

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

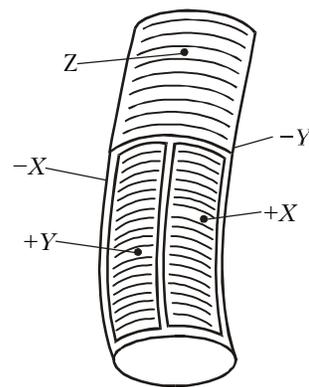


Рис.3. Тонкостенная трубка из пьезокерамики обеспечивает перемещение иглы по трем координатам. Для этого на трубке нанесены металлические электроды. При приложении напряжения к парам электродов $-X, +X$ или $-Y, +Y$ трубка изгибается, и игла перемещается по координатам X и Y. Подача напряжения к Z-электроду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

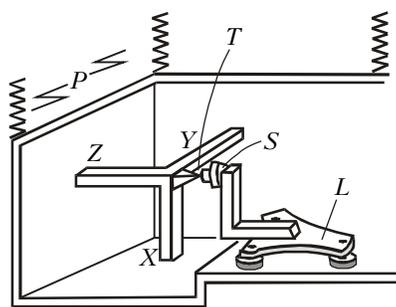


Рис.2. Общий вид механической системы микроскопа конструкции Биннига и Рорера. Игла T расположена на трехкоординатном манипуляторе с тремя электродами X, Y, Z. Для осуществления начального сближения образец S установлен на «трехногий ходилке» — манипуляторе грубых перемещений L. С целью виброизоляции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