

соты, изображение в туннельном микроскопе будет удвоиться — туннелирование будет происходить с обеих вершин в равной степени.

Итак, как же получается изображение поверхности в сканирующем туннельном микроскопе? Между иглой и исследуемым образцом прикладывается небольшая разность потенциалов, например 50 мВ. Игла микроскопа, помещенная на пьезосканере, совершает над образцом движение, подобное лучу в телевизоре — движется последовательно по линиям-строчкам, образуя полный кадр. Это движение обеспечивается напряжением, прикладываемым к X- и Y-электродам пьезосканера. При этом (что очень важно) игла движется и по третьей координате — Z, причем так, чтобы величина туннельного тока была постоянной. Движение иглы подобно полету крылатой ракеты над поверхностью земли — ракета летит над местностью, отслеживая ее рельеф таким образом, что высота полета поддерживается постоянной. В микроскопе поддерживается постоянная величина туннельного тока, а для однородного по составу образца это соответствует и постоянному зазору между иглой и поверхностью образца.

(Аналогия между полетом крылатой ракеты и движением иглы оказалась настолько близкой, что в микроскопе удалось применить электронную систему, аналогичную той, что использовалась в крылатых ракетах. Так в 1987 году и поступили американские ученые из Санты-Барбары, построив электронику микроскопа на специальном и очень умном процессоре, предназначенном для обработки аналоговых сигналов и построения следящих систем. В то время в американской промышленности, так же, как и в российской, были ярко выражены конверсионные тенденции, заключающиеся в применении военных технологий для мирных целей. Созданный таким образом туннельный микроскоп, получивший название «Nanoscope-2», является удачным примером конверсии.)

Изображение поверхности в микроскопе отображают на экране монитора в ярких красках и специально подобранной цветовой палитре — при этом искусство графики и умение физики идут рядом.

Современный туннельный микроскоп для научных, прикладных или

учебных целей — это небольшой и компактный прибор (размером с лабораторный оптический микроскоп). Вся его управляющая электроника занимает места не больше обычного вольтметра. А вот мониторы лучше использовать с большим экраном и высокого качества. Быстродействующий компьютер позволяет оперативно осуществлять обработку изображений — например, строить трехмерные образы поверхностей, поворачивая их под разными углами, меняя цвета изображения и используя различные графические эффекты.

Мы начали статью с закона Ома. Так что же, справедлив этот закон для туннельного перехода или нет? Ответ — да! Особенность в том, что зависимость сопротивления туннельного перехода от расстояния обратна соответствующей зависимости туннельного тока: $R(z) = U/I(z)$, где z — расстояние между проводниками (величина зазора туннельного перехода).

Сканирующий туннельный микроскоп применяют не только для того, чтобы визуализировать поверхность образца, увидеть отдельные атомы или молекулы. Туннельный микроскоп стал тем прибором, с помощью которого можно модифицировать поверхность, «перекачивать» по ней с помощью иглы отдельные атомы. (Эти эксперименты, правда, необходимо проводить при температурах около абсолютного нуля.) Швейцарский ученый Энгл, например, таким образом «написал» название фирмы, на которой был изобретен туннельный микроскоп, — слово IBM, составив его из отдельных атомов ксенона на поверхности никеля. При этом для буквы I он использовал всего девять атомов ксенона, а для букв B и M — по тринадцать.

Примечание 1

Первоначальная формулировка закона, установленного Омом, существенно отличалась от привычной современной. В своих экспериментах немецкий ученый применял оригинальную конструкцию гальванометра: две термопары, поддерживаемые при разных температурах, и набор проволочек одинакового поперечного сечения. Он определил, что угол поворота ϑ стрелки гальванометра зависит от длины выбранной проволочки X следующим образом:

$$\vartheta = \frac{\Psi}{X + \delta}.$$

Константа δ зависела от длины подводящих проводов и типа термопар, а величина Ψ определялась разницей в нагреве термопар и была названа ученым «возбуждающей силой».

Благодаря последовательным усилиям Джоуля, Фарадея и Кирхгофа, величины в законе Ома получили новую интерпретацию. Стало ясно, что вместо угла поворота стрелки гальванометра должна фигурировать величина электрического тока I и что «возбуждающая сила» — это по сути дела разность электрических потенциалов $\Delta\phi$. А в знаменателе нужно записывать полное сопротивление цепи, состоящей из сопротивления выбранной проволоки, соединительных проводов и внутреннего сопротивления термопар:

$$I = \frac{\Delta\phi}{R_x + R_\delta}.$$

Как часто бывает, первый шаг в развитии физической идеи является определяющим, и поэтому мы знаем не закон Ома — Джоуля — Фарадея — Кирхгофа, а закон, носящий имя одного ученого. Искусство экспериментатора и мастерство теоретика позволили Ому установить новый физический закон, а 155 лет спустя те же качества, присущие Биннигу и Рореру, позволили увидеть атомы с помощью созданного ими сложного прибора, который в упрощенной аналогии состоит из источника напряжения, измерителя тока и двух проводников — образца и иглы.

Примечание 2

За эффекты, связанные с появлением туннельного тока, неоднократно присуждались различные премии, в том числе и Нобелевские.

В 1973 году Нобелевская премия по физике была присуждена Лео Эсаки за открытие явления туннелирования в твердых телах и Айвару Живеру за экспериментальное исследование явления туннелирования в полупроводниках и сверхпроводниках. Вторую половину премии присудили Брайану Джозефсону за теоретические исследования по сверхпроводимости и туннелированию, в частности — за открытие явления, получившего название эффекта Джозефсона.

В 1986 году Нобелевскую премию по физике получили Герд Бинниг и Генрих Рорер за изобретение сканирующего туннельного микроскопа.

На основании своего открытия Эсаки изобрел туннельный диод, который применяется вместо радиоламп в высокочастотных генераторах. На основе эффекта Джозефсона построены стандарты частоты и чувствительные измерители магнитного поля. Сканирующие туннельные микроскопы, изобретенные Биннигом и Рорером, работают в научных и производственных лабораториях всего мира.