

# Курс лекций «Туннельные явления»

## Описание курса:

Курс составляется на основе лекций академика Р.А. Суриса и семинаров по его лекциям, которые ранее вёл П. С. Алексеев.

Курс посвящён изучению интерфейсных и туннельных явлений в объёмных полупроводниках, микро- и наноструктурах на основе металлов и полупроводников, а также другим вопросам, связанным с этими явлениями. А именно, в курсе изучаются интерфейсные состояния на краях кристаллов; низкочастотные и высокочастотные свойства структур металл-оксид-полупроводник; приборы с зарядовой связью и другие приборы на основе МДП структур. Подробно рассматриваются процессы, отвечающие за рекомбинацию и транспорт носителей в объёмных материалах, МДП-структурах, квантовых ямах и других микро и нано-структурах, а именно: перезарядка интерфейсных состояний, захват электронов на различные дефекты в объёмных полупроводниках, процессы рассеяния электронов на дефектах интерфейса и на фононах. В курсе рассказывается о плазмонах и плазмон-поляритонах в 2D электронных системах, об экситонах и поляронах в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах (квантовых ямах и сверхрешётках). В курсе также рассказываются основные факты о жидком гелии-4 и о дефектах типа поляронов в нём, а также основные факты о явлении сверхпроводимости и о модели БКШ описания типичных сверхпроводников. В курсе описываются эксперименты и излагается теория по туннельным явлениям в различных структурах. В частности, даётся описание туннелирования между нормальными металлами через изолирующий барьер, а также между сверхпроводящими металлами (эффекты Джозефсона). Рассказывается о времени туннелирования электронного пакета, о резонансном туннелировании электронов через двойной барьер и о межзонном туннелировании в объёмных полупроводниках. Описывается ионизация систем с локализованными электронами (атомы, локализованные дефекты в кристаллах) внешним электрическим полем. В курсе рассказывается об электрических полях от зарядов в слоистых структурах, о транспортных и оптических свойствах полупроводниковых сверхрешёток и квантовых ям, сообщаются основные принципы работы лазеров на основе сверхрешеток.

## Список тем курса:

1. Поверхностные состояния на краю кристалла в подходе Шокли и в модели сильной связи, поверхностные состояния на краю кристалла модели слабой связи.
2. Распределение электрических зарядов в МДП-структуре при положительном и отрицательных напряжениях на ней. Режимы аккумуляции (обогащения), обеднения и инверсии.
3. Максвелловская релаксация заряда в объёмном проводнике; нелинейный режим электрического омического транспорта за счёт зависимости времени максвелловской релаксации от электрического поля, N-образная вольт-амперная характеристика.
4. Ёмкость МДП-структуры, роль поверхностных состояний и частоты, на которой проводится измерение ёмкости.
5. Кинетика перезарядки поверхностных состояний в МДП-структуре. Измерения с помощью неё параметров структуры и дефектов, метод DLTS-спектроскопии.
6. Различие времен релаксации энергии и импульса, механизмы рассеяния электронов в инверсном слое в МДП-структуре, температурные зависимости времен релаксации.

7. Приборы с зарядовой связью. Принцип действия, природа транспорта заряда в них: самоиндуцированный дрейф и диффузия.
8. Плазмоны и магнитоплазмоны в двумерных электронных системах, плазмон-поляритоны в этих системах.
9. Многофононные захват и выброс электронов на (из) глубокие незаряженные дефекты в полупроводниках. (Переходы между состояниями в системе «электрон на дефекте с глубоким уровнем и локальный фонон вблизи этого дефекта» за счёт многофононных переходов.)
10. Туннельный захват электронов на глубокие дефекты в полупроводниках с дополнительным кулоновским барьером, возникающим за счёт отрицательного заряда дефекта.
11. Каскадный захват электронов на мелкие притягивающие кулоновские (положительно заряженные) дефекты в полупроводниках. (Диффузия по энергии, каскадный процесс перехода электронов по часто расположенным верхним уровням кулоновского дефекта.)
12. Нелинейный режим омической электропроводности за счёт разогрева электронов током, S-образная вольт-амперная характеристика.
13. Ионизация электрона из локализованного состояния (атома или дефекта в полупроводнике) периодическим внешним электрическим полем. (Задача Л.В. Келдыша.)
14. Основные факты о бозе-конденсации, о когерентном состоянии конденсата, о сверхтекучести гелия-4 (общие теоремы о форме сверхтекучей скорости, о виде сверхтекучей скорости около протяжённых дефектов).
15. Основные свойства сверхпроводников. Эффект Мейснера, глубина проникновения, длина когерентности. Основные идеи теории Гинзбурга-Ландау и модели БКШ.
16. Туннелирование невзаимодействующих через одиночный барьер. Зависимость туннелирования от импульса в плоскости барьера. Роль неидеальностей барьера. Оценка туннельного тока для типичных микроструктур.
17. Туннелирование взаимодействующих электронов через одиночный барьер. Туннельный гамильтониан, расчёт тока с учетом когерентности состояний справа и слева от барьера. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.
18. Резонансное туннелирование невзаимодействующих электронов через двойной барьер.
19. Межзонное туннелирование (эффект Франца-Келдыша).
20. Время туннелирования волнового пакета из электронов через одиночный барьер.
21. Электрическое поле заряда в слоистых структурах (потенциал Рытовой-Келдыша).
22. Захват электронов в структурах с квантовыми ямами из 3D состояний в барьере на 2D состояния в квантовой яме за счёт испускания оптических фононов.
23. Рассеяния электронов в объёмном полупроводнике на акустических фононах.
24. Рассеяния двумерных электронов в наноструктурах на объёмных акустических фононах. Время релаксации энергии и импульса.
25. Поглощение света квантовыми ямами. Влияние взаимодействия электронов и дырок на поглощение (экситонный эффект).
26. Состояния электронов в полупроводниковых сверхрешётках, в том числе при наличии электрического поля вдоль нормали. Блоховские осцилляции. Квантово-каскадные лазеры.
27. Экситон Ванье-Мотта в сверхрешётке.