

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ—1986

537.533.35

**СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ — ОТ РОЖДЕНИЯ
К ЮНОСТИ***Г. Бинниг, Г. Рорер*)*

Мы хотим изложить историю развития сканирующей туннельной микроскопии. Физические и технические аспекты этого вопроса уже освещались в нескольких недавно опубликованных обзорах и в материалах двух конференций¹, и ожидается, что другие публикации последуют в скором будущем. В приведенных в конце иллюстрациях обобщается техническая сторона проблемы. Наше повествование ни в коей мере не является рекомендацией по проведению научных исследований; это просто рассказ о наших мыслях, наших поступках и чувствах. Но мы были бы рады, если бы смогли поддержать более спокойное отношение к научной деятельности.

Вероятно, нам повезло в том, что мы изучали сверхпроводимость, чрезвычайно красивый и изящный раздел науки. Для сканирующей электронной микроскопии нам пригодился некоторый опыт в области туннелирования² и в обращении с ангстремами³, но ни с микроскопией, ни с исследованием поверхностей мы не сталкивались. Возможно, именно это обусловило смелость и энтузиазм, необходимые для занятий тем, что «в принципе не должно получиться», как нам часто говорили.

«После двух лет исследований фазовых переходов и критических явлений и многолетней работы с магнитными полями я был готов к переменам. Различные виды туннелирования уже некоторое время интриговали меня. Задолго до этого я интересовался идеей Джона Слоичевского о «считывании» цилиндрических магнитных доменов туннелированием; кроме того, я исследовал туннелирование между мелкими металлическими зернами в бистабильных резисторах, а позже был свидетелем усилий моих коллег по достижению устойчивости контактов Джозефсона. Поэтому микроскопическое исследование роста и электрических свойств тонких диэлектрических слоев показалось мне интересным. Мне предоставили возможность взять на работу нового исследователя, Герда Биннига, который также интересовался этой проблемой. Кстати, мы с Гердом не встретились бы, если бы не сотрудник IBM Алекс Мюллер, руководивший в то время отделом физики. Он и познакомил нас¹».

Исходная идея состояла не в создании микроскопа, а в осуществлении спектроскопических исследований участков поверхности, размеры которых не превышают 100 Å.

*) Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy — From Birth to Adolescence: Nobel Lecture. Stockholm December 8, 1986. — Перевод В. Г. Терзиева.

Герд Бинниг и Генрих Рорер — сотрудники Исследовательского отдела фирмы IBM, Цюрихская научная лаборатория, Рюмликон, Швейцария.

«За три месяца до начала моей работы в ИБМ, в процессе поиска жилья Гейни Рорер более подробно обсудил со мной свою идею о неоднородности поверхностей, в особенности тонких оксидных пленок, выращенных на металлических подложках. Дискуссия вращалась вокруг идеи о локальном исследовании подобных пленок, но мы поняли, что отсутствует инструмент, подходящий для этой цели. Также было не ясно, облегчится ли решение проблемы, если рассматривать конкретные туннельные контакты. Результатом этого разговора явилось то, что за несколько недель до начала моей работы в ИБМ, на конференции по низким температурам LT-15 в Гренобле я неожиданно вспомнил о своей старой мечте — о туннелировании в вакууме. Лишь спустя несколько лет я узнал, что об этом думали многие другие ученые, занимавшиеся, как и я, туннельной спектроскопией. Как это ни странно, никто этого вопроса не обсуждал, хотя сама мысль существовала давно». В действительности эта идея возникла двадцатью годами ранее, одновременно с туннельной спектроскопией⁴, но не получила развития. Вскоре после начала нашей работы Сеймор Келлер, член совета по техническому контролю исследовательского отдела ИБМ и давний сторонник развития работ по туннелированию в нашей лаборатории, обратил наше внимание на эксперименты У. А. Томпсона по туннелированию в вакууме с управляемым острием⁵.

Эта задача очень заинтересовала нас. Удивительно, что лишь спустя две недели мы поняли, что мы можем создать не только локальный спектроскопический зонд, но и получать сканированием спектроскопические и даже топографические изображения. Таким образом, открывалась возможность создания нового типа микроскопа. По принципу работы он в основном напоминает профилограф⁶, но сканирующее острие и поверхность не находятся в механическом контакте, а располагаются на расстоянии в несколько ангстрем, контролируемом по величине туннельного тока, протекающего между ними. Спустя примерно два года, незадолго до получения первых изображений, мы узнали о статье Р. Янга с соавторами⁷, в которой дано описание полевого излучающего микроскопа, названного авторами «топографайнером» (topografiner). Этот микроскоп имел много общего с СТМ, если не считать того, что острие располагалось довольно далеко от поверхности. Поэтому при больших напряжениях возникал ток эмиссии в электрическом поле, а не туннельный ток, и поперечная разрешающая способность оказывалась того же порядка, что и у оптического микроскопа. Авторы предложили улучшить разрешение, применив более тонкое острие, и даже пробовали использовать вакуумное туннелирование и обсуждали некоторые из захватывающих перспектив его применения в спектроскопии. Если бы они оценили хотя бы теоретически разрешающую способность туннелирования при сканировании, то, вероятно, пришли бы к новой идее — Сканирующей Туннельной Микроскопии. Они подошли к этой идее ближе, чем кто-либо другой.

В середине января 1979 г. мы подали нашу первую заявку на патент на СТМ. Эрик Кортенс, заместитель руководителя по физике в лаборатории ИБМ в Рюшликоне, подкрепил нашу заявку перспективой «тысяч СТМ'ов в будущем». Он первым поддержал нас. Вскоре, после лабораторного семинара по СТМ, Ганс-Йорг Шеель стал третьим, поверившим в эту идею.

С точки зрения технического воплощения нашего проекта большой удачей для нас было участие Кристофа Гербера. «С момента поступления на работу в ИБМ в 1966 г. Кристоф работал со мной (Г. Р.) над сильными импульсными магнитными полями, фазовыми диаграммами и критическими явлениями. К концу 1978 года мы получили весьма интересные экспериментальные результаты по проблеме случайных полей. Тем не менее, когда ему предложили участвовать в разработке нового направления, Кристоф ни минуты не колебался. Он всегда любил необычные вещи, и, кстати, был вторым, кто поверил в нашу идею. После этого я и проблема случайных полей остались без технической поддержки. Примерно год спустя к работе подключился Эди Вейбель, и еще одна тема осталась без технического обеспечения. В кон-

це концов и я присоединился к команде, оставив проблему случайных полей другим».

В первые месяцы работы над СТМ мы сосредоточили усилия на решении основных технических проблем⁸. Как избежать механических вибраций,

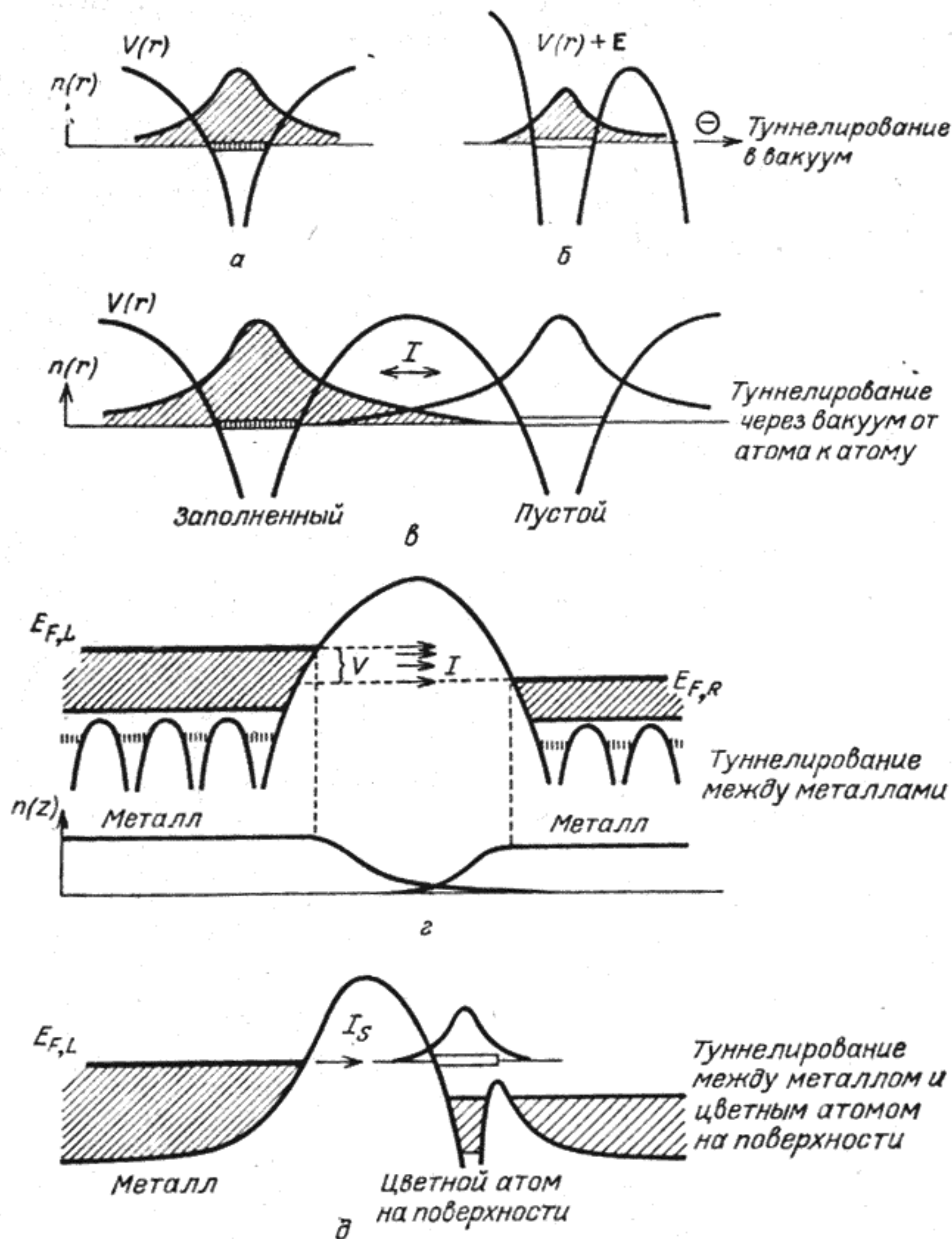


Рис. 1. Туннелирование.

а — Волновая функция валентного электрона в кулоновской потенциальной яме, создаваемой атомным ядром и другими валентными электронами, простирается в вакуум; она «туннелирует» в вакуум. б — Под действием внешнего электрического поля E электрон может туннелировать сквозь потенциальный барьер и покинуть атом. в — Если два атома окажутся достаточно близко друг от друга, то электрон может туннелировать между ними через вакуум или потенциальный барьер. г — В металле потенциальные барьеры между атомами низки, и электроны свободно перемещаются в зоне проводимости; но на поверхности потенциал возрастает, образуя поверхностный потенциальный барьер, через который электрон может туннелировать к достаточно близкому атому на поверхности другого металла; электрическое напряжение, приложенное к металлическим электродам, приводит к разным энергиям Ферми $E_{F,L}$ и $E_{F,R}$, обеспечивая в правой части (см. рисунок) свободные энергетические состояния для туннелирующих слева электронов; возникающий при этом туннельный ток приближенно описывается выражением $I = f(V) \exp(-\bar{\phi}^{1/2}s)$, где в $f(V)$ учитывается взвешенная локальная плотность состояний для образца и острия, экспонента задает проводимость ($\bar{\phi}$ — усредненная высота барьера в эВ; s — расстояние между электродами в $\text{\AA}$). $f(V)$ и $\bar{\phi}^{1/2}$ можно определить экспериментально, измерив $\partial \ln I / \partial V$ и $\partial \ln I / \partial s$. д — Простой пример локальной спектроскопии; характерное состояние или «цвет» поверхностного атома определяется из величины туннельного вклада в ток (см. ⁵⁸ и приведенные там ссылки).

приводящих к столкновению острия с поверхностью? Мы защитили микроскоп от акустического шума и вибраций, разработав мягкую подвеску в ва-

куумной камере. Каковы силы, действующие между острием и образцом? В большинстве случаев проблем они не вызывали. Как перемещать острие со столь высокой точностью? При помощи пьезоэлектрика, связывающего электронную и механическую части установки. Лишь позже, в результате самих экспериментов по туннелированию, была обнаружена непрерывная деформация пьезоматериалов в ангстремном диапазоне. Как осуществить

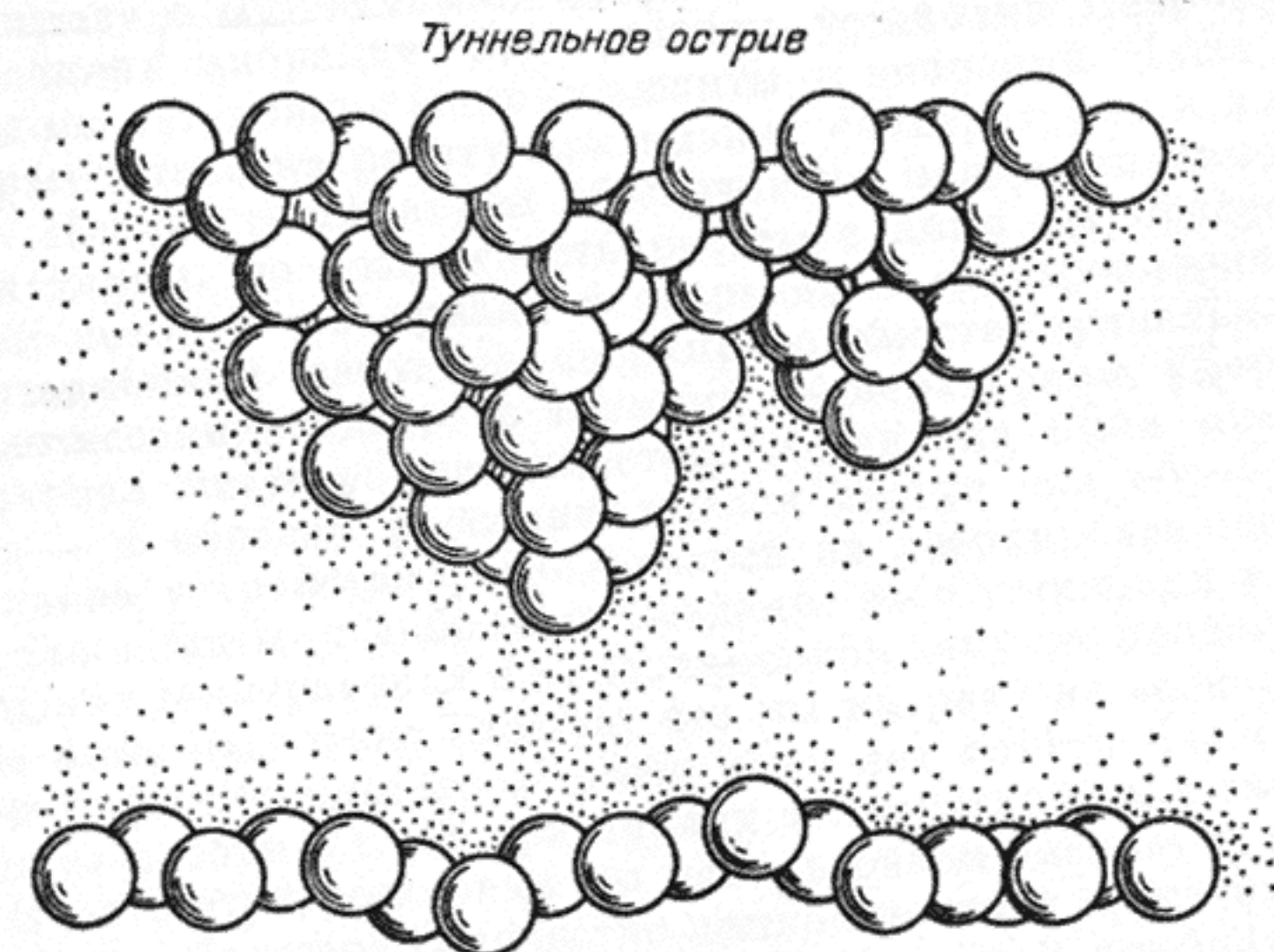
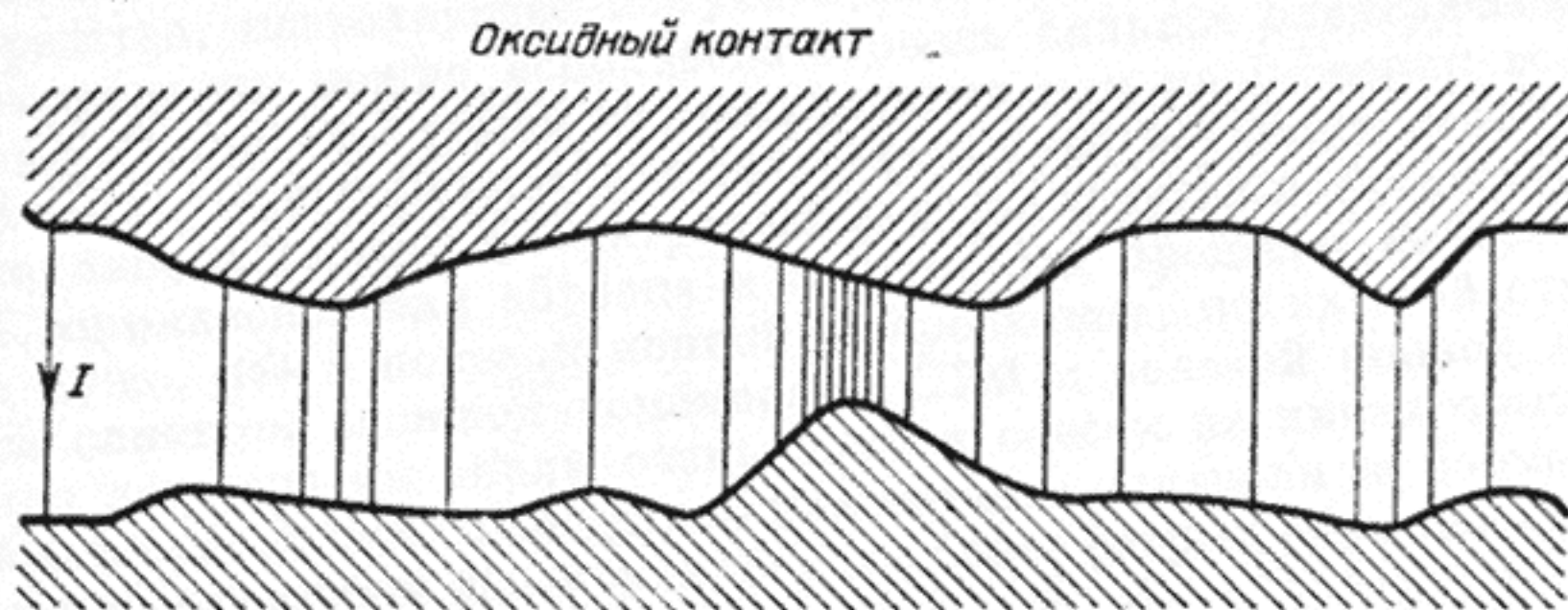


Рис. 2. Общий принцип.

Туннельная проводимость экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния между поверхностями. В вакууме проводимость уменьшается примерно в 10 раз при увеличении расстояния на 1 Å. В оксидном туннельном контакте плотность тока намного выше в узких каналах, возникающих в местах наименьшего удаления электродов. Когда один из электродов имеет форму острия, ток протекает практически только между крайними атомами острия и поверхностью, в идеальном случае — между определенной орбиталью атома на вершине острия и образцом. Это обеспечивает малую ширину канала, по которому протекает ток и, таким образом, хорошее поперечное разрешение (порядка атомных размеров). Второе острие, показанное на рисунке, отодвинуто от поверхности на расстояние, примерно соответствующее двум атомам. Сквозь него протекает в миллион раз более слабый ток.

точное перемещение образца на большое расстояние из положения обработки поверхности в положение контакта с острием? При помощи специального держателя образца. Как избежать сильных тепловых флуктуаций длины образца и, особенно, острия? Необходимо избегать нитевидных кристаллов с малыми упругими константами. Тут мы подошли к более общему и самому важному вопросу: какой должна быть форма острия и как ее получить? С самого начала мы рассматривали острие как непрерывную материю с некоторым радиусом кривизны. Но мы быстро поняли, что острие никогда не бывает гладким из-за конечного размера атомов, а также из-за грубости поверхности острия в общем случае (если не проводить специальной обра-

ботки). Таким образом, на поверхности основного острия существуют мини-острия. Сильная зависимость туннельного тока от расстояния между острием и образцом обуславливает выбор ближайшего к поверхности мини-острия.

Сразу после получения первых устойчивых СТМ-изображений, на которых были видны удивительно четкие моноатомные ступени, мы сосредоточили внимание на атомном разрешении. Наши надежды на достижение этой цели подкреплялись тем, что само туннелирование в вакууме предоставляет новое средство, позволяющее получить исключительно тонкое острие: для его формирования можно использовать очень сильное электрическое поле, возникающее при вакуумном туннелировании при напряжении всего в несколько вольт. При этом можно использовать либо миграцию ионов во внешнем поле, либо испарение в электрическом поле. Другой метод состоит в осторожном соприкосновении образца и острия. Эти процессы контролируются гораздо хуже, чем в полевой ионной микроскопии, но на этой стадии нам казалась слишком сложной комбинация СТМ с полевой ионной микроскопией, про которую мы знали очень мало и совсем не имели опыта работы с ней. Мы не располагали средством для точного контроля за формой острия. Методом проб и ошибок мы добивались все более острых образований. Иногда наш метод срабатывал, иногда нет.

Но сперва нам надо было получить вакуумное туннелирование. При этом наряду с нитевидными кристаллами (вискерами) серьезную проблему представляли вибрации. Для защиты установки СТМ внутри вакуумной камеры мы установили систему защиты от вибраций. Наша первая установка была рассчитана на работу при низких температурах и в сверхвысоком вакууме. Низкие температуры обеспечивали малые тепловые дрейфы и флуктуации длины, но возможность работы с ними мы предусмотрели главным образом потому, что думали в основном о спектроскопии. А после наших диссертационных работ по сверхпроводимости туннельная спектроскопия для нас ассоциировалась с низкими температурами. Сверхвысокий вакуум обеспечивал чистоту поверхностей. Установка была прекрасно спроектирована — к образцу и острию имелся доступ для обработки поверхности, туннельное устройство располагалось на сверхпроводящей магнитной подвеске для защиты от вибраций. Создание этой установки и первые испытания при низких температурах и в сверхвысоком вакууме продолжались целый год, но она была настолько сложна, что мы ни разу не воспользовались ею. Мы хотели слишком многого — лишь семь лет спустя были решены основные проблемы работы с СТМ при низких температурах и в сверхвысоком вакууме⁹. Вместо этой установки мы использовали эксикатор в качестве вакуумной камеры, большое количество липкой ленты и простейший вариант сверхпроводящей магнитной подвески, потребляющий приблизительно 20 литров жидкого гелия в час. Наш мастер — стеклодув Эмиль Хаупт очень помог нам, изготовив большое количество стеклянных деталей. Благодаря его энтузиазму была сделана свинцовая чаша для сверхпроводящей магнитной подвески. Первую четкую экспоненциальную зависимость силы туннельного тока I от расстояния между образцом и острием s , характерную для туннелирования, мы получили ночью, едва дыша от возбуждения и из боязни вызвать вибрации. Это случилось в знаменательную ночь 16 марта 1981 г.

Таким образом, через 27 месяцев после построения концепции сканирующего туннельного микроскопа он был создан. Это был период творческого развития, и у нас были достаточные возможности для того, чтобы мечтать, проводить исследования, ошибаться и исправлять свои ошибки. Мы не требовали дополнительного персонала или финансирования, а результаты научной работы, которой мы занимались наряду с разработкой СТМ, публиковались. Первым документом о СТМ стал внутрилабораторный отчет о нашей деятельности за март-апрель 1981 г.

Сама по себе логарифмическая зависимость силы туннельного тока I от расстояния между острием и образцом s еще не являлась доказательством

вакуумного туннелирования. Наклон зависимости $\ln I$ от s должен соответствовать высоте порога туннелирования $\phi \approx 5$ эВ, характерного для усредненных рабочих параметров острия и образца. У нас же получались значения меньше 1 эВ, что указывало на туннелирование через диэлектрик, а не через вакуум. К счастью, калибровка пьезочувствительности для быстрых малых изменений напряжения, с которыми мы работали, привела к значениям в два раза меньшим, чем приводившиеся изготовителями пьезоэлементов. В этом случае высота порога туннелирования получалась больше 4 эВ, т. е. доказывалось, что туннелирование происходит через вакуум. Меньшие значения пьезочувствительности позже были подтверждены тщательной калибровкой, проведенной совместно с Х.-Р. Оттом из ЕТН (Цюрих) и С. Виейрой из Автономного университета в Мадриде ¹⁰.

Несколькими месяцами ранее У. Поппе сообщил о вакуумном туннелировании ¹¹, но его интересовала туннельная спектроскопия экзотических сверхпроводников. В этой области он получил интересные результаты, но не измерил зависимости $I(s)$. Спустя 18 месяцев нас информировали о том, что Э. Ц. Теаг в своей диссертации приводил подобные кривые $I(s)$, которые в то время еще не были опубликованы в открытой печати ¹².

Наше волнение после той мартовской ночи было довольно сильным. «Герд хотел немедленно послать материалы на конференцию по низким температурам ЛТ-16, которая должна была состояться в сентябре в Лос-Анджелесе, хотя сроки посылки работ уже прошли. Он так или иначе собирался участвовать в этой конференции с докладом по сверхпроводящему титанату стронция, и я был уверен, что к тому времени мы бы получили топографические СТМ-изображения. Действительно, они у нас появились. Я организовал для Герда поездку по США, в которой он должен был выступать с сообщениями о СТМ. Но за три недели до отъезда его предупредили, что как только новость будет опубликована, сотни ученых немедленно займутся работами по СТМ. Так и случилось — спустя пару лет. Тем не менее, после двух продолжительных дискуссий мы все же решили, что пора СТМ увидеть свет ¹³. Наша первая попытка опубликовать результаты окончилась неудачей. «Это хорошая примета», успокоил нас Нико Гарсия, профессор из Автономного университета в Мадриде.

После того, как была создана законченная СТМ-установка, нам понадобилось только три месяца для того, чтобы получить первые изображения моноатомных ступеней ¹⁴ на монокристалле CaIrSn_4 , выращенном Р. Гамбино. Основная проблема состояла в том, как избавиться от вискеро́в, которые мы непрерывно создавали, прикасаясь острием к образцу. Мы были готовы заняться исследованием поверхности, в первую очередь с целью изучения перестройки поверхностных атомных слоев. Мы создали СТМ для работы в сверхвысоком вакууме (уже без липкой ленты!) и для проверки запустили его на резиновой подвеске в вакуумной камере. Результаты испытания показали, что можно обойтись без сверхпроводящей магнитной подвески.

Таковым было состояние дел к моменту начала поездки по США в сентябре 1981 г. Мы встретили в основном благожелательную реакцию, в некоторых случаях проявлялся энтузиазм, двое слушателей даже предсказывали Нобелевскую премию, но стало ясно, что рано ожидать активного подключения к работе новых ученых, так как СТМ еще слишком экзотичное устройство.

В дальнейшем для защиты СТМ от вибраций мы применяли двойную пружинную подвеску с электрическим демпфированием колебаний ⁸, и поместили все устройство в высоковакуумную камеру. Мы предусмотрели напыление и отжиг образца, но независимый контроль за его поверхностью с помощью какого-либо другого прибора в этом СТМ не был предусмотрен. Хотя сверхпроводящая подвеска использовалась всего три месяца, о ней писали еще несколько лет. Видимо, сложные устройства запоминаются лучше.

В науке о поверхности существовала весьма интригующая проблема, а именно — проблема перестройки 7×7 поверхности кремния вдоль плоскости (111). Ряд моделей, пользовавшихся популярностью, предсказывали некоторые весьма грубые черты поверхности, которые можно было бы увидеть с разрешающей способностью СТМ. Поэтому мы начали погоню за структурой 7×7 , поддавшись ее очарованию. Сперва успех не приходил. СТМ действовал довольно хорошо, иногда разрешение явно приближалось к 5 Å, но плохо обстояли дела с подготовкой поверхности. Иногда на изображениях получались довольно хорошие узоры с выраженными моноатомными линиями⁸, но обычно на атомном уровне поверхность выглядела грубой и разупорядоченной. На одном из изображений был даже намек на структуру 7×7 в виде упорядоченного узора из впадин, предшественников характерных угловых углублений. Хотя на основе единичного случая весьма рискованно предсказывать новую структуру, к тому же основываясь на новом методе, но этот результат воодушевил нас.

К весне 1982 г. о СТМ уже довольно много говорили. Предполагалось, что получение изображения хорошо подготовленной вицинальной поверхности с упорядоченным расположением моноатомных ступеней смягчило бы несколько сдержанное отношение к новому методу ученых, занимающихся исследованием поверхности. Однако мы считали, что моно-, двух- и трехатомные ступени на CaIrSn_4 с плоскими атомарными слоями на поверхности¹⁴ и линии моноатомных ступеней на Si (111) были достаточно убедительными. Вместо того, чтобы тратить время на неинтересные линии моноатомных ступеней, мы предпочли заняться исследованием перестройки поверхностей, для которых период структур был известен и для которых можно было надеяться получить новые результаты.

Так как образцы из золота было легче подготовить, а кроме того, требования к разрешающей способности в случае Au составляли лишь 8 Å, мы перешли к изучению монокристалла золота, а именно поверхности Au (110). Было известно, что на этой поверхности должна возникать структура 1×2 . Судя по тому, чему мы научились при исследовании моноатомных ступеней на поверхности кремния, эта задача должна была быть вполне по силам при разрешающей способности СТМ. Несколько ранее мы вернули Карлу-Хайнцу Ридеру, специалисту по исследованию поверхности из нашей лаборатории, представленный им монокристалл кремния в виде некой каплеобразной массы. Тем не менее он одолжил нам свой монокристалл золота, и спустя несколько недель мы вернули еще один каплевидный предмет в его коллекцию. Но за эти недели, благодаря его советам по подготовке поверхности образцов нам удалось разрешить структуру 1×2 на поверхности Au (110)¹⁵. Вопреки ожиданиям, задача оказалась не простой, так как золото переносилось на острие при малейшем соприкосновении с поверхностью. Подвижность Au при комнатной температуре столь высока, что грубые поверхности после некоторого времени сглаживаются, т. е. невозможно длительное время сохранять действительно тонкое острие, покрытое золотом. Хотелось бы отметить, что впоследствии для исследования поверхности Au (100) мы создали золотое острие испарением атомов Au в электрическом поле с образца на острие. Относительно сильное поле, возникающее при туннельном напряжении 0,8 В, было достаточным для стабилизации формы острия.

Достижение атомного разрешения поверхности Au (110) явилось результатом удачи и настойчивости. Разрешающая способность менялась хаотически, вероятно из-за того, что мигрирующие по острию адсорбированные атомы периодически оказывались на вершине. Мы также наблюдали заметное разупорядочение, приводящее к появлению длинных и узких полос 1×2 , перемежающихся с полосами перестройки структуры типа 1×3 и 1×4 , а также и с линиями моноатомных ступеней. Тем не менее в этих экспериментах были получены первые СТМ-изображения атомных рядов с атомарной разрешаю-

щей способностью перпендикулярно к рядам. Характерное для этой поверхности разупорядочение, подвергнутое критике с точки зрения науки о поверхности, позволило красиво продемонстрировать возможности СТМ в качестве локального метода и, примерно год спустя, сыграло важную роль

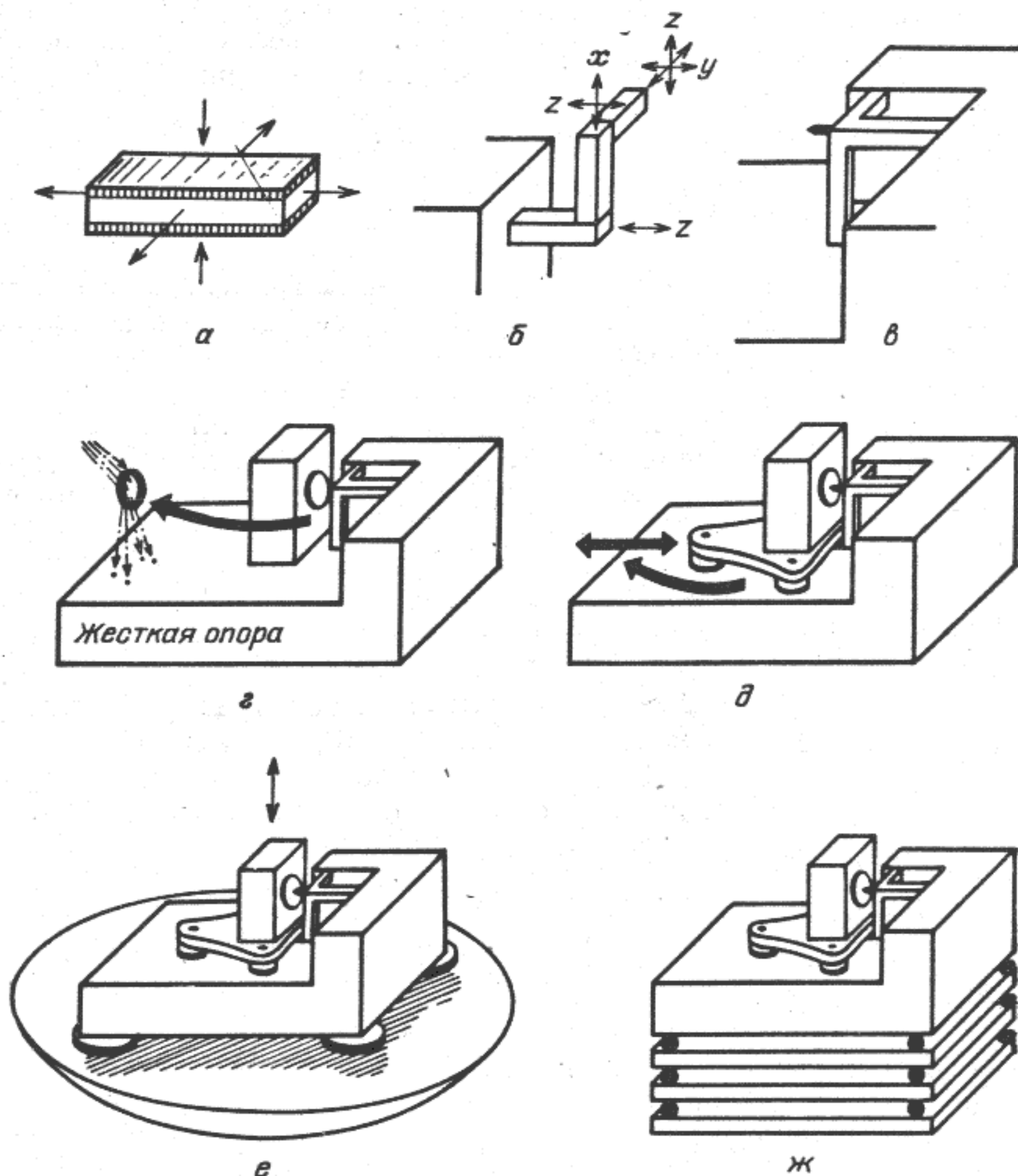


Рис. 3. Установка.

а — Напряжение, приложенное к двум сторонам пьезоэлектрического материала, приводит к его сжатию или расширению. Обычно изменение размеров пьезоэлектрика составляет несколько микрон. *б* — Свободный от трения, но весьма чувствительный к вибрациям пьезопровод. *в* — Пьезопровод в виде жесткой треноги в настоящее время применяется чаще всего наряду со сканирующими устройствами. *г* — Тренога и держатель образца жестко закреплены на подставке. Для подготовки и замены образца необходимо отодвинуть его от острия. *д* — Установка образца в доступной пьезопроводу области первоначально производилась пьезоэлектрическим держателем, опоры которого фиксировались электростатически; теперь также применяют магнитные держатели и дифференциальные винтовые подачи. *е* — В исходной системе защиты от вибраций туннельная установка вместе с постоянными магнитами была свободно подвешена над сверхпроводящей свинцовой чашей. *ж* — Простейшая и широко применяемая защита от вибраций при помощи стопки металлических пластин с прокладками из витона — резинового материала, пригодного для использования в высоком вакууме

в проверке первых микроскопических теорий сканирующей туннельной микроскопии.

С золотом мы также провели первые спектроскопические эксперименты с СТМ. Мы хотели проверить предсказания о выпрямляющей вольт-амперной характеристике туннельного контакта между образцом и острием, вызванной геометрической асимметрией¹⁶. К сожалению, поверхность образца утрачивала стабильность при напряжении порядка 5 В и положительном заряде на образце. Небольшая асимметрия вольт-амперной характеристики в этом случае могла объясняться другими причинами. Но при обратной

полярности можно было подавать напряжение до 20 В, наблюдая при этом ряд выраженных резонансных поверхностных состояний⁸. Мы считаем, что эксперименты с золотом весной и ранним летом 1982 г. явились весьма важным этапом в развитии метода. К этому времени СТМ уже превзошла первоначальные ожидания. Наградой нам были и первые наши единомышленники вне нашей лаборатории — Кэл Кьюат из Стэнфордского университета¹⁷ и Поль Хансма из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре¹⁸.

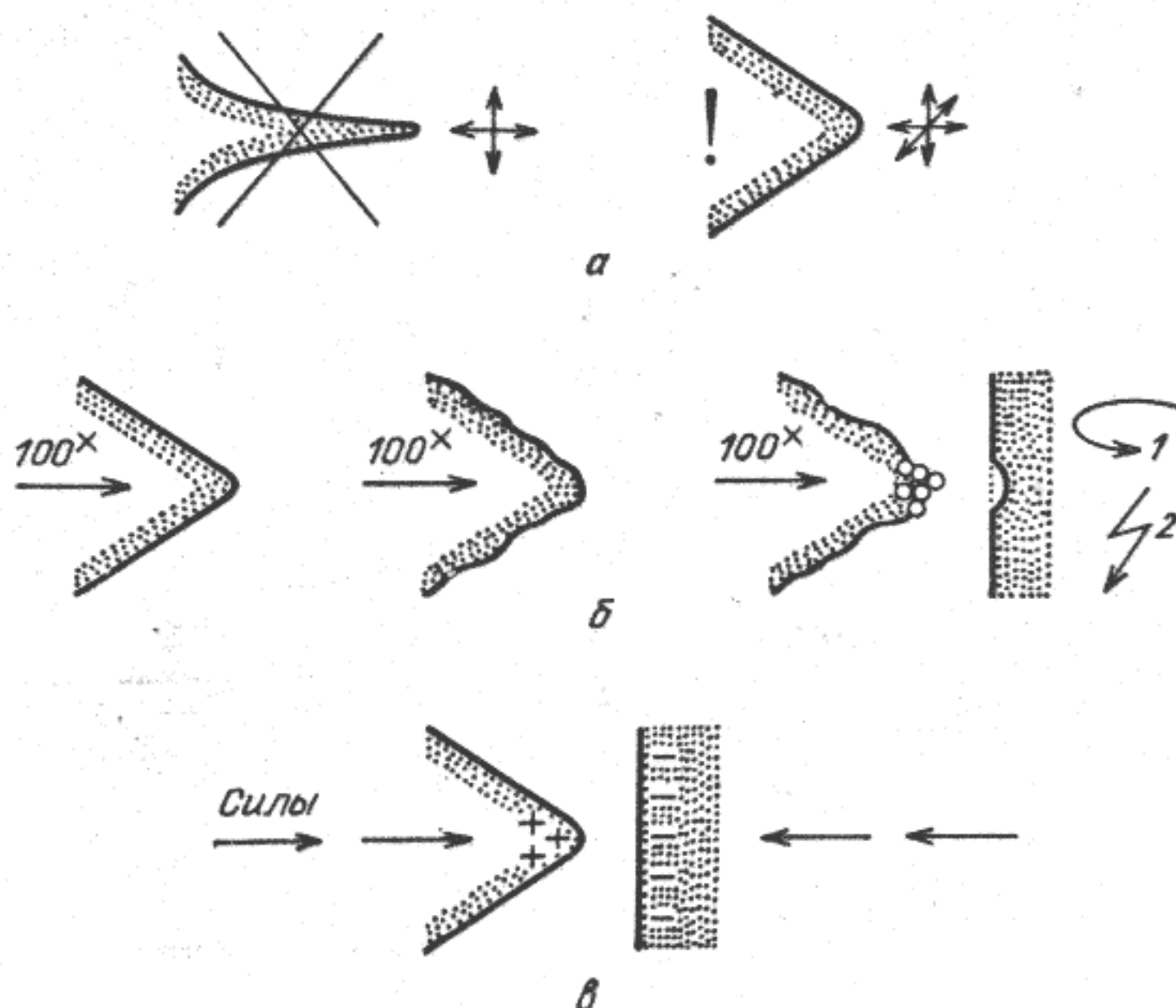


Рис. 4. Острия.

а — Длинные и тонкие острия или нитевидные кристаллы (вискеры) чувствительны к вибрациям и изменениям температуры. **б** — После механической обработки или травления на острие появляются мини-острия, через одно из которых и протекает туннельный ток; дальнейшее заострение сперва достигалось осторожным соприкосновением острия и образца (1), а затем — испарением в электрическом поле (2). **в** — Электростатические межатомные силы, действующие между острием и образцом, не деформируют закругленное острие или жестко закрепленный образец; но в случае наличия на острие вискеров туннельный промежуток становится неустойчивым; кроме того, необходимо учитывать возможную существенную реакцию мягкого образца (графит, керамика) на указанные силы.

Мы многократно докладывали работы по Au и это привлекло некоторое внимание, но мало кто подключался к исследованиям. Нам же было жалко тратить время даже на написание статьи — ждала структура 7×7 !

В это же время мы предпринимали первые попытки отображения различных атомов: исследовались маленькие островки золота на кремнии. На топографических изображениях островки выглядели как плоские гладкие холмики на грубой поверхности. Они также выделялись и большей высотой барьера туннелирования⁸. Таким образом, изображение островков Au возникало благодаря отличию их поверхностных электронных свойств. Конечно, было бы интересно продолжить эти исследования, но мы знали, что в принципе это возможно, а структура 7×7 все еще ждала!

Мы предприняли вторую попытку обнаружить структуру 7×7 осенью 1982 г. Мы приняли во внимание совет Франца Химпселя избегать напыления на поверхность образца. Это сразу позволило нам наблюдать структуру 7×7 на любом плоском участке поверхности. Мы были совершенно очарованы красотой узора.

«Я не мог отвести взгляд от изображений. Это было подобно вхождению в новый мир. Это казалось мне вершиной моей научной карьеры, и поэтому в некотором роде ее концом. Гейни понял мое настроение и повез меня на несколько дней в Сен-Антоньен — очаровательную деревню высоко в Швейцарских горах, чтобы написать статью о структуре 7×7 ».

Мы вернулись убежденные в том, что это привлечет внимание наших коллег, даже тех, кто не занимается исследованием поверхности. Мы представили необработанную рельефную модель, собранную из листов с записями самописца при помощи ножниц, оргстекла и гвоздей, а также обработанный вид сверху: первое для наглядности, второе — для анализа и обсуждения¹⁹. Это действительно привлекло внимание, и в результате мы практически забросили на некоторое время наши исследования. Мы были завалены

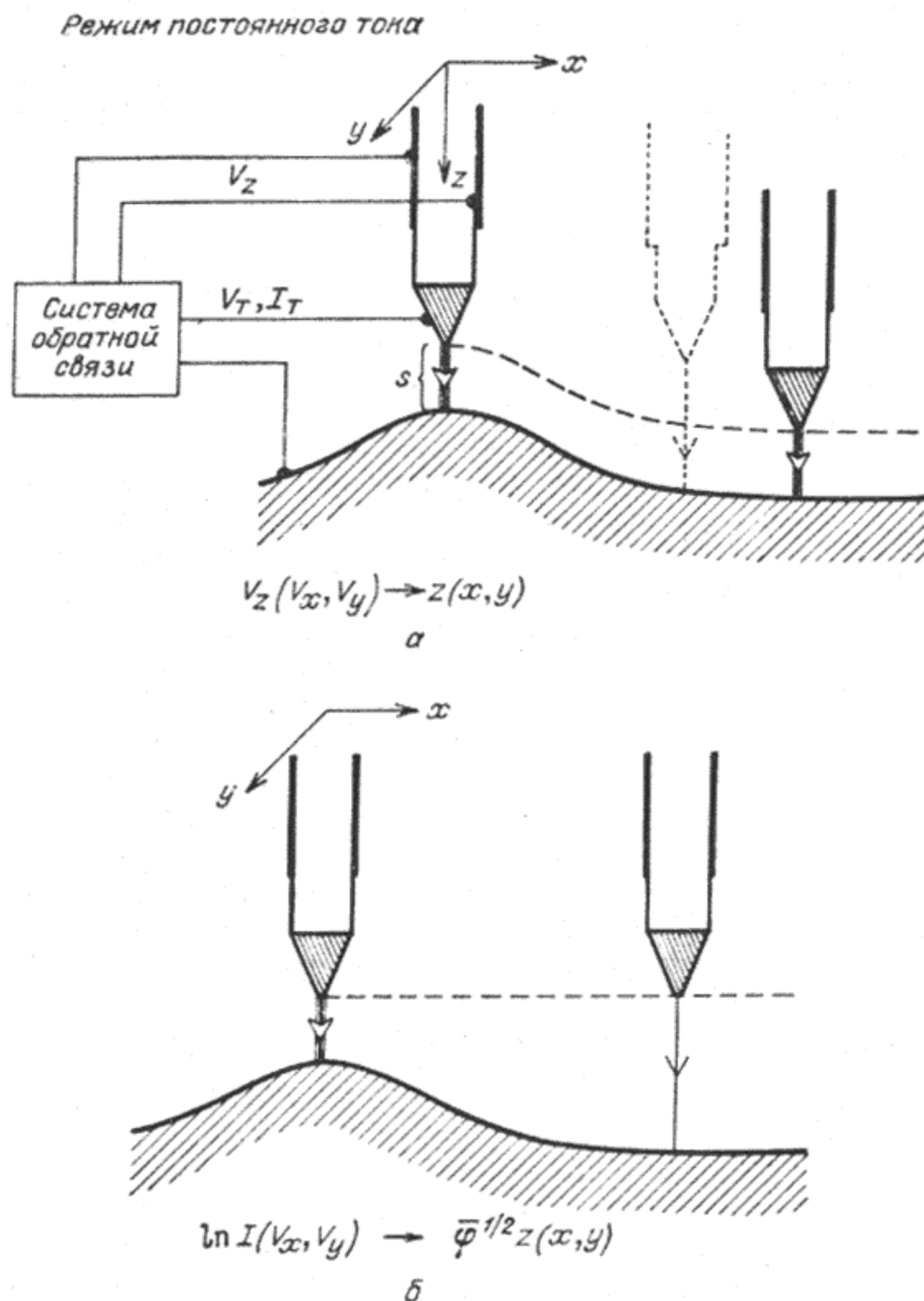


Рис. 5. Получение изображения.

а — В режиме постоянного тока острие перемещается вдоль поверхности при постоянной величине туннельного тока, поддерживаемого за счет изменения вертикального положения острия в зависимости от напряжения обратной связи V_z ; в случае электронно-однородной поверхности постоянная сила тока означает неизменное расстояние s между острием и образцом. б — На участках поверхности с перепадами уровня, меньшими нескольких ангстрем (в пределах динамического диапазона измерения тока) можно проводить быстрое сканирование острием при постоянном среднем положении острия по оси z . Такие «токовые изображения» получаются намного быстрее, чем в случае рис. а, но требуют независимого определения $\bar{\phi}^{1/2}$ для калибровки z . В обоих случаях туннельное напряжение и/или положение по оси z можно модулировать с целью определения соответственно $\partial \ln I / \partial V$ и/или $\partial \ln I / \partial s$.

просьбами выступить с докладом, а бесчисленные посетители нашей лаборатории хотели узнать, как собрать СТМ. Тем не менее число групп, серьезно занимавшихся этой проблемой, оставалось малым. Судя по всему сохранялось противоречие между кажущейся легкостью, с которой можно демонстрировать отдельные атомы в реальном трехмерном пространстве непосредственно

из кривых записей самописца с одной стороны, и интуитивного ощущения, что не может быть, чтобы все было так просто, с другой.

Наши результаты противоречили всем многочисленным моделям, которые существовали к тому моменту, и, как это ни странно, некоторым, которые возникли позже. Лишь адатомная модель В. Харрисона хорошо согласовалась с экспериментом²⁰. Только число адатомов было не совсем точным. Ныне общепризнанной является версия адатомной модели, согласно которой наряду с характерным узором 7×7 адсорбированных атомов, перестраиваются также и более глубокие атомные слои²¹. Эта модель хорошо согласуется с большинством результатов, полученных такими различными экспериментальными методами, как ионное каналирование²², просвечивающая электронная дифракция²³ и более точными результатами СТМ, полученными в других группах²⁴.

Эксперименты со структурой 7×7 ускорили и теоретические исследования СТМ на микроскопическом уровне. Терсоф и Хамман, а также Баратоф²⁵ применили к случаю малой геометрии острия и поверхности с атомарным рельефом формализм обменного гамильтониана, предложенный Бардиным. Гарсия, Окал и Флорес, а также Стол, Бартоф, Селлони и Карневали разработали подход, основанный на рассеянии²⁶. Оба подхода приводили к аналогичным результатам; мы были рады тому, что эти работы в основном подтвердили наше интуитивное восприятие туннелирования на микроуровне как простого туннелирования между плоскостями в уменьшенном масштабе, а, кроме того, они существенно улучшили восприятие СТМ в кругах физиков. Теоретическое рассмотрение непланарных аспектов туннелирования свободных электронов и результаты по СТМ для Au (110), все еще неопубликованные, послужили материалом для сравнения теории с экспериментом. Наши результаты оставались неопубликованными довольно долго, так как красивые изображения структуры 7×7 на кремнии затмили более ранние эксперименты с Au (110). Одной из реакций на первую попытку их опубликовать было следующее: «... В данной работе нет серьезного обсуждения и не выдвигаются новые концепции... Я интересуюсь строением поверхности золота и других металлов, рассматриваемых в этой работе. Но в представленных результатах я не вижу повода для волнения...». Конечно, мы плохо подготовили публикацию, но мы были не готовы к такому рецензированию, при котором выискиваются слабые места, а суть дела игнорируется.

Эксперименты с золотом и кремнием показали, что исследования методом СТМ существенно выиграют, если одновременно применять и другие методы изучения поверхности, в частности, дифракцию низкоэнергетических электронов (LEED). Мы уже поняли, что даже тщательно приготовленные поверхности часто оказываются не столь однородными и плоскими, как обычно предполагают. Совместное применение LEED и СТМ оказалось очень удобным. Это позволяло избежать напрасных поисков в случаях, когда искать нечего. Кроме того, мы получили возможность поработать с LEED и с Оже-электронной спектроскопией. Комбинирование СТМ с другими, более традиционными методами исследования поверхности также позволило ответить на часто поднимавшийся вопрос: что общего было между нашими СТМ-изображениями и реальной поверхностью, такой, какой ее представляют другие методы? Этот вопрос не очень волновал нас, так как мы уже выяснили, что перестройка поверхности остается неизменной непосредственно вплоть до дефектных областей, а кроме того, мы могли выделить большинство дефектов. Таким образом, для нас исследование одновременно несколькими методами имело скорее практическое, чем научное значение.

После краткого, но интересного изучения поверхности Au (100) при помощи новой комбинации СТМ, LEED и оже-электронной спектроскопии²⁷, мы приступили к химическим исследованиям. Вместе с А. Баро, профессором Автономного университета в Мадриде (Испания), мы наблюдали вызванную кислородом перестройку 2×1 -поверхности Ni (110)²⁸. Четко выраженные

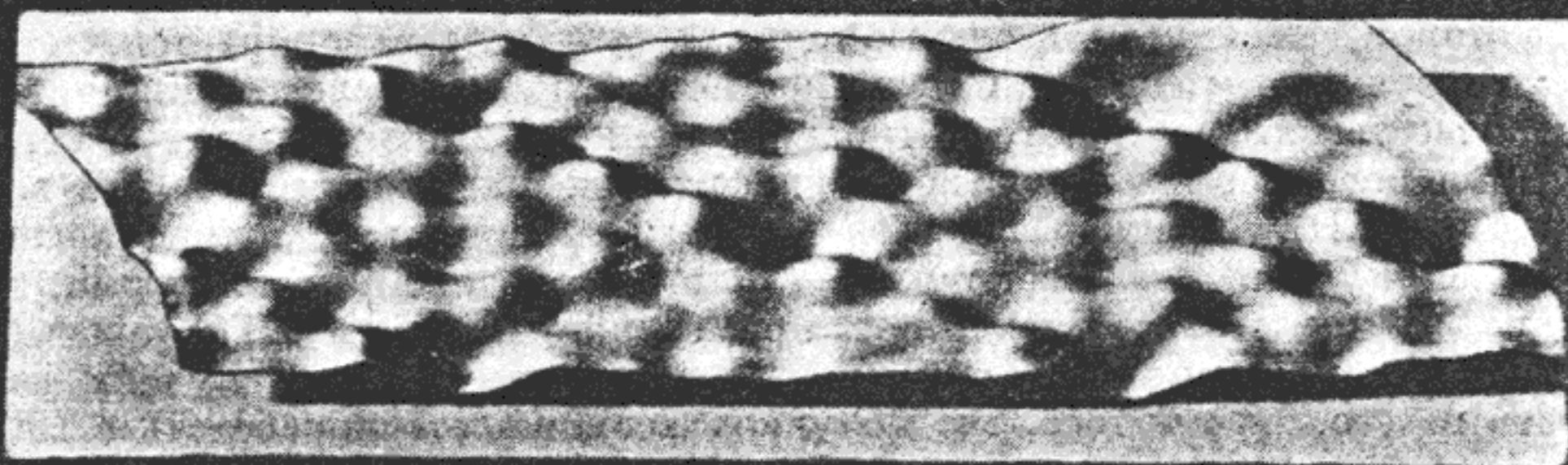
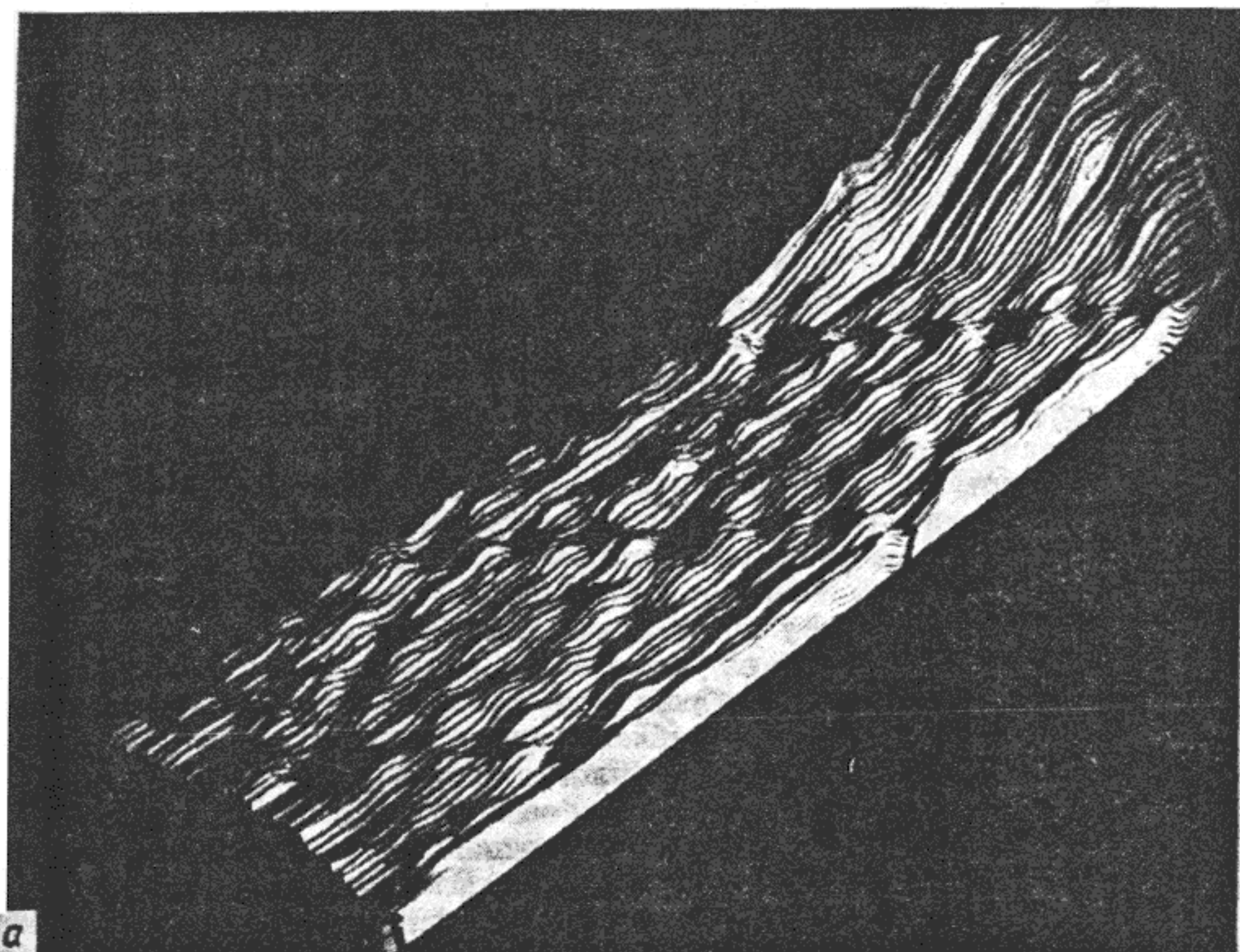


Рис. 6. Перестройка 7×7 -поверхности Si (111).

а — Рельеф, собранный из кривых, полученных непосредственно в эксперименте на самописце (из работы ¹⁹, © 1983 Американское физическое общество). *б* — Обработанное изображение перестройки 7×7 -поверхности Si (111). Угловые впадины и двенадцать максимумов (адатомов) характерны для ромбоэдрической элементарной ячейки на поверхности кристалла. На обработанном изображении 6 адатомов в правых половинах ромбов выглядят выше других. Это проявление электронной неэквивалентности поверхности, вызванное структурной неэквивалентностью левых и правых частей элементарной ячейки в более глубоких атомных слоях. Перестройка поверхности сохраняет упорядоченность непосредственно вплоть до крупного «атомного холма» справа

упорядоченные выступы мы интерпретировали как отдельные атомы кислорода. Мы и раньше наблюдали детали с размерами порядка атомных, которые можно было считать адсорбированными атомами или кластерами, но в тех случаях они скорее были помехой, а не предметом исследований. Эксперименты с кислородом на никеле продемонстрировали, что острие не приводит к необратимым изменениям кислородного слоя на поверхности. Это был очень существенный результат с точки зрения наблюдения, исследования и воздействия на химию поверхности при помощи СТМ-острия. Примерно год спустя, при исследовании вызванной кислородом перестройки 2×2 -поверхности Ni (100), мы обнаружили характерные импульсы тока, которые можно было объяснить диффузией кислорода вдоль поверхности под острием²⁹. Такие же импульсы присутствовали в наших экспериментах с кислородом на поверхности Ni (110), но тогда мы не обратили на них внимания. Теперь мы могли не только наблюдать отдельные диффундирующие атомы, но и сопоставить их движение с характерными чертами поверхности, такими, как ступени или адсорбированные атомы кислорода, изображение которых мы получали одновременно. К концу 1983 г. совместно с Х. Гроссом из ЕТН в Цюрихе мы также начали изучать возможности СТМ применительно к биологии. Мы смогли проследить за цепочкой ДНК на поверхности углеродной пленки, напыленной на покрытую серебром кремниевую пластину³⁰.

Год закончился очень 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. Нам сообщали о присуждении нам научной премии короля Фейсала и Еврофизической премии фирмы «Хьюлетт Паккард». «В день получения телеграммы Герд выступал в Берлине с докладом по случаю вручения ему премии Отто Кланга, кроме того, это была двадцатая годовщина моей работы с ИБМ». Все это вселяло надежду на то, что сканирующая туннельная спектроскопия добьется общего признания. Одновременно возник новый поток запросов на информацию по СТМ.

К концу лета 1984 г. мы, наконец, были готовы приступить к решению задачи, поставленной осенью 1978 г., еще до возникновения идеи о микроскопии: мы могли проводить спектроскопические исследования малых участков поверхности. Вместе с Х. Фухсом и Ф. Салваном мы исследовали перестройку 7×7 ^{1, 31}, перестройку $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -атомов Au на поверхности Si (111)³¹, и, возвращаясь к исходной задаче, мы изучили тонкую оксидную пленку на никеле^{1, 32}. Мы видели, что поверхности имеют электронную структуру (это известно и из экспериментов по фотоэмиссии). Мы могли добиться атомного разрешения при пространственном исследовании таких электронных структур. Тогда мы предложили называть это цветом атомов, и до сих пор используем этот термин. Действительно, оксидные слои были неоднородными, и наиболее четко просматривались на изображениях, получаемых методом сканирующей туннельной спектроскопии (СТС). На структуре 7×7 мы при помощи СТС могли исследовать второй атомный слой и наблюдали отдельные оборванные связи между адсорбированными атомами¹. К этому времени в группе К. Кьюата уже применяли СТМ и проводили спектроскопические исследования малых участков поверхности. Они еще не добились атомного разрешения, но работали при низких температурах³³. Они измерили энергетическую щель в сверхпроводнике и позже даже определили ее пространственное распределение. Получение спектроскопических изображений не явилось неожиданностью, но это был важный этап. Теперь у нас появилась возможность полного описания топографии и электронной структуры поверхности. Хотя получение информации о конкретных свойствах поверхности непосредственно из результатов СТМ и СТС измерений обычно непросто, наша идея о сканирующей туннельной микроскопии воплотилась в жизнь. Но мы знали, что наша точка зрения разделяется не всеми. До нас доходили слухи о том, что некоторые ученые готовы поспорить на

ящик шампанского, что наши данные — это всего лишь результат компьютерного моделирования! Подобное мнение, вероятно, основывалось на том, что, хотя прошло уже три года с момента создания СТМ, никто не смог повторить наших результатов с атомным разрешением. Это беспокоило и нас, но по другой причине. В конце лета 1983 г. Херб Бадд, организатор Европейского института фирмы ИБМ и приверженец идеи СТМ, попросил нас провести в рамках института летом 1984 года семинар по СТМ. Это означало

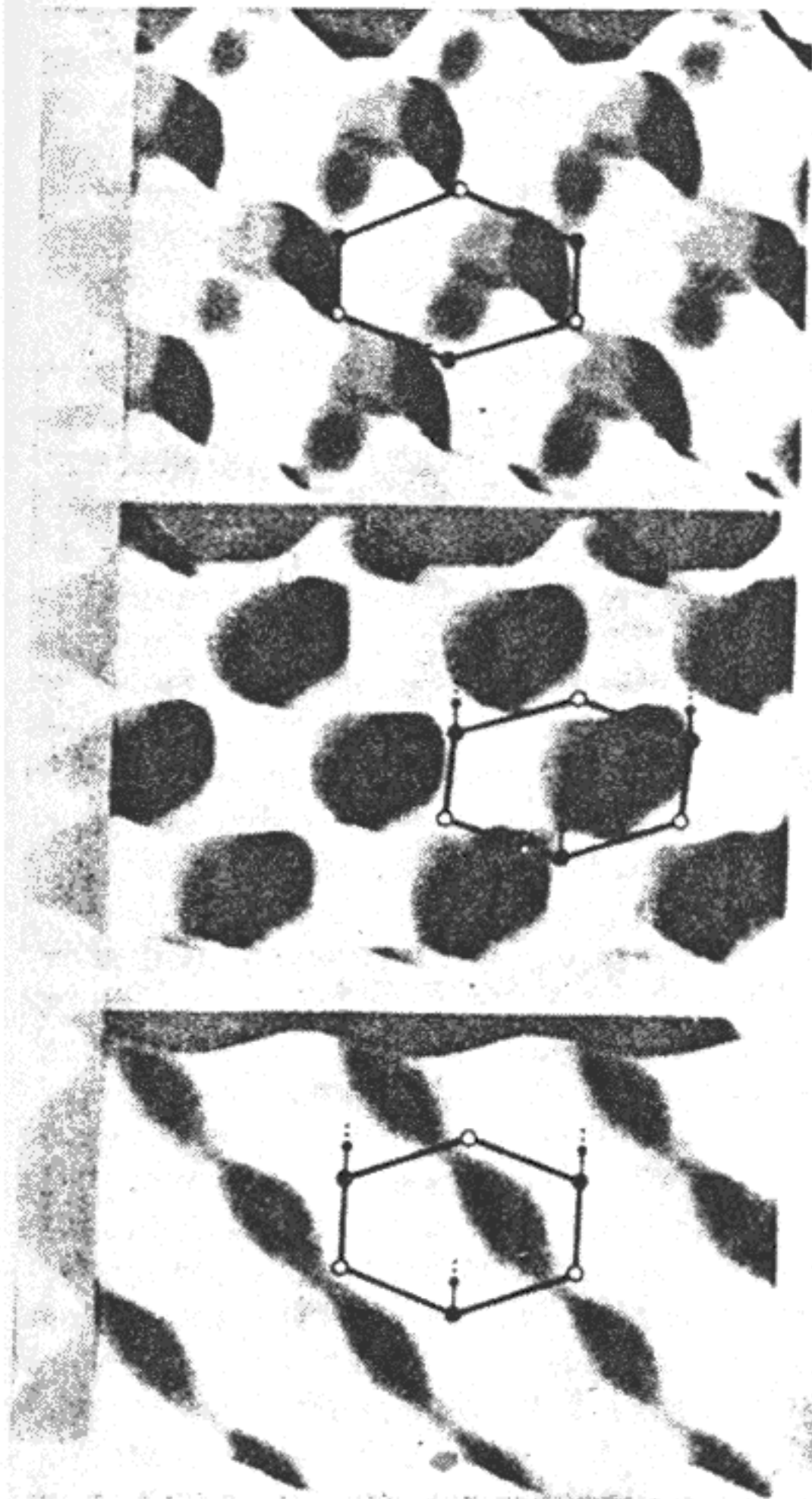


Рис. 7. СТМ-изображение скола на графите.

Верхнее изображение было получено при постоянном туннельном токе в 1 нА и напряжении 50 мВ. Складчатость поверхности отражает локальную плотность состояний (ЛПС) на уровне Ферми, а не положения атомов, расположенных в решетке, подобной пчелиным сотам (один шестиугольник показан на рисунке). ЛПС на атомах, имеющих связи с соседями во втором слое (незакрашенные кружки), ниже, чем на «свободных» атомах. Таким образом, верхний рисунок это скорее спектроскопическое, а не топографическое изображение. На среднем рисунке приведено «токовое изображение» той же поверхности. На нижнем токовом изображении, полученном при меньшем расстоянии между острием и поверхностью, два типа неэквивалентных атомов практически не различаются. Это объясняется различиями во взаимодействии с острием атомов углерода двух типов, компенсирующими их различные ЛПС. Также существенную роль может играть локальное возмущение электронной структуры

23 доклада в течение одной недели перед ведущими европейскими учеными. В то время было невозможно заполнить 23 часа докладами о СТМ, тем более привлечь 23 докладчика по этой теме. Год спустя, преисполненные оптимизма, мы договорились перенести семинар на лето 1985 года. В декабре 1984 г. по инициативе Кэла Кьюата девять представителей ведущих групп, занимающихся СТМ, собрались на мини-совещание в гостиничном номере в Канкуне. Обмен мнениями был очень интересным, но все еще никто, кроме нас, не добился атомного разрешения, и поэтому докладов для семинара явно не хватало.

В последующие несколько месяцев ситуация резко изменилась. Р. Финстра с соавторами первыми сообщили о исследовании сколов GaAs³⁴, группа К. Кьюата исследовала структуру 1×1 на поверхности Pt (100)³⁵, а Дж. Бэм, В. Хосслер и Э. Риттер на той же поверхности изучили гексагональную фазу³⁶. На собрании Американского физического общества в марте

1985 г. П. Хансма продемонстрировал СТМ изображения графитовых структур атомного масштаба ³⁷, а когда Д. Головченко докладывал красивейшие результаты по различным перестройкам пленок германия на поверхности Si (111) ³⁸, зал затаил дыхание. Атомное разрешение приобрело официальный статус, а сканирующая туннельная микроскопия — признание. Семинар Европейского института ИБМ в июле превратился в совещание по СТМ, включавшее около 35 докладов. Не во всех работах было получено атомное разрешение, но их было больше, чем в марте ³⁹. Как сказал Кэл Кьюат, «это был поток идей».

Пока что мы рассказывали в основном о борьбе за получение структурных и электронных изображений поверхности с атомным разрешением. Отдельные атомы наблюдались и раньше при помощи полевой ионной микроскопии и на них воздействовали методом атомного зонда ⁴⁰. Достоинства этих методов ограничены возможностью исследовать атомы только в конкретных позициях на вершине острия, изготовленного из одного из немногих подходящих материалов. Электронная микроскопия, основной источник информации о субмикронных структурах практически во всех областях науки и техники, также достигла атомного разрешения. Но получение изображений изолированных атомов или атомных структур в электронной микроскопии возможно лишь в определенных ситуациях при высоком мастерстве и уникальном оборудовании. Привлекательность и значение СТМ связаны не только с возможностью наблюдать поверхность от атома к атому, но и с широкими возможностями применения, с теоретической и экспериментальной простотой метода и с доступностью экспериментальной установки. Все это привело к спокойному и даже небрежному отношению к атомам и атомным структурам.

Но есть и другие, возможно, менее впечатляющие, но, тем не менее, важные аспекты, сделавшие СТМ жизнеспособным и общепризнанным методом, нашедшим применение во многих областях науки и техники.

Сами установки стали проще и миниатюрнее. Резко уменьшившиеся габариты позволили легко встраивать их в другие системы, например, в сканирующий электронный микроскоп ⁴¹. Один из типов установки, обеспечивая возможность точной фиксации положения образца, обладает достаточной устойчивостью для замены образца и острия *in situ*. Другие установки настолько устойчивы, что даже не чувствительны к вибрациям, возникающим при их погружении в жидкий азот ⁴² и достаточно миниатюрны, чтобы поместиться в горловине гелиевого транспортного дьюара ⁴³. Эти колибри семьи СТМ, теоретические предпосылки которых связаны со сжимаемыми туннельными контактами ¹⁸ на относительно плоских поверхностях, могут функционировать со скоростью телевизионной развертки ^{43, 44}. Подготовка острия также развилась до уровня, когда в условиях сверхвысокого вакуума можно создать хорошо сформированное пирамидальное острие, заканчивающееся одним ⁴⁵ или несколькими ⁴⁶ атомами. Такие острия необходимы для исследования неперiodических и разупорядоченных систем и шершавых поверхностей. Они также представляют интерес в качестве точечных источников низкоэнергетических электронов и ионов.

И в других областях науки, не связанных с физикой или исследованием поверхностей, возможность получения изображений в различных средах не менее привлекательна, чем атомное разрешение. В 1984 г. впервые было сообщено об изображениях, полученных в воздухе при атмосферном давлении ⁴⁷. Затем последовали изображения, полученные в криогенных жидкостях ⁴², в дистиллированной воде ⁴⁸, в солевых растворах ⁴⁸ и в электролитах ⁴⁹. Сканирующая туннельная потенциометрия развилась в интересный метод определения распределения потенциала на проводящих микроструктурах с атомным разрешением ⁵⁰. Последние достижения включают отображение межатомных сил при помощи атомно-силового микроскопа ⁵¹, позволяющего определять структурные и упругие свойства проводников и ди-

электриков, а также отображение электронных и упругих свойств мягких материалов⁵². Также изучается применение туннелирования поляризованных электронов для исследования поверхностных магнитных структур.

Наконец мы возвращаемся к идее, от которой произошел СТМ: проведение экспериментов в очень малой, заранее выбранной области в атомных

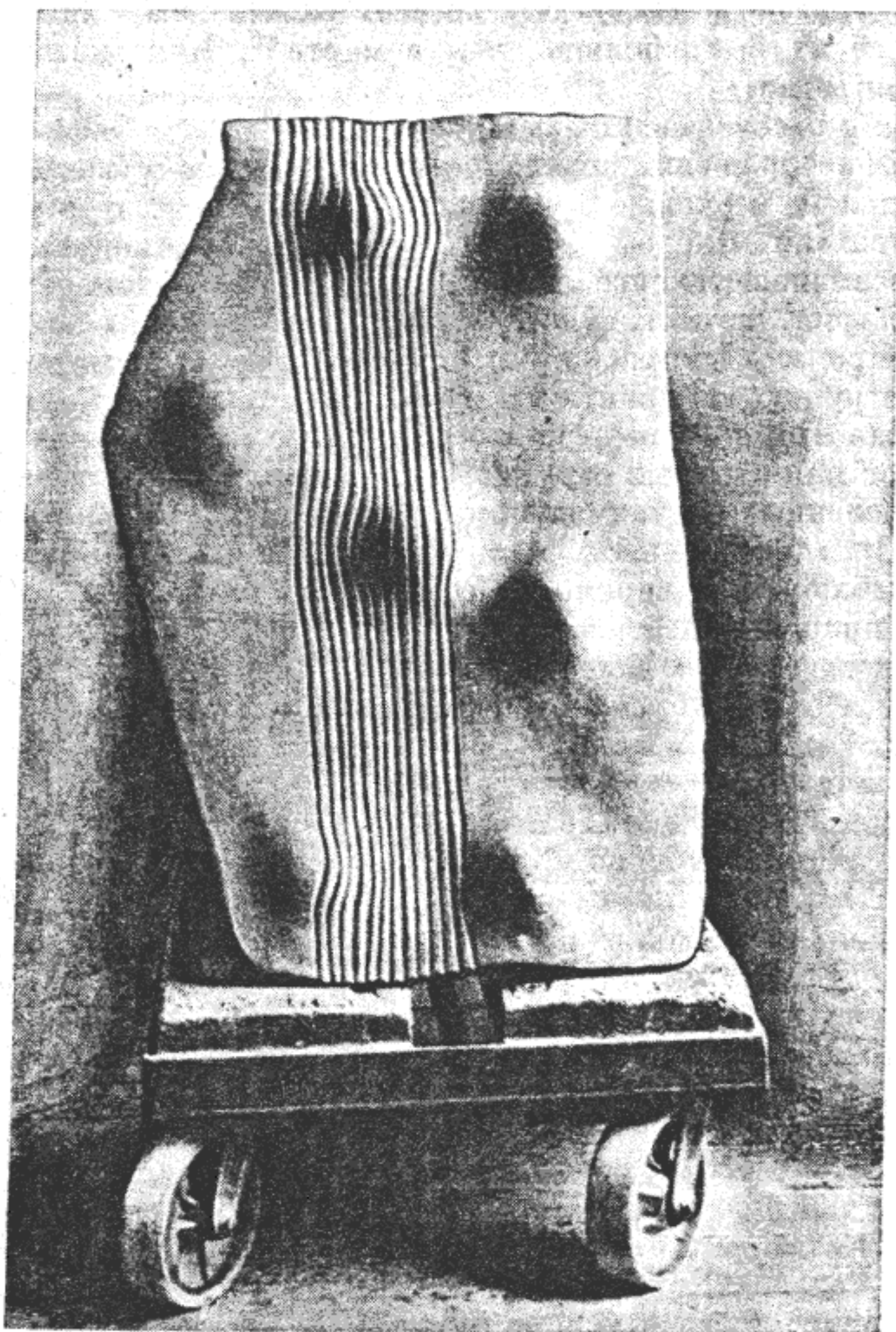


Рис. 8. Сферы в представлении художника.

Искусство и наука — это проявление творческого начала в человеке, и красота природы отражается в них. Скульптор Руди Ремпфлер нашел свою интерпретацию этой красоты в деформации поверхности. Он был очарован напряжением сферы, помещенной во внешнюю среду, больше, чем просто отображением ее формы. Хотя эта скульптура создана независимо от наших исследований, визуальное сходство с рис. 6 поразительно. (Скульптура Р. Ремпфлера; фотография публикуется с разрешения Т. Д. Фрея)

масштабах. Наряду с получением изображений открываются и другие экспериментальные возможности, как для неразрушающего контроля, так и для локального воздействия на поверхность. Можно использовать, в частности, сильные локальные электрические поля, токи с очень большой плотностью, локальные деформации, возможность измерения слабых сил, вплоть до величин сил межатомных взаимодействий. В перспективе возможно манипулирование отдельными атомами⁵³ и модификация молекул, короче говоря, применение СТМ в качестве машины Фейнмана⁵⁴. Эта область еще не достигла юности.

СТМ вышла из «Возраста подмастерья», опирается на надежную базу и теперь начинаются «годы странствий». Не хотелось бы строить догадки, куда в конце концов приведет путь, но мы искренне верим, что красота атомных структур послужит стимулом к применению данного метода к решению тех задач, где он сможет принести наибольшую пользу человечеству. Это мечта Альфреда Нобеля, наша мечта, мечта каждого человека.

Благодарности

Мы хотели бы поблагодарить всех, кто в той или иной форме оказывал нам поддержку и кто внес вклад в развитие сканирующей туннельной микроскопии. Мы очень ценим добрую и дружественную атмосферу, царящую в сообществе специалистов по СТМ. Мы благодарны Д. Брюлман за помощь в подготовке наших статей, которую она оказывала с самого начала, и за тщательное прочтение этой рукописи, а также Э. Толлу за обработку рис. 6 и 7 в соответствии с идеями Р. Восса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binnig G., Rohrer H.//IBM J. Res. and Develop. 1986. V. 30. P. 355.
Golovchenko J. A.//Science. 1986. V. 232. P. 48.
Hansma P. K., Tersoff J.//J. Appl. Phys. Rev. (to be published); Proceedings of the STM Workshop. Oberlech, Austria, July 1—5, 1985; IBM J. Res. and Develop. 1986. V. 30. No. 4/5; Proceedings of STM '86. Santiago de Compostela, Spain, July 14—18, 1986; Surface Sci. (in press). Статья, где приведены технические и биографические сведения: Dordick//IBM Res. Mag. 1986. V. 24. P. 2.
2. Binnig G. K., Hoenig H. E.//Zs. Phys. Kl. B. 1978. Bd 32. S. 23.
3. Rohrer H.//Helv. Phys. Acta. 1960. V. 33. P. 675.
4. Giaever I.//Rev. Mod. Phys. 1974. V. 46. P. 245.
5. Thompson W. A., Hanrahan S. F.//Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. P. 1303.
6. Williamson B. P.//Proc. Inst. Mech. Eng. 1967. V. 182. P. 21.
Guenther K. H., Wierer P. G., Bennett J. M.//Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 3820.
7. Young R., Ward J., Scire F.//Rev. Sci. Instrum. 1972. V. 43. P. 999.
8. Технические подробности: Binnig G., Rohrer H.//Helv. Phys. Acta. 1986. V. 55. P. 726; Sci. Amer. 1985. V. 253. P. 50; Surface Sci. 1983. V. 126. P. 236.
9. Marti O. Ph. D. Thesis No. 3095.—Zurich, Switzerland: ETH, 1986.
Marti O., Binnig G., Rohrer H., Salemink H.//Surface Sci. 1987 (in press).
10. Ott H. R., Rohrer H., Vieira S.//IBM J. Res. and. Develop. 1986. V. 30. P. 553.
11. Poppe U.//Verhandl. DPG (VI). 1981. Bd 16. S. 476.
12. Teague E. C. Dissertation.—North Texas State Univ, 1978; Univ. Microfilms International. Ann. Arbor, Mich.—P. 141; Bull. Am. Phys. Soc. 1978. V. 23. P. 290; J. Res. Nat. Bur. Stand. 1986. V. 91. P. 171.
13. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.//Physica. Ser. B. 1982. V. 109.—110. P. 2075.
14. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.//Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 57.
15. Binnig G., Rohrer H.//Surface Sci. 1983. V. 131. P. L379.
16. Miskowsky N. M., Cutler P. H., Feuchtwang T. E., Shepherd S. J., Lucas A. A., Sullivan T. E.//Appl. Phys. Lett. 1980. V. 37. P. 189.
17. Quate C. F.//Phys. Today. August 1986. P. 26.
18. Moreland J., Alexander S., Cox M., Sonnenfeld R., Hansma P. K.//Appl. Phys. Lett. 1985. V. 43. P. 387.—Сам П. Хансма не смог присутствовать на первом семинаре по СТМ в США. Но в нем приняли участие его студенты, и с ними он создал сжимаемый туннельный контакт.
19. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 120.
20. Harrison W. A.//Surface Sci. 1976. V. 55. P. 1.
21. Takayanagi K., Tanishire Y., Takahashi M., Takahashi S.//J. Vac. Sci. and Tech. Ser. A. 1985. V. 3. P. 1502.
22. Tromp R. M., van Loenen E. J.//Surface Sci. 1985. V. 155. P. 441.
23. Tromp R. M.//Ibidem. P. 432, и ссылки там.

24. Becker R. S., Golovchenko J. A., McRae E. G., Swartzentruber B.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 2028.
25. Tersoff J., Hamann D. R.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P.1998.
Baratoff A.//Physica. Ser. B. 1984. V. 127. P. 143.
26. Garcia N., Ocal C., Flores F.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 2002.
Stoll E., Baratoff A., Selloni A., Carnevali P.//J. Phys. Ser. C. 1984. V. 17. P. 3073.
27. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Stoll E.//Surface Sci. 1984. V. 144. P. 321.
28. Baro A. M., Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Stoll E., Baratoff A., Salvan F.//Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 1304.
29. Binnig G., Fuchs H., Stoll E.//Surface Sci. 1986. V. 169. P. L295.
30. Binnig G., Rohrer H.//Trends in Physics. V. 38/Eds J. Janta, J. Pantoflicek.—European Physical Society, 1985.
31. Baratoff A., Binnig G., Fuchs H., Salvan F., Stoll E.//Surface Sci. 1986. V. 168. P. 734.
32. Binnig G., Frank K. H., Fuchs H., Garcia N., Reihl B., Rohrer H., Salvan F., Williams A. R.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 991.
Garcia R., Saenz J., J., Garcia N.//Phys. Rev. Ser. B. 1986. V. 33. P. 4439.
33. DeLozanne A. L., Elrod S. A., Quate C. F.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 2433.
34. Feenstra R. M., Fein A. P.//Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 32. P. 1394.
35. Elro S. A., Bryant A., de Lozanne A. L., Park S., Smith D., Quate C. F.//IBM J. Res. and Develop. 1986. V. 30. P. 3,7.
36. Behm R. J., Hoesler W., Ritter E., Binnig G.//Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 228.
37. Hansma P. K.//Bull. Am. Phys. Soc. 1985. V. 30. P. 251.
38. Becker R. S., Golovchenko J. A., Swartzentruber B.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 2678.
39. Proceedings published in: IBM J. Res. Develop. 1986. V. 30. No. 4/5.
40. Обзор: Ernst N., Ehrlich G.//Topics in Current Physics. V. 40/Ed. U. Gonser.—Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer-Verlag, 1986.
41. Gerber Ch., Binnig G., Fuchs H., Marti O., Rohrer H.//Rev. Sci. Instrum. 1985. V. 57. P. 221.
42. Coleman R. V., Drake B., Hansma P. K., Slough G.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 394.
43. Smith D.P.E., Binnig G.//Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. P. 2630.
44. Bryant A., Smith D.P.E., Quate C. F.//Appl. Phys. Lett. 1981. V. 48. P. 832.
45. Fink H. -W.//IBM J. Res. and Develop. 1986. V. 30. P. 460.
46. Kuk Y., Silverman P. J.//Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 1597.
47. Baro A. M., Miranda R., Alaman J., Garcia N., Binnig P. G., Rohrer H., Gerber Ch., Carascosa J. L.//Nature. 1985. V. 315. P. 253.
48. Sonnenfeld R., Hansma P. K.//Science. 1986. V. 232. P. 211.
49. Sonnenfeld R., Schardt B. C.//Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 1172.
50. Muralt P., Pohl D. W.//Ibidem. V. 48. P. 514.
51. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch.//Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930.
52. Soler J. M., Baro A. M., Garcia N., Rohrer H.//Ibidem. V. 57. P. 444.
Durig U., Gimzewski J., Pohl D. W.//Ibidem. P. 2403.
53. Becker R. S., Golovchenko J. A., Swartzentruber B. S.//Nature. 1987. V. 325. P. 419.
54. Feynman R. P.//Engr. and Sci. February 1960. V. 22.
Hameroff S., Schneiker C., Scott A., Jablonka P., Hensen T., Sarid D., Bell S. 1987.
55. Lang N. D.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 45.