

**Краткая неофициальная версия программы учебной дисциплины**

Название дисциплины	Физика полупроводников
Автор(ы) программы	Кулаковский Владимир Дмитриевич член-корр. РАН д.ф.-м.н..
Курс	4 курс
Модули	1-2
Объем курса	Плановое число лекций и семинаров в неделю. 1/0.5
Элементы контроля	2 контрольные работы, устный экзамен

**1. Аннотация курса**

Курс посвящен изложению основ современной физики полупроводников. Наряду с традиционными разделами физики полупроводников, такими как теория зон, явления в контактах, одночастичные возбуждения и межчастичные взаимодействия в объемных полупроводниках, курс включает в себя проблемы составных квазичастиц и коллективных возбуждений в низкоразмерных полупроводниковых наноструктурах и микрорезонаторах. Курс является основой для углубленных специальных курсов в магистратуре, таких как “Оптика конденсированных сред”, Спиновая физика в полупроводниковых структурах” и др.

**2. Программа курса**

1. Зонная теория полупроводников. (полупроводники во внешних полях. мелкие доноры и акцепторы)
2. Химические связи в полупроводниках: Кристаллические решетки, электронная конфигурация атомов, типы химической связи( ионная, гомеополярная, ван-дер-ваальсовская), кристаллы со смешанной связью, полупроводниковые свойства и химическая связь. Запрещенная зона, примесные уровни, вакансии в кристалле.
3. Зонная теория полупроводников: основные предположения зонной теории, волновая функция электрона в периодическом поле, зоны Бриллюэна, энергетические зоны, закон дисперсии электронов и дырок, эффективная масса. примеры зонной структуры полупроводников)
4. Зонная теория полупроводников: полупроводники во внешних полях, неидеальные кристаллы. средние значения скорости и ускорения электрона, электроны и дырки электрическом в магнитном полях, диамагнитный резонанс.
5. Метод эффективной массы. Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле (квантовая теория), энергетический спектр электронов и дырок в постоянном электрическом поле, осцилляции Блоха (квантовая теория), мелкие примесные уровни
6. Статистика электронов и дырок в полупроводниках: распределение Ферми-Дирака и Больцмана, неравновесные электроны и дырки
7. Явления в контактах: потенциальные барьеры, плотность тока, соотношение Эйнштейна, условия равновесия тел, термоэлектронная работа выхода, контактная разность потенциалов.
8. Явления в контактах: распределение концентрации электронов и потенциала в слое объемного заряда, длина экранирования, обогащенный и истощенный слой, выпрямление в контакте металл – полупроводник, p-n переход.
9. Неравновесные электроны и дырки в полупроводниках: время жизни неравновесных

- электронов и дырок, уравнение непрерывности, фотопроводимость, квазиуровни Ферми.
10. Проблемы обоснования зонной теории. Адиабатическое приближение, приближение малых колебаний, метод самосогласованного поля. Полярны, экситоны, экситонные молекулы, ионизация экситонов, электрон-дырочная плазма, электрон-дырочная жидкость.
  11. Оптические переходы в прямых и непрямых полупроводниках. Межзонное и экситонное поглощение и излучение.
  12. Усиление и генерация света в активных средах. Стимулированное излучение. Инжекционные полупроводниковые лазеры. Поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором.
  13. Экситонные поляритоны в объемных полупроводниках.
  14. Полупроводниковые микрорезонаторы. Квазидвумерный свет. Экситонные поляритоны в полупроводниковых микрорезонаторах. Бозе-Эйнштейновская конденсация поляритонов

### 3. Элементы контроля и правила оценивания

В курсе проводятся две контрольные работы и итоговый устный экзамен.

Контрольные работы проводятся в конце 1 и 2 модуля в письменной форме, задание контрольной работы состоит из примерно 3 задач.

Устный экзамен проводится во время сессии 2 модуля или в конце 2 модуля по билетам, билет включает одну задачу и два теоретических вопроса.

**Текущая оценка**  $O_{\text{текущая}}$  рассчитывается как взвешенная сумма оценок за две контрольные работы:

$$O_{\text{текущая}} = 0,2 * O_{\text{контрольная1}} + 0,2 * O_{\text{контрольная2}},$$

где оценка за контрольные выставляются по 10-ти бальной шкале. Текущая оценка не округляется для дальнейших расчётов.

**Оценка за активность**  $O_{\text{активность}}$  учитывает активность студентов на лекциях и семинарах, оцениваемую экспертным мнением преподавателя. Оценка за активность выставляется отдельно за каждый модуль, максимальная оценка  $O_{\text{активность,мах}} = 1$  за каждый модуль, оценка может быть дробной:

**Накопленная оценка**  $O_{\text{накопленная}}$  складывается из текущей оценки и оценок за активность в 1 и 2 модуле без округления.

$$O_{\text{накопленная}} = O_{\text{текущая}} + O_{\text{активность1}} + O_{\text{активность2}}$$

(максимальная накопленная оценка равна 6 баллам)

**Оценка за экзамен**  $O_{\text{экс}}$  Экзамен оценивается по 10-бальной шкале экспертным мнением преподавателя. Для студентов, у которых  $O_{\text{текущая}} > 3$  и 3.5 экзаменационный билет состоит из ответа на 2 устных вопроса (без задачи) и 1 устный вопрос, соответственно.

**Итоговая оценка** определяется соотношением

$$O_{\text{итоговая}} = 0,5 * O_{\text{накопленная}} + 0,7 * O_{\text{экс.}}$$

где  $O_{\text{экс}}$  – оценка за экзамен. Округление итоговой оценки по арифметическим правилам.

#### 4. Примеры заданий элементов контроля

Примеры задач контрольных работ

1. Эффективная масса электронов в Si  $m = \begin{pmatrix} 0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0.91 \end{pmatrix} m_0$ . Какое минимальное

магнитное поле необходимо для измерения всех компонент массы на длине волны 8 мм, если время рассеяния электронов при  $T = 2\text{K}$  составляет  $10^{-10}$  сек.

2. Найти концентрации электронов и дырок и положение уровня Ферми в нелегированном GaAs при  $T = 2, 10, 100$  и  $300\text{K}$ . Эффективная масса электронов равна  $0.06m_0$ , дырок -  $0.5m_0$ . Ширину запрещенной зоны считать независимой от температуры и равной 1.5 эВ.

3. В легированном Ge уровень Ферми при  $T = 2\text{K}$  лежит на 10 мэВ выше дна зоны проводимости. Кристалл кремния подвергли одноосному сжатию вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Вследствие понижения симметрии кристалла в зоне проводимости произошло расщепление долин: 1 долина сместилась вниз на 30 мэВ, а 3 долины сместились вверх на 10 мэВ.

Тензор эффективной массы электронов в Ge  $m = \begin{pmatrix} 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0 & 1.59 \end{pmatrix} m_0$ .

4. В рамках приближения эффективной массы рассчитать энергии основного и первого возбужденного состояния электрона, локализованного на водородоподобном центре в полупроводниках с величиной эффективной массы  $m = 0.5 m_0$  и величинами диэлектрической постоянной, равными 12 и 3. Во всех ли этих случаях данное приближение дает правильный результат? Если нет, то в каких случаях данное приближение использовать нельзя. Ответ обосновать.

5. Найти области плотностей электронов, в которых можно использовать одноэлектронное

приближение в Ge при  $T = 0$ . (эффективная масса  $m = \begin{pmatrix} 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0 & 1.59 \end{pmatrix} m_0$ ,

диэлектрическая проницаемость – 16). Как изменятся эти области при сильном одноосном сжатии образца вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , приводящем к снятию вырождения долин в зоне проводимости.

Пример билета экзамена

1. Основные предположения зонной теории, волновая функция электрона в периодическом поле, энергетические зоны, закон дисперсии электронов и дырок, эффективная масса. примеры зонной структуры полупроводников
2. Экситонные поляритоны в объемных полупроводниках
3. Нарисовать вольт-амперную характеристику контакта металл-полупроводник Si n-типа

при условии, что до их соединения уровень Ферми в металле был расположен на 0.1 эВ выше, чем в кремнии и расстояние от дна зоны проводимости до уровня Ферми в кремнии равно 20 мэВ

## 5. Рекомендованная литература и ссылки по теме

### 5.1. Основной список

1. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников Физика полупроводников, М., Наука, 1977.
- 2.. Г.Г. Зегря, В.И. Перель, Основы физики полупроводников, Физматлит (2009).
3. Kittel.C, "Introduction to Solid State Physics", 8<sup>th</sup> Edition, 2005, ISBN : 978-0-471-41526-8  
(*Киттель, Введение в физику твёрдого тела*)

### 5.2. Дополнительный список

1. В. Б. Тимофеев Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур. Санкт-Петербург Изд-во Лань, 2014.
2. Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус, Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, М. Наука (1972).