

Лекция 10: Квантовая механика в нанoeлектронике

Цель лекции - предоставить студентам понимание роли квантовой механики в нанoeлектронике. Мы рассмотрим концепцию квантового ограничения, энергетические уровни в наноструктурах и явление квантовой туннельной передачи. Эта лекция поможет студентам осознать, как квантовые эффекты определяют поведение нанoeлектронных устройств.

Результаты обучения:

По окончании этой лекции студенты должны:

- Понимать, что такое квантовое ограничение и как оно связано с масштабами нанoeлектроники.
- Знать особенности энергетических уровней в наноструктурах и как они влияют на поведение электронов.
- Понимать явление квантовой туннельной передачи и её значение в нанoeлектронике.
- Осознавать влияние квантовой туннельной передачи на работу нанoeлектронных устройств и технологий.

Часть 1: Квантовое ограничение и энергетические уровни

Квантовое ограничение и энергетические уровни представляют собой ключевые концепции в нанoeлектронике, особенно в описании поведения электронов и других частиц в наномасштабных структурах. Вот более подробная информация о квантовом ограничении и энергетических уровнях:

Квантовое ограничение возникает, когда размеры наноструктур становятся сопоставимыми с длиной волны электронов или других частиц. При этом проявляются квантовые эффекты, влияющие на их свойства.

В наномасштабных структурах, таких как квантовые ямы, точки или проволоки, возникают дискретные *энергетические уровни* для электронов. Они характеризуются квантовыми состояниями, в которых электроны могут находиться в этих системах.

Теперь рассмотрим формулы и более подробные описания:

Энергетические уровни в квантовых ямах:

В квантовых ямах, где электроны ограничены в двух измерениях, энергетические уровни для электронов определяются формулой:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* L^2}$$

где:

E_n - энергия n-го уровня.

\hbar - приведенная постоянная Планка.

m^* - эффективная масса электрона в материале.

L - размер квантовой ямы.

n - номер уровня энергии.

Отсюда вывод, что энергия уровней в квантовой яме дискретизована и зависит от размера ямы и эффективной массы электрона.

Энергетические уровни в квантовых точках:

В квантовых точках, где электроны ограничены в трех измерениях, энергетические уровни определяются формулой:

$$E \propto \frac{1}{R^2}$$

E - энергия уровней.

R - радиус квантовой точки.

Энергетические уровни в квантовой точке обратно пропорциональны квадрату её радиуса, что также приводит к дискретизации энергии электронов.

Эти формулы и описания позволяют понять, как размеры наноструктур влияют на энергетические уровни электронов, а также как квантовое ограничение влияет на их свойства в наноэлектронике.

Часть 2: Квантовая туннельная передача и её влияние

Квантовая туннельная передача - это явление, при котором электроны могут проникать через барьеры энергии, которые, с классической точки зрения, они не могли бы пройти. Это происходит благодаря квантовым эффектам, и оно становится особенно важным в наноэлектронике, где размеры устройств и барьеры становятся наномасштабными.

Влияние квантовой туннельной передачи

Квантовая туннельная передача - это квантовый эффект, когда частица, не имея достаточной энергии, проходит через потенциальный барьер. Это явление имеет важное значение в наноэлектронике, особенно в процессе туннельной передачи в туннельных диодах и других наноэлектронных устройствах.

Формула для вероятности квантового туннелирования через потенциальный барьер:

$$P \approx e^{-2kd}$$

где:

P - вероятность туннелирования

k - коэффициент затухания в потенциальном барьере

d - толщина барьера

Описание формулы и происхождение:

Квантовое туннелирование основывается на волновой природе частиц, описываемой уравнением Шредингера. Волновая функция частицы описывает её вероятность нахождения в определенных областях пространства.

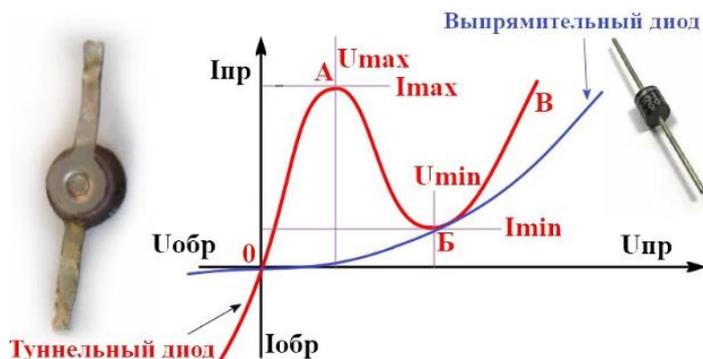
При прохождении через потенциальный барьер, волновая функция частицы затухает экспоненциально в области барьера. Классически частица не имела бы достаточной энергии для преодоления этого барьера. Однако согласно квантовой механике, есть конечная вероятность обнаружить частицу за пределами барьера, даже если у нее нет достаточной энергии для его преодоления.

Формула $P \approx e^{-2kd}$ представляет вероятность квантового туннелирования, где k характеризует степень затухания в барьере, а d - его толщину. Чем тоньше и выше барьер, тем выше вероятность туннелирования.

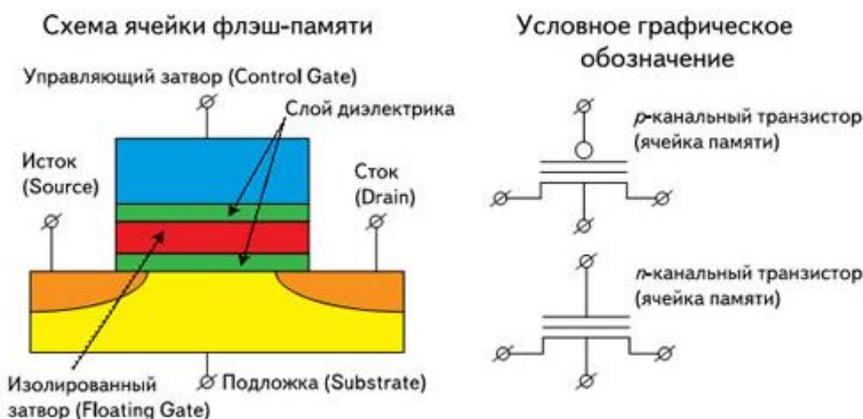
Эта формула является результатом решения уравнения Шредингера для потенциального барьера и происходит из процесса квантовой механики. Она позволяет предсказывать вероятность квантового туннелирования и играет важную роль в понимании и разработке наноэлектронных устройств, таких как туннельные диоды и многие другие, где это явление может быть использовано для передачи или усиления сигналов.

Квантовая туннельная передача оказывает существенное влияние на работу наноэлектронных устройств:

Туннельный диод: Основанный на эффекте квантовой туннельной передачи, туннельный диод может быть использован в электронике для создания высокочастотных усилителей и генераторов.



Флэш-память: Квантовая туннельная передача используется в флэш-памяти для программирования и стирания ячеек памяти.



Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) - это техника наноэлектронной микроскопии, которая использует явление квантового туннелирования для изображения поверхности материала с очень высоким пространственным разрешением. СТМ позволяет визуализировать атомарную структуру материалов и поверхностей, исследовать их электронные свойства и поведение отдельных атомов.

Принцип работы СТМ основан на использовании острой металлической или проводящей иглы, которая подносится на очень близкое расстояние к поверхности образца. Между иглой и поверхностью создается потенциальный барьер, и благодаря квантовому туннелированию электроны могут проникнуть сквозь этот барьер. Измеряется ток, который протекает из иглы на поверхность, что позволяет создать карту поверхности с высоким пространственным разрешением.

Основные формулы и концепции, связанные с СТМ:

Туннельный ток:

Туннельный ток I между иглой и поверхностью материала описывается формулой туннельной проводимости:

$$I = \frac{V}{R} \propto e^{-2kd}$$

где:

V - напряжение между иглой и образцом.

R - сопротивление туннельного барьера.

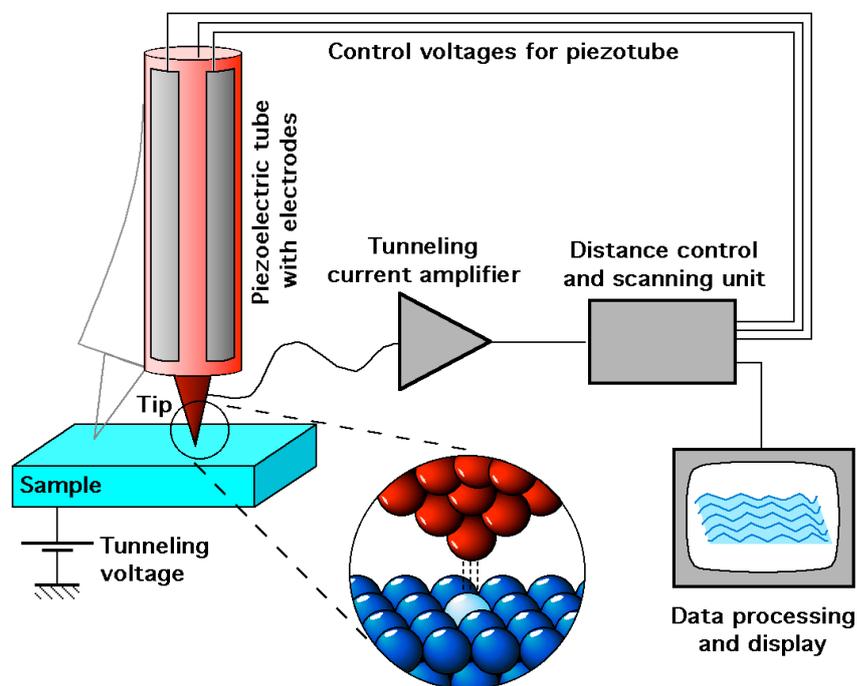
d - расстояние между иглой и поверхностью.

k - коэффициент затухания в потенциальном барьере.

Разрешение СТМ определяется размером острой иглы и расстоянием, на котором происходит туннелирование. Чем ближе игла к поверхности, тем выше пространственное разрешение.

Изображение поверхности:

Сигналы туннельного тока интерпретируются для создания изображения поверхности. Измерения собираются постепенно, сканируя иглу по поверхности.



Заключение:

Квантовая механика играет ключевую роль в нанoeлектронике, где квантовые эффекты начинают доминировать из-за квантового ограничения. Понимание этих эффектов позволяет создавать новые нанoeлектронные устройства и технологии с уникальными свойствами.