

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

« 21 » марта 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Физическая электроника

Physical electronics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физическая электроника
(103-01-00-135-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Физическая электроника.

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физической электроники.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.5 Физическая электроника; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего **108** часов, из которых **54** часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (**50** часов занятия лекционного типа, **4** часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), **54** часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Корпускулярная оптика Законы движения заряженных частиц в статических электрических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Оптический и механический подходы при решении задач корпускулярной оптики. Законы подобия. Параксиальные пучки. Основные свойства аксиально симметричных электростатических и магнитных полей. Теорема Буша и закон сохранения углового момента. Теорема Лагранжа-Гельмгольца и ее следствия.	11			5			5	6		6

Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза-диафрагма. Одиночная линза, иммерсионный объектив и иммерсионная линза. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Линза Глазера. Аберрации линз. Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Конструкции электронных микроскопов. Особенности электрооптических систем. Корпускулярные микроскопы. Динамика заряженной частицы в переменных во времени полях; движение частиц в полях электромагнитных волн, захват и ускорение, ускорение на биениях.										
Тема 2. Эмиссионная электроника Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Вакуумный диод с термокатодом и его вольт-амперная характеристика. Эмиссия под воздействием частиц. Взаимодействие электронов подпороговых энергий с твердым телом. Упругие	11			5			5	6		6

взаимодействия, сечения процессов. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизмы распыления. Формула Зигмунда для коэффициента распыления. Вторичная ионная эмиссия. Коэффициент вторичной ионной эмиссии. Рассеяние ионов низких и средних энергий. Обратное резерфордовское рассеяние. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия. Ионно-фотонная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии. Автоэлектронная, экзоэлектронная и взрывная эмиссия.										
Тема 3. Вакуумная электроника Формирование электронных пучков большой плотности. Пушка Пирса. Ограничение тока пространственным зарядом. Предельный ток нейтрализованных пучков - ток Пирса. Устойчивость пучков в дрейфовом пространстве,	17			8			8	9		9

неустойчивости Пирса, диокотронная и токово-конвективная неустойчивости, слипинг-неустойчивость. Спонтанное и вынужденное излучение потоков заряженных частиц. Черенковское, циклотронное (синхротронное) и ондуляторное излучения. Нормальный и аномальный эффекты Допплера. Томсоновское рассеяние. Источники СВЧ-излучения, основанные на вынужденном излучении потоков заряженных частиц; лампа бегущей волны (ЛБВ), магнетроны, гиратроны, убитроны, виркаторы, лазеры на свободных электронах. Релятивистские эффекты, умножение частоты, параметрические усилители и генераторы. Волны пространственного заряда. Пространственная и энергетическая группировки потоков частиц. Нелинейные механизмы насыщения излучения - захват частиц в волнах пространственного заряда, сдвиг резонансной частоты излучения. КПД СВЧ-источников излучения.										
Тема 4. Электроника твердого тела	24			12			12	12		12

(Физические основы электроники твердого тела. Особенности динамики электрона в идеальном твердом теле. Волновая функция, квазиимпульс, зоны Бриллюэна, зонный энергетический спектр, закон дисперсии. Энергетический спектр электрона в кристалле во внешних полях (электрическом и магнитном). Полуклассическая модель динамики электрона в кристалле, границы применимости. Дырки как способ описания ансамбля электронов, свойства и законы движения дырок. Энергетический спектр электрона в ограниченном кристалле. Условия локализации. Локализованные состояния Тамма. Поверхностные состояния Шокли. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект). Типы точечных дефектов в кристаллах. Акцепторные и донорные примеси в полупроводниках. Водородоподобная модель примесного центра. Неупорядоченные системы - аморфные полупроводники. Понятие идеального аморфного										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

твёрдого тела (идеального стекла). Случайная структура и случайное поле. Энергетический спектр неупорядоченных систем (без случайного поля и со случайным полем). Дефекты в аморфных материалах. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Обоснование применения статистики Ферми-Дирака к электронам в твёрдом теле (идеальном). Статистика примесных состояний. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Уровень электрохимического потенциала и концентрация свободных и связанных носителей в вырожденных полупроводниках: в собственном, с одним типом примеси, в частично компенсированном. Явление компенсации. Явления переноса заряда в твёрдом теле. Интеграл столкновений. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электропроводность полупроводников и металлов. Электропроводность в сильных электрических полях. Эффект Ганна. Классический и квантовый размерный эффекты в электропроводности. Электропроводность в										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

неупорядоченных системах. Прыжковая проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми (закон Мотта) и хвостах плотности состояний вблизи краев щели подвижности. Неравновесные носители заряда в полупроводниках и диэлектриках. Генерация и рекомбинация. Механизмы рекомбинации. Диффузия и дрейф неравновесных носителей, соотношение Эйнштейна. Плотность тока и градиент уровня Ферми. Уравнение непрерывности, анализ частных случаев локального возбуждения и инжекции. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело - вакуум. Контакт металл - полупроводник. Диоды Шоттки. Диодная и диффузионная теории выпрямления. Электронно-дырочный переход. Количественная теория инжекции и экстракции неосновных носителей. Выпрямление и усиление с помощью р-п переходов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода. Туннельный эффект в р-п переходах.										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и отражение электромагнитных волн свободными носителями заряда. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона. Прямые и не прямые переходы. Разрешенные и запрещенные переходы. Спектральные характеристики поглощения кристаллами. Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры. Оптические свойства аморфных полупроводников. Фотоэффект в p-n переходах. Солнечные батареи. Преобразование электрических сигналов в световые. Нанoeлектроника. Квантовые ямы и сверхрешетки. Квантовые нити и квантовые точки. Электронные состояния в наноструктурах. Транспортные явления в низкоразмерных системах. Оптические свойства наноструктур. Одноэлектронные явления в нанoeлектронных										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

устройствах. Нанотехнология. Приборы наноэлектроники.										
Тема 5. Физические основы электроники поверхности и пленочной электроники Энергетическая диаграмма реальной поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость. Влияние адсорбированных частиц на поверхностную проводимость. Полевые транзисторы. Проблема микроминиатюризации элементов микроэлектроники. Полупроводниковые, пленочные и гибридные интегральные схемы. Фотолитография, рентгеновская и электронная литографии. Особенности структуры пленок, связанные с характером зарождения. Текстурированные и эпитаксиальные пленки. Структурные несовершенства. Явления переноса в тонких металлических пленках. Дисперсные пленки. Сплошные пленки. Размерные эффекты в пленках. Тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки. Диэлектрические потери.	12			6			6	6		6

Токопрохождение через диэлектрические слои. Туннелирование. Надбарьерная эмиссия электронов. Токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ). Пленочные активные элементы. Использование неравновесных (горячих) электронов в металлических пленках. Активные элементы, основанные на использовании характеристик с отрицательным сопротивлением. Аналоговые триоды на основе ТОПЗ в диэлектриках. Пленочный полевой триод.										
Тема 6. Методы анализа поверхности и тонких пленок Методики определения плотности поверхностных состояний, основанные на эффекте поля (C-V метод и метод, основанный на изменении поверхностной проводимости). Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор). Дифракция медленных и быстрых электронов (на просвет и	13			6			6	7		7

отражение) как методы исследования структуры поверхности. Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии. Фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС и УФЭС). Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС или ЭСХА - электронная спектроскопия для химического анализа) и конструкции приборов. Химические сдвиги уровней. Количественная РФЭС. Спектроскопия характеристических потерь энергии (СХПЭЭ). Конструкции приборов. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в твердом теле. Количественная СХПЭЭ. Растровая электронная микроскопия. Режимы работы. Особенности формирования контраста. Рентгеновский микроанализ. Конструкции растровых электронных микроскопов и микроанализаторов. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы. Конструкция микроскопов. Применения.										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Методы ионной спектроскопии. Масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режим МСВИ. Ионно-нейтрализационная спектроскопия. Обратное резерфордовское рассеяние. Спектроскопия рассеяния ионов низких и средних энергий.										
Тема 7. Функциональная электроника Магнетоэлектроника. Цилиндрические магнитные домены. Магнитные запоминающие устройства: на ферритах и на тонких пленках. Акустоэлектроника: взаимодействие электронов с длинно-волновыми акустическими колебаниями решетки, акустоэлектрический эффект, усиление ультразвуковых волн. Акустоэлектрические явления на поверхностных волнах и их практические применения - малогабаритные линии задержки, усилители и генераторы электрических колебаний. Молекулярная электроника. Основные принципы молекулярной электроники. Электронные возбуждения, используемые для передачи и хранения информации в молекулярных системах.	16			8			8	8		8

Перспективы одномерных и квазиодномерных систем, структурная неустойчивость одномерных проводников, переходы Пайерлса и Мотта-Хаббарда. Электронные возбуждения в одномерных системах, солитонная проводимость. Фотопроводимость, нелинейные оптические свойства. Молекулярные полупроводники - полиацетилен и полидиацетилен: структура, свойства, легирование. Приборы молекулярной электроники. Криоэлектроника. Электронные свойства твердых тел (металлы, диэлектрики, полупроводники) при низких температурах. Явление сверхпроводимости. Эффект Мейснера. Особенности туннелирования в условиях сверхпроводимости. Высокотемпературная сверхпроводимость. Свойства и параметры сверхпроводников с высокой T_k. Макроскопические квантовые эффекты сверхпроводимости. Квантование магнитного потока. Эффект Джозефсона. Типы джозефсоновских переходов. Аналоговые устройства на эффектах Джозефсона.										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Стандарты напряжения, сквиды, приемные СВЧ-устройства. Цифровые ячейки логики и памяти. Проблемы создания больших интегральных схем (БИС). Особенности электронных устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.										
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	4					4	4			
Итого	108			50		4	54	54		54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература

1. Твердотельная электроника: Учебное пособие / Давыдов В. Н. – 2011. 175 с.
2. Твердотельная электроника и микроэлектроника: Учебное пособие / Берикашвили В.Ш., Воробьев С.А. Издательство: Издательство МГОУ, 2010 г.
3. Физические основы твердотельной электроники. Учебное пособие/Спиридонов О.П., 2008, 191 с.
4. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.
5. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Вынужденное излучение сильнотоочных релятивистских электронных пучков // УФН. 1987. Т. 152. Вып. 2.
6. Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
7. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М.: Изд-во МГУ, 1986.
8. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
9. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела / Под ред. Л. Фирменса. М.: Мир, 1981.
10. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС / Под ред. А. Бригса, М.В. Сиха. М.: Мир, 1987.
11. Т. Альфорд, Л.Фелдман, Д.Майер. "Фундаментальные основы анализа нанопленок". М.: Научный мир, 2012.
12. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Изд. Ин-та физики микроструктур РАН, Н. Новгород, 2004.
13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. "Введение в физику поверхности". М., Наука, 2006.
14. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применения / под ред. Уэйли Жу, Жонг Лин Уанг; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 582 с.
15. И.К. Гайнуллин, И.Ф. Уразгильдин // "Электронный обмен и неупругие процессы при взаимодействии ионов с поверхностью". М.: Физический факультет МГУ, 2010. 80 с.
16. Физические принципы электронной микроскопии / Р.Ф. Эгертон М.: Техносфера, 2010. 304 с.

17. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия/ Д. Синдо, Т. Оикава М.: Техносфера, 2006. 256 с.
18. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин, А.М. Филатов, А.Г. Ульяненок – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
19. Ван Дузер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей. М.: Радио и связь, 1984.
20. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра // УФН. 2000. Т. 170.
21. Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // УФН. 2000. Т. 170.
22. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М., 2000.
23. А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. Электронная микроскопия. Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
24. М.В.Кузнецов «Современные методы исследования поверхности твердых тел: фотоэлектронная спектроскопия и дифракция, СТМ-микроскопия», институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, 2010

Дополнительная литература:

1. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М.: Мир, 1982.
2. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972.
3. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971.
4. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973.
5. Методы анализа поверхности. Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 3 - 5.
6. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Л.: Наука 1968.
7. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ/ Дж. Голдстейн и др. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1984.
8. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
9. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Добрецов Л.Н., Гомаюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
11. Миллер Р. Введение в физику сильнооточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.
12. Физика сильнооточных релятивистских электронных пучков / А.А. Рухадзе и др. М.: Атомиздат, 1980.
1. В. В. Углов, Н. Н. Черенда, В. М. Анищик. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев. – Минск : БГУ, 2007. – 167 с.
2. Черепин В.Т. Ионный микрозондовый анализ.-К.: Наукова думка, 1992.
3. Антоненко С.В. Технология тонких пленок, Учебное пособие. -М.: МИФИ, 2008
4. Брандон Д., Каплан В. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. — М.: Техносфера, 2006
5. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок. Справочник, Том 1, Том 2. / Перевод с англ. под ред Елинсона. - М.: "Сов. Радио", 1977

Перечень используемых информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы (при необходимости):

1. <http://physelec.phys.msu.ru/>
2. <http://home.mpcdf.mpg.de/~mam/>

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

1. Д.ф.-м.н., профессор Черныш В.С., e-mail: chernysh@phys.msu.ru, +7(495)939-29-89
2. К.ф.-м.н., доцент Карташов И.Н., e-mail: igorkartashov@mail.ru, +7(495)9392547.
3. К.ф.-м.н., доцент Зыкова Е.Ю., e-mail: zykova@phys.msu.ru, +7(495)9392937.
4. К.ф.-м.н, ведущий инженер Хвостов В.В., e-mail: vkhv@yandex.ru, +7(495)9392953.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Найти собственную концентрацию свободных носителей заряда в кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs и антимониде индия InSb при комнатной температуре $T = 300$ К и температуре жидкого азота $T = 77$ К.
2. Найти концентрацию легирующей акцепторной примеси для кремния Si и германия Ge, при которой наступает вырождение концентрации свободных носителей заряда при комнатной температуре $T = 300$ К.
3. Найти высоту потенциального барьера фк в диоде Шоттки электронный германий n -Ge – золото Au. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии. Удельное сопротивление полупроводника $\rho = 1$ Ом·см.
4. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода n -Ge – p -GaAs. $N_{D,A} = 10^{16}$ см⁻³.
5. Рассчитать и сравнить дебаевские длины экранирования L_D в собственных полупроводниках – кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs, антимониде индия InSb при комнатной температуре.
6. Качественно представить на графике зависимость концентрации электронов в частично компенсированном полупроводнике ($N_D > N_A$) $\ln n$ от $1/T$. Оценить границы области температур, в которых $n \approx N_D - N_A$ для кремния, легированного мышьяком $E_D = E_C - 0,05$ эВ.
7. Сопротивление R_1 p - n -перехода, находящегося под прямым напряжением $U=1$ В, равно 10 Ом. Определить сопротивление R_2 перехода при обратном напряжении.
8. Прямое напряжение U , приложенное к p - n -переходу, равно 2 В. Во сколько раз возрастет сила тока через переход, если изменить температуру от $T_1=300$ К до $T_2=273$ К?
9. Идеальный фотодиод (т. е. с квантовым выходом, равным 1) освещается излучением мощностью $P = 10$ мВт при длине волны 0,8 мкм. Рассчитать ток и напряжение на выходе прибора, когда детектор используется в режиме фототока и фотоЭДС соответственно. Ток утечки при обратном смещении $I_0=10$ нА, рабочая температура $T = 300$ К.
10. Рассчитать квант проводимости одномерной цепочки атомов.
11. За счет эффекта Шоттки работа выхода электронов уменьшилась на 0,2 эВ. Найти напряженность электрического поля вблизи поверхности.
12. Катод площадью 1 см² при температуре 1000 К дает ток 3 А. Найти работу выхода электронов.
13. Вычислить удельную мощность, которую нужно подвести к катоду, работающему в режиме насыщения для получения термоэлектронного тока плотностью 0,1 А/см² при температуре 2000 К.

14. Плоский диод имеет катод площадью 5 см^2 с работой выхода 2 эВ , нагретый до температуры 1500 К . Расстояние от анода до катода $0,5 \text{ см}$. Найти анодный ток при приложенном напряжении 500 В .
15. Найти максимальную скорость фотоэлектронов при облучении катода с работой выхода 3 эВ излучением с длиной волны $0,3 \text{ мкм}$.
16. Найти квантовый выход фотокатода если его чувствительность на длине волны $0,5 \text{ мкм}$ составляет 10^{-6} А/Вт .
17. Найти смещение длинноволновой границы фотоэффекта для катода с работой выхода 2 эВ при приложении к нему ускоряющего электрического поля 3000 В/см .
18. Найти ширину потенциального барьера треугольной формы для электрона находящегося на уровне Ферми при приложении к катоду с работой выхода 4 эВ ускоряющего электрического поля напряженностью 10^7 В/см .

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Виды химической связи и их основные отличительные признаки, типы твердых тел. Дефекты кристаллической решетки.
2. Методы расчета электронной структуры твердых тел. Приближения слабой и сильной связи.
3. Гибридизация атомных орбиталей, метод линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО).
4. Волновая функция в периодическом поле кристалла. Энергетические зоны. Зона Бриллюэна.
5. Плотность электронных состояний. Статистика электронов в твердых телах (металлах и диэлектриках), уровень Ферми.
6. Концентрация носителей заряда в полупроводнике. Примесные уровни в полупроводниках. Собственная и примесная проводимости. Основные и неосновные носители заряда в полупроводнике (температурная зависимость).
7. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электропроводность полупроводников и металлов. Температурная зависимость электропроводности в твердых телах.
8. Различные типы контактов. Виды контактов металл-диэлектрик.
9. Эффект поля, зонная диаграмма при эффекте поля.
10. Контактные явления. Работа выхода и контактная разность потенциалов. Контакт металла с полупроводниками n -типа. Выпрямление на контакте металла с полупроводником n -типа.
11. Особенности электронной структуры низкоразмерных систем.
12. Проводимость одномерных систем.
13. Термоэлектронная эмиссия. Термодинамический и статистический подходы. Формула Ричардсона-Дешмана.
14. Термоэмиссионная постоянная. Истинная, эффективная, приведенная (ричардсоновская) работы выхода.
15. Эмиссия из металлов, собственных и примесных полупроводников.
16. Коэффициенты отражения частиц и прозрачности. Приведенный коэффициент прозрачности диода.
17. Экспериментальные измерения термоэлектронной эмиссии. Измерение коэффициента прозрачности. Измерение работы выхода.
18. Влияние внешнего электрического поля на эмиссию с поверхностей проводника и полупроводника. Эффект Шоттки. Эффект искривления зон.
19. Пленочные катоды. Теория “пятен”. Аномальный эффект Шоттки. Оксидные катоды.

20. Практические применения термоэлектронной эмиссии. Термоэмиссионный преобразователь тепловой энергии в электрическую.
21. Отрыв температуры электронов от температуры решетки. “Горячие” электроны. Создание “горячих” электронов. Эмиссия и кулоновский взрыв. Малтер-эффект.
22. Основные законы фотоэффекта. Закон Столетова. Закон Эйнштейна. Красная (длинноволновая) граница.
23. Теория Фаулера. Роль теплового движения.
24. Элементы квантовомеханической теории фотовозбуждения электронов.
25. Объемный и поверхностный фотоэффекты. Прямые и не прямые переходы. Селективный и векториальный эффекты.
26. Влияние внешнего электрического поля. Особенности фотоэффекта в полупроводниках. Фотоэлектронная и термоэлектронная работы выхода.
27. Измерение работы выхода. Квантовый выход и чувствительность фотокатода. Параметры и практические применения фотокатодов.
28. Спектры вторичных электронов. Коэффициент истинной вторичной электронной эмиссии. Закон подобия. Параметры и практические применения вторично-электронных эмиттеров.
29. Потенциальная и кинетическая ион-электронные эмиссии.
30. Автоэлектронная эмиссия. Формула Фаулера-Нордгейма. Учет зеркального изображения заряда.
31. Автотермоэлектронная эмиссия. Особенности автоэлектронной эмиссии с поверхности полупроводников.
32. Энергетический спектр автоэлектронов. Эффект Ноттингема.
33. Технологии изготовления “острийного” рельефа автокатодов. Параметры и практические применения автокатодов.
34. Взрывная эмиссия и эмиссия из плазмы. Параметры и практические применения взрывоэмиссионных катодов. Дiod с магнитной изоляцией.
35. Метод POF, каналирование, разрешение POF по массе и глубине?
36. Статический и динамический режимы ВИМС.
37. Применение ионно-фотонной эмиссии для диагностики материалов.
38. Оже переходы. Факторы, определяющие чувствительность оже-спектроскопии.
39. Фотоэлектронная спектроскопия.
40. Особенности микроанализа при использовании зондирующих пучков электронов и протонов.
41. Дифракция медленных электронов и ее применение для анализа поверхности.

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающем 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов физической электроники	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физической электроники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов физической электроники	Успешные и систематические знания основных законов физической электроники
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов физической электроники для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания основных законов физической электроники для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов физической электроники для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов физической электроники для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физической электроники	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физической электроники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физической электроники	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физической электроники