамене студенту выдается билет, содержащий три вопроса. На подготовку к ответу студенту выделяется не более 60 минут. Опрос студента по билету не должен превышать 60 минут.

В 4 и 5 семестрах промежуточная аттестация проводится в виде дифференцированного зачета на основании оценок, полученных при сдаче лабораторных работ. Необходимо выполнить и сдать все лабораторные работы, предусмотренные программой курса.