

Рис.1. При большом зазоре между проводниками ток равен нулю, при контакте проводников в цепи течет ток, например 1 А. До какого расстояния δ нужно сблизить два проводника, чтобы появился заметный электрический ток?

называемого *туннельного эффекта*. Туннельный эффект — это прохождение через *потенциальный барьер* микрочастицы, энергия которой меньше, чем высота барьера. В эксперименте Янга электроны находятся в потенциальной яме, и их энергия меньше высоты потенциального барьера, образуемого воздушным зазором. Одна часть электронов проходит сквозь барьер — туннелируют. Строгое объяснение этого эффекта дает квантовая механика (исходя из неопределенности импульса микрочастицы в области барьера). Туннельный эффект проявляется в различных системах; например, спонтанное излучение ядром электрона — β -распад — происходит также вследствие туннельного эффекта.

Неожиданное применение туннельного эффекта нашло себя в приборе, сконструированном в 1981 году сотрудниками исследовательского центра фирмы ИВМ в Швейцарии Гердом Биннигом и Генрихом Рорером. Швейцарские ученые поставили цель создать установку для спектроскопических исследований сверхпроводников. Они предполагали, что с ее по-

мощью смогут увидеть отдельные участки поверхности размером порядка 10 нанометров (одной стомиллионной метра). Созданный ими прибор превзошел все ожидания — 4 марта 1981 года Бинниг и Рорер (совместно с коллегами) увидели отдельные атомы (!) на поверхности кремния. Этот день можно считать днем рождения нового прибора — *сканирующего туннельного микроскопа* (СТМ).

«Глазами» микроскопа является его механическая часть (рис.2). В туннельном микроскопе изучают проводящие образцы. Для наблюдения поверхности образца его закрепляют на столике микроскопа, а заостренную иглу устанавливают на специальном манипуляторе — пьезосканере. Как сделать иглы для микроскопа, мы поговорим позже, а сейчас — об устройстве пьезосканера.

Пьезосканер первого микроскопа имел вид треноги, изображенной на рисунке 2. Каждую из «ног» такого манипулятора изготавливали из пьезокерамики в форме удлиненного бруска квадратного сечения. На противоположные грани брусков были нанесены металлические электроды. Прикладывая электрическое напряжение к электродам, можно было управлять длиной брусков — укорачивать или удлинять. (Такое свойство пьезокерамики используется не только в туннельном микроскопе, но и, например, в будильнике электронных часов. Пьезодиск в часах под действием переменного напряжения меняет свои размеры, тем самым возбуждая в воздухе звуковые колебания, которые нас и будят по утрам.)

Если приложить электрическое напряжение к каждой из трех «ног» манипулятора, то можно осуществить перемещение иглы по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Такие манипуляторы обеспечивают перемещение иглы на расстояния до 10 микрон.

В современных туннельных микро-

скопах используются манипуляторы в виде монолитной трубки с системой электродов (рис.3). Если приложить напряжение к Z-электродам, то верхняя часть трубки изменит длину, обеспечивая перемещение иглы вдоль Z-координаты. Перемещение иглы по другим координатам осуществляется за счет изгиба трубки. Достигается это следующим образом. В нижней части трубки имеется система X- и Y-электродов. Если к одному из X-электродов приложено положительное напряжение, а к другому отрицательное, то одна сторона трубки укоротится, а другая удлинится, в результате трубка изогнется, а игла переместится практически вдоль X-координаты. Аналогично можно осуществить перемещение иглы и по координате Y. При длине трубки 5 см, наружном диаметре 1 см и толщине стенок 0,3 мм перемещение по координатам X и Y может достигать 250 мкм, а по координате Z — до 10 мкм. При этом точность поддержания размеров трубки — сотые доли нанометра.

Для того чтобы получить высокое разрешение в туннельном микроскопе, необходимо применять иглы с острым кончиком. Желательно, чтобы на конце острия находился всего лишь один атом. К счастью, на момент изобретения туннельного микроскопа такие иглы уже умели делать (подобные иглы использовались в ионном проекторе). Иглы изготавливались из тонкой вольфрамовой проволоки, острие иглы имело форму

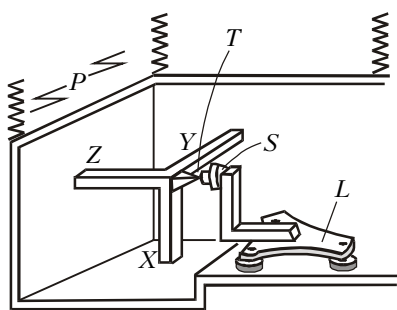


Рис.2. Общий вид механической системы микроскопа конструкции Биннига и Рорера. Игла T расположена на трехкоординатном манипуляторе с тремя электродами X, Y, Z. Для осуществления начального сближения образец S установлен на «трехногий ходилке» — манипуляторе грубых перемещений L. С целью виброизоляции механика микроскопа подвешена на мягких пружинах P

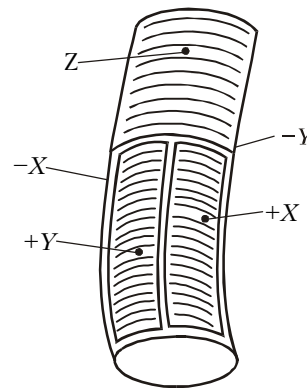


Рис.3. Тонкостенная трубка из пьезокерамики обеспечивает перемещение иглы по трем координатам. Для этого на трубке нанесены металлические электроды. При приложении напряжения к парам электродов $-X, +X$ или $-Y, +Y$ трубка изгибается, и игла перемещается по координатам X и Y. Подача напряжения к Z-электроду приводит к изменению общей длины трубки — игла перемещается по координате Z