

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ – НОВЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Р. З. БАХТИЗИН

Башкирский государственный университет, Уфа

SCANNING TUNNELING MICROSCOPE: A NEW TOOL FOR STUDY OF SOLID SURFACES

R. Z. BAKHTIZIN

A new instrument called the scanning tunneling microscope (STM) has been developed. The STM is capable to generate real space images of surfaces showing atomic structure. These images offer a new view of matter on an atomic scale. The details of principles and performance of the STM are described. Few examples of its application for solid surfaces' study are presented as illustrations of the power of the instrument.

Кратко описаны история создания сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), принцип его действия и основные трудности, которые необходимо было преодолеть для получения изображений атомной структуры поверхностей твердых тел. Возможности прибора иллюстрируются сериями СТМ-изображений с атомным разрешением.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Физика поверхностных явлений в настоящее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся разделов науки. Именно на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела основаны успехи современных микро- и нанотехнологий, гетерогенного катализа, космических технологий и т.п. Поэтому исследование разнообразных электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, остается актуальной задачей. И заветное желание ученых (и не только ученых) на протяжении многих лет – непосредственное наблюдение за поведением отдельных атомов на поверхности твердого тела и изучение процессов с участием одиночных или небольших групп атомов.

Первостепенное значение для понимания свойств любого объекта имеет знание его атомной структуры, поэтому определение поверхностных структур – один из наиболее важных разделов физики поверхности. Последние 30 лет микроструктура поверхностей твердых тел интенсивно изучалась методами дифракции и рассеяния электронных и ионных пучков, а также электронной спектроскопии. Однако большинство этих методов первоначально разрабатывалось для исследования объемной структуры твердых тел, поэтому они не всегда годятся для получения информации о структуре поверхности, тем более на атомном уровне. Долгое время основным методом исследования структуры поверхностей служил метод дифракции медленных электронов (ДМЭ), с применением которого связан существенный прогресс в развитии науки о поверхности. Достаточно упомянуть, что с помощью ДМЭ была открыта атомная реконструкция поверхностей – существование особого их структурного состояния, отличного от объемного, и обнаружено большое количество специфических фазовых переходов на поверхностях, как чистых, так и покрытых адсорбированными пленками. В методе ДМЭ тонкий коллимированный моноэнергетический пучок электронов низкой (до десятков элек-

тронвольт) энергии направляется на поверхность исследуемого кристалла. Так как энергия падающих электронов сравнительно невелика, то они проникают на глубину всего одного-двух атомных слоев, поэтому анализ углового распределения дифракционных рефлексов, образованных рассеянным пучком, дает сведения о расположении атомов в поверхностном слое. Такая информация, однако, методически связана со структурой обратной¹ (а не прямой!) решетки и оказывается усредненной по относительно большой площади поверхности кристалла.

Справедливости ради следует отметить, что в настоящее время существуют приборы, позволяющие отображать отдельные атомы: полевой ионный микроскоп и просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения, однако оба они имеют существенные ограничения по применимости, связанные со специфическими требованиями к форме образцов. В первом случае образцы должны иметь форму острых игл из проводящего материала с радиусом закругления не более 1000 \AA , а во втором — тонких полосок толщиной менее 1000 \AA . Первые изображения атомов были получены с помощью полевого ионного микроскопа, изобретенного Э. Мюллером в 1951 году. В этом приборе игольчатый образец, обычно изготавливаемый из тугоплавкого металла типа вольфрама, располагается в вакуумной камере напротив флуоресцирующего экрана. Камера заполняется инертным газом (гелием или аргоном) до давления 10^{-4} – 10^{-5} торр, и после приложения к острию высокого положительного напряжения вблизи наиболее выступающих участков поверхности происходит полевая ионизация атомов газа за счет туннелирования их электронов в образец. Образовавшиеся ионы ускоряются этим же полем и бомбардируют флуоресцирующий экран, отображая с большим увеличением выступающие участки.

Поэтому изобретение в 1982 году Г. Биннигом и Х. Рорером² сканирующего туннельного микроскопа, который не накладывает ограничений на размеры образ-

цов, реально открыло двери в новый микроскопический мир.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) довольно прост, но кардинально отличается от всех предшествующих методик, применявшихся в физике поверхности. Тонкое металлическое острие, смонтированное на электромеханическом приводе (X, Y, Z -позиционере), служит зондом для исследования участков поверхности образца (рис. 1, а). Когда такое острие подводится к поверхности на расстояние $\leq 10 \text{ \AA}$, то при приложении между острием и образцом небольшого (от 0,01 до 10 В) напряжения смещения V_s через вакуумный промежуток δ_z начинает протекать туннельный ток I_t порядка 10^{-9} А. Полагая, что электронные состояния (орбитали) локализованы на каждом атомном участке, при сканировании поверхности образца в направлении X и/или Y одновременным измерением выходного сигнала в цепи Z можно получить картину поверхностной структуры на атомном уровне. Эта структура может быть отображена в двух режимах: измеряя туннельный ток и поддерживая расстояние δ_z от острия до поверхности образца или измеряя изменения в положении острия (то есть расстояние до поверхности образца) при постоянном туннельном токе (второй режим используется чаще).

Вообще СТМ можно рассматривать как сочетание трех концепций: сканирования, туннелирования и локального зондирования. Само сканирование как средство отображения объекта широко применяется и в других типах микроскопов, например в растровом электронном микроскопе, а также в телевизионной технике, а электронное туннелирование³ с успехом использовалось для изучения физических свойств твердого тела задолго до появления СТМ (как и контактная спектроскопия). Все это делает СТМ уникальным микроскопом, который не содержит линз (а значит, изображение не искажается из-за аберраций), энергия электронов, формирующих изображение, не превышает нескольких электронвольт (то есть меньше энергии типичной химической связи), что обеспечивает возможность неразрушающего контроля объекта, тогда как в электронной микроскопии высокого разрешения она достигает нескольких килоэлектронвольт и даже мегаэлектронвольт, вызывая образование радиационных дефектов.

³ За разработку метода туннельной спектроскопии Л. Эсаки, А. Джайверу и П.Д. Джозефсону была присуждена Нобелевская премия по физике 1973 года.

¹ Обратная решетка — совокупность узлов, радиусы векторы которых $\mathbf{r} = i\mathbf{a}^* + j\mathbf{b}^* + k\mathbf{c}^*$, где i, j, k — всевозможные целые числа, $\mathbf{a}^* = [\mathbf{b} \times \mathbf{c}] / V$, $\mathbf{b}^* = [\mathbf{c} \times \mathbf{a}] / V$, $\mathbf{c}^* = [\mathbf{a} \times \mathbf{b}] / V$; $[\mathbf{b} \times \mathbf{c}]$, $[\mathbf{c} \times \mathbf{a}]$, $[\mathbf{a} \times \mathbf{b}]$ — векторные произведения основных трансляций кристаллической решетки $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$; V — объем элементарной ячейки. Понятие обратной решетки весьма удобно при описании дифракции на кристаллах рентгеновских лучей и электронов, так как позволяет установить взаимно однозначное соответствие между дифракционными рефлексами и узлами обратной решетки.

² За изобретение нового класса электронных микроскопов — сканирующего туннельного микроскопа Г. Биннигу и Х. Рореру была присуждена Нобелевская премия по физике 1986 года (вместе с Э. Руской).

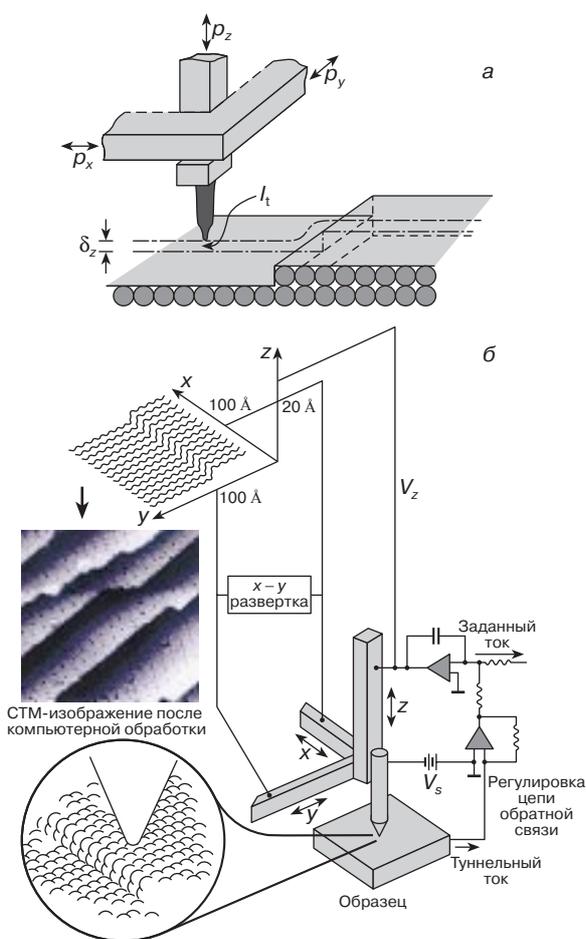


Рис. 1. *а* – принцип действия СТМ: p_x, p_y, p_z – пьезоэлементы; δ_z – туннельный вакуумный промежуток между острием-зондом и образцом; I_t – туннельный ток; *б* – схема, иллюстрирующая работу СТМ. Туннельный ток, возникающий при приложении напряжения V_s , поддерживается постоянным за счет цепи обратной связи, которая управляет положением острия с помощью пьезоэлемента p_z . Запись осциллограммы напряжения V_z в цепи обратной связи при одновременном воздействии пилообразного напряжения развертки вдоль осей x и y образует туннельное изображение, являющееся своего рода репликой поверхности образца

История создания этой методики берет свое начало с конца 60-х годов XX века, когда Р. Янг (Национальное бюро стандартов, США) попытался использовать электронное туннелирование для исследования геометрической структуры поверхности. С этой целью он разработал прибор, названный им топографиметром, весьма напоминающий современный СТМ за одним принципиальным исключением: сканирование осуществлялось на расстоянии $\sim 100 \text{ \AA}$ от поверхности и в режиме полевой электронной эмиссии (а не вакуумного тунне-

лирования!). В результате удалось наблюдать, например, поверхность дифракционной решетки (~ 180 линий/мм), но с разрешением лишь несколько сот ангстрем.

В ноябре 1978 года будущие Нобелевские лауреаты Бинниг и Рорер вернулись к идее использования вакуумного туннелирования для локальной спектроскопии тонких оксидных слоев на металлах. Для перемещения острия на малые расстояния и поддержания ширины вакуумного зазора с суб-ангстремной точностью были использованы пьезоэлектрические материалы и система обратной связи (рис. 1, *б*).

Несмотря на свою простоту в принципе, конструирование и изготовление СТМ до сих пор остается трудной задачей. Даже в наши дни существует немного лабораторий, располагающих СТМ, которые работали бы с истинно атомным разрешением. Все СТМ можно разделить на две основные группы: работающие на воздухе (или в другой среде) и в условиях сверхвысокого вакуума. Выделяют также низкотемпературные СТМ, работающие в условиях криогенных температур. В дальнейшем будем говорить только о сверхвысоковакуумных СТМ, работающих при комнатной температуре. Перечислим основные проблемы, стоящие перед разработчиками: 1) изоляция от акустических и механических вибраций; 2) создание быстродействующей малошумящей электроники, работающей в широком динамическом диапазоне; 3) обеспечение надежных сверхвысоковакуумных условий, допускающих различные манипуляции с образцом; 4) изготовление тонких атомногладких острий-зондов и их диагностика.

Для решения первоначально казавшейся непреодолимой проблемы виброизоляции Бинниг и Рорер в своей первой конструкции использовали даже сверхпроводящий магнитный подвес для размещения образца и сканирующего узла. В дальнейшем эту проблему удалось решить используя специальную подвеску в вакууме всего микроскопа на длинных пружинах и разместив сканирующий узел на массивном виброизолирующем столике. Для подвода острия-зонда к образцу на расстояние δ_z , равное нескольким ангстремам, и сканирования вдоль поверхности использовался пьезодвигатель на основе пьезоэлектриков – это такие материалы, которые изменяют свои размеры под действием управляющего напряжения (рис. 1, *а*).

Схема, демонстрирующая устройство СТМ и его работу, приведена на рис. 1, *б*. На пьезоэлемент p_z подается напряжение с выхода усилителя обратной связи, которое определяет величину зазора между образцом и острием и тем самым величину туннельного тока. Сам туннельный ток должен быть все время пропорционален заданному току, что поддерживается благодаря управляемой компьютером цепи обратной связи. На пьезо-

зоэлементы p_x и p_y под управлением того же компьютера подаются пилообразные напряжения, формирующие строчную и кадровую развертки (растр) подобно тому, как это осуществляется в телевидении. Осциллограммы напряжения V_z запоминаются компьютером, после чего преобразуются в зависимость $z(x, y)$, отображающую траекторию движения острья и, таким образом, являющуюся туннельным изображением поверхности образца. Как правило, записанные сигналы подвергаются фильтрации и дополнительной компьютерной обработке, позволяющей представить туннельные изображения в режиме так называемой серой шкалы, в котором контраст изображения коррелирует с рельефом поверхности: светлые пятна соответствуют более высоко расположенным областям и наоборот. И в процессе работы даже с первым вариантом СТМ в марте 1981 года (всего через 27 месяцев после того, как была сформулирована его базовая концепция!) была экспериментально доказана характерная для туннелирования экспоненциальная зависимость тока I_t от расстояния δ_z острье–образец. День 16 марта 1981 года считается датой рождения сканирующей туннельной микроскопии.

Основная область применения СТМ – физика поверхности твердых тел. Уже первые эксперименты по исследованию поверхности золота Au(100), относительно которой из данных ДМЭ было известно, что она испытывает реконструкцию 1×2 , позволили наблюдать различные сверхструктуры и ступеньки моноатомной высоты (рис. 2), что бесспорно свидетельствовало о разрешении прибора порядка нескольких ангстрем (сами исследователи ожидали получить геометрическое разрешение по плоскости наблюдения не более 45 \AA). И стало ясно, что в руках ученых появился уникальный инструмент, позволяющий наблюдать на поверхности отдельные атомы. Но чтобы убедить широкие круги научной общественности в том, что получаемые данные являются реальными экспериментальными результатами, а не данными компьютерного моделирования, понадобилось провести исследование поверхности кремния.

АТОМНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ; СТРУКТУРА 7×7

Самые элементарные соображения позволяют утверждать, что расположение атомов в поверхностном слое, вообще говоря, не такое, как внутри кристалла. В объеме идеального кристалла все валентные связи насыщены, но в процессе образования поверхности, например при раскалывании кристалла, связи между атомами разрываются, а создававшие их электронные пары распадаются на независимые электроны, готовые образовать новые связи – их называют оборванными

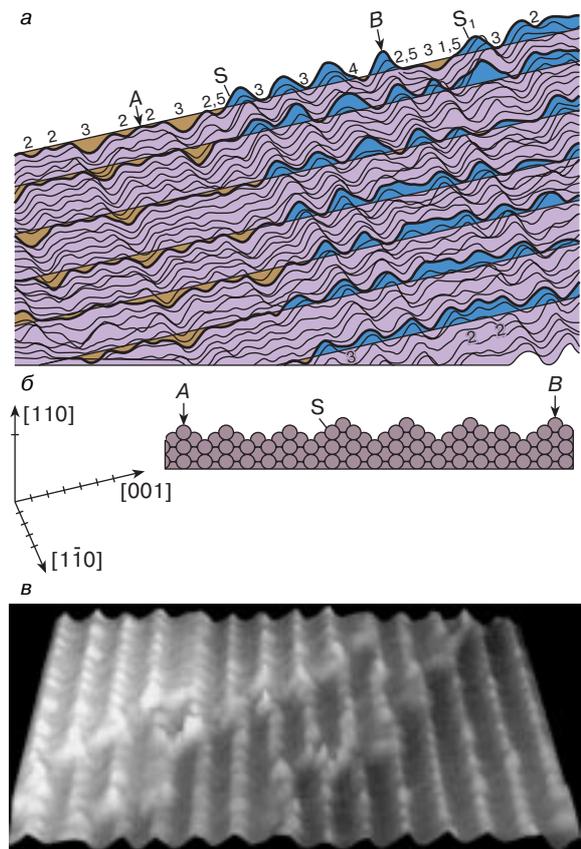


Рис. 2. СТМ-изображение поверхности золота Au(110): а – изображение, полученное в режиме линейной шкалы, на котором отчетливо видны ряды атомов и в то же время наблюдается определенное разупорядочение: узкие полосы с реконструкцией 1×2 перемешаны с полосами 1×3 и 1×4 , а также с линиями ступеней. Заметим, что исторически это самое первое СТМ-изображение с атомным разрешением, полученное Биннигом и Рорером в марте 1982 года, однако оно сравнительно долгое время оставалось неопубликованным (Surf. Sci. 1983. Vol. 131. P. L379) отчасти из-за более впечатляющих СТМ-изображений поверхности Si(111)– 7×7 (см. рис. 3), полученных осенью того же года; б – структурная модель поверхности Au(110); в – впоследствии атомная структура поверхности Au(110) сравнительно легко наблюдалась в режиме “серой” шкалы

связями. Такая ситуация энергетически очень невыгодная, поэтому, стремясь к равновесию, поверхностные электроны будут образовывать дополнительные связи между атомами на самой поверхности с тем, чтобы число оборванных связей существенно сократилось. В частности, соседние атомы, образуя дополнительные связи между собой, объединяются в пары – химеры, вследствие чего атомы каждого димера сближаются друг с другом, удаляясь от соседних атомов. В

результате на поверхности изменяется порядок кристаллической решетки и происходит реконструкция (то есть образуется новая сверхструктура).

Кроме реконструкции происходит еще один процесс перестройки – релаксация поверхности. В идеальном кристалле силы, действующие снизу на атомы, расположенные в объемной плоскости, уравниваются силами, действующими сверху. Но если эта плоскость оказывается на поверхности, то из-за отсутствия сил сверху первый слой атомов сместится ближе ко второму, второй – к третьему и т.д.

К сожалению, предсказать, какая конфигурация образуется на самом деле (или рассчитать ее по минимуму энергии), практически невозможно из-за бесконечного количества возможных моделей. Кроме того, появление той или иной реконструкции, которые зачастую мало различаются по энергии, в первую очередь определяется технологией обработки образца.

Одной из наиболее вызывающих и интригующих проблем в физике поверхности более 30 лет была структура поверхности Si(111)– 7×7 . Ранее с помощью метода ДМЭ было установлено, что эта реконструкция характеризуется периодом, превышающим период объемной решетки в 7 раз, и элементарной ячейкой, содержащей 49 атомов, однако детальное расположение этих атомов в ячейке оставалось неопределенным, а многочисленные (свыше двух десятков) модели этой структуры зачастую противоречили друг другу. На рис. 3, а приведено знаменитое туннельное изображение с атомным разрешением реконструкции 7×7 поверхности Si(111) в прямом (а не обратном) пространстве, характерными особенностями ромбической элементарной ячейки которой являются угловая ямка и 12 выступов – так называемые адатомы. На рис. 3, б приведено СТМ-изображение подобной поверхности, но в более традиционном для настоящего времени представлении. Впоследствии поверхность Si(111)– 7×7 стала использоваться в качестве своего рода эталона для проверки работоспособности СТМ.

Полученный результат (рис. 3, а) позволил полностью исключить из рассмотрения все многочисленные модели поверхности Si(111)– 7×7 . Несколько позже группе японских физиков под руководством К. Такаянаги на основе результатов экспериментов по просвечивающей электронной микроскопии и электронографии удалось построить свою, так называемую DAS-модель реконструкции 7×7 (рис. 3, в), которая предпо-

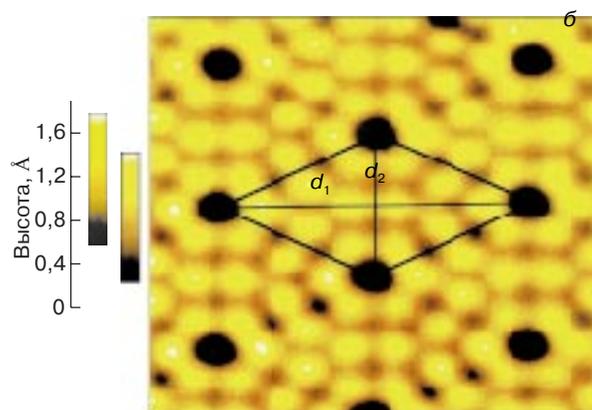
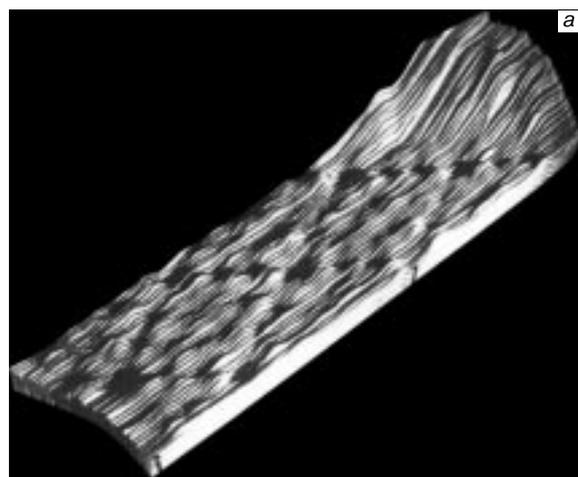
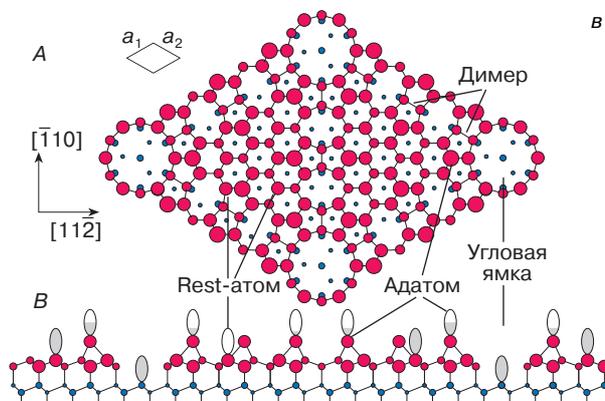


Рис. 3. СТМ-изображение реконструированной поверхности кремния Si(111)– 7×7 : а – рельеф поверхности, полученной из записей осциллограмм напряжения V_z ; напряжение смещения $V_s = +2,9$ В [1]; б – СТМ-изображение такой же поверхности, но полученное в режиме “серой” шкалы после фильтрации сигнала и его математической обработки; $V_s = +1,96$ В, туннельный ток $I_t = 4 \cdot 10^{-10}$ А. Черным ромбиком выделена элементарная ячейка, внутри которой находится 12 адатомов, длины диагоналей составляют $d_1 = 46,6$ А, $d_2 = 26,9$ А, глубина угловых ямок ~ 2 А; в – DAS-модель Такаянаги реконструкции 7×7 (А – вид сверху, В – вид сбоку); ромбиком выделена ячейка, содержащая 12 адатомов (крупные кружочки) и 9 димеров



лагает реконструкцию и более глубоких слоев в приповерхностной области. DAS-модель хорошо согласуется с результатами большинства экспериментов, выполненных с использованием рассеяния ионов средних энергий, дифракции рентгеновских лучей, ионного каналирования, СТМ, и в настоящее время считается общепринятой.

Яркие результаты, полученные на поверхности Si(111)-7 × 7, привлекли внимание к СТМ большого количества последователей, многим из которых удалось построить свои варианты прибора и в итоге также получить атомное разрешение (1985 год). С тех пор атомное разрешение стало официально установленным, а СТМ – общепризнанной методикой. И понадобилось минимальное время, чтобы об этом узнал широкий круг ученых и созрело общественное мнение о значимости работ Биннига и Рорера.

СТМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ СМЕЩЕНИЯ; ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ

Если наблюдать СТМ-изображения при различных напряжениях смещения V_s или, отключив на короткое время цепь обратной связи, снять зависимость туннельного тока I_t от V_s при постоянном значении зазора δ_z между острием и образцом, можно получить картину распределения оборванных связей, а также других электронных состояний, отвечающих разным энергиям, поскольку в процессе туннелирования в этом случае будут участвовать электроны с разными энергиями (из зоны проводимости, валентной зоны или локализованных состояний). Дальнейшее развитие этого подхода привело к появлению сканирующей туннельной спектроскопии, при которой измеряется зависимость $dI_t/dV_s = f(V_s)$, непосредственно связанная с локальной плотностью состояний в окрестности уровня Ферми.

Уровнем Ферми называется наивысший занятый электронами уровень при $T = 0$, соответственно энергией Ферми ϵ_F – энергия этого уровня. В импульсном пространстве уровень Ферми является изоэнергетической поверхностью (то есть поверхностью постоянной энергии, $\epsilon_F = \text{const}$), отделяющей занятые состояния от свободных, эту поверхность называют также ферми-поверхностью.

Что касается самих СТМ-изображений, то оказалось, что изображения, полученные при разных V_s (то есть соответствующие разным энергетическим состояниям), выглядят по-разному (рис. 4, а и б). Так, выступы, наблюдаемые на изображении заполненных состояний (рис. 4, а), обусловлены туннелированием в зону проводимости кремния через оборванные связи адатомов, в то время как впадины, видимые на изображении

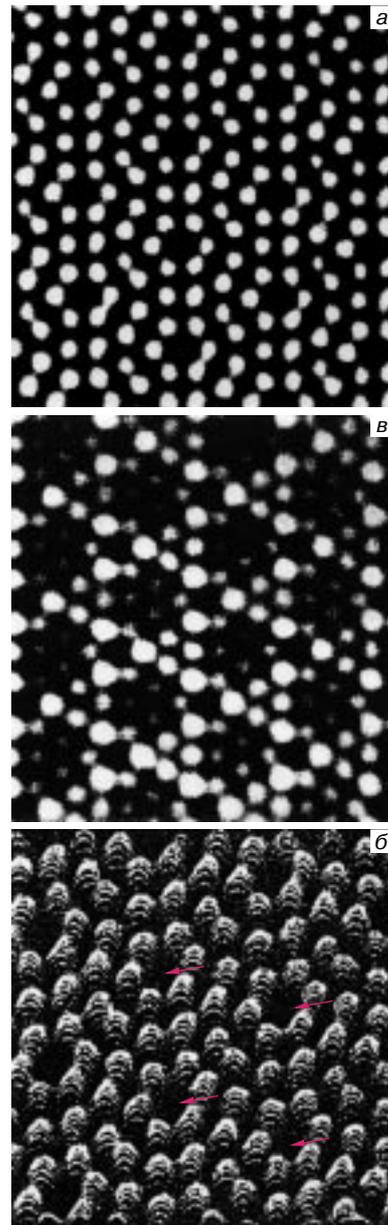


Рис. 4. СТМ-изображения поверхности Si(111)-7 × 7 при разных напряжениях смещения: а – $V_s = +2,4$ В, так называемое изображение заполненных состояний, электроны туннелируют из острия в образец; б – $V_s = -2,4$ В, изображение незаполненных состояний, электроны туннелируют из образца в острие-зонд; в – $V_s = +1,6$ В, изображение заполненных состояний, полученное в режиме линейной шкалы; стрелками указаны угловые дырки

незаполненных состояний, определяются туннелированием электронов из валентной зоны или локализованных состояний кремния в острие через оборванные связи rest-атомов (так называют атомы первого поверх-

ностного слоя) и атомов, расположенных в угловых ямках.

Таким образом, СТМ способен отображать локализованные состояния электронов, в частности распределение плотности состояний в прямом пространстве и расположение уровней на энергетической шкале. Но это означает, что СТМ позволяет наблюдать не сами атомы, а распределение в пространстве вокруг атомов плотности электронов различной энергии и дает не просто топографию, а скорее изображение электронной структуры поверхности в окрестности уровня Ферми. Это обстоятельство, с одной стороны, существенно повышает информативность метода, с другой — затрудняет расшифровку истинных поверхностных атомных структур.

Безусловно, поведение электронов, энергии которых близки к уровню Ферми, отделившему занятые состояния от свободных, наиболее важно, так как при любом воздействии на поверхность (термическом, освещении, адсорбции) уровни, ближайšie к ϵ_F , легче отдают или принимают электроны, то есть именно они определяют основные свойства поверхности.

До сих пор мы говорили только о чистых поверхностях. Для поверхностей, покрытых адсорбированными пленками, зависимость СТМ-изображений от напряжения смещения может проявляться еще в большей степени, так как некоторые адсорбаты (например, атомы щелочных металлов) даже в очень небольших количествах в состоянии кардинально изменить электронную структуру поверхности. Поэтому интерпретация СТМ-изображений адсорбированных слоев должна проводиться наиболее тщательно и обычно предполагает построение в каждом конкретном случае соответствующей структурной модели поверхности. Тем не менее именно непосредственные исследования на месте адсорбции и начальных стадий роста кристаллов являются основной и наиболее увлекательной сферой применения СТМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко рассмотрели историю создания СТМ и получения структурных и электронных изображений поверхности с атомным разрешением. С момента своего изобретения СТМ широко используется учеными самых разных специальностей, охватывающих практически все естественнонаучные дисциплины начиная от фундаментальных исследований в области физики, химии, биологии и до конкретных технологических приложений. Принцип действия СТМ настолько прост, а потенциальные возможности так велики, что невозможно предсказать его воздействие на науку и технику даже ближайшего будущего.

Как оказалось в дальнейшем, практически любые взаимодействия острейного зонда с поверхностью (механические, магнитные...) могут быть преобразованы с помощью соответствующих приборов и компьютерных программ в изображение поверхности. В настоящее время существует уже целое семейство так называемых сканирующих зондовых микроскопов: атомно-силовой, магнитный силовой, ближнего поля... основные характеристики которых (в первую очередь разрешающая способность) вплотную приблизились к характеристикам СТМ. Например, атомно-силовой микроскоп не требует, чтобы образцы были проводящими, и позволяет при этом исследовать структурные и упругие свойства проводников и изоляторов, а также комбинацию изображений электронных и упругих свойств мягких материалов.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру Х. Рореру за многочисленные обсуждения предмета данной статьи, позволившие воспроизвести историю создания СТМ из первых рук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. 7×7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space // *Phys. Rev. Lett.* 1983. Vol. 50, № 2. P. 120–123. Этой знаменитой публикацией открылась эпоха СТМ.
2. Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy – from Birth to Adolescence // *Rev. Mod. Phys.* 1987. Vol. 59. P. 615–625. [есть перевод этой Нобелевской речи Г. Биннига и Х. Рорера “Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения до юности” в кн.: Атомы “глазами” электронов: (Актуальные проблемы физики). М.: Знание, 1988. (Новое в жизни, науке, технике. Физика; № 3)].
3. Маслова Н.С., Панов В.И. Сканирующая туннельная микроскопия атомной структуры, электронных свойств и поверхностных реакций // *Успехи физ. наук.* 1989. Т. 157, № 1. С. 185–195.
4. Трубецков Д.И. Вакуумная микроэлектроника // *Соросовский Образовательный Журнал.* 1997. № 4. 58–64.
5. Келдыш Л.В. Таммовские состояния и физика поверхности твердого тела // *Природа.* 1985. № 9. С. 17–33.
6. Бахтизин Р.З., Сакурай Т., Хашицуме Т., Шуе К.-К. Атомные структуры на поверхности GaAs(001), выращенной методами молекулярно-лучевой эпитаксии // *Успехи физ. наук.* 1997. Т. 167. № 11. С. 1227–1241.

Рецензент статьи В.П. Петров

* * *

Рауф Загидович Бахтизин, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физической электроники Башкирского государственного университета, член редколлегии журнала "Journal of Micromechanics and Microengineering". Область научных интересов – эмиссионная электроника, физика поверхности твердых тел. Автор более 220 научных статей.