

разработан способ получения пленок различных веществ путем испарения в вакууме. Он впервые стал таким способом получать молекулярные смеси — тема, получившая в дальнейшем широкое развитие в трудах С.А. Векшинского, которые были удостоены Сталинской премии. Эти работы привели А.И. Шальникова к ряду изобретений, нашедших существенное применение в электровакуумной промышленности. А.И. Шальниковым были для целей биофизики разработаны исключительно чувствительные счетчики ультрафиолетовых лучей, в настоящее время широко применяемые в атмосферной оптике.

Начиная с 1934 г. основной областью работ Шальникова становится физика низких температур, в особенности явление сверхпроводимости. Здесь им был сделан ряд работ, принадлежащих к числу наиболее существенных в этой области. Так, Шальниковым впервые была открыта сверхпроводимость очень тонких пленок у сверхпроводящих металлов и обнаружено резкое возрастание критического магнитного поля в этих пленках по сравнению с критическим полем для массивных образцов. Эти результаты привели в дальнейшем к установлению такого фундаментального для явления сверхпроводимости факта, как значительная глубина проникновения магнитного поля в глубь сверхпроводников. А.И. Шальниковым был полностью разрешен вопрос о природе промежуточного состояния сверхпроводников. Путем исключительно тонкого эксперимента ему удалось непосредственно обнаружить сверхпроводящие и нормальные участки, из которых состоит сверхпроводник в промежуточном состоянии. В самое недавнее время Шальниковым были произведены эксперименты, впервые позволившие непосредственно измерить глубину проникновения поля в сверхпроводник, считающуюся в настоящее время важнейшей характеристикой явления сверхпроводимости...".

Методике изготовления и изучению свойств сверхпроводящих пленок гидрида палладия были посвящены и две последние работы Александра Иосифовича, опубликованные в середине 80-х годов.

С начала 60-х годов Шальниковым и работавшими с ним учениками была проведена серия пионерских исследований в области физики квантовых кристаллов. Эти работы актуальны и в наши дни и во многом определяют лицо современного Института физических проблем РАН.

С 1938 по 1970 гг. А.И. Шальников был профессором Московского государственного университета. Под его наблюдением в МГУ для кафедры физики низких температур был построен специальный корпус, оборудованной аппаратурой для производства жидкого гелия и водорода. Это позволило организовать низкотемпературный практикум для студентов МГУ и поставить на кафедре серьезные научные исследования. В мае 2005 г. в память о воспитателе многих поколений высококлассных специалистов-физиков, который не только щедро делился со своими питомцами знаниями и опытом, но и зачастую помогал студентам и аспирантам в решении их житейских проблем, одной из аудиторий корпуса присвоено имя Шальникова.

В 1956 г. Александр Иосифович организовал издание нового журнала *Приборы и техника эксперимента* — одного из самых крупных и авторитетных журналов РАН, посвященных методике физического экспери-

мента, главным редактором которого он был до последних дней.

И, наконец, следует вспомнить, что в последние годы жизни в сотрудничестве с врачами А.И. создал целую серию современных криохирургических инструментов, в основе конструкции которых лежала "блестящая экспериментальная находчивость, виртуозное мастерство и любовь к тонким зазорам", которыми отличались и его первые работы.

PACS numbers: 65.35. – p, 68.37. – d, 68.37.Ef

Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия атомно-чистой поверхности висмута

В.С. Эдельман

Электронные свойства висмута исследуются уже на протяжении многих десятилетий. Спектр электронов проводимости в объеме изучен весьма подробно (см. обзор [1]). Есть значительные успехи в вычислении зонной структуры [2], о чем свидетельствует достигнутое примечательное согласие с экспериментальными данными в самой чувствительной области — вблизи поверхности Ферми, что требует точности расчета энергии на уровне миллиэлектронвольта. Основная особенность висмута как металла состоит в том, что электроны проводимости имеют малую концентрацию порядка 10^{-5} атом $^{-1}$, их длина волны и дебаевский радиус экранирования много больше межатомного расстояния и достигают значений в сотни ангстрем, так что на расстояниях такого порядка от поверхности должна происходить полная перестройка всей системы электронов проводимости. Исходя из этого, можно ожидать радикальной перестройки спектра электронов у поверхности. Поэтому представляется интересной сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия (СТМ, СТС) поверхности висмута.

Проведение исследований облегчается тем, что можно приготовить высококачественные монокристаллы висмута, которые благодаря их естественной хрупкости легко раскалываются по базисной тригональной плоскости. При этом открывается атомно-чистая поверхность, плотность инородных атомов на которой порядка 1 мкм $^{-2}$. И в условиях глубокого вакуума чистота сохраняется долгое время.

Первая задача исследований — выяснение общей картины структуры поверхности, образующейся при раскалывании кристалла [3]. Известно, что висмут имеет ромбоэдрическую структуру, и его решетка может быть представлена как полученная растяжением простой кубической решетки вдоль одной пространственной диагонали куба и относительного сдвига двух гранецентрированных подрешеток вдоль той же диагонали. При такой трансформации из четырех исходно эквивалентных плоскостей куба типа (111) эквивалентными остаются только три, но они теряют тригональную симметрию, а ось третьего порядка сохраняется только у одной, той, которая перпендикулярна направлению растяжения. Далее будем называть эти плоскости квазитригональными и тригональной соответственно.

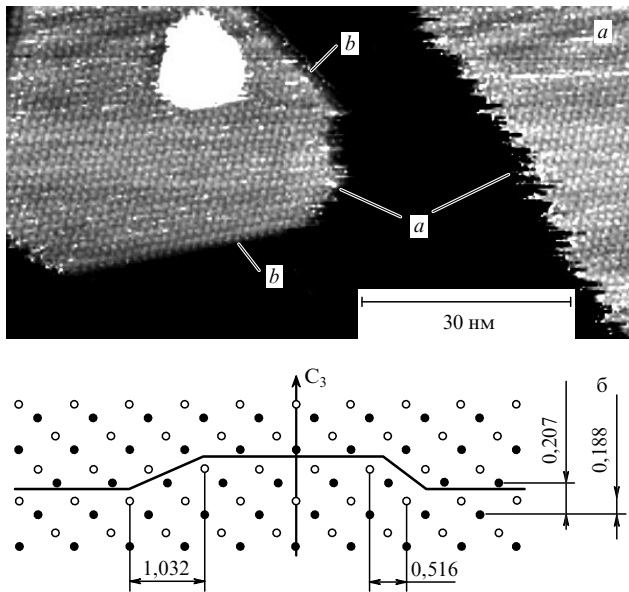


Рис. 1. (а) Полутоновое СТМ-изображение тригональной поверхности висмута, полученное при комнатной температуре. Черная и светлая области — атомно-гладкие террасы, расположенные соответственно на $\sim 0,4$ нм ниже и выше средних террас. При построении этой картинки градации темного и светлого выбраны так, чтобы на средних террасах проявлялась атомная структура. Видно, что границы типа *a* размыты из-за теплового движения атомов, а границы типа *b* при этой температуре остаются атомно-гладкими. Столь разное поведение связано с тем, что, как видно на схеме (б), структура правой и левой границ заведомо разная. (б) Расположение атомов в решетке висмута в плоскости, перпендикулярной направлению атомных рядов на границах типа *b*.

Первые результаты были получены при проведении исследований в условиях комнатной температуры [4, 5]. Типичное СТМ-изображение поверхности скола представлено на рис. 1. Поверхность составлена из атомно-плоских террас с перепадом уровней между ними, равным или кратным $0,4 \pm 0,02$ нм, так как расщепление всегда происходит между двумя более удаленными друг от друга плоскостями (см. рис. 1, внизу). Границы террас часто близки к прямым, следующим вдоль направлений атомных рядов на поверхности. Но есть террасы и с сильно искривленными границами и округлые островки (впадины) нанометровых размеров. Видно, что при комнатной температуре есть две системы границ террас — атомно-прямые (*b*) и размытые тепловым движением (*a*). Такое различие объяснено разной структурой границ (см. схему внизу на рис. 1).

Чтобы исключить тепловое движение и стабилизировать наблюдаемые картины, а также избежать теплового размытия спектральных особенностей, большая часть измерений проводилась при температуре, близкой к температуре жидкого гелия. Исследования осуществлены на низкотемпературной установке [6] с использованием сканирующего туннельного микроскопа [7].

Исследованные образцы условно можно разделить на две группы — слабodefekтные с плотностью дислокаций $n < 10^7$ см $^{-2}$ и сильноdefekтные с $n > 10^8$ см $^{-2}$. Структура поверхности скола существенно меняется от образца к образцу. Однако на основе анализа десятков реализаций можно выявить несколько характерных ситуаций. При этом в зависимости от дефектности

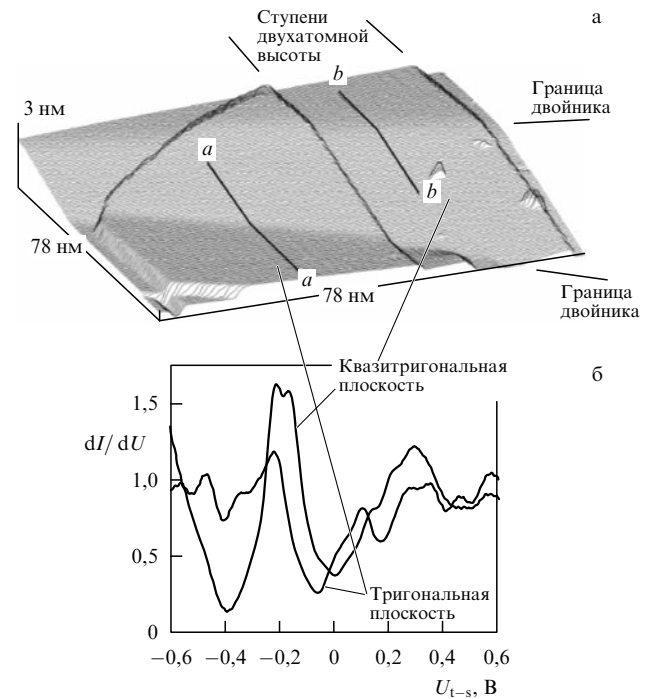


Рис. 2. (а) СТМ-изображение участка поверхности висмута с двойниковой прослойкой. (б) Дифференциальные вольт-амперные характеристики туннельного промежутка для тригональной и квазитригональной поверхностей. Характеристики измерялись при перемещении острого СТМ-кончика вдоль прямых *a*–*a* и *b*–*b*.

кристаллов картины оказываются качественно различными.

При раскалывании слабodefekтных кристаллов наблюдались, как правило, две ситуации. Либо на весь кадр размером 1×1 мкм распространялись 1–3 атомно-гладкие террасы с прямыми границами, идущими по направлениям атомных рядов, либо террасы имели вид проходящих через весь кадр полосок двухатомной высоты (глубины) и разной ширины (иногда всего несколько нанометров), с прямыми границами, совпадающими с направлением тех атомных рядов, ориентация которых была наиболее близка направлению силы, прикладываемой к кристаллу при скалывании. Таким образом, при быстром движении вершины трещины в хорошем кристалле граница террасы не отклоняется от прямой, что свидетельствует о сохранении ее импульса в отсутствие рассеяния.

Для defekтных образцов картина оказывается более разнообразной. Во-первых, наблюдаются террасы различной формы, их границы тоже совпадают с направлением атомных рядов, но в равной степени присутствуют границы всех трех эквивалентных ориентаций. Часто появляются уединенные nanoостровки (и впадины), как и на поверхностях, полученных сколом при комнатной температуре. В пределах кадра могут присутствовать и другие особенности, например дислокации, выход которых на поверхность проявляется как место зарождения новой террасы [3]. И, наконец, возможны случаи двойникования (рис. 2а). Такое разнообразие, как представляется, может быть связано с интерференцией гиперзвуковых колебаний, возбуждающихся при быстром движении вершины трещины и рассеивающихся на дислокациях. Когда дислокации удалены друг от друга,

эффект мал, но он возрастает при их сближении и увеличении плотности. Можно предположить, что размеры наностроек отвечают характерной длине звуковых волн, существенных в этом процессе.

Двойник приводит к появлению на СТМ-изображении двугранного угла, образованного двумя атомно-гладкими поверхностями. Ребро двугранного угла направлено приблизительно вдоль атомных рядов, а его экспериментально измеренная величина составляет $(180 \pm 2,4)^\circ$ с погрешностью $\pm 0,3^\circ$, обусловленной, в основном, погрешностью калибровки пьезосканера СТМ. Эта картина полностью соответствует известной схеме двойникового висмута [8].

Определить, какие из наблюдаемых при двойниковании плоскостей соответствуют тригональной, а какие — квазитригональной плоскостям, можно двумя способами. Если качество и поверхности, и острия СТМ позволяет наблюдать атомную структуру, то правильная треугольная решетка соответствует тригональной плоскости. Для квазитригональных плоскостей должны наблюдаться вытянутые перпендикулярно границе раздела равнобедренные треугольники с тем же основанием, но с углом при вершине $57,24^\circ$. Численно это различие мало, высоты треугольников должны различаться всего на $\sim 5,8\%$. Именно такая картина наблюдалась в эксперименте [3]. Другая возможность — по отношению высот ступеней, которые согласно кристаллографическим данным должны быть равны 0,395 и 0,374 нм на тригональной и квазитригональной плоскостях соответственно. Это небольшое различие вполне надежно регистрируется в эксперименте [9].

Как и следует ожидать, разная атомная структура этих двух плоскостей должна приводить к различию электронных свойств. Это отчетливо проявляется на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) туннельного промежутка. На рисунке 2б приведены дифференциальные ВАХ, которые, как известно, отражают плотность электронных состояний. Эти характеристики регистрировались во многих точках при перемещении острия СТМ вдоль линий $a-a$ и $b-b$. С точностью до шумов они совпадали между собой при измерениях в пределах плоских участков для соответствующих кристаллографических плоскостей.

Существенно, что для обеих плоскостей плотность состояний на уровне Ферми, т.е. при напряжении 0 В, имеет тот же порядок величины, что и при остальных напряжениях. Таким образом, у поверхности формируется двумерный металл, и его характеристики заведомо не столь аномальны, как в объеме висмута. Переход от спектра, характерного для тригональной плоскости, к спектру, характерному для квазитригональной плоскости, происходит в областях шириной 2–5 нм у границ двойникового. Исходя из этого размера, воспользовавшись соотношением неопределенностей, можно оценить импульс электронов проводимости — он не может быть меньше $\sim 1-2 \text{ нм}^{-1}$, что на порядок и более превосходит импульс электронов проводимости в объеме. Этот качественный вывод был подтвержден в экспериментах по фотоэлектронной спектроскопии [10].

Хотя на границе двойников на дифференциальных ВАХ можно различить отдельные максимумы и минимумы, которых нет на характеристиках вдали от границы, они не столь ярко выражены, чтобы можно было

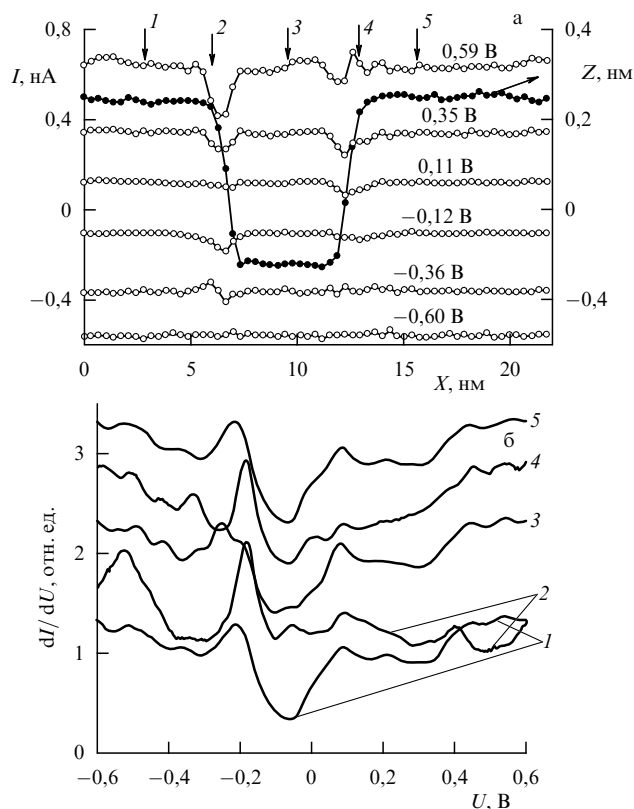


Рис. 3. (а) Сечения при нескольких выбранных напряжениях семейства вольт-амперных характеристик, измеренных при перемещении острия СТМ вдоль линии, пересекающей "канавку" двухатомной глубины, рельеф $Z(X)$ которой показан на этом же рисунке. (б) Дифференциальные вольт-амперные характеристики в точках, показанных стрелками на рис. а, номера возле которых соответствуют номерам характеристик.

уверенностью утверждать, что здесь формируется одномерная электронная структура. Иное дело — граница террас (рис. 3). Здесь различия столь велики, что вывод о формировании одномерных металлических структур несомненен.

В этом эксперименте острие СТМ перемещалось шагами по линии, примерно перпендикулярной границам террас, и в каждой точке регистрировалась координата Z , затем на короткое время выключалась обратная связь, управляющая положением острия по Z , и измерялась ВАХ при фиксированном расстоянии острие — образец. Таким образом получалось семейство характеристик, привязанных к координатам на поверхности и к ее рельефу. Влияние близости к границе на электронные свойства можно наглядно увидеть, построив сечения массива ВАХ при нескольких избранных напряжениях (рис. 3а). Видно, что у границ в узких областях шириной примерно 1 нм происходит изменение спектра электронов. Следовательно, область с другим спектром действительно имеет ширину порядка 1–2 межатомных расстояний, т.е. реально одномерна. Различия структуры правой и левой границ, о котором говорилось выше, сказывается и на электронных характеристиках. Отметим, что начальные условия при измерении характеристик (напряжение и ток) задавались при $-0,6 \text{ В}$. Поэтому соответствующее этому напряжению сечение ВАХ демонстрирует уровень шума и воспроизводимость измерений.

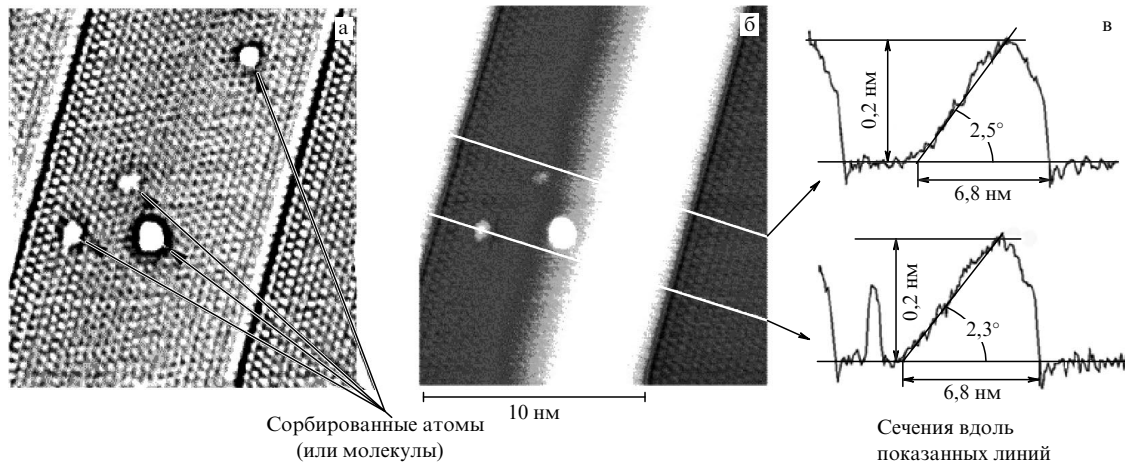


Рис. 4. (а) Продифференцированное изображение двойниковой микропрослойки рис. б. Дифференцирование позволяет четко выделить атомную структуру. Видно, что граница проходит точно вдоль атомного ряда. (б) Полутоновое изображение двойниковой микропрослойки (светлая полоса по центру рисунка). В левом верхнем углу участок еще одной микропрослойки. (в) Сечения рельефа вдоль линий, положение которых показано на рис. б.

Изменения спектра хорошо видны на дифференциальных ВАХ. Так, пик при $-0,22$ В характерный для зависимостей 1, 5, полученных для плоских участков, смещается к напряжению $-0,18$ В, резко сужаясь и вырастая по амплитуде. Поведение вблизи 0 В качественно изменяется — вместо монотонного роста dI/dU на кривой 2 (рис. 3б) виден минимум, а на кривой 4 — максимум. При этом во всех случаях плотность состояний на уровне Ферми остается конечной, т.е. электроны в направлении вдоль границ делокализованы. Отметим также, что в узкой впадине (кривая 3) спектр тоже несколько отличается от спектра на "берегах". Видимо, сказывается близость границ террас, "запирающих" электроны, которая приводит к интерференции их волновых функций.

Трактовка описанных результатов требует серьезного теоретического анализа, так как необходимо рассмотреть растекание тока из точки, в которую туннелируют электроны, по одномерной структуре, по поверхности и по объему. Сама по себе регистрация "одномерных" особенностей заставляет сделать качественный вывод об очень высокой электропроводности вдоль пограничной области с малым сечением.

Наиболее интересное и неожиданное явление, обнаруженное в экспериментах, — это появление двойниковых микропрослоек квантованной ширины (рис. 4). Их ширина определяется тем, что атомные слои в прослойке, наклоненные на малый ($2,3^\circ$) угол к слоям в остальном кристалле, ориентированным перпендикулярно тригональной оси, "сшиваются" на границах. И только самый верхний слой, "сшивающийся" с матрицей с одной стороны, образует ступеньку высотой $0,2$ нм с другой стороны [11, 12].

Другие геометрические характеристики прослоек прямо измерить не удалось. Их длину вдоль поверхности можно грубо оценить, поделив удвоенную длину всех прослоек в пределах кадра на число точек окончания. Для ситуации, изображенной на рис. 5, получим характерную длину порядка 5 мкм. Для картины, приведенной в [11, 12], на которой видно много точек окончания, оценка дает 1 мкм. Структура прослойки вблизи ее конца показана на рис. 5 справа. Видно, что она постепенно

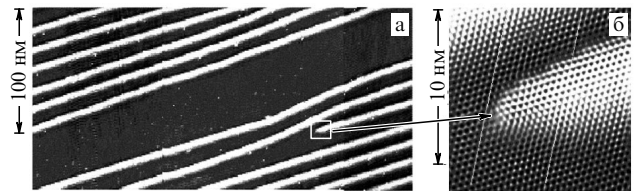


Рис. 5. (а) Изображение нескольких микропрослоек (светлые полосы). (б) С большим увеличением область вблизи окончания прослойки. Верхний более четкий край соответствует "крутой" границе (см. рис. 4). Прямые на рис. б проведены по атомам на тригональных участках. Видно, что у крутого края прослойки атомы смещены примерно на $1/3$ периода решетки из-за большего периода атомной структуры перпендикулярно границе для квазитригональной поверхности прослойки.

сходит на нет с обеих сторон, при этом изломы на границе следуют через несколько атомных расстояний. Представляется естественным предположение, что в глубину прослойка простирается на расстояние, не меньшее длины, на которой она заканчивается на поверхности, т.е. примерно на 10 нм.

Согласно представленным в работах [11, 12] результатам в области шириной в один–два атомных ряда вблизи ступеньки, как и в случае границ террас, вольт-амперные характеристики существенно отличаются от тех, которые наблюдаются вдали от особенности — при напряжениях между образцом и острием СТМ, меньших примерно $0,3$ В, они становятся практически линейными, что свидетельствует о формировании одномерного проводника с существенно большей концентрацией электронов проводимости, чем на остальной поверхности.

Представление о том, насколько узка область особенности электронного спектра в области границы, дает опыт по измерению величины $(dI/dZ)/I$. Реализуется это измерение при подаче на пьезоэлемент СТМ, осуществляющий перемещение острия по направлению Z , переменного напряжения с частотой, лежащей выше полосы обратной связи, путем измерения амплитуды переменного сигнала в функции координат поверхности

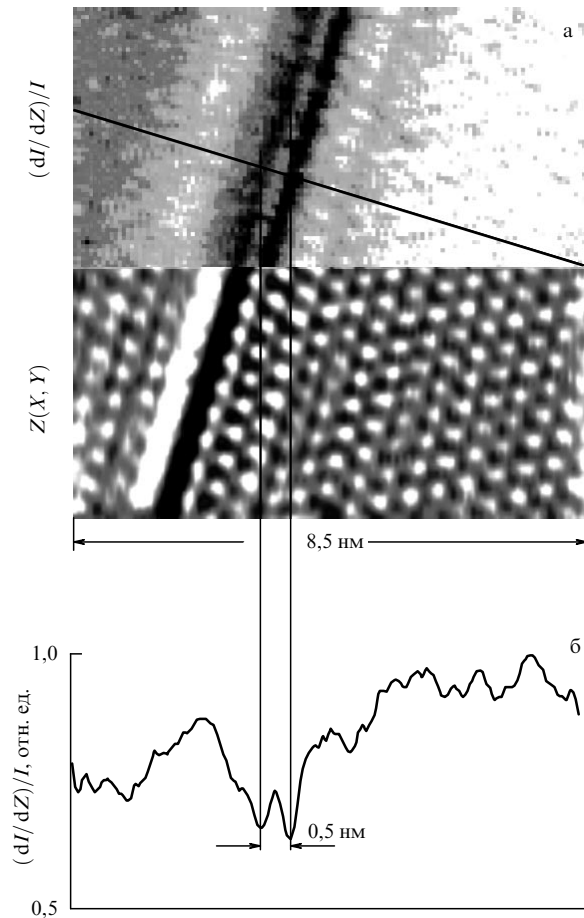


Рис. 6. (а) Нижняя часть кадра изображения поверхности "сшита" с верхней частью кадра производной туннельного тока по расстоянию Z острие – образец. (Оба полных кадра, каждый из которых занимает всю плоскость изображения, снимались в ходе одного эксперимента.) (б) Сечение вдоль линии, показанной на изображении (а).

X, Y . В квазиклассической модели туннелирования ток зависит от Z экспоненциально с показателем, пропорциональным $W^{1/2}$ (W — работа выхода). Следовательно, в описываемом опыте измеряется зависимость работы выхода от координат на поверхности.

Как видно на рис. 6, изменения показателя экспоненты довольно значительны. При этом непосредственно на границе есть аномалия полушириной всего примерно 0,25 нм, что даже несколько меньше межатомного расстояния. Таким образом, на границе формируется проводник минимальной ширины — в один атом.

Описанные эксперименты дали обширный материал по структуре особенностей на поверхности скола, отражающей в атомном масштабе процессы, идущие при разрушении металла, и их специфическим электронным свойствам.

Автор признателен А.Ф. Андрееву за интерес к работе.

Особо хочется выразить признательность А.И. Шальникову, который не только воспитал моего учителя, М.С. Хайкина, но и на протяжении многих лет своими советами, критикой, интересом, поддержкой работ по сканирующей туннельной микроскопии в ИФП АН СССР на их начальной стадии участвовал в формировании меня как ученого и человека. И мне было приятно и

лестно представить этот доклад на сессии Отделения физических наук РАН, посвященной его столетию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 01-02-16711 и 04-02-17369.

Список литературы

1. Эдельман В С *УФН* **123** 257 (1977)
2. Lin Y, Allen R E *Phys. Rev. B* **52** 1566 (1995)
3. Трояновский А М, Эдельман В С *Кристаллография* **44** 336 (1999)
4. Трояновский А М, Эдельман В С *Письма в ЖЭТФ* **60** 104 (1994)
5. Трояновский А М, Эдельман В С *Письма в ЖЭТФ* **60** 285 (1994)
6. Хлюстикова И Н, Эдельман В С *ПТЭ* (1) 158 (1996)
7. Edel'man V S et al. *J. Vac. Sci. Technol. B* **9** 618 (1991)
8. Классен-Неклюдова М В *Механическое двойникование кристаллов* (М.: Наука, 1960)
9. Офицеров А В, Эдельман В С *ЖЭТФ* **120** 731 (2001)
10. Jezequel G, Thomas J, Pollini I *Phys. Rev. B* **56** 6620 (1997)
11. Edel'man V S et al. *Europhys. Lett.* **34** (2) 115 (1996)
12. Edel'man V S *Phys. Lett. A* **210** 105 (1996)

PACS numbers: **61.46. + w**, **67.40. Yv**, **76.30. - v**

Примесные нанокластерные структуры в жидком гелии

Л.П. Межов-Деглин

1. Введение

Первые целенаправленные эксперименты по приготовлению и изучению свойств примесных нанокластерных конденсатов в сверхтекучем HeII были поставлены в Черногоровке в начале 70-х годов [1–3] по инициативе А.И. Шальникова. Исходная идея Александра Иосифовича — попытка приготовления пленки атомарного (металлического) водорода конденсацией атомов H на подложку, охлажденную до температуры T порядка 1 К, выглядела вполне привлекательной. Было известно, например, что тонкие пленки висмута, напыленные на подложку, охлажденную до $T \approx 4,2$ К, являются сверхпроводниками, хотя в обычных условиях висмут — полуметалл с малой концентрацией свободных носителей заряда. Однако эти пленки метастабильны и при нагреве подложки выше 20 К рекристаллизуются, так что при последующем охлаждении пленка подобно массивному образцу ведет себя как полуметалл. Можно ли приготовить квазидвумерную пленку атомарного водорода осаждением атомов H на твердую подложку, охлажденную ниже 1 К? Как локализовать свободные атомы водорода на поверхности подложки и свести к минимуму вероятность их подбарьерного туннелирования, сопровождаемого рекомбинацией атомов $H + H \rightarrow H_2$, оказавшихся в соседних узлах? Будет ли подобная пленка атомарного водорода обладать металлической проводимостью и тем более сверхпроводимостью? Ответы на подобные вопросы мог бы дать только прямой эксперимент, проведение которого затруднительно даже в наши дни. Как мы знаем сегодня [4], рекомбинация атомов водорода ограничивает максимальное содержание свободных атомов H в пропитанных сверхтекучим HeII трехмерных образцах дейтеро-