

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

539.292

**ВАКУУМНАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ И СПЕКТРОСКОПИЯ*****В. М. Свистунов, М. А. Белоголовский, А. И. Дьяченко***

«Он таинства природы раскрывает  
Пред изумленной душой!»

*И.-В. Гете*

Одним из наиболее значительных достижений в физике 80-х годов явилось создание нового мощного метода топографии и анализа поверхности твердого тела — сканирующей туннельной микроскопии. За прошедшие с момента появления первой публикации<sup>1</sup> пять лет поток работ, посвященных описанию новых вариантов туннельных микроскопов и их использованию в науке, стремительно нарастает. Значение этих исследований, открывших новую страницу в микроскопии, выходит за рамки физики твердых тел и затрагивает многие области наших знаний. Наилучшим подтверждением этому служит присуждение Нобелевской премии по физике за 1986 г. создателям сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) Г. Биннигу и Г. Рореру (совместно с Э. Руской, удостоенным этой награды за разработку электронного микроскопа).

Совершенствование конструкции СТМ привело к поистине фантастическому разрешению, достигающему  $0,02 \text{ \AA}$  по нормали к изучаемой поверхности и  $2 \text{ \AA}$  в плоскости образца. Однако его преимущество заключается не только в этих рекордных для микроскопии цифрах. В отличие от электронного микроскопа, СТМ изучает непосредственно поверхность, он не разрушает и не меняет исследуемый образец, работает в газообразной или жидкой среде (с небольшими потерями в разрешении по сравнению с вакуумом), может быть совмещен с другими устройствами с целью получения приборов с качественно новыми характеристиками.

Достигнутые в данном направлении успехи привели к тому, что, как сказано в<sup>2</sup>, «многие исследователи заразились «туннельной» лихорадкой». СТМ создан уже в ряде лабораторий США и Европы (см., например,<sup>2-4</sup>). Первый советский СТМ успешно работает в Институте физических проблем АН СССР<sup>5-8</sup>. Если вначале СТМ использовался для выяснения структуры металлических поверхностей, то сейчас объектами исследований стали также полуметаллы, полупроводники, адсорбированные частицы<sup>9</sup> и даже биологические объекты, которые уже не приходится, как в обычных электронных микроскопах, обезжизвлять и покрывать тонким слоем металла<sup>10</sup> (заметим, что во всех случаях необходимым требованием является наличие хорошо проводящей поверхности, на которой может размещаться изучаемый объект). Открываются широкие возможности для реализации упругой и неупругой туннельной спектроскопии<sup>11</sup>, как локальной, так и сканирующей. Создание низкотемпературного туннельного микроскопа<sup>12</sup> позволяет изучать электронную структуру поверхности сверхпроводящих материалов, процесс

зарождения сверхпроводящих областей на поверхности, определять спектры элементарных возбуждений. Эти эксперименты приобретают сейчас особое значение в связи с открытием в последнее время высокотемпературной сверхпроводимости<sup>13</sup>.

В современном производстве 5—10% валового национального продукта расходуется на возмещение потерь от трения и износа. СТМ — идеальное устройство для исследования этих процессов, а также для изучения коррозии и гетерогенного катализа, определяющего большинство современных химических технологий. Все эти явления определяются структурой первых атомных слоев поверхности, к которой традиционная электронная микроскопия абсолютно нечувствительна. Модификация СТМ для работы в режиме полевой эмиссии<sup>14</sup> позволяет надеяться на его использование для литографии и других типов обработки материалов (таким путем уже получены линии субмикронного размера), на широкое применение в микроэлектронике. Уникальные энергетические характеристики туннелирующих электронов лежат в тех же пределах, что и большинство химических процессов, поэтому, создавая пучок электронов с определенной энергией, можно вызывать требуемую химическую реакцию<sup>9</sup>, например, вызывающую модификацию поверхностной структуры<sup>15</sup>. Изобретение СТМ, по словам председателя Нобелевского комитета по физике С. Иогансона, «открывает безграничные возможности для науки».

Прежде чем перейти к описанию конструкций СТМ и новых результатов, полученных с его помощью со времени публикации первой заметки о СТМ в январском выпуске УФН 1984 г.<sup>16</sup>, остановимся вкратце на истории вопроса. Представление об электронном туннелировании, возникшее еще на ранних этапах развития квантовой механики, связывалось с прохождением электрического тока через вакуумный промежуток, разделяющий два металлических электрода<sup>17</sup>. Однако первоначально эксперимент в таком виде представлялся несуществующим, поскольку расстояние между металлами должно быть порядка  $10 \text{ \AA}$  и даже менее, т. е. быть сравнимым с неоднородностями на поверхностях проводников. В этом отношении интересна мысль Гиавера, высказанная в Нобелевской речи: «...Мы решили попытаться не использовать в качестве промежутка между металлами воздух или вакуум ввиду проблем, связанных с вибрациями. В конце концов мы понимали кое-что в технике»<sup>18</sup>. В качестве потенциального барьера Гиавер предложил воспользоваться тончайшим слоем окисла, естественным образом возникающим на поверхности одного из металлов. Несмотря на то, что в дальнейшем объектами туннельной спектроскопии стали исключительно гиаверовские структуры металл — изолятор — металл<sup>17,19</sup>, попытки создания вакуумного зазора не прекращались. Это обстоятельство обусловлено очевидными достоинствами такого барьера: отсутствием влияния электрических и механических свойств изолятора на туннельные характеристики, избавлением от эффектов неупругого туннелирования через примесные центры в барьере, отсутствием контактных явлений на границе металл — изолятор и, наконец, как показали последующие исследования, возможностью контролируемого изменения расстояния между электродами.

Первая попытка создания вакуумного барьера путем образования зазора между электродами в результате складывания двух независимо приготовленных образцов была предпринята в ИРЭ АН СССР Луцким и др.<sup>20</sup>. Первое устройство с изменяемым вакуумным промежутком было создано авторами работ<sup>21,22</sup>, которые использовали пьезоэлементы для сканирования эмиттера радиусом порядка  $1000 \text{ \AA}$  над исследуемой поверхностью и систему обратной связи, удерживающую эмиттер на определенном расстоянии от нее. Достигнутое разрешение в этом приборе, который использовался для микротопографии металлических поверхностей, составляло  $30 \text{ \AA}$  по нормали к образцу и  $4000 \text{ \AA}$  в плоскости поверхности<sup>22</sup>.

Первое спектроскопическое исследование с помощью подобной<sup>21,22</sup> экспериментальной техники было предпринято Поппе<sup>23</sup> на сверхпроводящих образцах  $\text{ErRh}_4\text{V}_4$ . Острие из золота или серебра вдавливалось в поверхность изучаемого кристалла, после чего оно с помощью пьезоэлемента поднималось над ним на расстояние, достаточное для возникновения туннельного тока сквозь образовавшийся вакуумный промежуток. Отчетливое наблюдение энергетических щелей в зависимости дифференциальной проводимости от напряжения на данном и других сверхпроводящих материалах указывает на туннельную природу возникающего в системе тока.

Радикальный прогресс в области вакуумного туннелирования был достигнут в работе<sup>1</sup>, выполненной сотрудниками научно-исследовательской лаборатории фирмы IBM в Цюрихе (Швейцария). Ими была усовершенствована защита от внешних и внутренних вибраций системы, существенно улучшена стабильность исследуемой поверхности и острия, значительно уменьшена ширина туннельного зазора, детально разработан механизм перемещения эмиттера. Остановимся вкратце на принципе действия этого устройства. С помощью пьезопреобразователя металлическое острие смещается по нормали  $z$  к поверхности проводника до появления конечного туннельного сопротивления. Поскольку в образовавшемся потенциальном барьере волновая функция электрона затухает экспоненциально, то туннельное сопротивление  $R$  и величина тока  $I = RU$  оказываются очень чувствительными к толщине зазора  $d$ , Å:

$$R = R_0 \exp(1,025 d\varphi^{1/2}),$$

где  $\varphi$  — средняя величина работы выхода электрона для двух материалов, образующих туннельный контакт, эВ; это выражение справедливо при напряжении на зазоре  $|U| \ll \varphi/e$ . При постоянном напряжении острие перемещается над поверхностью. При этом с помощью обратной связи, возмущающей на пьезоэлемент, туннельный ток, а следовательно, сопротивление  $R$  и произведение  $d\varphi^{1/2}$  поддерживаются постоянными. Тогда в соответствии с рельефом поверхности исследуемого образца меняется напряжение на управляющем пьезоэлементе  $u_z$ . Если величина  $\varphi$  постоянна вдоль поверхности, то получаемый при сканировании сигнал  $u_z$  непосредственно дает информацию о топографии поверхности в атомном масштабе.

Предложенная в<sup>1</sup> конструкция СТМ содержит три основных элемента: механизм грубого (более 1 мкм) сближения острия и образца, механизм тонкого (менее 1 мкм) перемещения и системы виброизоляции и демпфирования. Для грубого ступенчатого перемещения образца в боковом направлении, т. е. в плоскости  $x, z$ , служит пьезоэлектрический привод типа «паучок». Плавное приближение острия к поверхности осуществляется с помощью привода из пьезоэлектрической керамики, обеспечивающего диапазон перемещения до нескольких тысяч ангстрем (в первом СТМ использовался стандартный смещенный пьезоэлемент фирмы «Филлипс» с обратившимися электродами в трех взаимно перпендикулярных направлениях). Управление

чу которого входит неразрушающий подвод острия к поверхности образца, реакция на значительные неоднородности, ориентация плоскости сканирования, компенсация теплового дрейфа и т. д., а также запоминание информации и выдача ее на дисплей.

Разрешение, достигаемое СТМ, определяется рядом технических факторов, среди которых следует выделить: а) температурный дрейф; б) внешние вибрации; в) получение острия с минимальным радиусом закругления; г) достижение ультравысокого вакуума.

Первая проблема была успешно решена в работе<sup>2</sup>. Для предотвращения теплового дрейфа в  $z$ -направлении была использована компенсационная структура, а в  $x, y$ -плоскости — симметричная схема из пьезоэлектрических

керамических элементов. Эти меры наряду с компактностью сканирующего узла, позволившей снизить его чувствительность к вибрациям, обеспечили разрешение в плоскости сканирования не хуже  $10 \text{ \AA}$  и постоянную времени реакции всего лишь  $0,3 \text{ мс}$ , т. е. большую скорость развертки ( $400$  точек в секунду).

Разрешение по нормали к поверхности образца определяется в основном вибрацией острия относительно плоскости. Следует заметить, что система виброизоляции и демпфирования непрерывно менялась и упрощалась по мере совершенствования конструкции СТМ. В СТМ первого поколения для этой цели использовался сверхпроводящий подвес<sup>1,24</sup>. Во втором<sup>25</sup> и третьем<sup>9</sup> поколениях СТМ применялись двухступенчатые пружинные системы, которые различались в основном размерами. Наконец, в работе<sup>26</sup> был описан миниатюрный СТМ, в котором полностью отсутствуют винтовые пружины и демпфирующие магниты. В данном случае система виброизоляции представляла собой стопку расположенных одна над другой пластин из нержавеющей стали с тремя (или более) витоновыми демпфирующими прокладками между каждыми двумя соседними пластинами. Этого оказалось достаточно для достижения при атмосферном давлении воздуха в СТМ, установленном на обычном лабораторном столе, стабильности туннельного зазора порядка нескольких ангстрем. Естественно, что при дополнительной защите от звука и вибрации большой амплитуды можно улучшить стабильность по крайней мере на порядок величины. Помимо изоляции СТМ от внешних вибраций, существенной характеристикой системы является ее жесткость и компактность с целью повышения резонансных частот устройства<sup>2</sup>.

Разрешение, достигаемое СТМ в плоскости образца, зависит главным образом от формы острия: чем меньше радиус закругления, тем выше разрешающая способность устройства. Согласно<sup>27</sup> формирование острия лучше производить *in situ*. Уже простого касания поверхности образца достаточно для достижения разрешения порядка  $10 \text{ \AA}$ . С помощью нагрева и больших токов от острия к образцу можно получить разрешение в  $x$ ,  $y$ -плоскости порядка  $2 \text{ \AA}$ <sup>27</sup>, в то время как в  $z$ -направлении наилучшее значение составляет  $0,02 \text{ \AA}$ <sup>28</sup> (эти величины и приведены в начале статьи).

Естественно, что разрешение можно улучшить, если выполнять измерения в вакууме: в первых экспериментах  $\sim 10^{-6}$  торр, а в последующих — уже  $\sim 10^{-10}$  торр. В то же время необходимо подчеркнуть, что туннельные микроскопы могут работать и непосредственно на воздухе и давать неплохое разрешение (см., например,<sup>26</sup>).

До сих пор обсуждались конструкции СТМ типа игла — плоскость. В работе<sup>29</sup> был реализован другой вариант создания вакуумного зазора между двумя металлами (см. также<sup>30</sup>). Ее авторы указали на то обстоятельство, что для спектроскопических целей требуется стабильность зазора в  $0,01 \text{ \AA}$ . Для решения этой задачи они предложили методику создания туннельного контакта, образованного сжатием двух скрещенных электродов, осажденных на две разделенные тонкопленочной прокладкой (толщина  $\sim 0,9 \text{ мкм}$ ) подложки. С помощью электромагнитного устройства, которое помещалось в дьюар с жидким гелием, зазор между металлами плавно менялся и подложки прогибались настолько, что между ними возникал туннельный ток. Выполненные при температуре  $1,2 \text{ К}$  измерения позволили наблюдать в вольт-амперной характеристике переходов свинец — вакуум — свинец и свинец — вакуум — алюминий энергетические щели сверхпроводящих обкладок, что послужило доказательством туннельной природы тока через переход. Без применения схем обратной связи и с минимальными мерами подавления вибрации была надежно зарегистрирована структура во второй производной туннельного тока по напряжению, которая обусловлена фононами свинца и полностью идентична аналогичным особенностям, наблюдавшимся ранее на гиаверовских контактах с барьером из окисла алюминия. Это обстоятельство указывает на весьма высокую стабильность получаемых

переходов, которая, впрочем, оказалась недостаточной для наблюдения молекулярных колебаний с помощью эффекта неупругого туннелирования<sup>29</sup>.

Туннельный микроскоп, сочетающий элементы конструкции СТМ, предложенной в<sup>1</sup>, и устройства для сдавливания туннельных переходов<sup>29</sup>, подробно описан в<sup>31</sup>. При его разработке авторы работы<sup>31</sup> ставили две основные цели: добиться максимальной жесткости системы и минимального температурного дрейфа. Грубое перемещение острия в таком устройстве осуществляется с помощью микровинта, кроме того, для сканирования в плоскости образца и тонкого перемещения по оси  $z$  используются пьезоэлементы. Высокого разрешения удалось достигнуть в жидком азоте, были получены изображения отдельных атомов на поверхности слоев с плотной упаковкой. Разрешение в плоскости сканирования составляло величину менее  $3,4 \text{ \AA}$ , наилучшее разрешение в вертикальном направлении было порядка  $0,1 \text{ \AA}$ .

Перейдем к описанию первого советского СТМ<sup>5</sup>. Перемещение вольфрамового острия в нем производилось пьезоэлементами из титановой керамики. СТМ подвешен на амортизаторе под колпаком вакуумной установки (давление  $10^{-2} \div 10^{-5}$  мм рт. ст. обеспечивает акустическую изоляцию), которая амортизирована пружинной подвеской и резиновыми подушками. Управление СТМ и накопление результатов сканирования осуществляется ЭВМ «Мера-60». Согласно<sup>6</sup> сканирование производилось по относительно большой площади  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  с разрешением, близким к атомному. С помощью данного микроскопа в работе<sup>6</sup> впервые был изучен рельеф границы раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  в МДП-структуре, что крайне важно для адекватного описания свойств этого объекта. Посредством СТМ выявлены длиннопериодные неровности рельефа с характерной высотой  $10-30 \text{ \AA}$  и протяженностью сотни ангстрем. Согласно<sup>6</sup> именно они являются основным источником рассеяния электронов, что должно найти свое отражение в соответствующих теориях, описывающих электронные процессы в МДП-структурах. В<sup>7</sup> с помощью того же микроскопа исследована поверхность пленок ниобия, на основе которых готовятся пленочные структуры ниобий — окись ниобия — свинец. Выяснена природа возникновения туннельных переходов с множеством микромостиков, пронизывающих слой окисла: как оказалось, на поверхности пленок ниобия, напильных на горячую подложку, возникают выступы — кристаллиты высотой  $40-50 \text{ \AA}$ , которые, вероятно, и служат микромостиками в слое окисла. Несомненным прогрессом является создание быстродействующего СТМ<sup>8</sup>, позволяющего изучать кинетические явления в реальном масштабе времени.

К настоящему времени наиболее впечатляющими являются успехи сканирующей туннельной микроскопии в исследовании деталей электронной структуры поверхности металлов и полупроводников. Интенсивно изучалась картина расположения атомов в структуре из  $7 \times 7$  ячеек поверхности кремния<sup>9</sup>, германия,  $\text{GeSi}^{32,33}$ ,  $\text{GaAs}^{34}$ ; поверхность  $\text{Si}(001)$  исследована в работе<sup>35</sup>. Успешное разрешение структуры на атомарном уровне показывает, что новая микроскопия открывает невиданные ранее возможности в изучении физики и химии поверхности. При этом она не ограничена только границей раздела вакуум — твердое тело, но применима и для изучения границ газ — твердое тело и жидкость — твердое тело, играющих важную роль в катализе, коррозии, смазке и биологии. Способность СТМ работать в обычной воздушной среде и при обычных давлениях во многих случаях более чем компенсирует некоторые потери в степени разрешения. Существенно, что СТМ в принципе позволяет изучать явления на поверхности в процессе их развития: динамику дислокаций, сверхпроводящих областей и живых организмов, химические процессы и т. д. Перспективно также сочетание СТМ с другими устройствами. Так, недавно удалось совместить СТМ с обычным сканирующим электронным микроскопом<sup>26</sup>, сконструирован на основе СТМ прибор, который измеряет ультрамалые силы (до  $10^{-18} \text{ Н}$ )<sup>36</sup>. Техника поперечной электронной фокусировки совместно со сканирующей туннельной

микроскопией позволяет получать информацию об одной и той же поверхности извне и изнутри, причем сведения взаимно дополняют друг друга<sup>37</sup>.

Дальнейшее совершенствование конструкции СТМ и, в частности, улучшение стабилизации вакуумного зазора открывает широкое поле для реализации упругой и неупругой туннельной спектроскопии. Здесь особый интерес вызывает исследование элементарных возбуждений в «экзотических» сверхпроводниках, слоистых и неоднородных сверхпроводящих структурах и магнитных сверхпроводниках (результаты первых экспериментов на сверхпроводящих образцах представлены в<sup>37</sup>). СТМ позволит детально изучить анизотропию сверхпроводящих свойств материалов. В работе<sup>38</sup> обсуждаются возможности наблюдения процессов неупругого туннелирования с помощью СТМ, что позволило бы выяснить по соответствующим особенностям в туннельных кривых химическую природу одиночных адсорбированных молекул (см. также в<sup>39</sup> расчет сечения неупругого рассеяния электронов молекулой, находящейся на поверхности плоского электрода). Выполненные в<sup>38</sup> оценки показывают, что для барьера высотой порядка 2 эВ необходимо обеспечить стабильность вакуумного зазора в 0,02 Å (о достижении соответствующих параметров сообщается в работе<sup>28</sup>). Представляется возможным использовать СТМ для изучения процессов резонансного туннелирования электронов через небольшую совокупность точечных дефектов в пленке изолятора, покрывающей проводящую плоскость<sup>40</sup>.

Экспериментальные успехи, достигнутые за сравнительно короткий срок, стимулировали исследования по разработке теоретических основ вакуумной туннельной микро- и спектроскопии. Сформулируем некоторые из вопросов, поднимаемых в этих работах, заимствовав их частично из<sup>41</sup>.

1. Какие требования предъявляются к остриям, используемым в качестве одного из электродов?

2. Каким образом должны быть обработаны экспериментальные данные для получения точной информации об электронных и геометрических характеристиках исследуемой поверхности?

2. Существуют ли теоретические ограничения на вертикальную и поперечную разрешающие способности СТМ?

Для того чтобы ответить на эти вопросы, необходима последовательная теория туннелирования в системе острие — плоскость<sup>41–44</sup> (см. обсуждение в работе<sup>45</sup>). Отметим работу<sup>46</sup>, в которой теория<sup>42</sup> развита с учетом тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, что существенно для интерпретации результатов, получаемых с помощью СТМ при комнатной температуре, а также<sup>47</sup>, где указано на существенную роль потенциала изображения.

Особое внимание в теоретических работах уделяется разрешающей способности туннельного микроскопа. Заметим, что в случае мелкомасштабных неровностей разрешающая способность СТМ определяется не только геометрическими размерами: радиусом острия и его средним расстоянием до поверхности, но и длиной затухания волновой функции в вакуумном барьере<sup>44,48</sup>.

Прошедший с момента появления первой публикации период можно охарактеризовать как интенсивный поиск решений, направленных на повышение чувствительности, стабильности, виброустойчивости, создание различных механизмов смещения иглы — инжектора и т. д. Главное же — управляемый вакуумный промежуток атомных размеров стал реальностью и с помощью СТМ достигнуто еще полностью не осознанное разрешение. Воистину прав великий Гете: «Пусть перед тем порогом роковым фантазия в испуге замирает».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.//Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 178.
2. Van der Walle G.F.A., Gerritsen J. W., van Kempen H., Wyder P.//Rev. Sci. Instrum. 1985. V. 56. P. 1573.
3. Golovchenko J. A.//Science. 1986. V. 232. P. 48.
4. Demuth J. E., Hamers R. J., Tromp R. M., Welland M. E.//IBM J. Res. and Dev. 1986. V. 30. P. 396.
5. Хайкин М. С., Трояновский А. М.//Письма ЖТФ. 1985. Т. 11 С. 1236.
6. Хайкин М. С., Трояновский А. М., Эдельман В. С., Пудалов В. М., Семенчинский С. Г.//Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 193.
7. Голямина Е. М., Трояновский А. М.//Ibidem. С. 285.
8. Володин А. П., Хайкин М. С.//Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 1293.
9. Binnig G., Rohrer H.//Sci. American. 1985. V. 253. P. 22; перевод://В мире науки. 1985. № 10. С. 26.
10. Baró A. M., Miranda R., Carrascosa J. L.//IBM J. Res. and Dev. 1986. V. 30. P. 380.
11. Свистунов В. М., Белоголовский М. А. Туннельная спектроскопия квазичастичных возбуждений в металлах.— Киев: Наукова думка, 1986.
12. De Lozanne A. L., Elrod S. A., Quate C. F.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 2433.
13. Bednorz J. G., Müller K. A.//Zs. Phys. Kl. B. 1986. Bd 64. S. 189.
14. Wu M. K., Ashburn J. R., Torng C. J., Hor P. H., Meng R. L., Gao L., Huang Z. J., Wang Y. Q., Chu C. W.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 908.
15. McLeod M. A., Pease R. F. W.//J. Vac. Sci. and Technol. Ser. B. 1986. V. 4. P. 86.
16. Farrell H. H., Levinson M.//Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 31. P. 3593.
17. Ревокатова И. П., Силин А. П.//УФН. 1984. Т. 142. С. 159.
18. Wolf E. L. Principles of Electron Tunneling Spectroscopy.— New York: Oxford Univ. Press, 1985.
19. Giaever I.//Rev. Mod. Phys. 1974. V. 46. P. 245; перевод://УФН. 1975. Т. 116. С. 585.
20. Свистунов В. М., Белоголовский М. А., Черняк О. И.//УФН. 1987. Т. 151. С. 31.
21. Луцкий В. Н., Корнеев Д. Н., Елинсон М. И.//Письма ЖЭТФ. 1967. Т. 4. С. 267.
22. Young R., Ward J., Scire F.//Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 992.
23. Young R., Ward J., Scire F.//Rev. Sci. Instrum. 1972. V. 43. P. 999.
24. Porpe V.//Physica. Ser. B + C. 1981. V. 108. P. 805.
25. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.//Physica. Ser. B. 1982. V. 109—110. P. 2075.
26. Binnig G., Rohrer H.//Helv. Phys. Acta. 1982. V. 55. P. 726.
27. Gerber Ch., Binnig G., Fuchs H., Marti O., Rohrer H.//Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. P. 224.
28. Van Kempen H., Benistant P. A. M., van de Walle G. F. A., Wyder P. Preprint.— Nijmegen; Netherlands, 1987.
29. Hermsen J. G. H., van Kempen H., Nelissen B. J., Soethout L. L., van de Walle G. F. A., Weijs P. J. W., Wyder P. Preprint.— Nijmegen, Netherlands, 1987.
30. Moreland J., Hansma P. K.//Rev. Sci. Instrum. 1984. V. 55. P. 399.
31. Hansma P. K.//IBM J. Res. and Dev. 1986. V. 30. P. 370.
32. Drake B., Sonnenfeld R., Schneiz J.//Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. P. 441.
33. Becker R. S., Golovchenko J. A., Swatzentruber B. S.//Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 32. P. 8455.
34. Becker R. S., Golovchenko J. A., Swatzentruber B. S.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 2678.
35. Binnig G., Rohrer H.//Surface Sci. 1983. V. 126. P. 236.
36. Tromp R. M., Hamers R. J., Demuth J. E.//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 1303.
37. Binnig G., Quate C. F.//Ibidem. 1986. V. 56. P. 930.
38. Elrod S. A., Bryant A., de Lozanne A. L., Park S., Smith D., Quate C. F.//IBM J. Res. and Dev. 1986. V. 30. P. 387.
39. Binnig G., Garcia N., Rohrer H.//Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 32. P. 1336.
40. Persson B. N. J., Demuth J. E.//Sol. State Commun. 1986. V. 57. P. 769.

40. Сумецкий М. Ю.//Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 287.
41. Feuchtwang T. E., Cutler P. H., Miskovsky N. M.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 167.
42. Tersoff J., Hamann D.//Ibidem. P. 1998; Phys. Rev. Ser. B. 1985. V. 31. P. 805.
43. Garcia N., Ocal C., Flores F.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 2002.
44. Stoll E., Baratoff A., Selloni A., Carnevali P.//J. Phys. Ser. C. 1984. V. 17. P. 3073.
45. Feuchtwang T. E., Cutler P. H., Kazes E.//J. de Phys. 1984. T. 45. P. C9.
46. Leavens C. R., Aers G. C.//Sol. State Commun. 1986. V. 58. P. 9.
47. Binnig G., Garcia N., Rohrer H., Soler J. M., Flores F.//Phys. Rev. Ser. B. 1984. V. 30. P. 4816.
48. Крылов М. В., Сурис Р. А.//Поверхность. 1986. № 10. С. 20.