

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ. ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

Низовцова М.А., Драб А.А., студенты гр.378105

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Леонович А.А. – доцент кафедры физики, канд. физ.-мат. наук

Аннотация. Данная статья посвящена такому квантовому явлению, как туннельный эффект и его использованию в туннельном микроскопе. В ней описывается суть работы туннельного эффекта и его применение в туннельном микроскопе.

Ключевые слова. Туннельный эффект, туннельный микроскоп, квантовое явление.

В микроэлектронике и нанотехнологиях туннельный эффект стал ключевым явлением, определяющим процессы туннельной проводимости в наноструктурах и наноустройствах. Исследования в этой области направлены на создание более эффективных и компактных полупроводниковых устройств.

Это явление находит применение в различных сферах науки и техники. Некоторые из них включают:

Электроника: В электронике туннельный эффект используется в разработке туннельных диодов и транзисторов, а также в создании молекулярных электронных устройств. Это позволяет создавать компоненты с высокой производительностью и энергоэффективностью.

Нанотехнологии: Туннельный эффект играет ключевую роль в создании наноматериалов и наноструктур. Он позволяет управлять поведением и свойствами атомных и молекулярных систем на наномасштабе, что открывает новые перспективы для разработки наноустройств и наноматериалов.

Сканирующая зондовая микроскопия: В методах сканирующей зондовой микроскопии, таких как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (AFM), туннельный эффект используется для измерения и манипулирования поверхностными атомными и молекулярными структурами с высоким разрешением.

Квантовые вычисления: В квантовых компьютерах туннельный эффект может быть использован для создания кубитов - основных единиц квантовой информации. Это открывает новые перспективы для разработки более мощных и эффективных квантовых вычислительных систем.

Материаловедение: Туннельный эффект используется для исследования структур и свойств материалов на атомном уровне, что помогает понять и улучшить их характеристики и применимость в различных областях, включая электронику, фотонику, медицину и энергетику.

Эти сферы представляют лишь небольшую часть областей, где туннельный эффект может быть применен. Его уникальные свойства и возможности делают его важным инструментом для современной науки и техники.

В биологии и медицине туннельный микроскоп применяется для визуализации биомолекулярных структур, таких как ДНК и белки, что открывает новые возможности для исследования биологических процессов и разработки лекарств.

Туннельным эффектом называется возможность элементарной частицы, например электрона, пройти (протуннелировать) через потенциальный барьер, когда барьер выше полной энергии частицы. Квантовое туннелирование относится к квантово-механическому явлению, когда частица туннелирует через барьер, который она не могла преодолеть в классическом понимании.

Туннельный эффект — явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике и даже полностью противоречащее ей.

В классической физике, если у частицы недостаточно энергии для преодоления барьера, она не сможет его пройти. Однако, в квантовой механике, существует вероятность того, что частица проникнет через барьер, даже если у нее нет достаточной энергии.

Такое поведение часто объясняется волновой природы частиц в квантовой механике.

В квантовой механике частица характеризуется волновой функцией, которая отражает вероятность обнаружения частицы в определенном месте в определенный момент времени. Когда частица сталкивается с потенциальным барьером, уравнение Шрёдингера позволяет оценить вероятность того, что частица проникнет через него, поскольку волновая функция не просто поглощается барьером, а быстро уменьшается по экспоненте. Это означает, что потенциальный барьер в мире квантовой механики не является абсолютной непроницаемой границей, как это принято в классической механике Ньютона.

Если барьер невысок или если суммарная энергия частицы близка к пороговой, волновая функция, хотя и быстро уменьшается по мере приближения к краю барьера, всё же дает шанс частице преодолеть его. Таким образом, существует определенная вероятность того, что частица будет

обнаружена по ту сторону потенциального барьера — что невозможно в мире механики Ньютона. После преодоления края барьера частица свободно перемещается вниз по его внешнему склону, вдали от ямы, из которой она вышла.

Туннельный эффект имеет важные практические применения. Он используется в электронике для создания туннельных диодов и туннельных транзисторов, которые работают на основе того, что электроны могут туннелировать через узкие потенциальные барьеры в полупроводниках. Это позволяет создавать более эффективные и быстрые электронные компоненты. Также туннельный эффект используется в сканирующей туннельной микроскопии для изучения поверхности материалов с очень высоким разрешением.

Существование туннельного эффекта было признано физиками в период создания квантовой механики в 20-х годах. В 1927 году Фридрих Хунд стал первым, кто математически выявил туннельный эффект при расчетах двухъямного потенциала. В том же году Леонид Мандельштам и Михаил Леонтович, анализируя следствия на тот момент «нового» волнового уравнения Шредингера, независимо опубликовали работу, где представили более общее рассмотрение этого явления. В 1928 году независимо друг от друга формулы туннельного эффекта применили в своих работах русский учёный Георгий Гамов и американские учёные Рональд Герни и Эдвард Кондон при разработке теории альфа-распада. Оба исследования одновременно решали уравнение Шредингера для модели ядерного потенциала и математически обосновывали связь между радиоактивным полураспадом частиц и их радиоактивным излучением вероятностью туннелирования.

Туннельный микроскоп (ТМ) — это высокоточный научный инструмент, который использует принцип туннельного эффекта для изучения поверхностей материалов на атомарном уровне. Принцип работы туннельного микроскопа заключается в измерении тока, проходящего между острием зонда и поверхностью образца при очень малом расстоянии между ними. Ток, вызванный туннелированием электронов или других заряженных частиц через электронный запрет в вакууме или диэлектрике, зависит от расстояния между острием и поверхностью образца. Путем сканирования зонда по поверхности образца и измерения тока в каждой точке создается изображение поверхности с нанометровым разрешением.

Сканирующий туннельный микроскоп (далее СТМ) был изобретен в 1981 году немецким физиком Гердом Карлом Биннигом и швейцарским физиком Генрихом Рорером в Цюрихе. За его изобретение оба этих ученых были удостоены Нобелевской премии в 1986 году.

В основе СТМ лежит явление квантово-механического туннельного эффекта, заключающегося в способности частиц преодолевать потенциальные барьеры, высота которых больше полной энергии частицы. В рамках этой модели внутри проводника электронный газ считается свободным, то есть энергия электронов описывается соотношением $E = \frac{p^2}{2m}$, где p – импульс электрона, а m – его масса. Максимальную энергию, которую может иметь электрон в металле при температуре абсолютного нуля, называют уровнем Ферми (E_F). Весь объем металла является для электронов проводимости потенциальной ямой. Основной вклад в туннельный ток вносят электроны, имеющие наибольшую энергию, то есть находящиеся на уровнях, близких к E_F . Вблизи поверхности металла, то есть около границы раздела металл – вакуум, электроны проводимости оказываются вблизи края потенциальной ямы, который служит для них потенциальным барьером, высота которого определяется работой выхода ϕ . Согласно классическим представлениям, прохождение электроном потенциального барьера, имеющего высоту U , большую полной энергии электрона E , означает появление у него мнимого импульса: $p = \sqrt{2m(E - U)}$.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) использует явление туннелирования электронов между проводящим зондом и поверхностью образца при наличии внешнего напряжения. Важным параметром является ширина туннельного перехода, которая определяется расстоянием между зондом и образцом. Для СТМ обычно используется зонд в форме острой металлической иглы, где предельное пространственное разрешение зависит от радиуса закругления острия и его механической жесткости. Недостаточная жесткость иглы в разных направлениях может ухудшить разрешение из-за механических, тепловых и квантовых флуктуаций. В качестве материала для зонда часто выбираются металлы с высокой твердостью и устойчивостью к химическим воздействиям, например, вольфрам или платина.

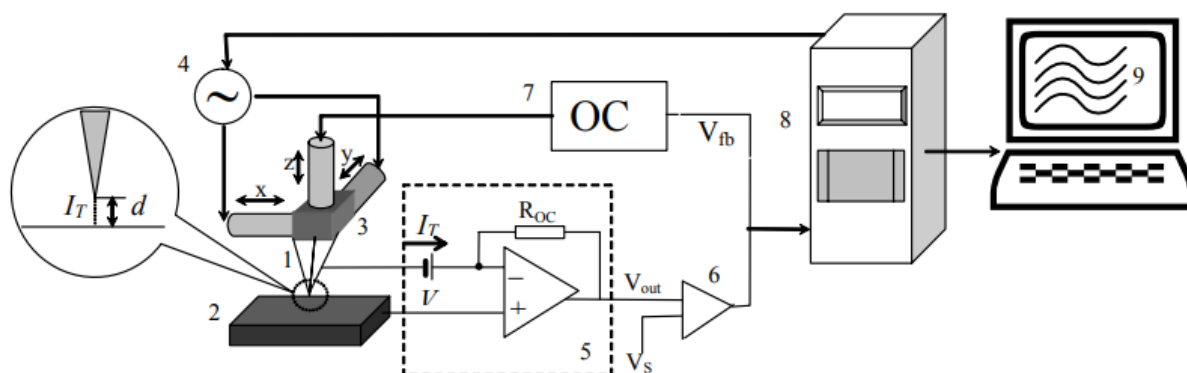


Рис. 1. Схема сканирующего туннельного микроскопа. Обозначения: 1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели x , y , z ; 4 – генератор развертки x , y ; 5 – туннельный сенсор; 6 – компаратор; 7 – электронная цепь обратной связи; 8 – компьютер; 9 – изображение $z(x, y)$

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) обладает двумя режимами работы. В первом режиме система обратной связи поддерживает заданное значение туннельного тока, и топография поверхности воспроизводится путем последовательного перемещения зонда. Во втором режиме зонд поддерживает постоянное расстояние от поверхности, и микроскоп отслеживает изменения туннельного тока. В обоих случаях позиция зонда контролируется с помощью пьезоэлементов. Пьезоэлектрические материалы изменяют свой размер под воздействием тока (или, наоборот, генерируют ток при изменении размера). Благодаря своей высокой чувствительности, они широко используются для точного перемещения объектов.

Обычно сканирование проходит в несколько этапов. Сначала выполняется общий скан участка поверхности размером около 1–1,5 микрона, чтобы получить общее представление о его топологии. Затем исследуется более мелкий участок размером около 100 нм, выбранный на основе предыдущего сканирования, и так далее, пока не достигнуты непосредственные измерения требуемых параметров. Это могут быть, например, измерения расстояний между атомами, изучение структуры поверхности или создание карты плотности атомных состояний. Кроме того, с помощью микроскопа можно производить манипуляции с отдельными атомами или молекулами. Разрешение СТМ в таких измерениях составляет около ангстрема (0,1 нм) в плоскости и 0,01 нм в глубину.

Для того, чтобы насадить молекулу на кончик зонда на подготовленную подложку наносится раствор, содержащий фуллерены определенного размера. После высыхания подложка сканируется зондом. Кончик зонда подходит к выбранному фуллерену и обвивает его, как показано на иллюстрации. При правильной комбинации напряжения на зонде и туннельного тока фуллерен удерживается зондом. Затем выполняется тестовый скан того же участка для проверки корректности работы модифицированного зонда, и подложка с фуллеренами заменяется на кювету с образцами, погруженными в масло.

Сканирующий туннельный микроскоп предоставляет уникальную возможность исследования атомных и молекулярных структур материалов с высоким разрешением. Благодаря его способности зондировать поверхность с атомной точностью, мы можем наблюдать атомные решетки и молекулярные структуры непосредственно на поверхности образцов. Кроме того, этот микроскоп позволяет манипулировать отдельными атомами и молекулами, открывая новые возможности для создания и изучения наноматериалов и наноустройств.

Применение туннельного микроскопа распространяется на множество областей, включая электронику, нанотехнологии, материаловедение, биологию и медицину. Он используется для исследования и создания новых материалов, разработки высокоточных наноустройств, изучения биологических объектов на молекулярном уровне и многое другое.

Последние достижения в области сканирующего туннельного микроскопа открывают перед нами широкие перспективы для улучшения его характеристик и функциональности. Увеличение разрешения и расширение спектра исследуемых материалов позволят нам исследовать более сложные системы и структуры с еще большей детализацией. Развитие новых методов анализа, таких как спектроскопия и магнитное отображение, также усовершенствует возможности сканирующего туннельного микроскопа и расширит его применение в различных научных исследованиях.

Дальнейшие исследования в области туннельного эффекта и сканирующего туннельного микроскопа играют важную роль в продвижении науки и технологии. Понимание физических основ туннельного эффекта и разработка новых методов исследования с помощью сканирующего туннельного микроскопа не только способствует расширению наших знаний о мире атомов и молекул, но и обеспечивает основу для разработки новых материалов, устройств и технологий в различных областях, включая нанотехнологии, медицину и электронику.

Список использованных источников:

1. Делоне Н.Б. Туннельный эффект // Соросовский образовательный журнал [электронный ресурс], 2000 – режим доступа: <https://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/928.html> - дата доступа: 14.04.2024.
2. Г. Бинниг, Г. Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности – Нобелевские лекции по физике – 1996. УФН, т. 154 (1988), вып.2, с. 261.
3. Сканирующий туннельный микроскоп – режим доступа: <https://chemistry.herzen.spb.ru/%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F-%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B8/%D1%81%D0%BA%D0%B0%BD%D0%B8%D1%80%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B9-%D1%82%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF/> - дата доступа: 14.04.2024
4. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности. – УФН, 1988, т.154, с.261.

UDC

TUNNEL EFFECT. TUNNEL MICROSCOPE

Nizovcova M. A., Drab A.A., students of 378105 group

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Leonovich A.A. – Docent of the Department of Physics PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article is devoted to such a quantum phenomenon as the tunneling effect and its use in a tunneling microscope. It describes the essence of the tunneling effect and its application in a tunneling microscope.

Keywords. Tunnel effect, tunnel microscope, quantum phenomenon.