

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭЛЕКТРОНИКИ

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета  
Кревчик В.Д.  
(Подпись) (Фамилия, инициалы)  
« 30 » ноября 2015 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### М1.2.6.1 ЭМИССИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

*(Индекс дисциплины по учебному плану, наименование дисциплины)*

Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
*(Код, наименование направления подготовки)*

Магистерская программа «Физика конденсированного состояния вещества»  
*(Наименование магистерской программы)*

Квалификация (степень) выпускника - Магистр

Форма обучения очная  
*(Очная, заочная)*

Пенза. 2015

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения учебной дисциплины «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела» является освоение студентами комплекса теоретических и экспериментальных знаний для решения задач, связанных с эмиссией электронов, включая электронную эмиссию холодных острий при приложении больших внешних электрических полей, а также вторичную электронно-электронную эмиссию.

### 2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры

Дисциплина M1.2.6.1 «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела» является дисциплиной по выбору студента вариативной части (блок M1.2) программы подготовки студентов по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях программы бакалавриата по указанному направлению подготовки по дисциплинам модулей «математика», «общая физика», а также по дисциплинам «квантовая теория», «термодинамика. Статистическая физика», «физика твердого тела».

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при изучении следующих дисциплин:

- «Взаимодействие заряженных частиц с поверхностью твердого тела» - вариативная часть программы подготовки (блок M1.2).

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

#### «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела»

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению:

Коды компетенции	Наименование компетенции	Структурные элементы компетенции (в результате освоения дисциплины обучающийся должен знать, уметь, владеть)
1	2	3
ПК-2	способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.	Знать: физические законы и явления, наблюдаемые на поверхности твердого тела под воздействием высоких температур и электрических полей.
		Уметь: использовать приобретенные знания в технологиях современных наукоемких производств.
		Владеть: навыками и научными приемами при проведении научно-исследовательских работ.
СК-1	способность использования модельных представлений для конкретно поставленной задачи в области теоретической и экспериментальной физики.	Знать: механизмы термоэлектронной, автоэлектронной и вторичной электронной эмиссий.
		Уметь: использовать приобретенные знания в решении научно-исследовательских и производственных задач.
		Владеть: техникой и методами исследования поверхности электронными пучками.

#### 4. Структура и содержание дисциплины «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела»

##### 4.1. Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Наименование разделов и тем дисциплины	Семестр	Недели семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)									Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)							
				Аудиторная работа				Самостоятельная работа					Собеседование (доклады)	коллоквиум	тест	контрольная работа	Реферат	эссе и иные творческие работы	курсовая работа (проект)	др.
				Всего	Лекция	Практические занятия (доклады)	Лабораторные занятия	Всего	Подготовка к аудиторным занятиям (доклады)	Реферат, эссе и др.	Курсовая работа	Подготовка к экзамену								
1.	Раздел 1. Классические и квантовые представления твердых тел.	2	1 ÷ 3	12	6	6	-	12	6	6	-	-	1 ÷ 3	-	-		1 ÷ 3	-	-	-
2.	Раздел 2. Термоэлектронная эмиссия.	2	4 ÷ 8	20	10	10	-	20	10	10	-	-	4 ÷ 8	-	-		4 ÷ 8	-	-	-
3.	Раздел 3. Автоэлектронная эмиссия.	2	9 ÷ 13	20	10	10	-	20	10	10	-	-	9 ÷ 13	-	-		9 ÷ 13	-	-	-
4.	Раздел 4. Вторичная электронная эмиссия.	2	14 ÷ 18	20	10	10	-	20	10	10	-	-	14 ÷ 18	-	-	-	14 ÷ 18	-	-	-
	<i>Курсовая работа (проект)</i>					-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Подготовка к экзамену</i>							36				36								
	Общая трудоемкость, в часах			72	36	36		108	36	36	-	36	Промежуточная аттестация							
													Форма		Семестр					
													Зачет		-					
													Экзамен		2					

## 4.2. Содержание дисциплины

### 4.2.1. Классические и квантовые представления твердых тел.

Классическая теория электропроводности металлов. Законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Законы Дюлонга и Пти, Видемана-Франца. Модель кристалла в волновой механике. Электрон в периодическом поле. Эффективная масса. Закон Зоммерфельда. Невырожденный и сильно вырожденный электронный газ. Температура вырождения. Проводники и диэлектрики с позиций зонной теории. Экситоны и поляроны. Поверхностные уровни Тамма.

### 4.2.2. Термоэлектронная эмиссия.

Термодинамический и статистический выводы уравнения Ричардсона. Термоэлектронная эмиссия полупроводников. Уравнение Козляковской. Распределение термоэлектронов по энергиям. Методы экспериментального изучения распределения термоэлектронов по энергиям: метод задерживающего поля; метод цилиндрического конденсатора Юза-Рожанского. Работа выхода электронов. Термоэлектронные методы экспериментального определения работы выхода: метод полного тока; метод прямых Ричардсона; калориметрический метод. Методы определения работы выхода электронов, связанные с контактной разностью потенциалов: метод Кельвина; метод Томсона-Зисмана; метод смещения вольтамперных характеристик. Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию. Нормальный эффект Шоттки.

### 4.2.3. Автоэлектронная эмиссия.

Теория автоэлектронной эмиссии металлов. Коэффициент прозрачности потенциального барьера и плотность тока автоэлектронной эмиссии при  $T = 0\text{K}$ . Плотность тока термоавтоэлектронной эмиссии. Понятие «горячих» электронов. Экспериментальные исследования автоэлектронной эмиссии. Зависимость тока автоэлектронной эмиссии от электрического поля и от работы выхода эмиттера. Распределение автоэлектронов по энергиям.

### 4.2.4 Вторичная электронная эмиссия.

Методика экспериментального исследования вторичной электронной эмиссии. Особенности исследования электронно-электронной эмиссии диэлектриков. Основные свойства вторичной электронной эмиссии. Полный коэффициент вторичной электронной эмиссии. Упруго отраженные первичные электроны. Неупруго отраженные первичные электроны. Истинно-вторичные электроны. Оже-пики в спектрах вторичных электронов. Теория вторичной электронной эмиссии по Джонкеру. Электронная оже-спектроскопия. Аномальная вторичная электронная эмиссия. Эффект Малтера.

## 5. Образовательные технологии

Форма проведения теоретических занятий – интерактивные лекции с применением мультимедиа-технологий (электронные презентации).

Форма проведения практических занятий - прослушивание и обсуждение докладов по разделам дисциплины (дискуссии по всем темам занятий).

*Занятия, проводимые в интерактивных формах, с использованием интерактивных технологий составляют 50% аудиторных.*

В целях реализации индивидуального подхода к обучению студентов, осуществляющих учебный процесс по собственной траектории в рамках индивидуального рабочего плана, изучение данной дисциплины базируется на следующих возможностях: обеспечение внеаудиторной работы со студентами, в том числе, в электронной образовательной среде с исполь-

зованием соответствующего программного оборудования, дистанционных форм обучения, возможностей интернет-ресурсов, индивидуальных консультаций и т.д.

**6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.  
Оценочные средства для текущего контроля успеваемости,  
промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

**6.1. План самостоятельной работы студентов**

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература (см. п. 7)	Количество часов
3 сем. 1 ÷ 3	Классические и квантовые представления твердых тел.	Подготовка к аудиторным занятиям (Доклады) Реферат	Зонная теория твердого тела. Метод возмущения для высоких термов. Зоны Бриллюэна. Проводники и диэлектрики с позиции зонной теории. Зонная модель примесного полупроводника.	1, 2	12
4 ÷ 8	Термоэлектронная эмиссия	Подготовка к аудиторным занятиям (Доклады) Реферат	Статистический вывод уравнения Ричардсона. Эффект Шотки. Термоэлектронная эмиссия полупроводников. Определение работы выхода по методу Ричардсона. Температурный коэффициент работы выхода. Термодинамический вывод адиабатической и изотермической работ выхода.	1, 2	20
9 ÷ 13	Автоэлектронная эмиссия	Подготовка к аудиторным занятиям (Доклады) Реферат	Вывод уравнения автоэлектронной эмиссии по Фаулеру и Нордгейму. Прозрачность потенциального барьера. Распределение автоэлектронов по энергиям.	1, 2	20
14 ÷ 18	Вторичная электронная эмиссия	Подготовка к аудиторным занятиям (Доклады) Реферат	Опытные закономерности и качественный механизм вторичной электронной эмиссии. Истинно-вторичные электроны. Оже-пики в энергетических спектрах вторичных электронов. Неупруго отраженные электроны. Пики характеристических потерь. Оже-электронная спектроскопия.	1, 2	20

## 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

**Самостоятельная работа** представляет собой задание по разделам дисциплины, представленное в форме доклада с последующим обсуждением.

## 6.3. Материалы для проведения текущего и промежуточного контроля знаний студентов

№ п\п	Вид контроля	Контролируемые темы (разделы)	Компетенции, компоненты которых контролируются
1.	Собеседование (Доклад) Реферат	Раздел 1. Классические и квантовые представления твердых тел.	ПК-2, СК-1
2	Собеседование (Доклад) Реферат	Раздел 2. Термоэлектронная эмиссия.	ПК-2, СК-1
3	Собеседование (Доклад) Реферат	Раздел 3. Автоэлектронная эмиссия.	ПК-2, СК-1
4	Собеседование (Доклад) Реферат	Раздел 4. Вторичная электронная эмиссия.	ПК-2, СК-1

### 6.3.1. Примерный перечень вопросов к собеседованию

1. Кто впервые наблюдал термоэлектронную эмиссию?
2. Уравнение термоэлектронной эмиссии металлов.
3. Уравнение термоэлектронной эмиссии полупроводников.
4. От чего зависит величина тока термоэлектронной эмиссии?
5. Чему равна постоянная Ричардсона?
6. Чему равна кинетическая энергия термоэлектронов в потоке?
7. Чему равна средняя кинетическая энергия термоэлектронов в объеме?
8. Что представляет собой уровень Ферми ?
9. Укажите связь адиабатической и изотермической работы выхода.
10. Что происходит с глубиной потенциальной ямы при увеличении температуры металла?
11. Какая зависимость изотермической работы выхода от температуры?
12. Каким методом определяется изотермическая работа выхода электронов из металла?
13. Каким методом определяется истинная работа выхода электронов из металла?
14. В чем заключается эффект Шоттки?
15. Какую форму имеет потенциальный порог на границе «металл-вакуум»?
16. Напишите формулу для плотности тока автоэлектронной эмиссии.
17. К чему приводит выход электронов при автоэлектронной эмиссии с уровней, лежащих выше уровня ферми?
18. . К чему приводит выход электронов при автоэлектронной эмиссии с уровней, лежащих ниже уровня ферми?
19. Какие электрические поля требуются для автоэлектронной эмиссии?
20. При каких плотностях тока автоэлектронная эмиссия переходит в вакуумную дугу?
21. Плотность тока автоэлектронной эмиссии.
22. Наблюдается ли калориметрический эффект при термоэлектронной эмиссии?

### 6.3.2. Темы рефератов.

1. Исследование поверхности с помощью сканирующей туннельной и Оже-электронной спектроскопии.
2. Исследование электронной структуры поверхности.
3. Эффективные термоэлектронные и вторично-электронные эмиттеры.
4. Термо- и фотоэмиссионные преобразователи энергии.
5. Предпробивные эффекты в термоавтоэлектронной эмиссии.
6. Эмиссия ионов в сильных СВЧ-полях.
7. Полевые исследования материалов ВТСП.
8. Полевые эмиссионные катоды (металлы, полупроводники).
9. Автоэлектронная эмиссия многоострижных катодов.
10. Ионная эмиссия жидкометаллических источников ионов.

### 6.3.3. Перечень вопросов и заданий к экзамену

1. Классическая теория электропроводности металлов по Друде-Лоренцу. Электроны в периодическом поле. Блоховские волны.
2. Опытное определение удельного заряда электрона. Модель кристалла в волновой механике.
3. Электрическая проводимость металлов. Закон Ома в дифференциальной форме. Сильная связь. Метод возмущения для низких термов.
4. Закон Джоуля-Ленца для плотности тепловой мощности. Средняя энергия электрона в металле. Теплоемкость металла.
5. Закон Видемана-Франца. Эффективная масса электрона в периодическом поле. Дырка.
6. Эффект Холла. Слабая связь. Метод возмущения для высоких термов. Закон Бриллюэна.
7. Затруднения классической теории металлов. Полуквантовая модель металла по Френкелю.
8. Сильно вырожденный электронный газ. Зависимость уровня Ферми от температуры.
9. Теория Зоммерфельда.
10. Параметры потенциальной ямы и способы их определения.
11. Невырожденный электронный газ. Температура вырождения.
12. Экситоны и поляроны. Поверхностные уровни Тамма.
13. Проводники и диэлектрики с позиций зонной теории.
14. Распределение термоэлектронов по энергиям. Средние значения кинетической энергии термоэлектронов вне металла в объеме и в потоке.
15. Качественный обзор зонной теории.
16. Зонная модель дефектного (примесного) полупроводника. Зонная модель идеального полупроводника.
17. Качественный анализ причин электропроводности металлов и изоляторов согласно зонной теории.
18. Способ опытного определения эффективной массы электрона.
19. Аддитивное окрашивание солей. F – центры.
20. Определение границ энергетических зон в приближении Бриллюэна.
21. Модулированные плоские волны электронов и причины сопротивления металлов.
22. Правило Матиссена и его объяснение.
23. Электропроводность идеальных полупроводников.
24. Электропроводность дырочных полупроводников.
25. Термодинамический вывод уравнения Ричардсона.
26. Распределение по энергиям термоэлектронов.
27. Статистический вывод уравнения Ричардсона.
28. Нормальный эффект Шоттки.

29. Калориметрический метод определения работы выхода.
30. Методы определения контактной разности потенциалов с помощью термоэлектронной эмиссии.
31. Уравнение термоэлектронной эмиссии полупроводников по Козляковской.
32. Определение работы выхода по Ричардсону.
33. Формальное определение понятия работы выхода электрона.
34. Работа выхода электронов (адиабатическая, изотермическая). Температурный коэффициент работы выхода.
35. Распределение термоэлектронов по энергиям. Средние значения кинетической энергии термоэлектронов вне металла в объеме и в потоке.
36. Экспериментальные исследования автоэлектронной эмиссии. Зависимость тока автоэлектронов от электрического поля и работы выхода. Распределение автоэлектронов по энергиям.
37. Термоэлектронная эмиссия. Плотность тока термоавтоэлектронной эмиссии.
38. Автоэлектронная эмиссия при  $T=0K$ . потенциальный барьер и плотность тока.
39. Влияние объемного заряда на автоэлектронную эмиссию.
40. Температурная поправка к уравнению автоэлектронной эмиссии.
41. Калориметрический эффект при автоэлектронной эмиссии.
42. Уравнение автоэлектронной эмиссии.
43. Распределение автоэлектронов по энергиям.
44. Общее понятие автоэлектронной эмиссии.
45. Вторичная электронно-электронная эмиссия и методы ее экспериментального исследования.
46. Основные свойства вторичной электронно-электронной эмиссии. Опытные закономерности и качественный механизм электронно-электронной эмиссии.
47. Эффект Оже и его применение в физике твердого тела.
48. Истинно-вторичные электроны при электронно-электронной эмиссии. Оже-пики в энергетических спектрах вторичных электронов.
49. Электронная Оже-спектроскопия.
50. Особенности исследования вторичной электронной эмиссии диэлектриков.
51. Аномальная вторичная электронная эмиссия. Эффект Молтера.
52. Теория вторичной электронной эмиссии по Джонкеру.
53. Неупруго отраженные первичные электроны. Спектры характеристических потерь энергии первичных электронов.
54. Упруго отраженные первичные электроны во вторичной электронно-электронной эмиссии.
55. Тонкая структура энергетических спектров вторичной электронной эмиссии

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела»

#### а) основная литература:

1. Евстифеев. В.В. Эмиссионные явления на поверхности твердого тела: учебное пособие/ В. В. Евстифеев; Пенз. Гос. Ун-т.- Пенза: Изд-во Пенз. Гос. Ун-та, 2008. Неограниченный доступ. <http://window.edu.ru/resource/468/66468>

#### б) дополнительная литература:

2. Владимиров Г.Г. Физическая электроника. Эмиссия и взаимодействие частиц с твердым телом: учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013.  
[HTTP://KLEOPATRA.PNZGU.RU/CGI-BIN/IRBIS64R\\_91/CGIIRBIS\\_64.EXE?P21DBN=KATL&I21DBN=KATL\\_PRINT&S21FM T=FULLW\\_PRINT&C21COM=F&Z21MFN=16754](http://KLEOPATRA.PNZGU.RU/CGI-BIN/IRBIS64R_91/CGIIRBIS_64.EXE?P21DBN=KATL&I21DBN=KATL_PRINT&S21FM T=FULLW_PRINT&C21COM=F&Z21MFN=16754)

#### в) Интернет-ресурсы: единое окно доступа к информационным ресурсам

<http://window.edu.ru>; <https://elibrary.ru>



## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

### 1. Оснащенность учебных аудиторий:

Комплект учебной мебели: парты, стол преподавательский, стулья, доска.

Проектор NEC V260X, экран Lumien Master Control, ноутбук HP Pro Book 4710s VQ738EA.

### 2. Программное обеспечение:

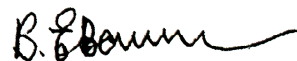
«Microsoft» (подписка Eopen), «Антивирус Касперского»

Рабочая программа дисциплины «Эмиссионные явления на поверхности твердого тела» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

Программу составили:

1. Евстифеев Виктор Васильевич, профессор

(Ф.И.О., должность, подпись)



**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**

Программа одобрена на заседании кафедры «Физика»

Протокол № 3

от « 19 » ноября 2015 года

Зав. кафедрой «Физика»

(подпись, Ф.И.О.)



Семенов М.Б.

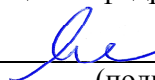
Программа согласована с заведующим выпускающей кафедрой

«Физика»

(название кафедры)

Семенов М.Б. 19.11.2015

(подпись, Ф.И.О., дата)



Программа одобрена методической комиссией факультета приборостроения, информационных технологий и электроники

Протокол № 4

от « 30 » ноября 2015 года

Председатель методической комиссии

факультета приборостроения,

информационных технологий и электроники



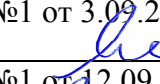
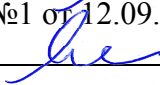
(подпись)

Задера А.В.

(Ф.И.О.)



**Сведения о переутверждении программы на очередной учебный год  
и регистрации изменений**

Учебный Год	Решение кафедры (№ протокола, дата, подпись зав. кафедрой)	Внесенные изменения	Номера листов (страниц)		
			заменен- ных	новых	аннулиро- ванных
2016-2017	№1 от 9.09.2016 г. 	Учебно-методическое и ин- формационное, материальное техническое обеспечение дисциплины	8	9	
2017-2018	№1 от 14.09.2017 г. 	Учебно-методическое и ин- формационное обеспечение дисциплины	8		
2018-2019	Пр.№1 от 3.09.2018 	Изменений нет			
2019-2020	Пр.№1 от 12.09.19 	Изменений нет			