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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Эмиссионная электроника

по направлению подготовки
03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск–2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

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

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

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-2.1 – Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

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

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

– тест;

– семинары.

Тест (ИОПК-2.1, ИПК-1.1):

Тест по курсу «Эмиссионная электроника»

Вопрос 1. На рис.1 приведено распределение электронов по энергиям в металле. Какая из кривых (1 или 2) соответствует случаю при T=0, а какая – случаю T > 0?

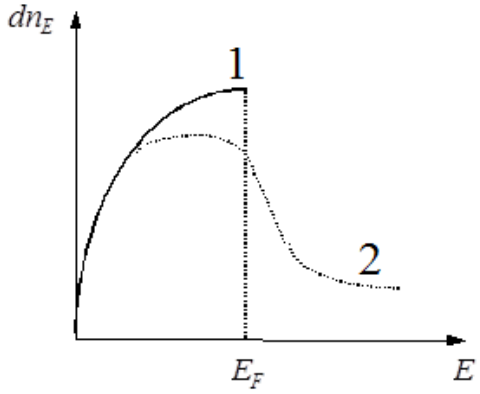

Рисунок 1 – Распределение электронов по энергиям в металле.

Ответ:

А: 1 - T=0; 2 - T > 0

Б: 1 - T > 0; 2 - T=0

Вопрос 2. Энергия Ферми – это:

Ответ:

А: это граница между зоной проводимости и валентной зоной.

Б: эта энергия, с которой электрон покидает твердое тело.

В: это максимальное значение энергии, которое могут иметь электроны в металле при абсолютном нуле температуры.

Г: это уровень, который отделяет полностью заполненные уровни от полностью свободных.

Вопрос 3. Функция распределения Ферми –Дирака описывает $f(W)=\frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}}+1}$.

Ответ:
А: зависимость энергии Ферми от температуры.
Б: распределение электронов по энергиям вырожденного электронного газа.

Вопрос 4. Что на рис. 2 обозначено символом W_a:

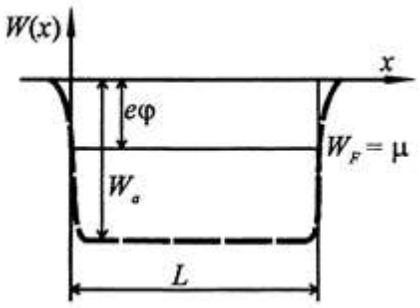

Рисунок 2 – Распределение потенциала.

Ответ:
А: уровень Ферми
Б: полная работа выхода
В: эффективная работа выхода
Г: минимальная энергия электрона, покидающего твердое тело.

Вопрос 5.
Работу, которую нужно совершить для удаления из кристалла электрона с энергией, соответствующей энергии ферми называют....

Ответ:
А: полной работой выхода
Б: термодинамической работой выхода
В: эффективной работой выхода

Вопрос 6. На рис. 3 приведена энергетическая диаграмма, поясняющая различные виды эмиссии электронов из металла. Каким видам эмиссии соответствуют переходы 1 и 2, изображенные на диаграмме?

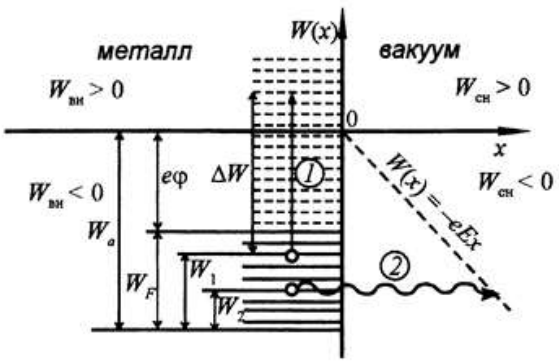

Рисунок 3 – Энергетическая диаграмма, поясняющая различные виды эмиссии.

Ответ:
А: переход 1 – отображает виды эмиссии без предварительного возбуждения, переход 2 - отображает виды эмиссии с предварительным возбуждением.
Б: переход 1 – отображает виды эмиссии с предварительным возбуждением, переход 2 - отображает виды эмиссии без предварительного возбуждения.

В: оба отражают виды эмиссии без предварительного возбуждения.
Г: оба отражают виды эмиссии с предварительным возбуждением.

Вопрос 7. Какие из перечисленных видов эмиссии относятся к видам эмиссии с предварительным возбуждением?
Ответ:
А: фотоэлектронная эмиссия
Б: автоэлектронная эмиссия
В: вторичная электронная эмиссия

Вопрос 8. Термоэлектронная эмиссия это:
Ответ:
А: испускание электронов под действием падающего на поверхность тела электромагнитного излучения.
Б: испускание электронов нагретыми металлами.

Вопрос 9. Изменение работы выхода под действием внешнего электрического поля получило название «эффект Шоттки». Что происходит с формой потенциального барьера при наложении внешнего электрического поля?
Ответ:
А: уменьшение высоты потенциального барьера.
Б: процесс эмиссии электронов полностью прекратиться.
В: высота потенциального барьера останется неизменной, но при этом энергия электронов внутри кристалла существенно вырастет и, соответственно эмиссионный ток увеличится.

Вопрос 10. Красной границей фотоэффекта называется:
Ответ:
А: это определенное для каждого типа материалов значение длины волны, при котором будет происходить фотоэмиссия.
Б: максимальную длину волны, при которой еще наблюдается фотоэффект.
В: минимальная энергия падающего на кристалл кванта.

Вопрос 11. На рис. 4 приведен энергетический спектр вторичных электронов. Какая из областей соответствует истино вторичным электронам?

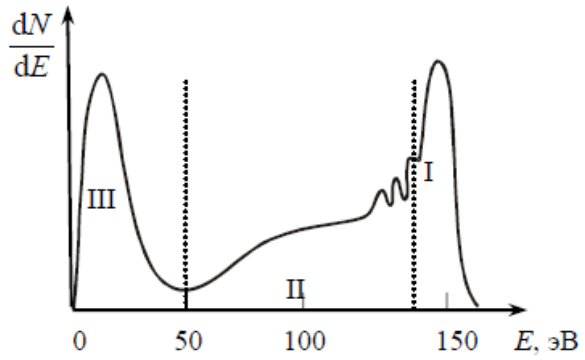

Рисунок 4 – Энергетический спектр вторичных электронов.

Ответ:
А: I
Б: II
В: III

Вопрос 12. Выберите верные утверждения:
Ответ:
А: полный коэффициент вторичной электронной эмиссии сильно зависит от шероховатости поверхности тела (мишени).

Б: полный коэффициент вторичной электронной эмиссии величина постоянная для всех материалов.
В: полный коэффициент вторичной электронной эмиссии практически не зависит от температуры тела (мишени).
Г: полный коэффициент вторичной электронной эмиссии возрастает по экспоненциальному закону с увеличением угла падения первичных электронов на тело (мишень).

Ключи: 1) А; 2) В; 3) Б; 4) Б; 5) Б; 6) Б; 7) А, В; 8) Б; 9) А; 10) Б; 11) В; 12) А, В, Г.

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающий ответил правильно как минимум на 10 вопросов.

Семинары (ИОПК-2.1, ИПК-1.1)
Темы семинаров:
1. Термоэлектронная эмиссия.
2. Фотоэлектронная эмиссия.
3. Автоэлектронная эмиссия.
4. Вторичная электронная эмиссия.

По результатам семинарских занятий знания студентов оцениваются по следующим критериям: активность участия в обсуждении вопросов; демонстрация знаний по изученному теоретическому материалу; владение профессиональной терминологией; способность выстраивать логическую речь при ответах на поставленные вопросы.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Экзамен в восьмом семестре проводится в устной форме по экзаменационным билетам. Билет состоит из двух частей. Первая часть включает в себя два теоретических вопроса из списка контрольных вопросов по курсу, проверяющих сформированность компетенции ПК-1 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1. Ответы на теоретические вопросы даются в развернутой форме. Вторая часть содержит практический вопрос, оформленный в виде задачи, проверяющий сформированность компетенции ОПК-2 в соответствии с индикатором ИОПК-2.1. Ответ на вопрос второй части дается в письменной форме и предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

После ответа на билет студенту могут быть заданы уточняющие или дополнительные вопросы из открытого перечня вопросов экзаменационных билетов, направленные на проверку достижения ИОПК-2.1 и ИПК-1.1. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Критерии оценивания:

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

2. К прохождению итогового контроля (промежуточной аттестации) допускаются студенты, получившие по результатам текущего контроля успеваемости в течение семестра не менее 35 баллов. Текущая аттестация включает: выполнение теста - 20 баллов и участие в семинарах – 20 баллов. При этом в течение семестра проводится четыре семинара. За участие в каждом из них студент получает по 5 баллов.

Список контрольных вопросов по курсу «Эмиссионная электроника»:

1. Физический смысл уровня (или энергии) Ферми?
2. Записать выражение для энергии Ферми. От какой величины в основном зависит значение энергии Ферми?
3. Изобразить график распределения электронов по энергиям в металле при T=0 и T>>0. Чему равна вероятность заполнения электронами состояний с энергией $W<W_F$ и $W>W_F$ при T=0 ?
4. Изобразить прямоугольный потенциальный барьер на границе твердое тело-вакуум. Указать на нем и дать определение понятиям «полная работа выхода» и «эффективная работа выхода».
5. Указать две причины возникновения потенциального барьера на границе твердое тело/вакуум, а следовательно две составляющие полной работы выхода? Объяснить возникновение составляющей полной работы - $W_{из}$ (работа, совершаемая электроном при движении в области действия сил изображения)? Объяснить возникновение составляющей полной работы - $W_{дв}$ (работа, совершаемая электроном при прохождении двойного слоя)?
6. Изобразить форму потенциального барьера, учитывающего действие сил двойного слоя и сил изображения.
7. Изобразить графически сопоставление потенциального барьера с распределением электронов по энергиям. Укажите на нем уровень энергии Ферми, полную и эффективную работу выхода электрона.
8. Изобразить на энергетической диаграмме и объяснить «переход 1», отображающий виды эмиссии с предварительным возбуждением электронов. Перечислить виды эмиссии с предварительным возбуждением электронов (с указанием способа возбуждения электронов металла).
9. Изобразить на энергетической диаграмме и объяснить «переход 2», отображающий виды эмиссии без предварительного возбуждения электронов. Перечислите кратко основные виды эмиссии без предварительного возбуждения электронов.
10. Дать определение термоэлектронной эмиссии. Записать выражение для плотности тока термоэлектронной эмиссии.
11. Объяснить наличие в выражении для плотности тока термоэлектронной эмиссии коэффициента прозрачности D ?
12. Объяснить необходимость учета температурной зависимости работы выхода для определения плотности тока термоэмиссии?
13. Эффект Шоттки. Записать уравнение Ричардсона-Дэшмана с учетом действия внешнего электрического поля.
14. Перечислить типы термокатодов. Что такое эффективность и срок службы катода?
15. Дать определение фотоэлектронной эмиссии, внутреннего и внешнего фотоэффекта.
16. Сформулировать пять основных законов фотоэлектронной эмиссии.
17. Записать и объяснить уравнение баланса энергии электрона, участвующего в эмиссии (уравнение для кинетической энергии электрона, покинувшего металл, в том числе через красную границу ФЭЭ). Записать выражение для работы выхода фотокатода через красную границу (ν_0).
18. Дать определение и записать выражение для квантового выхода фотокатода. Записать выражение для числа фотонов приходящих на фотокатод в единицу времени через световой поток и энергию фотонов. Дать определения и записать выражения для квантового выхода (или квантовой чувствительности) фотокатода (Y) и спектральной чувствительности фотокатода (η_ν).
19. Распределение электронов по энергиям. Метод тормозящего поля.
20. Изобразить форму спектральной характеристики металлов. Объяснить вид кривой при T=0. Что такое селективный максимум. Объяснить влияние температуры фотокатода и внешнего электрического поля на поведение кривой вблизи граничной частоты. Записать

зависимость работы выхода от напряженности электрического поля и уравнение для граничной частоты.
21. Дать определение многофотонной ФЭЭ, изобразить схематически, записать выражение для фототока.
22. ФЭЭ полупроводников. Записать условие появления ФЭЭ из беспримесного полупроводника, изобразить данное условие на энергетической диаграмме.
23. Для случая ФЭЭ полупроводников дать определение фотоэлектронной работы выхода, уметь отметить ее на энергетической диаграмме. Как соотносятся между собой фотоэлектронная и термоэлектронная работы выхода и почему. Записать выражение для термоэлектронной работы выхода через фотоэлектронную работу выхода.
24. Изобразить энергетические диаграммы для полупроводников *n*-типа и *p*-типа для пояснения эффекта ФЭЭ. Записать условия, необходимые для появления ФЭЭ из примесных полупровводников, из которых может быть определена граничная частота. Записать соотношения между термо- и фотоэлектронной работами выхода для примесных полупроводников.
25. Как можно повысить фотоэлектронную эффективность полупроводника?
26. Дать определение АЭЭ. Пояснить процесс АЭЭ на энергетической диаграмме. При каком условии возможно туннелирование электрона через потенциальный барьер.
27. Как изменяется энергия электрона после выхода его из «туннеля»?
28. Пояснить, почему автоэмиссионные катоды изготавливают в виде острия из тугоплавких металлов, а эксперимент проводят в условиях сверхвысокого вакуума.
29. Пояснить необходимость введения функции Нордгейма в выражение для прозрачности барьера?
30. Какие факторы ограничивают максимальную величину напряженности внешнего электрического поля, создаваемого вблизи поверхности катода?
31.Объяснить (с помощью энергетической диаграммы электронов в металле) влияние электрического поля и температуры на спектр эмитированных электронов (выделить на диаграмме четыре группы электронов и объяснить вклад каждой из них в общий ток автоэмиссии).
32. Изобразить и пояснить распределение эмитированных из металла электронов по энергиям при различных соотношениях между электрическим полем (E) и температурой катода (T).
33. Дать определение ВЭЭ. Из чего состоит поток вторичных электронов.
34. Распределение вторичных электронов по энергиям. Записать выражения для коэффициентов упруго отраженных, неупруго отраженных и истинно-вторичных электронов; полный коэффициент и полный ток ВЭЭ на отражение; коэффициент ВЭЭ «на прострел».
35. От каких параметров вещества или среды зависит коэффициент ВЭЭ. Пояснить.
36. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов и от угла падения первичных электронов.
37. Временная дисперсия ВЭЭ.
38. Оже-электронная эмиссия.

Примеры экзаменационных билетов:

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 $e\varphi_э$= 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 K, а плотность анодного тока $j_A = 10^{-3}$ А/см^2.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Теоретические вопросы (ИОПК-2.1, ИПК-1.1):

1. Изобразите прямоугольный потенциальный барьер на границе твердое тело-вакуум. Укажите на нем и дайте определение понятиям «полная работа выхода» и «эффективная работа выхода».

Ответ должен быть представлен графическим изображением прямоугольного потенциального барьера на границе твердое тело-вакуум с указанием на нем полной и эффективной работы выхода.

2. Укажите две причины возникновения потенциального барьера на границе твердое тело/вакуум, а следовательно две составляющие полной работы выхода.

Ответ должен включать объяснение причин возникновения двух составляющих полной работы выхода.

3. Объясните возникновение составляющей полной работы $W_{из}$ (работа, совершаемая электроном при движении в области действия сил изображения).

Ответ должен заключаться в объяснении причины возникновения составляющей, связанной с действием сил зеркального изображения.

4. Объясните возникновение составляющей полной работы $W_{дв}$ (работа, совершаемая электроном при прохождении двойного слоя).

Ответ должен заключаться в объяснении причины возникновения составляющей, связанной с действием сил двойного слоя.

5. Изобразите форму потенциального барьера, учитывающую действие сил двойного слоя и сил изображения.

Ответ должен быть представлен графическим рисунком.

6. Изобразите графически сопоставление потенциального барьера с распределением электронов по энергиям. Укажите на нем уровень энергии Ферми, полную и эффективную работу выхода электрона.

Ответ должен заключаться в построении диаграммы, объединяющей форму потенциального барьера и распределение электронов по энергиям с указанием на ней уровня энергии Ферми, полной и эффективной работы выхода электрона.

7. Изобразите на энергетической диаграмме и объясните «переход 1», отображающий виды эмиссии с предварительным возбуждением электронов.

Ответ должен заключаться в построении диаграммы, объединяющей форму потенциального барьера и распределение электронов по энергиям с указанием на ней видов эмиссии с предварительным возбуждением электронов.

8. Перечислите виды эмиссии с предварительным возбуждением электронов (с указанием способа возбуждения электронов металла).

Ответ должен содержать перечисление видов эмиссии с предварительным возбуждением электронов с указанием способа возбуждения электронов металла.

9. Изобразите на энергетической диаграмме и объясните «переход 2», отображающий виды эмиссии без предварительного возбуждения электронов.

Ответ должен заключаться в построении диаграммы, объединяющей форму потенциального барьера и распределение электронов по энергиям с указанием на ней видов эмиссии без предварительного возбуждения электронов.

10. Перечислите кратко основные виды эмиссии без предварительного возбуждения электронов.

Ответ должен содержать перечисление видов эмиссии без предварительного возбуждения электронов.

11. Приведите примеры комбинированных видов эмиссии электронов.

Ответ должен содержать перечисление комбинированных видов эмиссии электронов.

Задачи (ИОПК-2.1, ИПК-1.1):

Задача 1. Определить плотность тока термоэмиссии (в $А/м^2$), если материал термокатода имеет эффективную работу выхода $\varphi_{эфф}$=1,5 эВ, температура катода $T_к$=900 К, проницаемость потенциального барьера D=0,95.
Ответ: плотность тока термоэмиссии составляет $3,85 \cdot 10^{-3}$ $А/м^2$.

Задача 2. Определить эффективную работу выхода материала термокатода $\varphi_{эфф}$, если температура катода $T_К = 900$ К, проницаемость потенциального барьера D = 0,95, а плотность тока термоэмиссии $Jэ=3,85 \cdot 10^3$ $А/м^2$. Определить ток эмиссии термокатода, если площадь катода S = 0,1 $см^2$.

Ответ: эффективная работа выхода составляет 1,5 эВ.

Задача 3. Определить плотность тока термоэмиссии (в $А/м^2$), если температура катода $T_к = 2000$ К, эффективная работа выхода материала катода $\varphi_{эфф} = 2$ эВ, проницаемость D = 1 , а напряженность электрического поля у поверхности катода составляет $E = 8 \cdot 10^7$ В/м.

Ответ: плотность тока термоэмиссии составляет $3,24 \cdot 10^8$ $А/м^2$.

Задача 4. Оценить высоту потенциального барьера, создаваемого объемным электронным зарядом вблизи поверхности катода, если известно, что эффективная работа выхода электронов из катода $\varphi_{эфф}$ = 3,3 эВ при Т = 2000 К, а плотность анодного тока равна 10^{-3} $А/см^2$.

Ответ: высота потенциального барьера составляет 1,34 эВю
Задача 5. За счет эффекта Шоттки работа выхода электронов уменьшилась на 0,1 эВ. Чему равно ускоряющее электрическое поле у поверхности катода?
Ответ: ускоряющее электрическое поле у поверхности катода равно $6,93 \cdot 10^4$ $В/м^2$.

Информация о разработчиках

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