

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

537.533.35

**ВАКУУМНАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — НОВЫЙ МЕТОД
ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ***И. П. Ревокатова, А. П. Силин*

В последнее время заметно возрос интерес к изучению поверхности твердых тел. Это в свою очередь привело к появлению новых методов и приборов для исследования поверхности. В настоящей заметке мы кратко рассмотрим появившийся совсем недавно принципиально новый метод исследования поверхности, получивший название вакуумной туннельной микроскопии¹.

Первый сканирующий вакуумный туннельный микроскоп (СВТМ) был изготовлен в Исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе (Швейцария). Работа и возможности СВТМ испытаны на ряде материалов. Уже очевиден ряд преимуществ, которые метод СВТМ имеет по сравнению с ранее известными методами. С помощью СВТМ можно получить в атомарном масштабе трехмерную картину поверхности с разрешением высоты микро-рельефа $\sim 0,1-0,2 \text{ \AA}$, что на порядок лучше, чем в сканирующем электронном микроскопе. Следует отметить, что в СВТМ используются слабые электрические поля (на 3 порядка меньше, чем в ионизационном микроскопе, энергия «туннельного» луча $\sim 1 \text{ мэВ} \div 4 \text{ эВ}$), благодаря чему не происходит разрушение исследуемой поверхности. Кроме того, в СВТМ имеется свободный доступ к исследуемой поверхности, что позволяет одновременно со структурой поверхности изучать проходящие на ней физические и химические процессы.

Действие СВТМ основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер. Легко получить (см., например,²), что коэффициент прохождения D через прямоугольный потенциальный барьер высотой Δ и шириной l для частиц с массой M и энергией $E < \Delta$ будет равен

$$D = \frac{4k^2\kappa^2}{(k^2 + \kappa^2) \text{sh}^2 l\kappa + 4k^2\kappa^2}; \quad (1)$$

здесь

$$\kappa = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2M(\Delta - E)}, \quad k = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2ME}. \quad (2)$$

Отсюда легко получить, что туннельный ток I через вакуумный зазор шириной l будет определяться следующей формулой¹:

$$I \propto \exp(-A\sqrt{\Delta}l), \quad (3)$$

где

$$A = \sqrt{\frac{8M}{\hbar^2}} = 1,025 \text{ эВ}^{-1/2} \text{ \AA}^{-1}, \quad (4)$$

Δ — средняя работа выхода двух веществ, находящихся в контакте. Из формул (3), (4) следует, что если величина Δ составляет несколько эВ, то

изменение l даже на величину моноатомной ступеньки (несколько Å) приводит к изменению туннельного тока на 3 порядка. Такая резкая зависимость туннельного тока от величины вакуумного зазора позволяет получить в СВТМ чрезвычайно высокое разрешение.

Попытки экспериментального наблюдения и практического использования вакуумного туннелирования электронов долгое время не имели успеха в первую очередь из-за вибраций, в результате которых происходит неконтролируемое изменение туннельного тока, обусловленное изменением ширины вакуумного зазора. Загрязнение исследуемой поверхности чужеродными атомами в результате адсорбции и окисления также неконтролируемо изменяет величину туннельного тока.

Основным узлом СВТМ является измерительная ячейка. Она состоит из вакуумного кожуха, внутри которого помещается столик с электродами и устройством для их перемещения. Во всех моделях СВТМ электродами служат вольфрамовая игла и пластина из исследуемого материала.

Для уменьшения внешних вибраций вся измерительная ячейка помещается на массивную каменную плиту, которая лежит на надувных подушках. Чтобы избавиться от внутренних колебаний установки, используется магнитная подвеска столика с электродами. Следует отметить, что СВТМ работает при комнатной температуре, кроме сверхпроводящего свинцового блока, используемого для магнитной подвески столика с электродами. Чтобы устранить вибрацию самих электродов, была разработана и использована новая конструкция крепления и перемещения электродов, в которой практически отсутствовала механическая связь электродов с внешней средой³.

В качестве основного устройства для перемещения электродов был использован стандартный пьезомонитор фирмы «Филлипс». С его помощью возможно перемещение электродов в трех взаимно перпендикулярных направлениях более чем на 1000 Å с точностью $0,2 \text{ Å}$. Для управления перемещением к трем пьезокристаллам пьезомонитора прикладывались независимо регулируемые напряжения. Напряжение, прикладываемое к пьезомонитору для перемещения иглы в перпендикулярном направлении, задавалось контролирующей ячейкой. Оно изменялось в зависимости от высоты микрорельефа таким образом, чтобы при постоянном напряжении, приложенном к вакуумному зазору, поддерживать постоянной величину туннельного тока. При этом величины управляющих перемещением пьезомониторов напряжений определяют топографическую картину поверхности при постоянной работе выхода (3). Для определения того, какие изменения управляющих напряжений обусловлены изменениями ширины зазора l , а какие — изменениями работы выхода Δ , проводилось изменение величины зазора на Δl . Тогда, используя соотношение

$$\Delta^{1/2} = \frac{\Delta (\ln I)}{\Delta l}, \quad (5)$$

можно определить изменение работы выхода, измерив изменение логарифма туннельного тока $\Delta (\ln I)$.

С помощью СВТМ можно определить не только высоту деталей микрорельефа поверхности, но также и их ширину. Тангенциальная разрешающая способность СВТМ зависит от размеров острия иглы, с помощью которой проводится сканирование.

Известно¹, что если использовать иглу со сферическим острием радиуса r , то тангенциальная разрешающая способность будет определяться следующим соотношением:

$$\delta(r) = 3 \sqrt{\frac{2r}{A\sqrt{\Delta}}} \approx 3 \sqrt{r(\text{Å})}. \quad (6)$$

Как видно из этого соотношения, чтобы получить $\delta \lesssim 100 \text{ \AA}$, необходимо иметь иглу с $r \lesssim 100 \text{ \AA}$. Такие иглы обычно используются в эмиссионных микроскопах. Однако иглы для эмиссионных микроскопов нельзя использовать в СВТМ из-за их чувствительности к вибрациям, что вызвано их большой длиной. Поэтому создатели СВТМ¹ разработали новую процедуру изготовления игл. Вольфрамовый пруток диаметром 1 мм затачивался под углом 90° , таким образом, чтобы на конце образовывались минииглы с радиусами $\sim 1000 \text{ \AA} = 1 \text{ мкм}$. Благодаря чрезвычайной чувствительности туннельного сопротивления к ширине зазора фиксировался ток только от самой длинной иглы. Еще больше можно заострить иглу, если несколько раз коснуться ею исследуемой поверхности. При использовании этой процедуры удалось достичь величин $\delta \sim 10 \text{ \AA}$.

Первые эксперименты на СВТМ первого поколения проводились в вакууме 10^{-6} Торр. Была измерена зависимость туннельного сопротивления от величины вакуумного зазора между вольфрамовой иглой и платиновой пластиной. Исходная величина зазора составляла 10 \AA . Измерения проводились при постоянном напряжении обеих полярностей величиной 60 мВ, при котором еще не наблюдается полевая эмиссия электронов с конца вольфрамовой иглы.

Из формулы (3) следует экспоненциальная зависимость туннельного сопротивления R от величины зазора

$$R(l) \sim \exp(A \sqrt{\Delta} l). \quad (7)$$

Однако такая зависимость R наблюдалась только после специальной очистки поверхности электродов, поскольку вакуум 10^{-6} Торр недостаточно высок, чтобы избежать загрязнения электродов. Процедура очистки состояла в следующем³: игла приводилась в соприкосновение с поверхностью пластинки, после чего прикладывалось напряжение с частотой 10 кГц, в результате чего происходила ультразвуковая очистка электродов. После первой очистки величина туннельного барьера составляла 3,2 эВ, а после повторных очисток величина туннельного барьера приближалась к 5 эВ, что соответствует средней работе выхода для платины и вольфрама Δ .

С помощью СВТМ первого поколения были также получены трехмерные топографические картины поверхности (110) Ir монокристаллов CaIrSn_4 ⁴. Наблюдались одно-, двух-, и трехатомные ступени и начальные стадии образования винтовых дислокаций.

Полученная при помощи СВТМ величина высоты одноатомной ступени $6,7 \text{ \AA}$ хорошо согласуется со значением $6,87 \text{ \AA}$, полученным рентгеновским методом.

В СВТМ второго поколения измерения проводились в вакууме $\sim 10^{-10}$ Торр. Загрязнения поверхности в столь высоком вакууме не происходило, на что указывало постоянство высоты туннельного барьера. Устройство этого микроскопа подробно описано в работе⁴. Топографические «картины» снимались при сканировании иглой вдоль исследуемой поверхности при постоянном туннельном токе.

При исследовании золота⁴ его поверхность подвергалась обычной процедуре, вызывающей перестройку поверхности (110), а именно, бомбардировке атомами аргона с последующим отжигом в вакууме $\sim 10^{-10}$ Торр. До обработки исследуемая поверхность (110) золота была практически атомно гладкой. После обработки микрорельеф исследовался при комнатной температуре и при 300° C . При комнатной температуре наблюдалась гофрировка поверхности (110) золота в направлении [001]. Период гофрировки изменялся от 20 до 100 \AA , а амплитуда гофрировки — от 0,1 до 2 \AA . Было замечено лишь незначительное количество ступеней высотой 6 \AA в направлении [110]. При температуре 300° C наблюдалась высокая плотность одно- и двухатомных ступеней в направлении [110]. Аналогичные данные об увеличении плотности

атомных ступеней при увеличении температуры были получены для поверхности (100)Ni из анализа формы линий дифракции гелия.

Поскольку достижение плотности тока $\sim 10^3 \div 10^4$ А/см² в СВТМ не представляет трудности, то этот прибор можно использовать для исследования поверхностей не только металлов, но также и слабо легированных полупроводников.

Так, при помощи СВТМ второго поколения наблюдалась реконструкция поверхности (111) Si⁵. Образование поверхностной сверхрешетки 7×7 наблюдалось и ранее, например, при помощи дифракции медленных электронов. Однако с помощью СВТМ перестройка впервые наблюдалась в координатном пространстве, а не в пространстве импульсов, что существенно упростило интерпретацию результатов.

При подготовке образца к исследованию на СВТМ он нагревался до 900° С в вакууме $\sim 10^{-10}$ Торр непосредственно в измерительной камере, что позволило удалить слой окисла, возникший на поверхности во время переноса образца в измерительную камеру после химического травления. Микро рельеф поверхности снимался при напряжении 2,9 В (положительным электродом являлась игла) ввиду того, что напряжение меньше 2,5 В приводило к прямому контакту между иглой и образцом. Была получена картина расположения атомов в двух элементарных 7×7 ячейках с 9 минимумами и 12 максимумами, которая позволяет судить о расположении атомов на поверхности (111) Si. Размеры диагоналей ячейки 7×7 46 ± 1 Å и $29 + 4$ Å хорошо согласуются со значениями, полученными рентгеновскими методами: 46, 56 Å и 26,88 Å.

Благодаря высокому пространственному разрешению СВТМ можно использовать для изучения адсорбции атомов и молекул на поверхности твердых тел, а также для контроля процессов роста кристаллов и исследования ультратонких слоев изоляторов на поверхности полупроводников.

Предполагается создание СВТМ третьего поколения, работающего при температуре жидкого азота, когда можно добиться еще лучшей механической стабильности.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.— Appl. Phys. Lett., 1982, v. 40, p. 178.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика.— М.: Физматгиз, 1963.
3. Binnig G., Gerber Gh.— IBM Tech. Disc. Bull., 1979, v. 22, p. 2897.
4. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.— Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, p. 57.
5. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.— Ibid., 1983, v. 50, p. 120.