

11;12
©1993

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

*Д.Н.Давыдов, В.А.Тимофеев,
А.С.Грохольский, С.А.Рыков,
С.А.Немов, И.Б.Затарова*

Метод сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии (СТМ/СТС), позволяя одновременно изучать рельеф поверхности и туннельную плотность электронных состояний, дает уникальную возможность исследования локальных электронных спектров полупроводников [1,2].

Для проведения спектроскопических измерений в широком диапазоне температур (1.2–300 К) был разработан компактный низкотемпературный сканирующий туннельный микроскоп (НТСТМ), обладающий высокой резонансной частотой f_0 и, следовательно, высокой стабильностью и низкой чувствительностью к внешним вибрациям. НТСТМ выполнен из немагнитных материалов, что позволяет помещать его во внутрь сверхпроводящего соленоида с внутренним диаметром 20 мм, проводя измерения в присутствии магнитных полей. Предусмотрена также возможность работы в транспортном сосуде Дьюара.

Высокая жесткость конструкции НТСТМ достигается за счет компактности и применения в качестве системы грубого подвода вертикального инерциального пьезодвижителя, находящего широкое применение в конструкциях сканирующих туннельных микроскопов [3,4].

Конструкция НТСТМ приведена на рис. 1,а. Пьезокерамические трубки 1 и 2 (изготовлены из керамики ЦТС-19) приклеены к керамическому основанию 3. Внутренняя пьезотрубка 1 используется для перемещения закрепленной на ее торце иглы в трех взаимно перпендикулярных направлениях и имеет следующие размеры: длина 12.7, наружный диаметр 6.35, толщина стенок 0.51 мм. Наружная пьезотрубка 2 приводит в действие пьезодвижитель грубого подвода образца к острию и имеет длину 19, наружный диаметр 12.1 и толщину стенок 0.51 мм. К ее торцу приклеена кварцевая

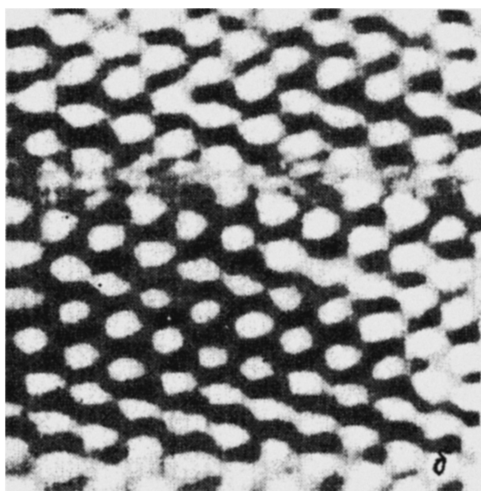
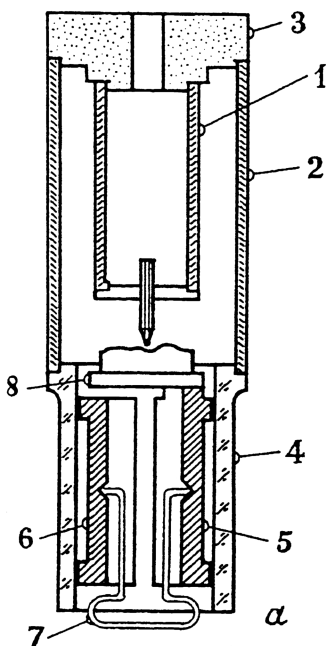


Рис. 1. а — конструкция НТСТМ; б — СТМ изображение 3.6×3.6 нм участка поверхности пиролитического графита, полученное при $T = 4.2$ К.

трубка 4, внутри которой находятся подвижные полуцилиндры 5 и 6, выполненные из немагнитной нержавеющей стали и прижимающиеся к внутренней поверхности кварцевой трубки пружиной 7. К полуцилиндру 5 прикреплен держатель образца 8, выполненный также из немагнитного материала.

Система грубого подвода образца к острию приводится в действие при подаче на электроды наружной пьезокерамической трубки импульсов пилообразной формы. Изменение направления движения достигается путем изменения формы импульсов. Минимальный шаг системы грубого подвода (≈ 11 нм) при комнатной температуре соответствует амплитуде управляющего импульса ≈ 15 В при движении вверх. Обычно при грубом подводе использовались амплитуды импульсов 20–30 В, при этом скорость движения держателя образца составляла ≈ 1 мм в минуту. При температуре $T = 4.2$ К, вследствие уменьшения чувствительности пьезокерамики примерно в 6 раз, движение осуществлялось при амплитуде импульсов 110–130 В.

Чувствительность конструкции к внешним вибрациям оценивалась путем прямого измерения фактора жесткости

$S(f, f_0)$, определяемого соотношением

$$S(f, f_0) = \frac{\Delta Z(f, f_0)}{Z},$$

где Z — амплитуда внешнего гармонического возмущения аналитического узла СТМ с частотой f , $\Delta Z(f, f_0)$ — амплитуда колебаний на частоте f в системе острие — образец. При $f \ll f_0$ резонансная частота конструкции связана с $S(f, f_0)$ простым соотношением [5]:

$$f_0 = f \cdot S^{-1/2}.$$

В нашем случае колебания СТМ с частотой $f = 1.3$ Гц и амплитудой $Z = 10$ нм приводили к колебаниям между острием и поверхностью образца $\Delta Z = 0.35$ нм, то соответствует значению $f_0 \approx 7$ кГц. При жесткости конструкции, соответствующей этой резонансной частоте, атомарное разрешение на графите достигается без использования системы виброзащиты (рис. 1, б).

С использованием описанного выше НТСТМ были выполнены пробные исследования топографии поверхности и локальных туннельных спектров напыленных на слюду пленок. Исследованные образцы, полученные термическим испарением в вакууме модифицированным методом КЗО из компенсированного РbТе, представляли собой по данным фазового анализа и РЭМ тонкие ($d \approx 0.5 - 0.7$ мкм) крупноблочные монокристаллические слои. Материал шихты был изготовлен с использованием явления самокомпенсации. В качестве легирующей примеси применена донорная примесь Cl ($N_{Cl} = 1$ ат.%). Для максимального проявления самокомпенсации при изготовлении шихты в расплав вводился сверхстехеометрический теллур. Полученные слои были высокоомными, неоднородными по электронным свойствам, с преимущественной проводимостью p -типа, с концентрацией дырок $p \approx (3 - 5) \cdot 10^{17}$ см⁻³ по данным из эффекта Холла. Интерес к данным объектам был обусловлен тем, что из подобной шихты были изготовлены поликристаллические слои с высокой фоточувствительностью. Механизм фотопроводимости поликристаллических пленок халькогенидов свинца до сих пор не получил однозначного истолкования. Однако ясно, что высокая фоточувствительность самым тесным образом связана с неоднородностью потенциального рельефа [6]. Потенциальные барьеры могут существовать на границах между кристаллитами или между p и n -областями и на дислокационных стенках внутри отдельных кристаллитов. Так как НТСТМ позволяет изучать потенциальный рельеф в субмикронном масштабе, его применение для исследования таких неоднородных объектов представляет несомненный интерес.

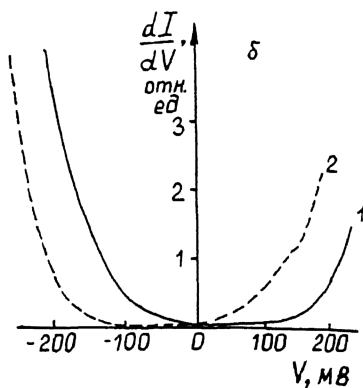
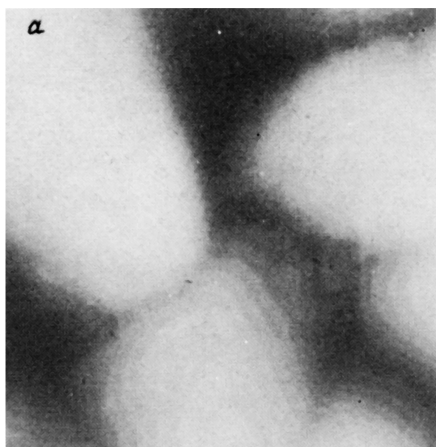


Рис. 2. а — СТМ изображение 187×187 нм участка поверхности пленки PbTe:Cl , б — Типичные локальные туннельные спектры, полученные в различных точках поверхности пленок.

Во всех экспериментах использовались механически заточенные вольфрамовые острия. Измерения проводились при температуре $T = 4.2$ К в атмосфере газообразного гелия. Максимальная площадь сканирования составляла 370×370 нм. В заданных точках в пределах области сканирования производились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ). Путем численного дифференцирования ВАХ были получены зависимости дифференциальной проводимости dI/dV от напряжения смещения.

На рис. 2,а приведено СТМ изображение участка 187×187 нм поверхности PbTe:Cl . Поверхность имеет ярко выраженную блочную структуру с характерным размером ≈ 150 нм. Типичные туннельные спектры (зависимости $dI/dV(V)$) для данных пленок приведены на рис. 2,б. Во всех случаях широкий минимум соответствует положению запрещенной зоны E_g , средняя величина которой, полученная как результат усреднения локальных значений E_g , равна 205 ± 20 мэВ, что находится в хорошем согласии с литературными данными [7]. Как показали наш эксперименты, исследуемые пленки с точки зрения электронных свойств обладают высокой степенью неоднородности, представляя собой чередующиеся области с дырочной (кривая 1, рис. 2, б) и электронной (кривая 2, рис. 2 б) проводимостью. Минимальный масштаб изменения характера проводимости можно оценить как ≈ 26 нм, хотя в большинстве случаев области с одним типом проводимости простирались на расстоянии $\approx 150-200$ нм. В выполненных нами экспериментах явно выраженной корреляции между топографией поверхности и локальными электронными свойствами

обнаружить не удалось. Однако уже сейчас представляются очевидными большие возможности применения НТ-СТМ для исследования механизма фотопроводимости тонких поликристаллических пленок халькогенидов свинца на локальном уровне.

Авторы выражают благодарность А.В.Федосееву за помощь в обработке СТМ изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 93-02-2041).

Список литературы

- [1] Yi Chiy, M.L. Reed, T.E. Schlesinger // Appl. Phys. Lett., 1992. V. 60. N 14. P. 1715.
- [2] Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Муситина Е.П., Кайданов В.И., Рыков С.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 2. С. 36-40.
- [3] Renner C.H., Nidermann Ph., Kent A.D., Fisher O. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 965.
- [4] Agrait N. // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. P. 263.
- [5] Pohl D.W. // IBM J. Res. Develop. 1986. V. 30. N 4. P. 417.
- [6] Неустроев Л.И., Осипов В.В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 59-65.
- [7] Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS. М.: Наука, 1968. 384 с.

Санкт-Петербургский
государственный технический
университет

Поступило в Редакцию
4 октября 1993 г.