

## Программа лекций по «Туннельные явления в твердых телах»

### **I. Распространение волн в плоскостных средах**

1. Постановка задачи. Оптические аналогии.
2. Стационарные состояния электрона. Граничные условия для волновой функции.
3. Метод матрицы распространения.
4. Пример – отражение частицы от скачка потенциала, коэффициенты отражения и прохождения.
5. Пример – отражение от потенциального барьера, коэффициент прохождения.
6. Пример – энергетический спектр частицы, локализованной в несимметричной потенциальной яме конечной высоты.
7. Резонансное туннелирование.
8. Стационарные состояния частицы, локализованной в двух связанных потенциальных ямах. Время туннелирования.

### **II. Квазиклассическое описание туннелирования**

1. Приближение Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна.
2. Квазиклассическое туннелирование через потенциальный барьер. Пример решения задач.
3. Туннелирование в аксиально-симметричном поле. Задача об альфа-распаде.

### **III. Туннелирование в структурах «металл–изолятор–металл»**

1. Плотность состояний нормального металла. Равновесная функция распределения
2. Расчет туннельного тока и дифференциальной проводимости между металлами в приближении эффективной массы. Представление о туннельной спектроскопии.

### **IV. Межзонный туннельный эффект в полупроводниках и полупроводниковых гетероструктурах**

1. Представление о p-n переходе. Плотность состояний полупроводников.
2. Туннельный диод. Отрицательное дифференциальное сопротивление.
3. Туннелирование с поглощением/испусканием фононов.
4. Туннелирование с поглощением/испусканием фотонов (эффект Франца-Келдыша).

### **V. Туннелирование в структурах «сверхпроводник–изолятор–нормальный металл» и «сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник»**

1. Особенности плотности состояний сверхпроводников. Энергетическая щель.
2. Квазичастичное туннелирование. I-V характеристика.
3. Туннелирование сверхпроводящего конденсата (эффект Джозефсона).
4. Контакт двух сверхпроводников с разной шириной энергетической щели.
5. Сверхпроводники с внутренним эффектом Джозефсона (ВТСП).
  - 5.1. Джозефсоновские вихри.
  - 5.2. Принцип работы перестраиваемого flux-flow генераторы терагерцового диапазона.
6. Сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы)
  - 6.1. Двухконтактный dc-сквид. Принцип работы сквида.
  - 6.2. Токо-полевая зависимость.
  - 6.3. Использование СКВИДов для измерений слабых магнитных полей.

### **Задачи для экзамена**

- задача считается решенной, если выполнены ВСЕ промежуточные расчеты
  - данные задачи могут быть сформулированы и использованы также в виде основных и дополнительных вопросов на экзамене
1. Записать матрицу распространения для случая наклонного падения частицы на одномерный потенциальный барьер. Рассчитать вероятность отражения/прохождения в этом случае.

2. Используя метод матрицы распространения рассчитать энергетический спектр частицы в одномерной потенциальной яме конечной высоты [1,2]. Рассмотреть симметричный и несимметричный случаи.
3. Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр частицы в двух связанных потенциальных ямах [1,2].
4. Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр разрешенных состояний для электрона в периодическом потенциале  $U(x)$ :  $U(x)=0$  при  $0 < x < a$  и  $U(x)=U_0$  при  $a < x < b$ , где  $a+b$  – период структуры (модель Кронига-Пенни). Решение задачи приведено в [7].
5. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в потенциальной яме [1].
6. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в двух связанных потенциальных ямах [1].
7. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов, при  $T=0$ .
8. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при  $T=0$  [8].
9. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из сверхпроводника и нормального металла, при  $T=0$  [10].
10. Рассчитать квазичастичную ветку вольт-амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух одинаковых сверхпроводников, при  $T=0$  [10].
11. Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля [10].
12. Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе [10].
13. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о стационарном эффекте Джозефсона) [10].
14. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о нестационарном эффекте Джозефсона) [10].

### Рекомендуемая литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., «Квантовая механика (нерелятивистская теория)». — М.: Физматлит, 2004.
2. Бурштейн Э., Лундквист С., «Туннельные явления в твердых телах». — М., 1983.
3. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1976.
4. Бом Д., «Квантовая теория» — М.: Наука, 1965.
5. Razavy M., «Quantum theory of tunneling». — World Scientific, 2003.
6. Ансельм А.И., «Введение в теорию полупроводников»
7. «Задачи по физике твердого тела». Под ред. Г.Дж. Голдсмита. — М.: Наука, 1976.
8. Демиковский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000.
9. Шмидт В.В., «Введение в физику сверхпроводников». — М., Наука, 1982.
10. Абрикосов А.А., «Основы теории металлов». — М.: Наука, 1986.
11. Вольф Е., «Принципы электронной туннельной спектроскопии». — Киев: Наукова Думка, 1990.