

· Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:  
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

**Эмиссионная электроника**

по направлению подготовки  
**03.03.02 – Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**


Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2021**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.03.13

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

– ОПК-2 - Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1 - Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

– ИОПК-2.2 - Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить понятийный аппарат и физические основы, используемые для описания основных видов эмиссии из конденсированного вещества в вакуум.

– Научиться применять понятийный аппарат и физические основы различных эмиссионных явлений в вакууме для решения научных и практических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в профессиональный модуль по выбору «Физика плазмы».

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 8, зачет с оценкой.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины обучающимся студентам необходимы знания по базовым физико-математическим дисциплинам, термодинамике, статистической физике и квантовой механике.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

– лекции: 24 ч.;

– практические занятия: 24 ч.;

в том числе практическая подготовка: 24 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Введение.

Предмет Эмиссионная электроника (ЭЭ). История развития. Виды эмиссии. Параметры и характеристики потенциального барьера на границе металл-вакуум.

Внутренний поток электронов, падающий границу твердое тело – вакуум и его распределение по энергии.

#### Тема 2. Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ).

Формула Ричардсона - Дэшмана. Поправки к формуле, связанные с коэффициентом отражения, зависимостью работы выхода от температуры, влиянием сильного электрического поля (эффект Шоттки), влиянием объемного заряда эмитируемых частиц (закон Чайлда-Лэнгмюра) и контактной разности потенциалов. Распределение термоэлектронов по скоростям и энергиям. Особенности ТЭЭ из полупроводников. Типы термокатодов.

#### Тема 3. Фотоэлектронная эмиссия (ФЭЭ).

Законы внешнего фотоэффекта. Факторы, влияющие на характеристики фотоэмиттеров. Теория ФЭЭ Фаулера. Особенности ФЭЭ при мощном лазерном возбуждении. ФЭЭ полупроводников. Эффективные фотокатоды. Применение ФЭЭ.

#### Тема 4. Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ).

Энергетический спектр вторичных электронов. Свойства трех фракций ВЭЭ. Истинно вторичные. Простейшая теория ВЭЭ Джонкера. Характеристические пики. Эффективные материалы для ВЭЭ. Применение ВЭЭ.

#### Тема 5. Автоэлектронная эмиссия (АЭЭ).

Квазиклассический подход к определению прозрачности потенциального барьера. Выражение для полного тока АЭЭ. Температурнезависимая часть АЭЭ: формула Фаулера - Нордгейма. Термоавтоэлектронная эмиссия. Температурозависимая поправка к формуле Фаулера - Нордгейма. Практическое использование АЭЭ.

#### Тема 6. Взрывная электронная эмиссия (ВзЭЭ).

ВзЭЭ: природа, причины, механизмы. Тепловая модель взрыва остря. Закономерности взрывных процессов на плоскости. Эрозия. Закономерности, связанные с разлетающейся плазмой. Динамический первеанс. Применение ВзЭЭ.

#### Тема 7. Эмиссия из плазмы.

Схема эмиссионного плазменного источника. Электронно-эмиссионные свойства. Ионно-эмиссионные свойства. Пристеночный слой и равновесный потенциал плазмы. Проблемы отбора электронов и ионов из плазмы.

Тема 8. Эмиссионные явления при взаимодействии ионов с поверхностью твердых тел.

Основные понятия. Вторичная ионная эмиссия. Катодное распыление. Потенциальная и кинетическая ионно-электронная эмиссия. Учет взаимодействия ионов с поверхностью твердых тел на практике. Катодно-распылительные системы.

### **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением бально-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения контрольных работ, заданий и тестов по материалам курса, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение контрольных заданий – 20, тестов – 10. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Зачет с оценкой в восьмом семестре** проводится в письменной форме по экзаменационным билетам. Билет содержит два теоретических вопроса и задачу. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Результаты зачета определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» по величине суммарного балла исходя из результатов ответов на экзамене (60%) и текущей аттестации в течение семестра (40%). Оценка согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 — «отлично»; 85-70 — «хорошо»; 69-45 — «удовлетворительно», менее 45 — «неудовлетворительно».

Билет состоит из двух частей.

Первая часть состоит из двух теоретических вопросов, проверяющих сформированность компетенции ПК 1 в соответствии с индикатором ИПК 1.1. Ответы на оба вопроса даются в развернутой форме.

Вторая часть содержит практический вопрос, оформленный в виде задачи, проверяющий сформированность компетенции ОПК 2 в соответствии с индикатором ИОПК 2.2. Ответ на вопрос второй части дается в письменной форме и предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

Ниже приведены примеры билетов для зачета с оценкой:

### Билет №1.

Вопрос 1. Потенциальный барьер на границе металл-вакуум. Работа выхода электрона в вакуум.

Вопрос 2. Тепловая модель эрозионных процессов при взрывной эмиссии.

Задача. Вычислить длину монохроматического света, падающего на фотоэмиттер с работой выхода  $e\varphi = 1,0$  эВ, если максимальная скорость электронов, выбиваемых с поверхности эмиттера,  $v_{\max} = 500$  км/с.

### Билет №2.

Вопрос 1. "Красная" граница фотокатода и ее связь с работой выхода электрона из металла.

Вопрос 2. Коэффициент прозрачности треугольного потенциального барьера с учетом эффекта Шоттки.

Задача. Оценить высоту потенциального барьера, создаваемого объемным электронным зарядом вблизи поверхности катода, если известно, что работа выхода электронов из катода  $e\varphi = 3,3$  эВ при  $T = 2000$  К, а плотность анодного тока  $j_A = 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22067>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

Вопросы по теме «Термоэлектронная эмиссия»:

1. Формула Ричардсона - Дэшмана. Поправки к формуле, связанные с коэффициентом отражения, зависимостью работы выхода от температуры, влиянием сильного электрического поля (эффект Шоттки), влиянием объемного заряда эмитируемых частиц (закон Чайлда-Лэнгмюра) и контактной разности потенциалов.
2. Распределение термоэлектронов по скоростям и энергиям. Метод тормозящего поля.
3. Особенности ТЭЭ из полупроводников.
4. Типы термокатодов.

Вопросы по теме «Фотоэлектронная эмиссия»:

1. Дать определение явления внутреннего фотоэффекта или фотопроводимости, внешнего фотоэффекта или фотоэлектронной эмиссии (ФЭЭ).
2. Основные законы ФЭЭ (закон Столетова; зависимость тока ФЭЭ от спектрального состава света; красная граница фотоэффекта; зависимость кинетической энергии электронов, покидающих фотокатод от частоты и светового потока; о безынерционности ФЭЭ).
3. Квантовый выход фотокатода (определение и выражение); выражение для числа приходящих на фотокатод фотонов; выражение для кинетической энергии электронов, покинувших металл (через красную границу фотоэмиссии). Пороговая частота и длина волны ФЭЭ.
4. Распределение фотоэлектронов по энергиям (объяснить суть метода тормозящего поля).
5. Спектральные фотоэлектрические характеристики металлов:
  - спектральная чувствительность фотокатода (определение и выражение);
  - определение спектральной характеристики фотокатода;
  - что означает свойство *селективности* фотокатода;
  - влияние температуры фотокатода на вид спектральной характеристики (вблизи области  $\nu = \nu_0$ );
  - влияние внешнего электрического поля на вид спектральной характеристики фотокатода;
6. Многофотонная ФЭЭ металлов (суть процесса; выражение для фототока; что такое люкс-амперная характеристика; объяснить укорочение длительности импульса фототока при многофотонной эмиссии).
7. ФЭЭ полупроводников. Эффективные полупроводниковые фотокатоды.

Вопросы по теме «Вторичная электронная эмиссия»:

1. Дать определение «вторичной электронной эмиссии». Изобразить схематически энергетический спектр вторичных электронов. Записать для каждой области спектра выражение для соответствующего ей коэффициента ( $r$ ,  $\eta$ ,  $\delta$ ), а также выражение для полного коэффициента вторичной электронной эмиссии.
2. От каких факторов зависит (или не зависит) полный коэффициент вторичной электронной эмиссии? Пояснить зависимость коэффициента истинно вторичных электронов от работы выхода и от атомного номера элемента.
3. Объяснить появление характеристических потерь энергии отраженных электронов.
4. Что такое оже-электроны. Пояснить их появление с помощью энергетической диаграммы.

Вопросы по теме «Автоэлектронная эмиссия»:

1. Квазиклассический подход к определению прозрачности потенциального барьера. Выражение для полного тока АЭЭ.
2. Температурнезависимая часть АЭЭ: формула Фаулера - Нордгейма.
3. Термоавтоэлектронная эмиссия. Температурозависимая поправка к формуле Фаулера - Нордгейма.
4. Практическое использование АЭЭ.

Вопросы по теме «Взрывная электронная эмиссия»:

1. Природа, причины и основные механизмы ВЭЭ. Тепловая модель взрыва острия.
2. Закономерности взрывных процессов на плоскости. Эрозия.
3. Закономерности, связанные с разлетающейся плазмой. Динамический первеанс.
4. Применение ВЭЭ.

Вопросы по теме «Эмиссия из плазмы»:

1. Схема эмиссионного плазменного источника. Электронно-эмиссионные свойства. Ионно-эмиссионные свойства.

2. Пристеночный слой и равновесный потенциал плазмы.
3. Проблемы отбора электронов и ионов из плазмы.

Вопросы по теме «Эмиссионные явления при взаимодействии ионов с поверхностью твердых тел»:

1. Вторичная ионная эмиссия.
2. Катодное распыление.
2. Потенциальная и кинетическая ионно-электронная эмиссия.
3. Учет взаимодействия ионов с поверхностью твердых тел на практике. Катодно-распылительные системы.

Перечень задач для решения как на практических занятиях, так и для самостоятельного решения:

Задача 1. Определить плотность тока термоэмиссии (в  $A/m^2$ ), если материал термокатода имеет эффективную работу выхода  $\phi_{эфф}=1,5$  эВ, температура катода  $T_k=900$  К, проницаемость потенциального барьера  $D=0,95$ .

Задача 2. Определить эффективную работу выхода материала термокатода  $\phi_{эфф}$ , если температура катода  $T_k=900$  К, проницаемость потенциального барьера  $D=0,95$ , а плотность тока термоэмиссии  $J=3,85 \cdot 10^3$   $A/m^2$ . Определить ток эмиссии термокатода, если площадь катода  $S=0,1$   $cm^2$ .

Задача 3. Температуру термокатода  $T_k=1100$  К понизили до температуры  $T_k=600$  К. Как при этом изменилась плотность тока термоэмиссии, если  $\phi_{эфф}=1,2$  эВ.

Задача 4. Термокатод имеет плотность тока  $J=200$   $A/m^2$  при  $T_k=1800$  К. Определите эффективную работу выхода  $\phi_{эфф}$ .

Задача 5. Определить ток эмиссии термокатода, если  $T_k=1500$  К, площадь катода  $S=0,3$   $cm^2$ , а эффективная работа выхода составляет  $\phi_{эфф}=1,5$  эВ.

Задача 6. Определить плотность тока термоэмиссии (в  $A/m^2$ ), если температура катода  $T_k=2000$  К, эффективная работа выхода материала катода  $\phi_{эфф}=2$  эВ, проницаемость  $D=1$ , а напряженность электрического поля у поверхности катода составляет  $E=8 \cdot 10^7$  В/м.

Задача 7. При какой напряженности электрического поля можно получить плотность тока эмиссии  $10^3$   $A/cm^2$ , если  $T_k=1800$  К, а  $\phi_{эфф}=2,8$  эВ. На сколько электрон-вольт изменится при этом работа выхода?

Задача 8. Термокатод имеет плотность тока  $10$   $A/cm^2$  при  $T_k=1000$  К. Определите эффективную работу выхода  $\phi_{эфф}$ ?

Задача 9. Какова работа выхода электрона из металла, если повышение температуры накала от  $2000$  К до  $2001$  К увеличивает ток эмиссии катода на 1%?

Задача 10. Ток эмиссии катода с площадью поверхности  $S_k=0,1$   $cm^2$  равен  $0,5$  А при  $T_k=1400$  К. Определить  $\phi_{эфф}$ .

Задача 11. Как изменится эффективная работа выхода, если между катодом и анодом приложено напряжение  $50$  кВ, а расстояние между катодом и анодом  $0,5$  см? ( $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м)?

Задача 12. Оценить высоту потенциального барьера, создаваемого объемным электронным зарядом вблизи поверхности катода, если известно, что эффективная работа выхода электронов из катода  $\phi_{эфф}=3,3$  эВ при  $T=2000$  К, а плотность анодного тока равна  $10^{-3}$   $A/cm^2$ .

Задача 13. За счет эффекта Шоттки работа выхода электронов уменьшилась на  $0,1$  эВ. Чему равно ускоряющее электрическое поле у поверхности катода?

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.  
Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к зачету.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение:

1. ТЭЭ из полупроводников.
2. Типы термокатодов.
3. ФЭЭ полупроводников.
4. Эффективные фотокатоды.
5. Применение ФЭЭ.
6. Эффективные материалы для ВЭЭ.
7. Применение ВЭЭ.
8. Практическое использование АЭЭ.
9. Применение ВЭЭ.
10. Катодно-распылительные системы.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Проскуровский Д.И. Эмиссионная электроника: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2010.
2. Евстифеев В. В. Эмиссионные явления на поверхности твердого тела. Изд. ПГУ, Пенза 2008.
3. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1982.
4. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1979.

б) дополнительная литература:

1. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966.
2. Елинсон М.И., Г.Ф. Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. – М., 1958.
3. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984.
4. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.

в) ресурсы сети Интернет:

1. В.В. Евстифеев. Эмиссионные явления на поверхности твердого тела. Уч. пособие. – Пенза, 2008 - <http://window.edu.ru/resource/468/66468/files/stup518.pdf>

## 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

#### **15. Информация о разработчиках**

Шипилова Анна Викторовна, кандидат технических наук, кафедра физики плазмы физического факультета ТГУ, доцент.