

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического
факультета МГУ



/ В.В. Белокуров /

«21» марта 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

1.3.5 Физическая электроника

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.5. Физическая электроника, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамен

Тема 1. Электроника твердого тела.

Динамика электрона в идеальном твердом теле. Волновая функция, квазиимпульс электронов в твердом теле, зоны Бриллюэна, законы дисперсии. Эффективная масса.

Типы точечных дефектов в кристаллах. Акцепторные и донорные примеси в полупроводниках.

Статистика носителей заряда в металлах и полупроводниках. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Уровень электрохимического потенциала и концентрация свободных и связанных носителей в полупроводниках.

Неравновесные носители заряда в полупроводниках и диэлектриках. Генерация и рекомбинация. Механизмы рекомбинации.

Поглощение и испускание света полупроводниками.

Явления переноса заряда в твердом теле. Интеграл столкновений. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электропроводность полупроводников и металлов.

Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело–вакуум. Контакт металл–полупроводник. Диоды Шоттки. Электронно-дырочный переход. Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение.

Диффузия и дрейф неравновесных носителей, соотношение Эйнштейна. Плотность тока и градиент уровня Ферми. Уравнение непрерывности, анализ частных случаев локального возбуждения и инжекции.

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.

Наноэлектроника. Квантовые ямы и сверхрешетки. Электронные состояния в наноструктурах. Транспортные явления в низкоразмерных системах. Одноэлектронные явления в наноэлектронных устройствах. Приборы наноэлектроники.

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 р-п переходах. Солнечные батареи. Преобразование электрических сигналов в световые.

Тема 2. 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.

Тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки. Диэлектрические потери.

Токопрохождение через диэлектрические слои. Туннелирование. Надбарьерная эмиссия электронов. Токи, ограниченные пространственным зарядом.

Отрицательная дифференциальная проводимость. Активные элементы, основанные на использовании эффекта отрицательной дифференциальной проводимости.

Тема 3. Эмиссионная электроника.

Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона-Дешмана. Работа выхода.

Влияние внешнего электрического поля на эмиссию с поверхностей проводника и полупроводника. Эффект Шоттки.

Вакуумный диод с термокатодом и его вольт-амперная характеристика. Закон $3/2$.

Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую.

Фотоэлектронная эмиссия. Основные законы фотоэффекта. Красная (длинноволновая) граница фотоэффекта.

Спектры вторичных электронов. Коэффициент истинной вторичной электронной эмиссии.

Потенциальная и кинетическая ион-электронная эмиссии.

Автоэлектронная эмиссия. Формула Фаулера-Нордгейма. Взрывная эмиссия.

Тема 4. Методы анализа поверхности и тонких пленок.

Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона-Дешмана. Работа выхода.

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 заряженных частиц.

Дифракция медленных и быстрых электронов как методы исследования структуры поверхности.

Электронная Оже-спектроскопия. Физические принципы. Экспериментальное оборудование. Оже-анализ.

Фотоэлектронная спектроскопия. Фотоэлектрический эффект. Экспериментальное оборудование. Химические сдвиги уровней. Количественная рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Спектроскопия характеристических потерь энергии. Конструкции приборов. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в твердом теле. Количественная спектроскопия характеристических потерь энергии.

Сканирующая электронная микроскопия. Режимы работы. Особенности формирования контраста. Рентгеновский микроанализ. Конструкции растровых электронных микроскопов и микроанализаторов.

Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы методов. Конструкции микроскопов.

Вторично-ионная масс-спектроскопия. Режимы работы.

Ионно-нейтрализационная спектроскопия.

Спектроскопия рассеяния ионов низких и средних энергий. Спектроскопия обратного резерфордского рассеяния.

Тема 5. Функциональная электроника.

Магнетоэлектроника. Цилиндрические магнитные домены. Магнитные запоминающие устройства на ферритах и на тонких пленках.

Акустоэлектроника: взаимодействие электронов с длинноволновыми 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. 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.

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. Особенности электронных устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные знания в области физической электроники	Неполные знания в области физической электроники	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области физической электроники	Сформированные и систематические знания в области физической электроники

IV. Рекомендуемая основная литература

1. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Л.: Наука 1968.
2. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ/ Дж. Голдстейн и др. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1984.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Добрецов Л.Н., Гомаюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
6. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.
7. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков / А.А. Рухадзе и др. М.: Атомиздат, 1980.
8. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.
9. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Вынужденное излучение сильноточных релятивистских электронных пучков // УФН. 1987. Т. 152. Вып. 2.
10. Елифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
11. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М.: Изд-во МГУ, 1986.
12. Твердотельная электроника: Учебное пособие / Давыдов В. Н. – 2011. 175 с.
13. Твердотельная электроника и микроэлектроника: Учебное пособие/Берикашвили В.Ш., Воробьев С.А. Издательство: Издательство МГОУ, 2010 г.
14. Физические основы твердотельной электроники. Учебное пособие/Спиридонов О.П., 2008, 191 с.

15. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М.: Мир, 1982.
16. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972.
17. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971.
18. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973.
19. Методы анализа поверхности. Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 3 - 5.
20. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
21. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела / Под ред. Л. Фирменса. М.: Мир, 1981.
22. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС / Под ред. А. Бригса, М.В. Сиха. М.: Мир, 1987.
23. Т. Альфорд, Л.Фелдман, Д.Майер. "Фундаментальные основы анализа нанопленок". М.: Научный мир, 2012.
24. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Изд. Ин-та физики микроструктур РАН, Н. Новгород, 2004.
25. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. "Введение в физику поверхности". М., Наука, 2006.
26. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применения / под ред. УэйлиЖу, Жонг Лин Уанг; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 582 с.
27. И.К. Гайнуллин, И.Ф. Уразгильдин // "Электронный обмен и неупругие процессы при взаимодействии ионов с поверхностью". М.: Физический факультет МГУ, 2010. 80 с.
28. Физические принципы электронной микроскопии / Р.Ф. Эгертон – М.: Техносфера, 2010. – 304 с.
29. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия/ Д. Синдо, Т. Оикава – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
30. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин, А.М. Филатов, А.Г. Ульяновков – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
31. Ван Дузер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей. М.: Радио и связь, 1984.
32. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра // УФН. 2000. Т. 170.
33. Максоров Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // УФН. 2000. Т. 170.
34. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М., 2000.

V. Рекомендуемая дополнительная литература

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. А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. Электронная микроскопия. Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
4. Антоненко С.В. Технология тонких пленок, Учебное пособие. -М.: МИФИ, 2008
5. Брандон Д., Каплан В. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. — М.: Техносфера, 2006
6. М.В.Кузнецов «Современные методы исследования поверхности твердых тел: фотоэлектронная спектроскопия и дифракция, СТМ-микроскопия», институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, 2010
7. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок. Справочник, Том 1, Том 2. / Перевод с англ. под редЕлинсона. - М.: "Сов. Радио", 1977