

Авторы: Генрих РОРЕР — сотрудник исследовательского отдела ИБМ Цюрихской лаборатории (Швейцария);

Герд БИННИГ из ФРГ, профессор экспериментальной физики во Франкфуртском университете им. И. В. Гёте;

Эрист РУСКА из Западного Берлина, профессор института Фрица Хабера при Обществе Макса Планка по развитию науки;

ЭДЕЛЬМАН Валериан Самсонович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов АН СССР.

СОДЕРЖАНИЕ

Г. Бинниг, Г. Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения до юности. Перевод А. М. Трояновского	3
Э. Руска. Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии. Перевод А. М. Трояновского	28
В. С. Эдельман. Туннельный эффект и микроскопия	45

А 92 **Атомы «глазами» электронов (Актуальные проблемы физики).** — М.: Знание, 1988. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 3).
11 к.

В сборник включены переводы лекций нобелевских лауреатов за 1986 г.: Герда Биннига, Генриха Рорера, Эриста Руски, посвященные созданию электронного микроскопа (Э. Руска) и изобретению нового класса электронных микроскопов — сканирующего туннельного микроскопа (Г. Бинниг, Г. Рорер).

Нобелевские лекции сопровождаются комментарием одного из видных специалистов в области электронной физики доктора физико-математических наук В. С. Эдельмана.

Брошюра рассчитана на читателей, интересующихся проблемами и достижениями современной физики.

1604010000

ББК 22.3

© Перевод на русский язык
Нобелевских лекций Г. Биннига, Г. Рорера,
Э. Руски, статья В. С. Эдельмана,
издательство «Знание», 1988 г.

ГЕРД БИННИГ, ГЕНРИХ РОРЕР

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — ОТ РОЖДЕНИЯ ДО ЮНОСТИ¹

Мы хотим представить историю сканирующей туннельной микроскопии, не останавливаясь на физических и технических аспектах, которые уже были рассмотрены в нескольких недавно появившихся обзорах, в материалах двух конференций² и будут освещены во многих других публикациях, которые последуют в ближайшем будущем. Кратко техническая сторона отражена в прилагаемых рисунках, которые в тексте мы не будем упоминать. Наш рассказ — это не рекомендация, как проводить исследования. Он только отражает наши размышления, действия и чувства. Однако было бы очень приятно, если бы он способствовал более спокойному отношению к научному процессу.

Пожалуй, нам повезло в том, что у нас обоих был опыт работы в области сверхпроводимости, с ее красотой и элегантностью. Что касается сканирующей туннельной микроскопии, то мы кое-что сделали, изучая туннелирование, и узнали, что такое ангстремы, но с микроскопией или физикой поверхности знакомы не были. Это, вероятно, придавало нам смелости с легким сердцем заняться тем, что, как нам часто говорили, «не может работать в принципе».

«После того как я пару лет изучал фазовые переходы и критические явления и много, много лет работал с магнитными полями, я был готов поменять тему. Туннелирование в той или иной форме занимало меня уже довольно давно. Несколько лет назад я заинтересовался идеей Джона Слончевского, предложившего регистрировать магнитные цилиндрические домены с помощью тун-

¹ © The Nobel Foundation, 1987.

G. Binnig and H. Rohrer. Scanning Tunneling Microscopy — from Birth to Adolescence.

² Proceedings of STM'86, Santiago de Compostela, Spain, Surface Sci, 1987, 181, 1/2.

нелирования. В другой раз я на короткое время был вовлечен в исследование туннелирования между очень маленькими металлическими зернами в бистабильных сопротивлениях, а позднее общался со своими коллегами, боровшимися с проблемами, возникающими при изготовлении джозефсоновских переходов. Поэтому изучение роста и электрических свойств тонких изоляционных слоев, имеющих малую площадь, казалось мне интересной задачей, и это позволило мне привлечь нового сотрудника, Герда Биннига, которому понравилась эта тематика, и потому он принял мое предложение. Герд и я не встретились бы друг с другом, если бы не сотрудник ИБМ Алекс Мюллер, бывший глава отдела физики, способствовавший нашему первому контакту».

Первоначально у нас не было намерения сконструировать микроскоп, а была лишь идея осуществить локальную спектроскопию на площадке диаметром менее 100 Å.

«Когда я подыскивал место, еще за три месяца до начала работы в ИБМ, Гейни Рорер подробно изложил мне свои соображения о неоднородностях на поверхности, особенно в зернах тонких оксидных слоев на металлах. Наш разговор вращался вокруг того, как изучать эти пленки с достаточной локальностью, и мы пришли к выводу, что для этого нет подходящего инструмента. Мы также прикидывали, как бы исхитриться так изготовить туннельный контакт, чтобы получить больше информации об объекте. Под впечатлением этой дискуссии за несколько недель до того, как я начал работать в ИБМ, откуда-то из подсознания совершенно неожиданно всплыла старая мечта — осуществить эксперимент по вакуумному туннелированию. Только несколько лет спустя я узнал, что был не одинок — этого хотели многие ученые, которые, подобно мне, работали в области туннельной спектроскопии. Странно, что никто из нас не говорил об этом вслух, хотя в принципе идея эта весьма стара». Действительно, этой идее уже лет 20, и ее можно датировать началом туннельной спектроскопии. Казалось, это так и оставалось идеей, и лишь после того, как мы приступили к работе, Сеймор Келлер, в то время член совета по техническому надзору над Исследовательским отделом ИБМ, одним из первых выступивший в защиту туннелирования как нового направления исследований в нашей лаборатории, обратил на-

ше внимание на попытки В. А. Томпсона осуществить вакуумное туннелирование с перемещаемым острием.

Нас как экспериментаторов воодушевил этот вызов и открывающиеся новые возможности. Удивительно, но потребовалась пара недель, чтобы осознать, что, идя этим путем, мы получим не только зонд для локальной спектроскопии, но — используя сканирование — также и спектроскопические и топографические изображения, то есть создадим новый тип микроскопа. Его принцип работы очень походит на использующийся в профилометре, только вместо того, чтобы при сканировании острия вдоль поверхности сохранялся контакт с образцом, между острием и образцом поддерживается небольшой зазор в несколько ангстрем, управляемый туннельным током, текущим между ними. Примерно через два года и незадолго до того, как мы получили наши первые картинки, мы узнали о статье Р. Янга и др., в которой описан микроскоп, использующий полевую эмиссию, названный топографиметром. Он имел много общего с нашим СТМ, за исключением того, что острие должно быть довольно далеко от поверхности, и для создания эмиссионного тока — а не туннельного — прикладывается довольно высокое напряжение. Это приводит к худшему разрешению, сравнимому с получаемым в оптическом микроскопе. Они предполагали улучшить пространственное разрешение, используя для полевых эмиттеров более острые иглы, даже пытались осуществить вакуумное туннелирование и обсуждали заманчивые перспективы этого прибора в спектроскопии. Если бы они, хотя бы мысленно, соединили вакуумное туннелирование со сканированием и оценили получающееся разрешение, то они, вероятно, пришли бы в конце концов к новому направлению — к сканирующей туннельной микроскопии. Они подошли к ней ближе, чем кто-либо другой.

В середине января 1979 года мы представили наш первый патент, раскрывающий суть СТМ. Эрик Куртис, тогда заместитель руководителя отдела физики в ИБМ Рушликонской лаборатории, говорил в заявлении на выдачу патента о «тысячах будущих СТМ». Он был первым, кто поверил в наше дело. Вскоре после того, узнав на внутрилабораторном семинаре о наших идеях, Ганс-Ерг Шеел стал третьим.

С технической реализацией нашего проекта нам повезло, ибо мы заручились мастерством Кристофа Гер-

17 лет

бера. «С тех пор, как он поступил в ИБМ в 1966 году, Кристоф работал со мной (Г. Р.), участвуя в создании сильных импульсных магнитных полей и в исследовании фазовых диаграмм и критических явлений. К концу 1978 года мы были воодушевлены нашими первыми экспериментальными результатами при исследовании случайных полей, но, когда Кристофу предложили участвовать в новом рискованном предприятии, он не колебался ни секунды. Он всегда любил неординарные вещи и случайно стал вторым поверившим. Так я и проблема случайных полей остались без его усердной технической помощи. Примерно год спустя к нам присоединился Эди Вейбель, что оставило еще один проект без технической помощи. Наконец я укомплектовал команду и отошел от исследования случайных полей, оставив это для других».

В течение первых нескольких месяцев нашей работы по СТМ мы сконцентрировали усилия на главных приборных задачах и их решении. Как избежать механических вибраций, из-за которых игла и образец перемещаются относительно друг друга? Защитой от вибраций и акустического шума мягкой подвеской микроскопа в вакуумной камере. Насколько велики силы, действующие между острием и образцом? Казалось бы, в большинстве случаев это неважно. Как двигать иглу на такие малые расстояния? С помощью пьезоэлектрических материалов, связав с их помощью электронику с механикой, избегая трения. Непрерывность деформации пьезоэлектриков в ангстремном и субангстремном диапазонах была установлена только позднее благодаря самим туннельным экспериментам. Как прецизионно передвигать образец на большие расстояния от места, где проводится обработка поверхности, до места, достигаемого иглой? При помощи «вши»³. Как избежать больших тепловых флуктуаций длины образца и особенно иглы? Надо избегать «вискеров» с малой жесткостью. Это приводит к более общему и наиболее важному вопросу: какую форму должно иметь острие и как ее достичь? В самом начале мы представляли себе кончик иглы как предмет из сплошного материала, имеющий некоторый радиус кривизны. Однако мы очень скоро поняли, что

³ Так было названо пьезоэлектрическое устройство, перемещающее платформу с образцом малыми шагами (Прим. перев.).

игла всегда неровная вследствие конечного размера атомов и того, что острие довольно шероховатое, если оно специально не обработано. Под этой шероховатостью подразумевалось существование «мини-острий», как мы их назвали. Благодаря чрезвычайной чувствительности туннельного тока от расстояния игла — образец выбирается «мини-острие», ближайшее к образцу.

Сразу же после того, как мы получили первые стабильные СТМ-изображения, на которых были видны замечательно крутые моноатомные ступеньки, мы сконцентрировали наши усилия на достижении атомного разрешения. Наши надежды достичь этой цели исходили из того, что вакуумное туннелирование само дает новый инструмент для производства чрезвычайно острых игл: очень локальные и очень высокие поля, достижимые при вакуумном туннелировании при подаче всего лишь нескольких вольт, могут быть использованы для заострения концов игл посредством миграции в поле либо полевым испарением. Другая возможность — легкое касание поверхности. Все эти операции не столь контролируемы, как заострение игл в ионно-полевым микроскопе, но на той стадии нам казалось слишком сложным совмещать СТМ с ионно-полевым микроскопом. Мы едва знали, что такое ионный микроскоп, и ничего о том, как с ним работать. У нас не было средств контролировать детально форму иглы. Мы действовали методом проб и ошибок до тех пор, пока структуры, которые мы наблюдали, не становились все отчетливее и отчетливее. Иногда это получалось, иногда нет.

Но с начала мы должны были доказать, что вакуумное туннелирование происходит. При попытке это сделать, оставив в стороне случаи появления вискеров, самая серьезная проблема была связана с вибрациями здания. Для того чтобы защитить ячейку СТМ также и от акустического шума, мы установили виброизолирующую систему внутри вакуумной камеры. Наша первая установка была спроектирована для работы при низких температурах и в ультравысоком вакууме. Низкие температуры гарантировали малые температурные дрейфы и малые тепловые флуктуации длины, но нам они были нужны из-за того, что наши мысли были поглощены спектроскопией. А туннельная спектроскопия была низкотемпературной сферой деятельности для нас обоих, получивших свои докторские степени за работы по сверх-

проводимости. УВВ позволил бы готовить и сохранять поверхности вполне определенного состава. Проект прибора был прекрасен, и образец, и игла были доступны для обработки их поверхности, а для виброизоляции туннельной ячейки предназначалась сверхпроводящая подвеска. Конструирование и первые проверки при низких температурах и высоком вакууме заняли год, но прибор оказался так сложен, что мы его так никогда и не использовали. Мы были слишком самонадеянны — только через семь лет удалось решить основные задачи, связанные с созданием низкотемпературного и высоковакуумного прибора. Вместо нашего прибора использовали эксикатор как вакуумную камеру, много скотч-ленты и примитивный вариант сверхпроводящей подвески, потребляющей около 20 л жидкого гелия в час. Эмиль Хаупт, наш эксперт-стеклодув, помогал нам со множеством стеклянных деталей и на одном энтузиазме сделал даже свинцовую чашу для левитации. Проводя измерения ночью и едва дыша — как от волнения, так еще больше от того, чтобы не вызвать вибраций, мы получили нашу первую явно экспоненциальную характеристику для туннелирования зависимости тока I от расстояния S игла — образец. Это была замечательная ночь 16 марта 1981 года.

Так, 27 месяцев спустя после того, как была сформулирована концепция, родился сканирующий туннельный микроскоп. В течение этого периода мы получили простор для мечтаний, исследований, совершения и исправления ошибок. Мы не требовали лишних людей или ассигнований, наша побочная деятельность давала приемлемые и публикуемые результаты. Первым документом о СТМ был внутренний отчет в марте — апреле 1981 года.

Сама по себе логарифмическая зависимость туннельного тока I от расстояния острие — образец S еще не была доказательством вакуумного туннелирования. Наклон прямой $\ln I(S)$ должен был соответствовать высоте туннельного барьера $\Phi \approx 5$ эВ, характеризующего среднюю работу выхода острия и образца. Мы едва достигли 1 эВ, что указывало скорее на туннелирование через некоторый изоляционный слой, чем через вакуум. К счастью, оказалось, что пьезочувствительность для малых и быстрых изменений напряжения достигает только половины величины, указываемой заводом-изго-

→ пьезочувствительность
пьезоэлемент
падает с зазором

товителем. Учет этого дал для высот туннельного барьера значение, большее 4 эВ, и таким образом вакуумное туннелирование было установлено. То, что пьезочувствительность падает, было подтверждено позднее благодаря тщательной калибровке, проведенной Х. Р. Оттом из ETH⁴ (Цюрих) и С. Виейрой из Мадридского независимого университета.

У. Поппе доложил о наблюдении вакуумного туннелирования несколькими месяцами ранее, но его интерес был сосредоточен на туннельной спектроскопии экзотических сверхпроводников. Здесь он добился успеха, но зависимость $I(S)$ не измерялась. Восемнадцатью месяцами позднее мы получили информацию, что Е. С. Тижо в своей диссертации уже писал о наблюдении аналогичных зависимостей $I(S)$, однако эти результаты в то время не были опубликованы в открытой литературе.

Мы были сильно возбуждены после мартовской ночи. «Герд хотел немедленно послать доклад на конференцию ЛТ-16⁵, хотя сроки приема прошли. Эта конференция должна была проводиться в Лос-Анджелесе в сентябре. Он все равно собирался ехать туда со своей работой по сверхпроводящему титанату стронция, и я был уверен, что к этому времени мы получим несколько топографических СТМ-картинок. И мы действительно в этом преуспели. Я устроил для Герда турне по лабораториям США, но за три недели до его отъезда один из друзей предостерег, что, как только новость станет известной, сотни ученых немедленно набросятся на СТМ. Так и случилось, но парой лет позже. После того как мы дважды подолгу обсуждали эту проблему во время воскресных прогулок, мы все же решили, что настало время представить СТМ публике». Наша первая попытка опубликоваться была неудачной. «Это хороший знак», — утешал нас работавший в то время в лаборатории профессор Испанского независимого университета Ниго Гарсиа.

После того как этот первый важный шаг с полной СТМ-установкой был сделан, у нас ушло всего три месяца, включая время на ожидание высоковольтных мощных источников для пьезокерамики, на то, чтобы полу-

⁴ Электротехническая высшая школа (Прим. перев.).

⁵ Речь идет о международной конференции по физике низких температур (low Temperature Physic) (Прим. перев.).

чить первые изображения монокристаллов ступеней на монокристалле CaI_2Sn_4 , выращенном Р. Гамбино. Здесь основные неприятности связаны с вискерами, которые все время возникали, как только игла касалась поверхности. Теперь мы были готовы повернуться лицом к физике поверхности и начать с того, чтобы получить разрешенную картину реконструированной поверхности. Мы построили СТМ, теперь уже без скотч-ленты, совместимый с ультравысоким вакуумом, и, что бы не терять времени, стали работать с ним в вакууме, подвесив СТМ на резиновой ленте. Результаты показали, что можно обойтись без сверхпроводящей подвески.

Этот тур с докладами по США в сентябре 1981 года походил на гастроль. Большею частью реакция была благожелательной, кое-кто проявлял энтузиазм, и даже двое предсказывали Нобелевскую премию, но СТМ представлялся, по-видимому, слишком экзотичным, чтобы кто-то еще активно за него взялся.

Следующим нашим шагом была защита СТМ от вибрации двухступенчатой пружинной подвеской с затуханием за счет вихревых токов, и эту конструкцию мы поместили в УВВ-камеру, не использовавшуюся в то время. Мы добавили для очистки поверхности распылитель и устройство отжига, но никакие другие приборы, применяемые для анализа состояния поверхности, предназначенные для контроля образца или иглы, еще не могли быть совмещены с СТМ. Хотя сверхпроводящая подвеска служила лишь три месяца, про нее говорили несколько лет. Иногда оказывается, что что-то сложное запомнить легче всего!

Наиболее интригующей и вызывающей проблемой в физике поверхности является реконструкция 7×7 поверхности Si (111). Наиболее известные модели содержали довольно крупные элементы, которые могли бы быть разрешены СТМ. Так мы начали охотиться за структурой 7×7 и покорились ее волшебству. Сначала все было безуспешно. Сам СТМ работал хорошо, иногда разрешение достигало 5 \AA , но с подготовкой поверхности дело обстояло хуже. Мы случайно наткнулись на участки с хорошо выраженными линиями монокристаллов ступеней, но обычно поверхность всегда выглядела грубой и неупорядоченной в атомном масштабе. На одной картинке даже был виден намек на 7×7 в виде регулярных образований из углублений — предвест-

ников характерных впадин по углам ячеек. Однако слишком рискованно, основываясь на единственном случае, говорить о наблюдении новой структуры новым методом. Но это поддержало нашу уверенность.

Весной 1982 года про СТМ уже всюду говорили. Возможно, если бы удалось получить изображение участка виденной * грани правильно подготовленной поверхности с определенной последовательностью ступеней, то это устранило бы настороженное отношение со стороны специалистов по поверхности. Мы, однако, думали, что моно-, двойные и тройные ступени на CaI_2Sn_4 с атомно-гладкими террасами и линии ступеней Si (111) и без того достаточно убедительны и многообещающи, и вместо траты времени на малопрофильные ступени мы предпочитали продолжать атаку на реконструированную поверхность с известной периодичностью, имея разумные шансы узнать что-нибудь новое и внести свой вклад в проблему.

Чтобы облегчить приготовление образцов и имея в виду, что потребуется разрешение лишь около 8 \AA , мы переключились на монокристалл золота, точнее, на его поверхность (110), которая, как известно, испытывает реконструкцию 1×2 . Казалось, для этого разрешения СТМ, с которым мы исследовали кремниевые ступеньки, хватит с запасом. Хотя мы и вернули немного раньше Карлу-Хейну Ридеру, работавшему в лаборатории специалисту по физике поверхности, сделанный им каплевидный монокристалл Si, его пришлось уговаривать предоставить нам еще и кристалл Au, и несколько недель спустя мы добавили другую капельку в его коллекцию. Но в промежутке, воспользовавшись его советами по обработке поверхности, мы добились успеха в разрешении структуры 1×2 . Вопреки ожиданиям нам также пришлось бороться за разрешение, потому что частицы Au отделялись от поверхности, даже если мы только слегка касались ее нашей иглой. Подвижность Au при комнатной температуре так велика, что неровная поверхность сглаживается через некоторое время, поэтому на самом деле острые концы игл с Au-покрытием перестают существовать. Здесь хотелось упомянуть, что позднее, проводя эксперименты с Au (100), мы делали ост-

* Пояснения к отмеченным звездочкой понятиям читатель найдет в статье В. С. Эдельмана в конце брошюры (Прим. ред.).

рые иглы испарением в поле атомов с образца на острие, стабилизируя их форму воздействием относительно высокого поля, прикладывая напряжение 0,8 В к туннельному переходу.

В случае с поверхностью Au (110) атомное разрешение удалось достичь скорее благодаря удаче и настойчивости. Разрешение непредсказуемо менялось скачками с высокого до низкого, что, вероятно, вызывалось миграцией по острию адсорбированных атомов, находивших на некоторое время устойчивое положение на кончике. Мы также наблюдали заметный беспорядок: длинные, но узкие полосы с реконструкцией 1×2 были перемешаны с реконструированными полосами 1×3 и 1×4 , а также с линиями ступеней. Тем не менее эти эксперименты дали первые СТМ-картинки, на которых были видны атомные ряды с атомным разрешением в направлении, перпендикулярном рядам. Беспорядок, присущий этой поверхности, хотя и может вызвать сомнения с точки зрения физики поверхности, очень хорошо демонстрирует возможности СТМ как локального метода измерений, и примерно год спустя это сыграло важную роль при проверке первой микроскопической теории сканирующей туннельной микроскопии.

С помощью золота мы также осуществили первый спектроскопический эксперимент с СТМ. Мы хотели проверить предсказание, что $I-V$ характеристика туннельного контакта образец — игла становится выпрямляющей из-за геометрической асимметрии. К сожалению, поверхность образца становится нестабильной при положительном напряжении на образце +5 В, и небольшая наблюдаемая асимметрия в этом диапазоне напряжений может быть обусловлена и другими причинами. Но при обратной полярности напряжение можно изменять до 20 В, проходя целый ряд хорошо выраженных резонансных поверхностных состояний. Мы считаем, что эксперименты с золотом весной и в начале лета 1982 года стали наиболее важным шагом в развитии методики, и СТМ к тому моменту превзошел наши первоначальные ожидания. Мы также заполучили первых сторонников вне лаборатории: ими стали Карл Куат из Стэнфордского университета и Пауль Хансам из Калифорнийского университета, Санта Барбара. Со многими мы обсуждали работу с Au, и она привлекла некоторое внимание, но тем не менее работали мы над этим не-

много. Мы даже не нашли времени написать статью — структура 7×7 ждала!

Между тем мы сделали первые попытки по наблюдению «химического» изображения: небольших островов Au на кремнии. Островки выглядели на топограмме как гладкие, плоские холмы на шероховатой поверхности, но их можно было так же четко распознать и как области с выделенной высотой туннельного барьера. Таким образом, острова Au проявились благодаря отличным их электронным поверхностным свойствам. Было, конечно, интересно продолжить эту линию, но мы уже знали, что в принципе это работает, а структура 7×7 все еще ждала!

Мы приступили ко второй попытке подступиться к 7×7 осенью 1982 года, используя совет Франца Химпелла не распылять поверхность. Это немедленно помогло, и мы увидели 7×7 на плоской поверхности. Мы были совершенно очарованы красотой картины.

«Я не мог оторваться от изображения. Это было так, как будто мы вступили в новый мир. Мне казалось, что это высшая точка в моей научной карьере, которую уже не превзойти, и в некотором смысле ее конец. Гейни осознал мое настроение и отправил меня на несколько дней в Сант-Антонин, прелестную деревушку высоко в Швейцарских горах, писать статью о 7×7 ».

Мы были убеждены, что эта работа привлечет внимание наших коллег, в том числе и тех, которые не связаны с физикой поверхности. Чтобы этому помочь, мы представили как рельефные модели, изготовленные с оригинальных записей, не прошедших математической обработки, с помощью ножниц, плексигласа и крючков, так и видимых сверху обработанных картин, первые — чтобы заслужить доверие, последние — для анализа и обсуждения. Это определенно помогло, причем до такой степени, что мы на некоторое время практически прекратили исследования. Мы были завалены просьбами о докладах, и многочисленным визитерам в нашу лабораторию было интересно узнать, как построить СТМ. Однако число групп, которые серьезно начали работать, оставалось небольшим. Казалось, все еще сохраняется противоречие между прямо-таки вызывающей принципиальной легкостью получения изображений индивидуальных атомов в трехмерном пространстве, непосредственно за-

писываемых самописцем, и интуитивным соображением, что в конце концов все не может быть так просто.

Наш результат исключил все многочисленные модели, которые существовали прежде, и как ни странно, некоторые другие, которые появились потом. Только одна была очень близка: адатомная модель В. Харрисона, в которой, правда, число адатомов в ряду было не совсем таким. Сейчас общепринят вариант модели, в которой, кроме появления характерных адатомов в структуре 7×7 , испытывают реконструкцию также более глубокие слои. Эта модель совместима с большинством результатов, полученных различными экспериментальными методиками, такими, как ионное каналирование, электронная дифракция в проходящем пучке и с более детальными STM-результатами, полученными другими группами.

Эксперименты с 7×7 также стимулировали первые теоретические попытки описания STM на микроскопическом уровне. Терсоф, Хамман и Баратоф применили бардиновское преобразование гамильтонова формализма к задаче с малым острием и поверхностью, искаженной в атомном масштабе. Гарсиа, Окал и Флорес, а также Столл, Баратоф, Селони и Карневали использовали метод рассеяния. Оба подхода привели к близким результатам: они успокоили нас, в общих чертах подтвердив наше основанное на интуиции представление, что туннелирование при малых размерах можно описать простым масштабным преобразованием планарного туннелирования, и они определенно способствовали принятию STM в физических кругах. Теоретические усилия сконцентрировались на непланарном аспекте процесса туннелирования свободных электронов, и STM-результаты по Au (110), все еще не опубликованные, послужили для их проверки. Они оставались неопубликованными довольно долгое время, так как яркие изображения поверхности кремния 7×7 затмили ранние эксперименты с Au (110). Один из отзывов на первую попытку опубликовать их был таким: «...статья фактически лишена концептуального обсуждения, не говоря уже о принципиальной новизне... Было бы интересно обсудить в статье структуры поверхности золота и других металлов. Почему меня должны волновать результаты этой работы?..» Мы определенно плохо подготовили эту публикацию, но мы были недостаточно знакомы с такими

судьями, которые ищут слабые места и невинно избегают сути.

Эксперименты с золотом и кремнием показали, что STM в физике поверхности много бы выиграл, если бы было возможно дополнительно исследовать поверхность «in situ»⁶ другими методами, в частности методом дифракции электронов малой энергии (LEED). Мы уже узнали, что поверхности, даже тщательно приготовленные, зачастую не так однородны и плоски, как считается. Объединение LEED и STM в одном приборе оказалось чрезвычайно полезным, оно позволило избежать потери времени на поиски, когда искать нечего, и дало нам повод поучиться, поработав с LEED и оже-электронными микроскопами (ОЭС). Комбинация STM с другими методами, принятыми в физике поверхности, сняла также часто проявляющееся беспокойство: что общего наши STM-картинки имеют в действительности с поверхностями, характеризуемыми другими методами? Мы не разделяли это беспокойство в сколько-нибудь значительной степени, так как уже знали, что реконструкция остается неизменной в непосредственной близости от дефектных участков и потому, что мы могли выявить большинство загрязнений и дефектов в отдельности. Таким образом, для нас комбинированный инструмент был нужен скорее с практической, чем с научной, точки зрения.

После короткой, но интересной серии экспериментов с новым комбинированным прибором STM/LEED/ОЭС, приведшей к разрешению и пониманию природы (100) поверхности Au, мы окунулись в сферу химии. Вместе с А. Баро, профессором Мадридского независимого университета, Испания, который также хотел познакомиться поближе с техникой, мы наблюдали вызванную оксидированием реконструкцию 2×1 Ni (110). Ярко выраженную регулярную систему выступов, которую мы увидели, мы интерпретировали как обязанную отдельным атомам кислорода. Мы и до этого видели на изображениях особенности атомного масштаба, их можно было бы объяснить как адсорбированные атомы или кластеры, но они были скорее помехой, чем предметом интереса. Эксперименты с кислородом на Ni показали, что покрывающий поверхность кислородный слой не изменяется

⁶ «на месте».

необратимо под воздействием изображающего острия. Это было очень существенным результатом с точки зрения наблюдения, изучения и осуществления поверхностных химических явлений с помощью СТМ-острия. Примерно через год при изучении вызванной кислородом реконструкции 2×2 поверхности Ni (100) мы наблюдали характерные токовые выбросы, которые мы могли приписать кислороду, диффундирующему вдоль поверхности под иглой. Мы заметили, что выбросы того же самого типа уже проявлялись в наших изображениях покрытого кислородом Ni (110), но в то время мы их не стали рассматривать. Не только диффундирующие атомы могут наблюдаться отдельно, но и их миграция может коррелировать с определенными характеристиками на поверхности, подобным ступенькам или связанным атомам кислорода, изображение которых получается независимо. Ближе к концу 1983 года мы также начали испытывать возможности СТМ в биологии вместе с Х. Гроссом из ETH (Цюрих). Мы могли проследить цепи ДНК, лежащие на угольной пленке, нанесенные на подложку из Si, покрытую Au.

Этот год закончился наиболее приятным сюрпризом: в пятницу 9 декабря мы получили телеграмму от секретаря Фонда короля Фейсала, за которой в понедельник последовал телефонный звонок от секретаря Европейского физического общества, извещавшие о награждении премией за науку короля Фейсала и премией фирмы Хьюлетт-Паккард для европейских физиков. В «день, когда пришла телеграмма, Герд был в Берлине, где читал лекцию в связи с присуждением премии Отто Клуंगा. Это был также мой двадцатый год работы в ИБМ». Это придало нам уверенности в том, что сканирующая туннельная микроскопия на подъеме. Все это породило также новый поток просьб.

Летом 1984 года мы были наконец готовы вернуться к тому, с чего начали осенью 1978 года, задолго до того как возникли мысли о микроскопии, а именно осуществить локальную спектроскопию. Вместе с Х. Фуксом и Ф. Сальваном мы исследовали реконструкцию 7×7 на чистой поверхности кремния и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ на Si (111), покрытого золотом, и, попав в самую точку — тонкие оксидные пленки на Ni. Мы смогли увидеть, что поверхности имеют сложную электронную структуру. Это уже

было известно, например, благодаря опытам по фотоэмиссии, и теперь мы смогли увидеть эти структуры разрешенными в пространстве в атомном масштабе. Мы стали говорить (и все еще так делаем) о цвете атомов⁷. Оксидные слои оказались неоднородными и были более четко видны на изображениях при сканирующей туннельной спектроскопии (СТС). На изображении 7×7 мы смогли заглянуть с помощью СТС внутрь до второго слоя и наблюдать отдельные разорванные связи между атомами.

В это время К. Куат со своей группой уже имел работающий СТМ, и они осуществили локальную спектроскопию, правда, еще без атомного разрешения, но зато при низкой температуре. Они измерили энергетическую щель сверхпроводника и позднее нарисовали даже пространственную картину. Спектроскопическое изображение не было чем-то удивительным, но тем не менее это был важный шаг вперед. Теперь у нас был инструмент, позволяющий полностью охарактеризовать топографию поверхности и ее электронную структуру. Хотя обычно и возникают проблемы при выделении интересующих свойств из набора СТМ- и СТС-измерений, наше представление о сути сканирующего туннельного микроскопа оказалось верным. Но тем не менее нам приходилось слышать, что эта точка зрения не общепринята. До нас доходили слухи, что есть ученые, которые бьются об заклад на шампанское, что наши результаты — компьютерная симуляция. Такие мнения, возможно, были основаны на том факте, что СТМ достиг уже трехлетнего возраста, а атомное разрешение получилось только у нас. Это тоже нас беспокоило, но в другом смысле. В конце лета 1983 года Герб Будд, патрон Европейского института ИБМ и ярый сторонник СТМ, просил нас провести семинар летом 1984 года в рамках института. Это означало неделю с 23 лекциями перед избранной аудиторией европейских академических кругов. В то время совершенно не хватало материала заполнить 23 часа, не говоря уже о том, чтобы пригласить 23 докладчика. Год спустя мы согласились, полные оптимизма, на лето 1985 года. В декабре 1984 по инициативе Кар-

⁷ Как известно, различным видимым цветам соответствуют разные энергии квантов света. По аналогии часто в физике говорят о «цвете», например, электронов, имея в виду, что они обладают разной энергией (Прим. перев.).

ла Куата девять представителей наиболее успешно работающих групп по СТМ собрались на маленькое рабочее совещание в комнате отеля в Кенкане. Состоялся полезный обмен идеями, но все еще у других атомного разрешения не было. Таким образом, все еще не набралось лекций для предстоящего семинара.

В последующие несколько месяцев ситуация резко изменилась. Первыми стали Р. Фенстра с сотрудниками, исследовавшие скол CaAs , а потом группа К. Ф. Куата со структурой 1×1 на Pt (100) и Д. Бем, В. Хёслер и Е. Риттер с гексагональной фазой на Pt (100). На мартовском собрании Американского физического общества в 1985 году Хансма представил СТМ-изображения структур графита с атомным разрешением, а когда Ж. Головченко показывала прекрасные результаты по наблюдению различных реконструированных структур Ge пленок, напыленных на Si (111), в аудитории можно было бы услышать, как падает иголка. Атомное разрешение стало официально установленным, а сканирующая туннельная микроскопия — признанной. Семинар Европейского института ИБМ в июле превратился в исключительно рабочее совещание по СТМ, его программаместила около 35 оригинальных исследований, из которых не все имели дело с атомным разрешением, но их было уже больше, чем в марте. «Водопад идей», как сказал об этом Карл Куат.

Наш рассказ до сих пор касался в основном попыток получения структурного и электронного изображения с атомным разрешением и вращался вокруг физики поверхности. Отдельные атомы уже видели и ранее в ионно-полевым микроскопе, и они изучались по отдельности с помощью метода атомных проб. Красота этих методов относительна из-за ограничений, накладываемых тем, что могут быть исследованы только атомы, сидящие на определенных местах на тонких иглах, и эти иглы могут быть изготовлены из довольно ограниченного набора материалов. Точно так же электронная микроскопия, которая в настоящее время служит главным источником знаний о субмикронных структурах практически во всех областях науки, технологии и производства, продвинулась до атомного уровня. Получение изображения индивидуальных атомов или атомных структур тем не менее все еще остается проблемой и требует высокого профессионализма и специального оборудования. Привле-



кательность СТМ состоит не только в том, что можно наблюдать поверхность атом за атомом, но также в возможностях его широкого применения, его принципиальной и технической простоте и продуктивности. Все это приводит к спокойному и почти небрежному распознаванию атомов и атомных структур.

Но есть много других аспектов, может быть, менее очевидных, но тем не менее важных, которые сделали СТМ широко принятым методом, используемым теперь во многих областях науки и технологии.

Сами инструменты стали проще и меньше. Их сильно уменьшенный размер допускает легкое совмещение с другими системами, например, включение в сканирующей электронный микроскоп. Одни инструменты сохраняют возможность устанавливать образец с высокой точностью, но при этом имеют достаточно жесткую конструкцию, чтобы осуществить смену острия и образца «in situ». Другие приборы настолько жестки, что нечувствительны даже к вибрациям при погружении в жидкий азот. Есть такие маленькие, что могут пройти через горло сосуда для хранения жидкого гелия. Эти «коллибри» среди СТМ, конструкция которых в каком-то смысле есть возврат к сжимаемым туннельным переходам, могут работать с телевизионными скоростями на относительно ровных плоских участках поверхности, и в них используется в качестве сканера всего лишь одна трубочка. Изготовление игл также продвинулось до уровня, когда в ультравысоком вакууме может быть сделана игла строго пирамидальной формы, заканчивающаяся одним или несколькими атомами. Такие острия особенно важны для проведения исследований неперiodических структур, разупорядоченных систем и шероховатых поверхностей. Они также интересны и сами по себе, как точечные источники низкоэнергетических электронов и ионов.

За пределами физики и науки о поверхности использование различных устройств для получения изображения кажется столь же привлекательным, как и достижение атомного разрешения. Изображения, полученные при обычном давлении воздуха, были впервые описаны в 1984 году, за ними последовали изображения в криогенных жидкостях, в дистиллированной воде, в растворах соли и электролитах. Сканирующая туннельная потенциометрия оказалась интересным методом для изу-

чения распределения в атомном масштабе потенциала вдоль проводящих микроструктур. Среди недавних достижений надо отметить получение изображения за счет межатомных сил с помощью микроскопа на атомных силах. С его помощью можно исследовать структурные и упругие свойства проводников и изоляторов и комбинацию изображений электронных и упругих свойств мягких материалов. Изучается также вопрос использования туннелирования спин-поляризованных электронов для исследования с высоким разрешением магнитных поверхностных структур.

Вернемся опять к тому, что вызвало к жизни СТМ: проведению локальных экспериментов в заранее выбранном положении при очень малом пространственном масштабе вплоть до атомных размеров. Кроме получения изображений, это открывает в самом широком плане новые возможности для экспериментирования: как для неразрушающего изучения, так и для осуществления локальных изменений. Этому способствуют локальные сильные электрические поля, токи чрезвычайной плотности, локальные деформации, возможность измерения слабых сил вплоть до сил, действующих между отдельными атомами, и это далеко не полный список. Наконец, открывается возможность воздействовать на отдельные атомы и изменять отдельные молекулы, т. е. использовать СТМ как машину Феймана.

«Годы ученичества» СТМ пришли к концу, фундамент заложен, начинаются «годы странствий». Нам не хотелось бы гадать, к чему все это в конце концов приведет, но мы глубоко верим, что красота атомных структур будет стимулировать применение этого метода только к тем проблемам, решение которых пойдет исключительно на благо человечества. Это была надежда Альфреда Нобеля, это наша надежда.

Благодарности

Нам бы хотелось поблагодарить всех, кто внес вклад в развитие сканирующей туннельной микроскопии, и выразить наше восхищение приятной рабочей атмосферой, существующей среди тех, кто связан с СТМ. Мы также благодарим Дилис Брюллман за ее старательную обработку наших текстов с самого начала и за внимательное чтение этой работы и Эриха Столла за подготовку рис. 6 и 7 с использованием идей Р. Восса.

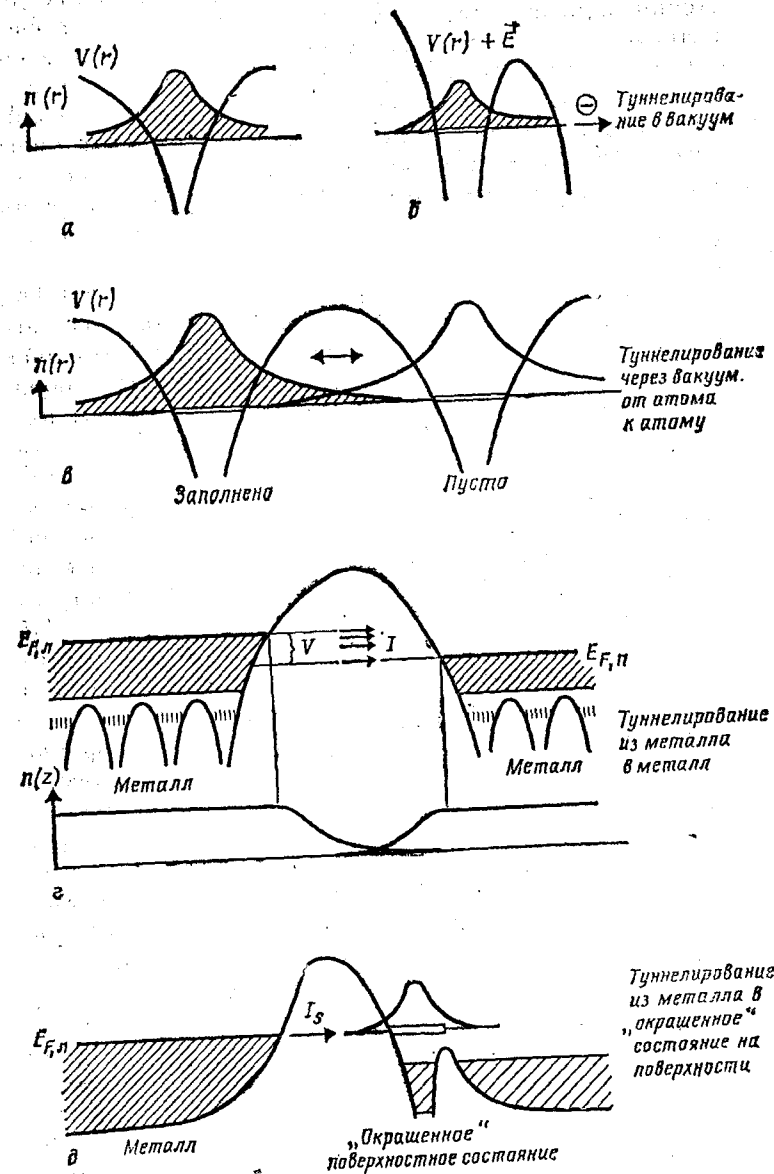
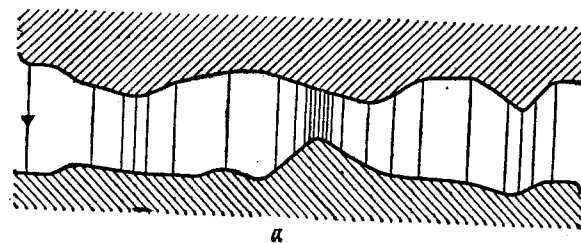


Рис. 1. (См. подпись к рисунку на стр. 22).

Рис. 1. Туннелирование: *a* — волновая функция валентного электрона в яме кулоновского потенциала ядра атома и всех других валентных электронов, которая простирается «в вакууме»; она как бы «туннелирует» в вакуум; *б* — если приложить электрическое поле E , то электрон может туннелировать через потенциальный барьер и покинуть атом; *в* — если два атома подходят достаточно близко, то электрон может туннелировать туда и обратно через вакуумный промежуток, в котором образуется потенциальный барьер; *г* — в металле потенциальные барьеры между внутренними атомами разрушаются, уровни электронов размываются в энергетические зоны, и электроны из зоны проводимости свободно перемещаются по образцу. Однако на поверхности потенциал со стороны вакуума повышен, из-за чего образуется туннельный барьер. Через него электрон может туннелировать к поверхностному атому другого металла, расположенного поблизости. Напряжение V , приложенное между двумя металлами, приводит к появлению разности уровней Ферми $E_{F,L}$ и $E_{F,R}$, таким образом, создавая «пустые состояния» справа для электронов, туннелирующих с левой стороны. Результирующий туннельный ток, приближенно описываемый формулой $I = f(V) \cdot \exp(-V \Phi \cdot s) \cdot f(V)$ содержит взвешенную локальную плотность состояний острья и образца, экспонента описывает прохождение через барьер с усредненной высотой Φ (эВ) и расстоянием между двумя металлами $S(A) \cdot f(V)$ и $V \Phi$ описывают свойства материалов. Эти величины можно получить, измеряя dI/dV и d^2I/dV^2 ; δ — простая иллюстрация локальной спектроскопии. Характерное состояние на поверхности, имеющее определенный «цвет», обнаруживается по резкому появлению дополнительного туннельного тока I_s .

Туннельный переход с оксидным слоем



Туннелирование у острья

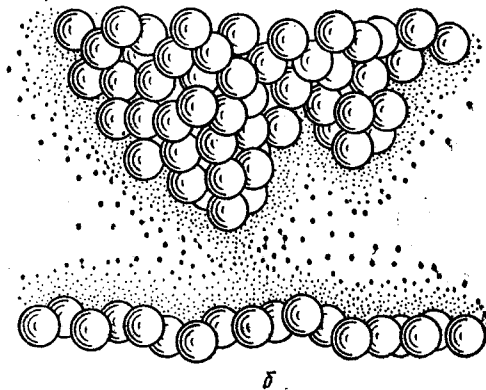


Рис. 2. Принцип СТМ. Туннельная прозрачность уменьшается экспоненциально с увеличением туннельного вакуумного промежутка примерно в 10 раз на каждый Å. В туннельных переходах с оксидным слоем большая часть тока течет через узкие каналы там, где промежутки между электродами минимальны. Если один из электродов имеет форму острья, то ток течет практически только с выступающего атома острья, в самом лучшем случае — всего лишь с одной орбитали «вершинного» атома. Это приводит к нигдевному каналу туннельного тока и, таким образом, к атомному разрешению вдоль поверхности. Второе острие, показанное на рисунке, удалено примерно на два атома, и ток через него примерно в миллион раз меньше.

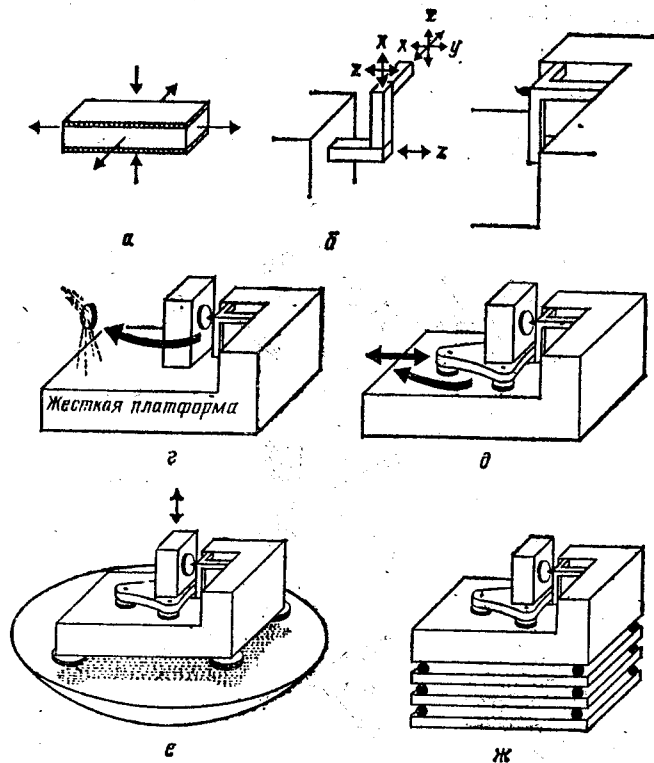


Рис. 3. Схема прибора: *a* — напряжение, приложенное к двум электродам, сжимает или растягивает пьезоэлектрический материал, расположенный между ними. Полное изменение размеров пьезоэлектрика обычно составляет микрометры; *b* — X - Y - Z пьезодвигатель, свободный от трения, который, однако, довольно чувствителен к вибрациям; *в* — жесткий пьезодвигатель, из трех пьезоэлементов, который в настоящее время наиболее часто используется наряду с пьезодвигателями на основе одного трубчатого пьезоэлемента; *г* — треножник и держатель образца, установленный на жестком основании. Образец для замены и во время очистки должен быть удален от иглы; *д* — перемещение образца в пределы досягаемости иглы, укрепленной на пьезодвигателе, в первых вариантах достигалось при помощи пьезоэлектрической «вши» с электрически прижимаемой ногой. Сейчас используются также позиционеры с магнитным двигателем или дифференциальные винты; *е* — в первой системе вибрационной изоляции туннельная ячейка с постоянными магнитами левитировала над сверхпроводящей свинцовой чашей; *ж* — простая и широко используемая в настоящее время вибрационная защита из стопки металлических пластин, разделенных винтоном — резиной, использование которой допустимо в высоковакуумных установках

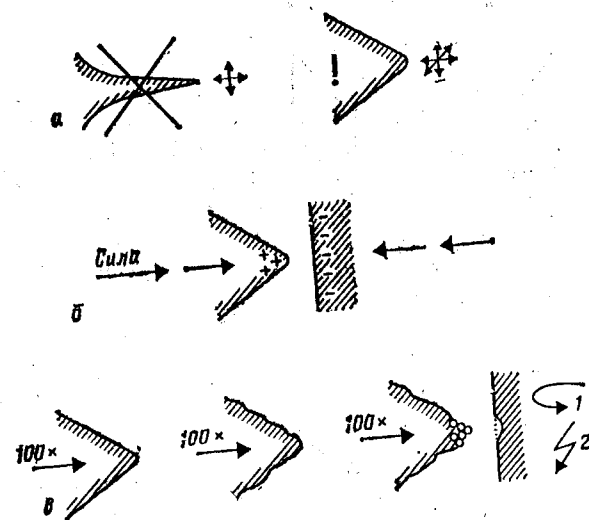


Рис. 4. Острие: *a* — длинные и узкие острия, или висютеры, чувствительны к вибрации и тепловым возбуждениям; *б* — механически отшлифованное или протравленное острие содержит мини-острия, только через одно из них обычно протекает туннельный ток. Дальнейшее заострение вначале достигалось легким касанием, а позднее — испарением в поле; *в* — электрические и межатомные силы между острием и образцом не деформируют затупленное острие или твердый образец, но делают туннельный промежуток механически нестабильным, когда на игле есть висютер. Отклик образца мягкого материала, такого, как графит или органические вещества, на такие силы может быть значительным и должен учитываться

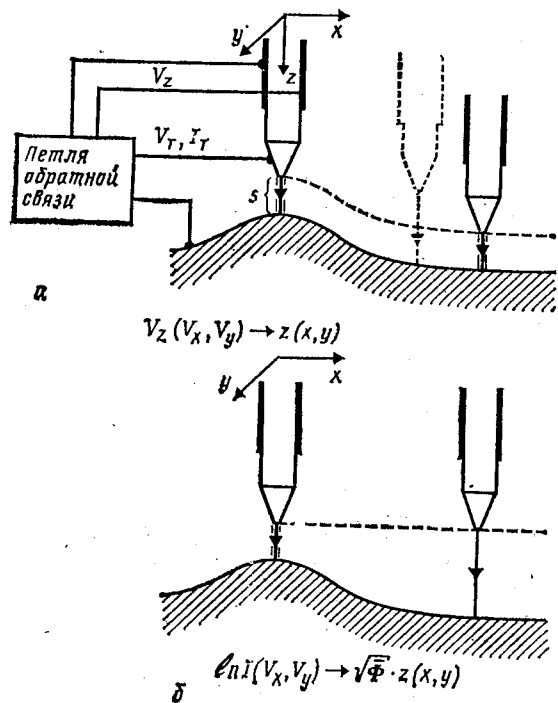


Рис. 5. Получение изображения: *a* — в режиме постоянного тока. Острием сканирует вдоль поверхности и поддерживается установленное значение туннельного тока путем непрерывной регулировки вертикального положения острия подачей напряжения обратной связи V_z . В случае электронно-однородной поверхности постоянный ток, по сути, отвечает постоянной величине S ; *б* — на участке поверхности с отклонениями от плоскости, меньшими нескольких ангстрем, соответствующими динамическому диапазону измерения тока, острие можно быстро сканировать при постоянном среднем значении координаты z . Такие «токовые изображения» позволяют осуществлять сканирование намного быстрее, чем по способу *a*, но при этом требуется независимое определение $\sqrt{\Phi}$ для калибровки z . В обоих случаях туннельное напряжение и/или положение по оси z можно модулировать для того, чтобы дополнительно получить значения $\partial \ln I / V$ и/или $\partial \ln I / S$ соответственно

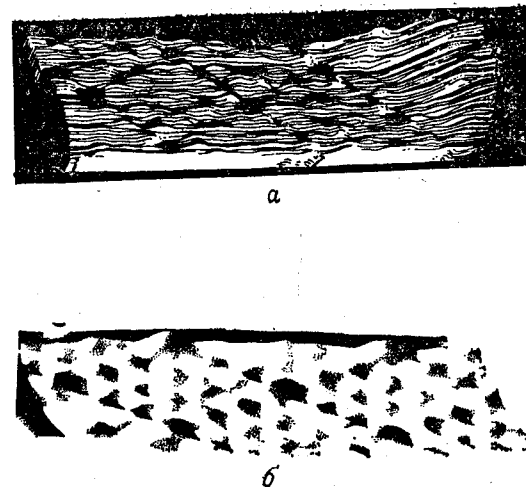
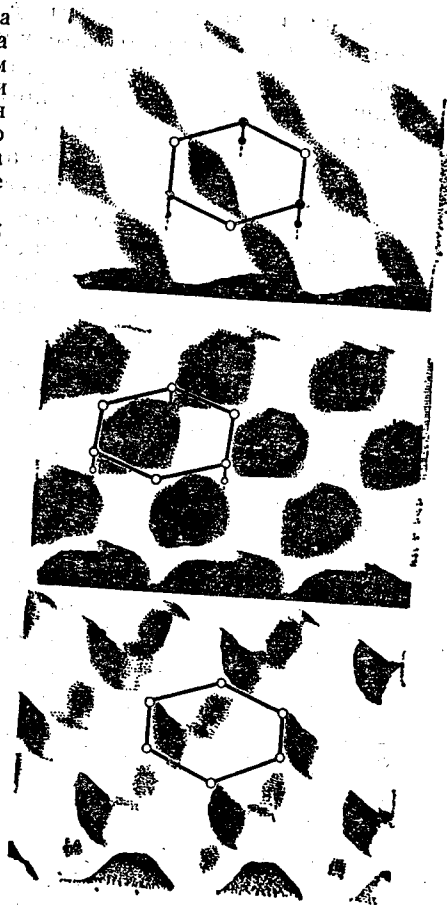


Рис. 6. 7×7 реконструкция поверхности (111) Si: *a* — рельеф, восстановленный по оригинальным записям треков (из Binnig и др., 1983, Phys. Rev. Lett. 50, 120); *б* — математически обработанное изображение 7×7 реконструированной поверхности Si (111). Характерными элементами ромбической элементарной ячейки поверхности являются угловая яма и 12 максимумов, обязанных атомам. На обработанном изображении шесть атомов в правой половине ромба лежат выше, чем в левой. Это электронная неэквивалентность, проявляющаяся на поверхности, обязана неэквивалентности структуры левой и правой половин элементарной ячейки у нижележащих слоев. Реконструкция остается постоянной в непосредственной близости от небольшого «атомного холма», расположенного справа

Рис. 7. СТМ-изображения скола графита. Верхняя картинка была снята при постоянном туннельном токе 1 нА и при напряжении 50 мВ. Волнистость, отслеженная острием, отражает локальную плотность состояний (ЛПС) на Ферми-уровне, а не положение атомов, которые образуют на поверхности сетку типа пчелиных сот, как показано на рисунке. ЛПС в области атомов, связанных с соседями во втором нижележащем слое (светлые круги), ниже, чем в области свободных атомов. Таким образом, это изображение, скорее, спектроскопическое, чем топографическое. Средний рисунок — «токовое изображение», дающее в основном сходную картинку. На нижней картинке «токовое изображение» снято при острие, расположенном ближе к поверхности, два неэквивалентных атома выглядят почти идентичными. Это необычное поведение объясняется различием локального, упругого отклика для двух типов атомов углерода на межатомные силы со стороны острия, и он компенсирует различие ЛПС. Локальное возмущение электронной структуры тоже может играть важную роль



ЭРНСТ РУСКА

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА И ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ¹

А. Родительский дом, семья

Месяц назад Нобелевский комитет прислал мне свой ежегодник за 1985 год. Из него я понял, что многие нобелевские лекции носят явно научный характер, заполнены кривыми, таблицами и ссылками на литературу.

¹ © The Nobel Foundation, 1987.
E. Ruska. The Development of the Electron Microscope and of Electron Microscopy,

Мне же не хочется читать здесь лекцию о вещах, описанных в любом современном учебнике по физике. Поэтому здесь я буду говорить не столько о физических и технических деталях и их взаимосвязях, сколько о человеческом опыте — о радостных событиях и многих разочарованиях, которые испытывали я и мои коллеги на нашем пути к конечному результату. Это не означает, что мне хотелось бы пожаловаться, скорее, я чувствую, что подобный опыт ученого, занятого поиском новых подходов, абсолютно понятен или даже нормален.

В таком контексте я должен, конечно, рассмотреть влияние своего окружения, в частности семьи. В моей семье уже было несколько ученых: мой отец, Юлиус Руска, был историком в Гейдельберге и Берлине, мой дядя, Макс Вольф — астрономом в Гейдельберге, его ассистент, бывший ученик моего отца и мой крестный отец, Август Кофф, директор Института астрономических вычислений бывшего Университета Фридриха-Вильгельма в Берлине. Кузен моей матери, Альфред Хохе, был профессором психиатрии во Фрейбурге-Брайсгау, мой дед со стороны матери, Адальберт Меркс, теологом в Гиссене и Гейдельберге.

Мои родители жили в Гейдельберге и имели семь детей. Я был пятым, шестым мой брат Гельмут, а которым я, сколько себя помню, был особенно близок и дружен. Уже очень рано оптические инструменты произвели на нас сильное впечатление. Несколько раз дядя Макс показывал нам телескопы в возглавляемой им обсерватории на горе Кёнигштуле, расположенной рядом с Гейдельбергом. С оптическим микроскопом у нас вскоре возникли столь же впечатляющие, но противоречивые отношения. На втором этаже нашего дома у отца было два кабинета, разделенные широкой дверью на полозьях, которая обычно была открыта. Одну комнату он использовал для своих исторических исследований, имеющих отношение к классической филологии, другую — для удовлетворения своих интересов, в частности к минералогии, ботанике и зоологии. Когда наши игры с соседскими детьми становились слишком шумными, он стучал в оконное стекло. Это обычно давало эффект лишь на короткое время, вскоре он стучал повторно, значительно сильнее. При третьем стуке Гельмут и я должны были явиться в его комнату и молча сидеть на низкой деревянной скамейке спиной друг к

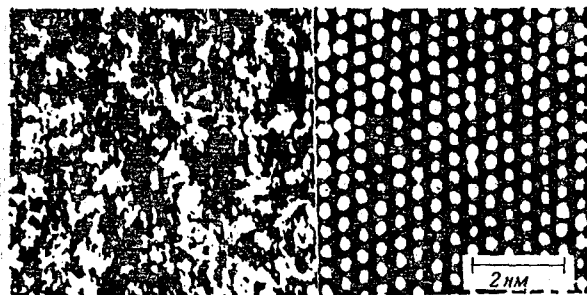


Рис. 4. Кристалл парафина. Слево изображение, полученное при минимальной дозе, справа изображение, полученное наложением 400 подобластей левого изображения с помощью компьютера. (Henderson R., Unwin P. N. T., Nature, 257, 28—32, 1975.)

лучше противостоят большим дозам электронов, поскольку подвижность внутри образца сильно уменьшается по сравнению с комнатной температурой. Таким образом, даже после неизбежной ионизации молекулы сохраняют свою структуру длительное время. В последние годы стало возможным получать изображения кристаллов, очень чувствительных к облучению, в криомикроскопах с разрешением $3,5 \text{ \AA}$ (рис. 4). Образцы охлаждались до температуры -269°C . Получение прямого изображения с достаточным контрастом невозможно, так как образцы разрушаются лучом при выдержках, необходимых для нормальной экспозиции. Поэтому записывается много изображений при малых дозах, а затем они усредняются. Хотя такие изображения очень зашумленные, они все же содержат достаточно информации о периодической структуре. Окончательно усредненное изображение обрабатывается компьютером: сначала по точкам с помощью денситометра измеряется плотность почернения на микрограмме и каждой точке изображения ставится в соответствие число, пропорциональное оптической плотности. Недоэкспонированное изображение всего кристалла делится компьютером на подобласти, подобно шахматной доске, и затем большое число (в нашем случае 400) этих изображений подобластей взаимно коррелируется и суммируется компьютером. Результирующее изображение соответствует нормально экспонированной микрофотографии. На левой части видно первоначально зашумленное изображение парафинового

кристалла, на правой стороне показано усредненное изображение. Каждая белая точка — изображение молекулы парафина. Длинная молекула парафина расположена перпендикулярно к плоскости изображения. С помощью такой процедуры электронные микрографические изображения могут быть обработаны компьютером. Можно даже изобразить трехмерные протеиновые кристаллы с очень высоким разрешением. Компьютер является очень мощным инструментом в современной электронной микроскопии.

Я не могу вдаваться в детали, касающиеся трансмиссионных электронных микроскопов с электростатическими линзами, сканирующих электронных микроскопов, которые широко используются как для изучения поверхности, так и для изучения прозрачных образцов. Очень важны различные методы обработки изображений, проводимые с помощью компьютера, электронно-полевой микроскоп и ионный микроскоп.

В. С. ЭДЕЛЬМАН

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ И МИКРОСКОПИЯ

Нобелевская премия за 1986 год поделена: одна часть присуждена Эрнесту Руске за создание электронного микроскопа, другая — Г. Биннигу и Г. Рореру — за сканирующий туннельный микроскоп. В сущности, это очень близкие приборы, в обоих случаях речь идет о получении изображения при помощи потока электронов. Но сколь различен оказался путь их авторов к высшему признанию! Первый электронный микроскоп появился более полувека тому назад, но событие это не вызвало эмоционального шока — это был период бурного развития квантовой механики, одно из основных достижений которой — описание электронов. Одновременно техника осваивала электронные пучки, нашедшие столь широкое применение и в радиолампах, и в электронно-лучевых трубках, появлялись первые телевизоры на их основе, и первый электронный микроскоп с разрешением на уровне оптического некоторым мог даже показаться не более чем любопытной игрушкой.

Правда, у «игрушки» этой были заманчивые перспективы — дифракционный предел разрешения, определяемый длиной волны де Бройля, равной для свободных

электронов единицам или долям ангстрема (в зависимости от их энергии), позволял надеяться когда-нибудь увидеть при помощи этого нового прибора отдельные атомы и молекулы. Но путь к этому оказался труден и далек. И хотя по мере совершенствования электронных микроскопов, улучшения разрешения «светосилы» и других параметров они находили все более и более широкое применение в науке и технике и для удовлетворения этих нужд была создана целая отрасль приборостроения, до сих пор предельные параметры лимитируются техническими причинами и до принципиального предела далеко. Правда, атомного разрешения удалось достичь, и электронные фотографии тонких кристаллов, сделанные «на просвет» с отчетливо видимыми отдельными атомами, приводятся даже в школьном учебнике физики, но и в этом случае изображение, строго говоря, формируется не отдельными атомами, а цепочками атомов, расположенными по ходу электронного луча.

И вдруг рядом с этими электронными «Голиафами» ценой в сотни тысяч долларов, создание которых доступно лишь на уровне самой совершенной микроскопии, — микроскоп, который хороший мастер делает за одну-две недели (конечно, если он уже научился делать такие приборы), начинает выдавать картинки поверхности разных материалов, на которых прекрасно видно, как расположены отдельные атомы! Не удивительно, что прибор вызвал интерес и восхищение физиков, и многие, не дожидаясь промышленного выпуска СТМ, стали создавать свои микроскопы и использовать их для решения многочисленных задач.

И понадобилось самое минимальное время — фактически нужно было только, чтобы об этом событии узнал достаточно широкий круг ученых, — как созрело общественное мнение о необычайной значимости работы Биннига и Рорера. Это выразилось в факте присуждения им Нобелевской премии через три года после публикации первой статьи, в которой наблюдалась поверхность кремния с разрешением отдельных атомов. Но то же самое общественное мнение не пожелало быть несправедливым и не признать колоссальные заслуги тех, кто занимался электронной микроскопией, и свидетельство тому — Нобелевская премия Э. Руске, присужденная ему полвека спустя после появления его пионерской работы.

К тому, что сказал Руска в своей Нобелевской лекции, можно многое добавить. Но бессмысленно это делать в нашем комментарии, имея в виду то громадное количество литературы — и специальной, и популярной, и справочной, — которое доступно заинтересованному читателю. Иное дело сканирующая туннельная микроскопия — бурно развивающаяся область исследований, где каждый месяц появляется что-то новое, где многое еще не устоялось, книг не написано, обзоры редки и до энциклопедий еще далеко. Поэтому попробуем вкратце описать достижения, перспективы и проблемы, стоящие перед туннельной микроскопией.

1. Феномен туннелирования

Первое, что нам придется сделать, — описать несколько подробнее, что же такое сканирующий туннельный микроскоп. Работа его основана на туннельном эффекте. Это явление — одно из первых, с которым знакомишься, изучая квантовую механику, и причина его тесно связана с принципом неопределенности, гласящим: у микрочастиц нет точного размера, или, другими словами, определенной границы. Так, например, для атома, размеры которого определяются электронным облаком, не существует точной границы, такой, чтобы можно было сказать: все электроны сидят внутри, а снаружи их нет. Но все же в малой области вблизи ядра заставить электроны можно почти наверняка, а при удалении от ядра эта вероятность быстро падает примерно по закону:

$$W \sim \exp\left(-\frac{2r\sqrt{2mV}}{\hbar}\right), \quad (1)$$

где r — расстояние, $m=9,108 \cdot 10^{-30}$ кг — масса электрона, V — энергия его связи, обычно равная единицам или десяткам электрон-вольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж), $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. Нетрудно оценить, что этот «хвост» в распределении электронов тянется не слишком далеко — при $V \approx 10$ эВ его плотность падает в 10 раз при удалении от центра на каждый $\sim 1 \text{ \AA}$ (условно эта ситуация изображена на рис. 1, а Нобелевской лекции Биннига и Рорера, далее НЛ). Так что фактически никуда электрон от атома сам по себе не уходит.

Но если поместить атом в электрическое поле E , то такое может произойти. Каким должно быть это поле, нетрудно оценить: к энергии электрона при изменении его положения вдоль поля (координата x) добавляется величина, равная eEx (см. НЛ, рис. 1, б). Поэтому, если электрон очутится на расстоянии от ядра больше, чем

$$x_0 \approx V/eE, \quad (2)$$

то ему станет энергетически выгодно, оторваться от атома — произойдет его туннелирование через потенциальный барьер. Но, чтобы это реально произошло, надо, чтобы значение x_0 было не очень большим, и ясно, что этот характерный размер связан с показателем экспоненты в формуле (1):

$$\frac{x_0 \sqrt{2mV}}{\hbar} \approx 1. \quad (3)$$

Таким образом, туннелирование должно происходить в поле, напряженность которого

$$E \approx \frac{V}{ex_0} \approx \frac{\sqrt{2mV^3}}{e\hbar}$$

имеет громадную величину $\approx 10^8 \dots 10^9$ В/см!

Технически создать такие громадные электрические поля можно в системе из двух электродов, один из которых — острая игла с малым радиусом закругления r . Если между этими электродами приложить напряжение U , то поле вблизи острия будет равным $\sim U/r$, так что при $r \approx 10^{-5}$ см (а такие острия можно довольно просто изготавливать электрохимическим травлением) нужное для туннелирования поле достигается при $U \approx 10^3$ В. И этого поля действительно достаточно, чтобы вырвать из острия собственные электроны, энергия связи которых с металлом, называемая еще работой выхода, составляет, как и для свободных атомов, величину порядка нескольких электрон-вольт. Это явление называется автоэлектронной эмиссией и применяется в технике, например в некоторых типах электронных микроскопов для создания электронного пучка.

Туннелирование между двумя проводниками можно осуществить и иным способом: сблизив на малое расстояние два плоских образца, присоединенных к разным полюсам источника тока. Физика дела здесь такова: в

твердом теле атомы расположены так близко друг к другу, что электронные облака внешних оболочек перекрываются друг другом. Это значит, что эти электроны уже не имеют определенного атома — хозяина, а принадлежат всему кристаллу. При этом, однако, одновременно с исчезновением оболочек, характерных для отдельных атомов и отвечающих квантованным значениям энергии электронов, расширяются возможности для электронов пребывать в различных точках пространства сопровождается размыванием уровней энергии в относительно широкие зоны (см. НЛ, рис. 1, з).

Зоны в металлах заполняются до граничной энергии E_F , называемой также энергией Ферми, а работа выхода V для металла — это есть энергия связи электронов, находящихся на уровне Ферми. И совершенно аналогично случаю отдельных атомов указать границу метал-

ла можно лишь с точностью до расстояния $\sim \hbar/\sqrt{2mV}$ (сравни с формулой (3), а плотность электронов над металлом изменяется с расстоянием z пропорционально

$\exp(-\frac{2z}{\hbar}\sqrt{2mV})$ (сравни с формулой (1). Сблизим

теперь две металлические пластинки на расстояние S . Тогда если они соединены между собой проводником, то уровни Ферми в них установятся одинаковыми — это есть условие равновесия, и через щель между ними, преодолевая потенциальный барьер, электроны будут туннелировать справа налево и слева направо с вероят-

ностью, пропорциональной, очевидно, $\exp(-\frac{2S}{\hbar}\sqrt{2mV})$.

Если же вместо проводника включить источник напряжения, то в одном из металлов уровень Ферми станет выше, чем в другом, точно на величину eU (см. НЛ, рис. 1, з). Из-за этого в цепи пойдет ток за счет электронов, туннелирующих сквозь барьер из металла, уровень Ферми в котором выше, на свободные места, отвечающие той же энергии и лежащие в зоне проводимости другого металла. Электроны, переносящие ток, берутся из интервала энергии eU , их число пропорционально энергетической плотности состояний на уровне Ферми $\rho(E_F)$, помноженной на eU , т. е. для плотности туннельного тока верно соотношение (рис. 1, а):

$$j_T \sim U \cdot \rho(E_F) \exp\left(-\frac{2S}{\hbar} \sqrt{2mV}\right). \quad (4)$$

Строго говоря, если речь идет о туннелировании между разными металлами, то надо учесть, что и $\rho(E_F)$, и m , и V для них различно, но сейчас это неважно.

Если же изучать туннелирование между металлом и, например, полупроводником, то картина выглядит несколько иначе. Дело в том, что для полупроводников (мы сейчас для простоты будем говорить о чистом полупроводнике без легирующей примеси) характерным является то, что вблизи уровня Ферми есть две энергетические зоны. Одна из них — валентная, все состояния в которой при температуре $T=0$ К заполнены, в другой же, лежащей выше по энергии зоне проводимости, все состояния свободны. Эти зоны разделены энергетической щелью. Так же как в атоме, электрон не может иметь энергию, значение которой не отвечает какому-либо уровню, так же и в полупроводнике не может быть электронов с энергией, лежащей вне зон, т. е. в данном случае лежащей в пределах энергетической щели. Другими словами, плотность состояний для таких энергий равна нулю, и туннельный ток может течь только тогда, когда приложено такое напряжение, что уровень Ферми металлического электрода выше дна зоны проводимости — и в этом случае электроны туннелируют из металла либо если он ниже потока валентной зоны, что отвечает туннелированию в металл. Этому процессу от-

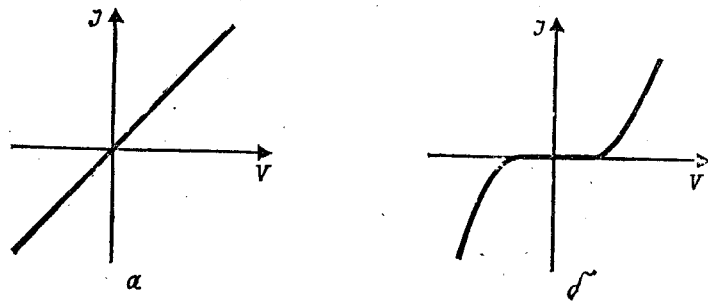


Рис. 1. Схематическое изображение вольт-амперных характеристик туннельных контактов металл — металл (а) и металл — полупроводник (б)

вечает вольт-амперная характеристика, условно изображенная на рис. 1, б.

Из этого рисунка видно, что вольт-амперная характеристика туннельного промежутка отражает структуру энергетических зон вещества, и не только такие грубые эффекты, как наличие или отсутствие щели. Любая особенность в плотности состояний находит в ней свое отражение, приведя к увеличению или уменьшению тока при соответствующих характерных напряжениях. Именно это лежит в основе метода туннельной спектроскопии, разработка которого Л. Эсаки, А. Джайвером и П. Д. Джозефсоном принесла им Нобелевскую премию за 1973 год. И метод этот стал уже рутинным, когда к нему обратили взоры будущие нобелевские лауреаты Рорер и Бинниг.

2. Рождение сканирующего туннельного микроскопа

Цель, которую ставили себе Рорер и Бинниг, была довольно скромна, и надо сказать, они были в своих поисках отнюдь не одиноки. Именно в связи с интересом к исследованию неоднородных материалов и неоднородных состояний возникла мысль осуществить локальную туннельную спектроскопию, используя зонд малых размеров, перемещаемый (сканируемый) вдоль поверхности образца. При этом нужно было найти решение непростой задачи: чтобы через вакуумный промежуток шел туннельный ток, зазор между зондом и поверхностью образца должен был составлять всего лишь несколько ангстрем. Стоило ли браться за такую задачу? Безусловно, и тому есть по крайней мере две серьезные причины.

Во-первых, несмотря на все достижения предыдущих экспериментов по туннельной спектроскопии, они сохранили общий недостаток: все они выполнялись на системах образец — тонкая пленка диэлектрика (обычно окисла самого исследуемого вещества) — пленка металла. А в такой системе, очевидно, взаимодействие вещества с диэлектриком приводит к появлению новых связанных состояний, локальных искажений кристаллической решетки и т. п. Избавиться от этого, сделав промежуток вакуумным, представлялось очень заманчивым.

Во-вторых, даже современными методами электрон-

ной и фотолитографии трудно получить образцы традиционной структуры для туннельных исследований с размерами, меньшими ~ 1 мкм. Но если в качестве зонда взять острие с кончиком, имеющим радиус закругления $\sim 0,1$ мкм (а такие острия уже давно умели делать), то благодаря чрезвычайной чувствительности туннельного тока к величине зазора реально весь ток, как можно ожидать, будет проходить через самый кончик острия по области с размерами порядка 100 \AA (см. НЛ, рис. 2).

Итак, нужно было подвести острие к образцу на расстояние нескольких ангстрем. К счастью, технические средства для решения этой задачи в принципе существовали. Основная идея: надо начинать с большого расстояния, когда никакого туннельного тока нет, и успеть остановиться, когда появляющийся при уменьшении зазора ток достигнет заданной величины. При этом, зная законы туннелирования, можно заранее оценить, каким должен быть этот ток при заданном зазоре. Ну а затем, используя обратную связь, нужно поддерживать неизменным этот ток. Для того чтобы все это работало, нужно иметь материал, который изменял бы свои размеры под воздействием приложенного управляющего напряжения. Такие материалы известны давно — это пьезоэлектрики, из которых наиболее высокими параметрами обладает пьезокерамика ЦТС (цирконат — титанат свинца).

Для конкретной реализации такого устройства можно предложить различные конструкции, многие из которых сейчас созданы и работают в разных лабораториях мира. Ну а устройство той, которую использовали Рорер и Биннинг, достаточно ясно из рис. 3, приведенного в их нобелевской лекции. СТМ работает так: на пьезоэлементы, изменяющие свою длину в направлении осей x, y , лежащих в плоскости образца, подаются пилообразные напряжения, формирующие строчную и кадровую развертки совершенно аналогично тому, как это делается в телевизоре.

На третий, z , пьезоэлемент подается напряжение с выхода усилителя обратной связи, который вырабатывает такое напряжение, чтобы туннельный ток был все время равен заданному, что достигается изменением зазора между образцом и острием благодаря удлинению

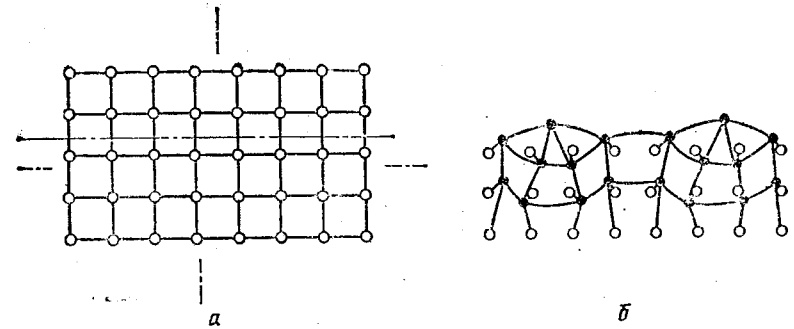


Рис. 2. Одна из мыслимых схем реконструкции поверхности (б) при разрезании простого кубического кристалла по плоскости (001) (а). Атомы условно показаны кружками, сплошные кружки — их позиция после реконструкции. Сплошные линии условно изображают связи между атомами. Для упрощения рисунка показана только одна атомная плоскость, перпендикулярная грани (001). Эта схема не более чем условная иллюстрация

или укорочению пьезоэлемента под воздействием подаваемого на него напряжения. Напряжение разверток формируется под управлением ЭВМ, куда передается и напряжение обратной связи. Они запоминаются и преобразуются в картину $z(x, y)$, отображающую траекторию острия. Переход от напряжений к координатам осуществляется без труда, так как малые изменения длины пьезокерамики пропорциональны изменениям напряжения.

Описанное устройство заработало и выдало неожиданный результат; оказалось, что уже на первых зарегистрированных топограммах поверхности золота видны крутые ступеньки моноатомной высоты. Они были столь резкими, что свидетельствовали о разрешении куда лучше, чем 100 \AA , скорее, надо было говорить об единицах \AA . Единственным объяснением этому могло быть то, что игла, сама сложная из атомов, не может оканчиваться гладко, а всегда есть один или несколько атомов, сидящих на самом кончике, и именно через них течет весь ток (см. НЛ, рис. 2). И исследователи поняли, что в их руках совершенно неожиданно очутился уникальный инструмент, и они направили свои усилия на то, чтобы постараться увидеть на поверхности отдельные атомы, и добились блистательного успеха, исследуя поверхность кремния.

Что такое «реконструкция» поверхности?

Здесь нам придется сделать некоторое отступление и рассказать о том, что такое реконструкция поверхности, чтобы можно было по достоинству оценить те возможности, которые открыла туннельная микроскопия.

В последние годы физики, имеющие дело с твердыми телами, сосредоточили свое внимание на изучении их поверхности, и не только потому, что именно поверхность определяет ход многих практически важных процессов, таких, как катализ, сорбция, химические реакции с участием твердых тел, технологические процессы при изготовлении полупроводниковых электронных приборов, да и сами параметры многих из них. Уже с точки зрения того, как устроен окружающий мир, структура поверхности долго представляла загадку. Какова структура в объеме, удалось узнать после открытия дифракции рентгеновских лучей (М. В. Т. Лауэ, Нобелевская премия 1914 г.) и разработки методов исследования с их помощью структуры кристаллов (У. Г. Брэгг, У. Л. Брэгг, Нобелевская премия 1915 г.).

Но что же происходит на поверхности? Рентген был бессильен ответить на этот вопрос, а уже самые простые соображения говорили о том, что атомная структура поверхности навряд ли совпадает с той картиной, которая получится, если бесконечный кристалл мысленно рассечь и считать, что при этом все атомы, оказавшиеся на границе, остаются на своих местах. Действительно, представим себе, что мы имеем дело с простым кубическим кристаллом (рис. 2, а). В нем каждый атом имеет по 6 ближайших соседей, с которыми он связан межатомными силами. Рассечем теперь его плоскостью, параллельной грани куба (такая плоскость обозначается в кристаллографии как плоскость (001), и уберем верхнюю половину. При этом атомы верхнего слоя никак не могут остаться на своих местах — в сплошном кристалле силы, действующие на них снизу, уравновешивались силами сверху, но теперь сверху атомов не осталось, эти силы исчезли, а значит, слой этот обязан сместиться и подойти ближе к слою, лежащему ниже. Тот, в свою очередь, тоже слегка сместится, и т. д., так что межплоскостное расстояние для нескольких приповерхностных слоев будет иным, чем в объеме. (Реально та-

кая деформация быстро падает с глубиной и распространяется всего на 2—3 слоя.)

Но этого мало — у верхних атомов остаются, как говорят, оборванные связи, а это энергетически очень невыгодно, и, стремясь к равновесию, атомы на поверхности будут перестраиваться так, чтобы оборванных связей или совсем не осталось, или чтобы их число значительно уменьшилось. Одна из мысленно возможных схем такой перестройки — ее называют реконструкцией — показана на рис. 2, б. Обратите внимание — реконструкция привела к тому, что период решетки вблизи поверхности в одном направлении стал в 4 раза больше, чем в объеме, и теперь элементарная ячейка имеет размеры не 1×1 , а 4×1 !

Построенная картина реконструированной поверхности далеко не единственно возможная, и для плоскости (001) она, скорее всего, не самая выгодная с точки зрения минимума энергии, потому что у нее симметрия по отношению к поворотам (ось 2-го порядка) ниже, чем симметрия всего кристалла (ось 4-го порядка). Какая картина получится реально, предсказать практически невозможно: для этого надо построить все возможные модели (а их фактически бесконечно много!) и рассчитать, какая из них отвечает минимуму энергии. Но и этого будет мало — различные конфигурации могут не слишком сильно различаться по энергии, и в зависимости от технологии изготовления образца реально могут реализоваться разные ситуации. Например, если расколоть в вакууме кристалл кремния перпендикулярно диагонали куба (плоскость 111), то реконструированная поверхность приобретает вид 2×1 . Если же теперь кристалл отжечь, то появится конфигурация с громадным периодом, в 7 раз превышающим период решетки, так называемая структура 7×7 .

То, о чем сейчас говорилось, стало известно лет 15 назад благодаря освоению методов наблюдения дифракции медленных электронов. (Кстати, обнаружение этого явления принесло К. Дж. Дэвиссону и Дж. П. Томсону Нобелевскую премию в 1937 г.)

В отличие от рентгеновских лучей медленные электроны сильно взаимодействуют с атомами и проникают в глубь твердого тела всего на несколько атомных слоев. Поэтому отраженные от кристалла электроны несут информацию практически только о его поверхности.

А так как свободные электроны имеют длину волны $\lambda = 2\pi\hbar/\sqrt{2mE} \approx 1 \text{ \AA}$ (при $E=100 \text{ эВ}$), сравнимую с межатомным расстоянием, то они дифрагируют на периодической решетке, составленной из атомов. Так, если период двумерной решетки равен d , то, согласно известным законам дифракции, при падении электронов по нормали к поверхности дифракционный максимум окажется расположенным под углом к нормали, определяемым из уравнения $d\sin\varphi = \lambda$.

Поэтому, сняв электронограмму и измерив углы, под которыми видны дифракционные пятна, можно узнать, какие периоды есть на поверхности. Таким образом и было установлено, что поверхность (111) кремния претерпевает реконструкцию 7×7 .

Ну а дальше надо опять строить разные модели, выбор которых теперь, правда, ограничен — период ячейки известен, рассчитывать интенсивность отражения под разными углами, сопоставлять эти расчеты с измерениями и делать выбор, не будучи до конца уверенным, что удалось перебрать все возможности.

Такова была ситуация к моменту появления сканирующего туннельного микроскопа. И его создатели решили, что новый прибор надо использовать для наблюдения реконструкции поверхности твердых тел, и в первую очередь для наблюдения структуры 7×7 .

СТМ и структура 7×7

Перипетии поисков и полученные результаты подробно изложены в Нобелевской лекции, и не будем их повторять. Отметим лишь, что замечательная картинка (см. НЛ, рис. 6) сыграла свое дело, с момента ее появления СТМ стал общепризнанным прибором, и во многих лабораториях мира начали появляться свои работы в этом направлении. Появились и замечательные работы по структуре 7×7 , в которых удалось продвинуться дальше.

В одной из этих работ исследовалась так называемая вицинальная грань кремния — плоскость поверхности проходила под небольшим углом к кристаллографической плоскости (111). Оказалось, что вся она составлена из террас, плоскости которых точно совпадают с плоскостью (111) (рис. 3). И что самое удивительное —

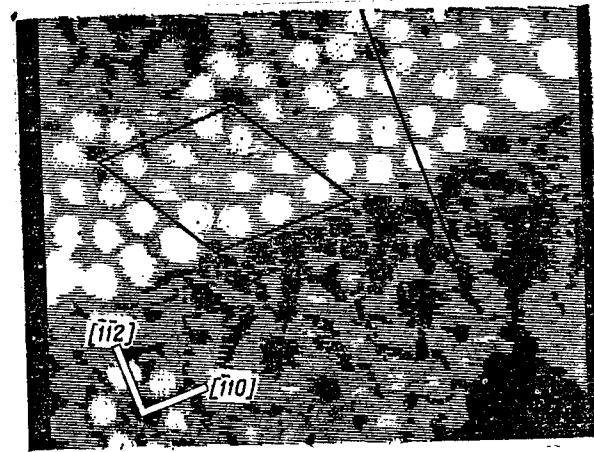


Рис. 3. СТМ-изображение вицинальной грани кремния, близкой к грани (111). На плоских террасах, совпадающих с плоскостями (111), видна структура 7×7 , сохраняющаяся вплоть до ступеней атомной высоты (R. S. Becker, J. A. Golovchenko, E. G. McRae, B. S. Swartzentruber, Phys. Rev. Lett., v. 55, p. 2028, 1985)

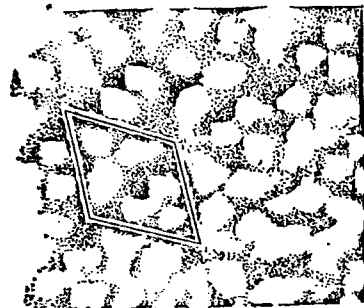
поверхности этих террас сохраняют реконструкцию 7×7 вплоть до самых своих краев, и более того, положение и форма границы ступеней атомной высоты жестко связаны со структурой 7×7 : выглядит так, будто вся громадная ячейка 7×7 ведет себя как отдельный атом, который нельзя разделить на части. А СТМ — единственный прибор, с помощью которого удалось установить это обстоятельство.

В другой работе структура 7×7 наблюдалась при разных напряжениях между образцом и острием. Мы уже установили, говоря о туннелировании, что, задавая разные напряжения, можно обследовать электроны разной энергии: принадлежащие зоне проводимости, или валентной зоне, или какому-либо еще избранному энергетическому состоянию. И оказалось, что СТМ-изображения, отвечающие разным энергетическим состояниям, выглядят совершенно по-разному (рис. 4) — так, «выступы» при туннельном токе, обусловленном электронами из зоны проводимости кремния, могут смениться «впадинами», если в процессе принимают участие электроны из валентной зоны или находящиеся в связанном приповерхностном состоянии. Получается, что СТМ видит вовсе не сами атомы, а распределение в простран-

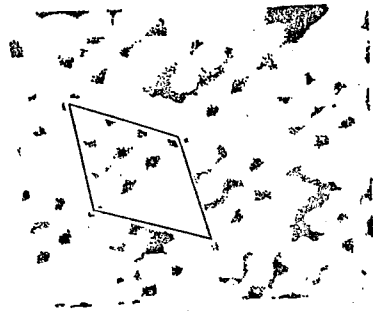
↑ ↑ ↑
важно



a



b



c

Рис. 4. STM-изображения 7×7 реконструированной поверхности (111) кремния при разных напряжениях вольфрамовое острие — образец. Верхние рисунки отвечают туннелированию электронов из вольфрама в кремний при напряжениях $+2$ В и $+1,45$ В, нижний — из кремния в вольфрам $-1,45$ В. Заметна сильная асимметрия средней картины в

пределах ромбической элементарной ячейки, показанной на рисунках. Для верхнего и нижнего рисунков эта асимметрия выражена довольно слабо и проявляется лишь при тщательном анализе (см. НЛ). (R. J. Hamers, R. M. Tromp, J. E. Demuth, Phys. Rev. Lett., v. 56, p. 1972, 1986)

стве плотности электронов различной энергии; изображение не топографическое, а спектроскопическое. Это очень важное обстоятельство, существенно повышающее информативность метода.

Кремний — не единственный материал, на котором удалось получить картины с ангстремным разрешением. Сейчас можно привести целый список, в котором будет не один десяток материалов, а вторым был графит.

STM-изображение графита

Исследование графита было начато, скорее, с прикладной целью. Дело вот в чем: в обычном микроскопе,

чтобы разглядеть какой-то мелкий предмет, его кладут на подложку, которая достаточно ровная и гладкая, так что не мешает наблюдению интересующего объекта. После изобретения STM возник вопрос: а нельзя ли с его помощью наблюдать не только специально подготовленные поверхности твердых тел, но и какие-то другие объекты, например вирусы, крупные молекулы, полимерные цепи и т. п.? Но здесь возникает проблема, практически пока не решенная: если пытаться наблюдать что-то с атомным разрешением, то подложка должна быть атомно-гладкая хотя бы на относительно больших участках.

В поисках таких подложек и обратились к графиту, точнее, к синтетическому веществу, называемому пирографитом. Сейчас умеют изготавливать высококачественные кристаллы пирографита, которые легко расщепляются, подобно слюде. Но в отличие от слюды графит — это металл в том смысле, что у него есть свободные электроны, проводящие электрический ток. И действительно, на сколах графита обнаружили довольно большие участки — размерами порядка 10^{-5} см — гладкие в атомном масштабе. А на этих гладких участках проявилась тонкая структура (см. НЛ, рис. 7, рис. 5), симметрия которой по отношению к поворотам — ось 6-го порядка — совпадает с симметрией графита, кристаллы которого расщепляются именно перпендикулярно этой оси.

Это недвусмысленно указывало на то, что STM-изображение отражает атомную структуру. Любопытно, что хорошие картинка, которые удалось увидеть многим исследователям, получились не только при измерениях в глубоком вакууме, но и на воздухе и даже при погружении графита в дистиллированную воду. Связано это с химической инертностью графита — его поверхность ничем не загрязняется.

Но еще более любопытно, что картина не похожа на то, что, казалось бы, следовало наблюдать. Действительно известно, как устроена решетка графита (рис. 6): она сложена из слоев, в пределах которых атомы образуют «пчелиные соты» с расстоянием между ними всего $\sim 1,42$ А. Поэтому связь между слоями (расстояние) составляет целых $\sim 3,35$ А. Эта связь очень слабая, поэтому графит так легко расщепляется. И нет оснований ожидать, что поверхность реконструируется — слишком

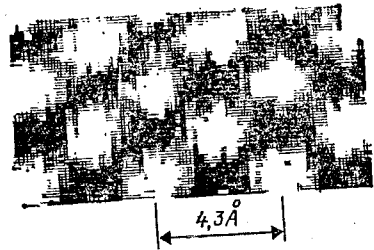


Рис. 5. Одно из СТМ-изображений пирографита (А. П. Володин, А. М. Трояновский, М. С. Хайкин, В. С. Эдельман, ПТЭ, № 4, 1987, 231).

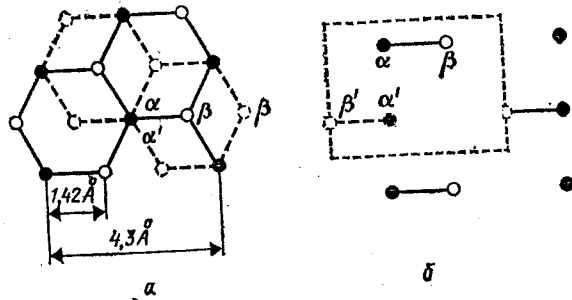


Рис. 6. Схема решетки графита: а — вид сверху, вдоль оси шестого порядка; б — вид сбоку

ничтожно изменение энергии при разрыве межплоскостных связей по сравнению с энергией взаимодействия атомов в плоскости.

Но вместо «пчелиных сот» видна совершенно иная структура — светлые пятна (выпуклости) расположены так, что в центре каждого шестиугольника, вершинами которых они являются, расположено еще одно светлое пятно. К тому же и расстояние между пятнами не 1,42 Å, а целых 2,5 Å. Получается так, будто из каждого двух атомов, помеченных на рис. 7 как атомы α и β , виден только один. Строго говоря, это не противоречит общим принципам, потому что эти атомы занимают физически разные позиции, под атомом α в нижележащем слое есть сосед, а под атомом β — нет. Но, опять повторим, связь между слоями очень слабая, и как показывают расчеты, относительного смещения этих атомов вверх—вниз практически не происходит. И здесь

опять встает вопрос: что же видит СТМ, когда речь идет о картине в атомном масштабе? И ответ, как и в предыдущем разделе, — не сами атомы, а распределение плотности электронов определенной энергии, в данном случае — энергии на уровне Ферми.

Как мы сказали выше, графит — это металл. Но это металл особый: электронов проводимости в нем ничтожно мало, всего $\sim 10^{-5}$ на каждый атом. А это означает, что уже слабые воздействия, такие, как, например, удаление соседнего слоя, могут сильно отразиться на распределении в пространстве плотности электронов проводимости, так как само их существование есть следствие тонкого баланса различных взаимодействий. Как показали расчеты, проведенные к настоящему времени уже несколькими разными группами авторов, так оно и есть: над атомами β плотность электронов проводимости выше, чем над атомами α , и согласно расчету, именно атомы β дают наблюдающиеся возвышения. И исторически именно исследование графита указало на спектроскопический характер СТМ-изображения.

Но графит приподнес еще один сюрприз: амплитуда перемещения острия по вертикали при наблюдении «атомных» картин оказалась в некоторых случаях прямо-таки гигантской, достигающей десятка и более ангстрем. Казалось бы, этого никак не может быть. Вспомним хотя бы, что межплоскостное расстояние в графите 3,35 Å — очевидно, это верхняя граница для амплитуды искажений поверхности. Объяснение было найдено — оказывается, надо учесть силы, действующие между острием и образцом, приводящие к деформациям графита при сканировании поверхности. Силы эти хотя и имеют атомный масштаб, но совсем не так уж малы — порядка $10^{-8} \dots 10^{-9}$ Н. И их вполне можно измерить. Так родилась идея еще одного прибора, предложенного все теми же Беннигом и Рорером, — микроскопа на атомных силах.

Сканирующий микроскоп на атомных силах (СМАС)

Устройство СМАС несколько сложнее, чем СТМ. Единственный описанный пока прибор сделан так: на легкой тонкой пружинке укреплен алмазная игла, и к ней подводится образец. Когда расстояние между кончиком иглы и образцом достигает примерно нескольких

ангстром, действующая между ними сила становится достаточной, чтобы вызвать деформацию пружинки тоже на несколько ангстром. А эта деформация измеряется при помощи СТМ, острие которого подведено к пружинке с тыльной стороны. Таким образом, имеется как бы тандем из двух приборов. А дальше все понятно: образец сканирует под алмазной иглой, и зазор между ними автоматически поддерживается таким, чтобы деформация пружинки, измеряемая по величине туннельного тока, оставалась постоянной.

Это выглядит просто на бумаге, но ясно, что реально работать с таким прибором необычайно трудно. Но все-таки уже первая попытка дала изображения с разрешением ~ 30 А. И надо полагать, направление это будет развиваться. Во всяком случае, на 2-ю Международную конференцию по СТМ, проходившую летом 1987 года, было представлено уже несколько докладов по СМАС, а это значит, что новые публикации на эту тему не за горами.

СТМ в технике

В последние годы проявляется стремление ко все большей миниатюризации в электронике: размеры элементов интегральных схем становятся меньше 1 мкм, появляются многослойные полупроводниковые структуры с толщиной слоев в десятки — сотни ангстром. При отработке технологии таких приборов, естественно, необходимы методы исследования, того, что получается. И тут СТМ с его ангстромным разрешением, думается, со временем займет ведущее, если не монопольное, место.

Дело в том, что традиционный метод электронной микроскопии, применяемый сейчас для анализа таких структур, не очень хорош. Хотя в лучших микроскопах (которые, напомним, по конструкции куда сложнее и много дороже даже кустарных СТМ!) получается предельное разрешение, близкое к разрешению СТМ, энергия зондирующих электронов в них очень высока — десятки и сотни килоэлектрон-вольт. У таких электронов во многих материалах пробег оказывается очень большим — в кремнии, например, порядка 1 мкм. Поэтому реально с разрешением ситуация оказывается намного хуже: надо строить сложные модели, учитывающие различные процессы при взаимодействии электронов с веществом, и использовать не очень корректные процеду-

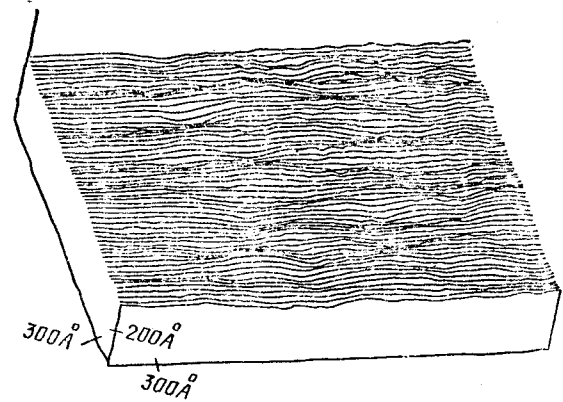


Рис. 7. Топограмма поверхности кремния. Образец получен травлением окисного слоя с полевого транзистора (М. С. Хайкин, А. М. Трояновский, В. С. Эдельман, В. М. Пудалов, С. Г. Семенчинский, Письма в ЖЭФ. 1986. — Т. 44. — 6.193)

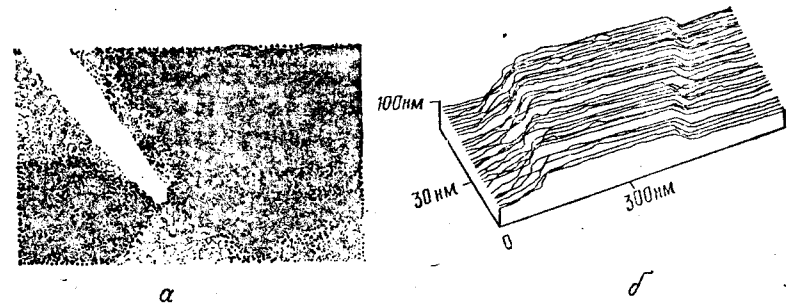


Рис. 8. Фотография микроэлектродной структуры ниобия на кремнии в сканирующей иглы, подведенной к микроэлектроду, полученная в сканирующем электронном микроскопе (а), и СТМ-изображение средней части микроэлектродной структуры (б). (А. П. Володин, Ч. В. Копецкий, Г. А. Степанян, М. С. Хайкин, В. С. Эдельман, Письма в ЖЭФ. — 1987)

ры обработки результатов измерений, чтобы хоть сколько-нибудь приблизиться к техническому пределу самого микроскопа.

СТМ свободен от этого недостатка. Уж если с его помощью можно видеть отдельные атомы на поверхности кремния, то и давно можно исследовать «микроскопический» рельеф поверхности (рис. 7) и то, как на него влияет различная обработка. Столь же несложно исследовать и структуру тонких пленок, поверхность металлических стекол и других материалов.

Несколько сложнее обследовать локальные образова-