

## Физика – школьники. Задача 7 «Как работает туннельный микроскоп» (базовая).

Сканирующая зондовая микроскопия является одним из наиболее мощных методов изучения объектов нанотехнологии. Первым из зондовых микроскопов был сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). СТМ позволяет получать замечательные изображения отдельных атомов.

Работа СТМ основана на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер в вакууме между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле. Это схематично изображено на рис.1. Эффект туннелирования имеет квантовую природу и заключается в следующем. Существует отличная от нуля вероятность того, что частица (например – электрон) преодолет потенциальный барьер даже в том случае, когда ее полная энергия (остающаяся при этом неизменной) меньше высоты барьера. В СТМ зонд подводится к поверхности образца на расстояния в несколько ангстрем и образуется туннельно-прозрачный потенциальный барьер, величина которого определяется, в основном, значениями работы выхода электронов из материала зонда и образца. При приложении разности потенциалов между зондом и образцом между ними начинает течь электрический ток, вызванный туннелированием электронов.

Несмотря на то, что эффект туннелирования наблюдается только для квантовых объектов, для анализа работы СТМ часто можно обойтись без квантовой механики. При качественном рассмотрении барьер можно считать прямоугольным (см. рис. 1, на котором форма искажена из-за наличия разности потенциалов между зондом и образцом). При этом эффективная высота барьера  $\varphi^*$  равна средней работе выхода материалов зонда  $\varphi_3$  и образца  $\varphi_0$ :  $\varphi^* = \frac{\varphi_3 + \varphi_0}{2}$ . Для оценок и качественных рассуждений часто пользуются следующей упрощенной формулой для плотности туннельного тока  $j_t$ , протекающего между двумя проводниками, разделенными вакуумным туннельным барьером:

$$j_0 = j_0 \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m_e \varphi^*} \Delta\right) \quad (1)$$

где  $j_0$  – постоянная, зависящая от разности потенциалов между проводниками,  $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $m_e$  – масса электрона,  $\varphi^*$  – эффективная высота туннельного барьера (в энергетических единицах, например в эВ).

Конечно, на самом деле на атомных масштабах острие зонда СТМ и тот участок образца, который изучается, выглядит совсем не так, как это показано на рис.1. Куда ближе к реальности картина, показанная на рис.2 и учитывающая атомную структуру вещества.

**Вопрос 1. Туннельный ток течет через любой атом зонда, рядом с которым расположен атом образца. Острие зонда СТМ на самом деле состоит не из одного атома, а из нескольких. Тем не менее, СТМ очень часто дает возможность разрешать отдельные атомы. Почему так получается (1 балл)?**

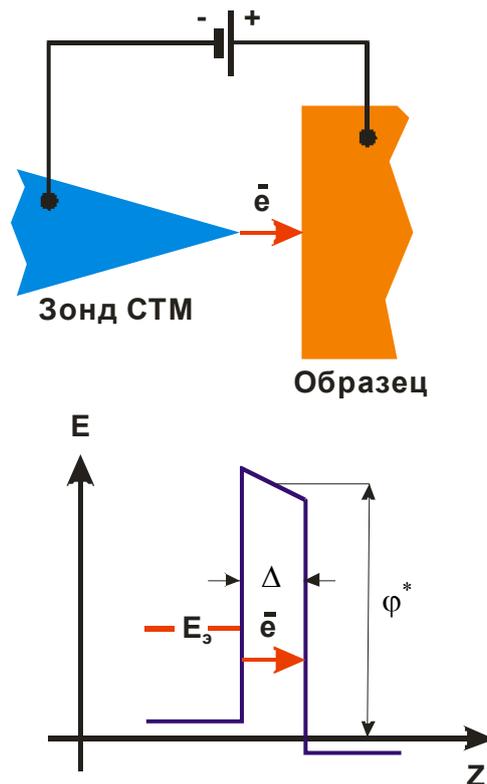


Рис.1. Схема, иллюстрирующая принцип работы СТМ за счет туннелирования электронов через потенциальный барьер:  $E$  – энергия,  $E_s$  – энергия туннелирующих электронов,  $Z$  – пространственная координата,  $\Delta$  – ширина и  $\phi^*$  – эффективная высота туннельного барьера.

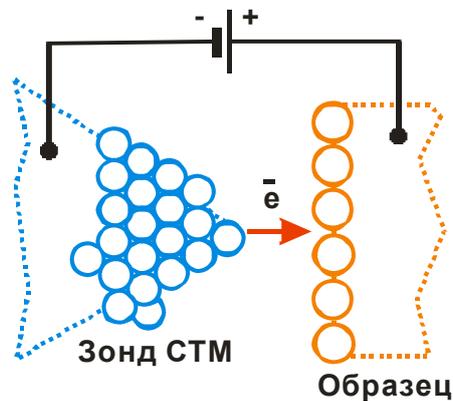


Рис.2. Схематическое изображение атомной структуры участков конца зонда и поверхности образца, между которыми происходит туннелирование при работе СТМ.

Часто для того, чтобы зонд СТМ был «хорошим» и позволял увидеть отдельные атомы он просто должен заканчиваться одним атомом (как это показано на рис.2).

**Вопрос 2. На основании формулы (1) докажите, что в случае, если высота туннельного барьера 5 эВ, напряжение на зонде 10 мВ, расстояние от конца зонда до поверхности 5 Å а точность измерения туннельного тока 10 %, СТМ позволит увидеть, что несколько**

атомов на поверхности находятся глубже, чем остальные на 0.5 Å. Предполагается, что зонд СТМ «хороший» (2 балла).

Поскольку в основе работы СТМ лежит явление туннелирования, то в получаемых данных содержится информация не только о рельефе, но и об электронной структуре поверхности образца, например о работе выхода электронов.

**Вопрос 3. Предложите способ измерения локальной эффективной высоты туннельного барьера с помощью СТМ (1 балл).**

**Вопрос 4. Предложите способ измерения с помощью СТМ локальных работ выхода электрона для зонда и образца в том случае (2 балла).**

### Методические замечания:

1. Задача решается в рамках знаний школьной программы и в рамках здравого смысла
2. Если Вам незнакомы какие – либо термины, Вы можете спросить об этом преподавателей в специальном разделе форума <http://www.nanometer.ru/forum/viewforum.php?f=19> или найти ответ самостоятельно (в том числе изучив доступные Вам Лекции на сайте Олимпиады <http://www.nanometer.ru/lectures.html?UP=156195> )
3. Решение оформляется и отсылается только в электронном виде, как описано в инструкциях к работе с задачами и решениями заочного теоретического тура, приведенных в разделе «Олимпиада» [http://www.nanometer.ru/olymp2\\_o4.html](http://www.nanometer.ru/olymp2_o4.html)
4. Подписывать решения не надо, Ваша фамилия, имя и отчество будут зашифрованы при проверке, идентификация для системы проверки производится по логину и паролю, который Вы вводите при входе на сайт Олимпиады [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru) в качестве участника (этот пароль Вы задавали при регистрации и заполнении анкеты участника).