

05.2; 11

© 1991

ЛОКАЛЬНАЯ ТУННЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА В СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

А.О. Г о л у б о к, Д.Н. Д а в ы д о в,
Е.П. М у с и х и н а, В.И. К а й д а н о в,
С.А. Р ы к о в

Туннельная спектроскопия (ТС) использовалась в ряде работ для изучения зонного спектра теллурида свинца [1, 2], двумерных поверхностных [3, 2], локализованных и резонансных состояний [4, 5]. Все эти исследования были выполнены с использованием планарных МДП структур. Настоящая работа является попыткой (насколько нам известно, первой) применить для этих целей сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

Объектами исследования служили монокристаллы n - $PbTe$, выращенные методом Бриджмена-Стокбаргера, легированные в одном случае сверхстехиометрическим свинцом, в другом — двумя процентами индия. Холловские концентрации электронов составляли соответственно $1 \cdot 10^{18}$ и $7 \cdot 10^{18}$ см^{-3} (4.2 К). Поверхность кристаллов (100) подвергалась полирующему электролитическому травлению.

СТМ [6] погружался в жидкий гелий (4.2 К). В экспериментах использовалось W острие, к которому прикладывался потенциал, а образец был заземлен. Пространственная калибровка СТМ осуществлялась по изображению поверхности графита с атомным разрешением. Наличие последнего позволяет оценить площадь туннельного контакта — $5 \cdot 10^{-16}$ – 10^{-15} см^2 . Площадь сканирования могла изменяться от $50 \times 50 \text{ \AA}^2$ до $10000 \times 10000 \text{ \AA}^2$, кадр сканирования содержал 100×100 точек. Визуализация топографии поверхности $Z(X, Y)$ в режиме постоянного туннельного тока [7] приостанавливалась в каждой двенадцатой точке растра, разрывалась петля обратной связи и на контакт подавалось линейно меняющееся во времени смещение. Зависимость $I(V)$ в диапазоне +300 – –100 мВ снималась за 50 мс. С помощью аналогового дифференцирования определялись также $dI/dV(V)$ и $d^2I/dV^2(V)$. В одной точке растра эти зависимости снимались до 100 раз с последующим усреднением для исключения случайных сигналов, связанных с вибрациями в системе.

На рис. 1, а представлены типичные зависимости $I(V)$, $dI/dV(V)$ и $d^2I/dV^2(V)$ для $PbTe \langle Pb \rangle$. Они мало отличаются от тех же зависимостей, полученных на планарных МДП контактах с помощью модуляционной методики [3]. Следует, однако, отметить,

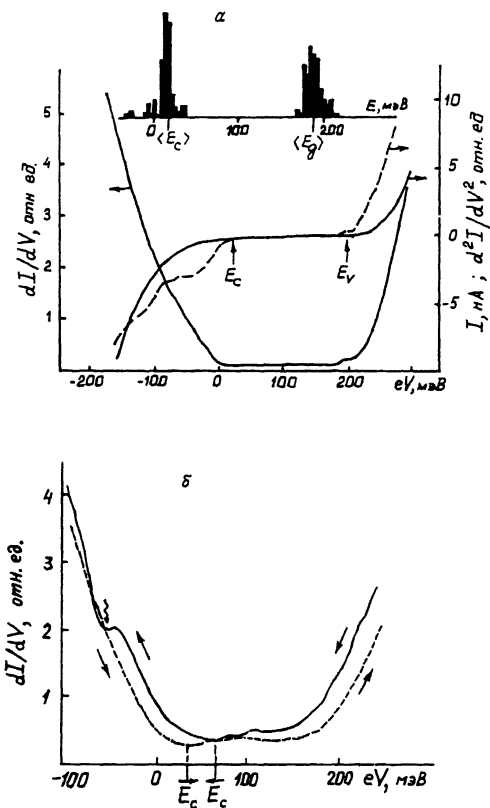


Рис. 1. а - ВАХ, dI/dV , d^2I/dV^2 для $PbTe\langle Pb \rangle$ и гистограммы распределения величин E_C и E_g , измеренных в различных точках образца. Расстояние между точками ~ 400 А; б - дифференциальная проводимость для $PbTe\langle In \rangle$ (\leftrightarrow - направления раз-вертки $V(t)$).

что аналоговое дифференцирование, усреднение ВАХ не позволяют выделить такие тонкие особенности, как фоновые пики. Характерные изломы на d^2I/dV^2 (помечены стрелками) можно идентифицировать как края зоны проводимости (E_C) и валентной (E_V) и таким образом определить ширину запрещенной зоны $E_g = |E_C - E_V|$ и положение уровня Ферми $E_F - E_C$. На вставках рис. 1 представлены гистограммы значений E_g и $E_F - E_C$, полученные для 112 точек растра. $\langle E_g \rangle \approx 190$ мэВ совпадает с литературными данными, а $\langle E_F - E_C \rangle$ хорошо согласуется с положением E_F , рассчитанным из холловской концентрации. Повторные снятия ВАХ в одной точке на поверхности образца дают значения E_g и $E_F - E_C$, различающиеся меньше, чем для разных точек. Таким образом, использо-

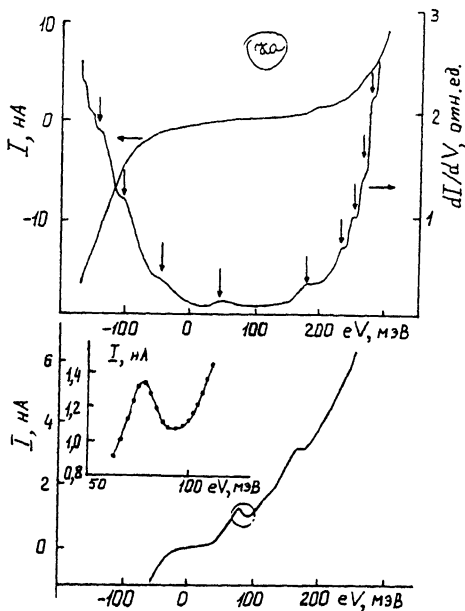


Рис. 2. а - осцилляции dI/dV для $PbTe\langle In \rangle$, б - ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

вание СТМ позволяет проводить, с ранее недоступным пространственным разрешением, измерение распределения электронных свойств на поверхности образцов, в частности, обусловленных флуктуациями концентрации дефектов.

Туннельные ВАХ для $PbTe\langle In \rangle$ (рис. 1, б) подобны ВАХ для $PbTe\langle Pb \rangle$, давая практически совпадающие значения $\langle E_g \rangle$, но обнаруживая, однако, специфические особенности.

1) При начальном напряжении развертки $V_0 > 0$, что соответствует туннелированию электронов из кристалла в острие, вблизи $V \approx -100$ мВ на участке протяженностью 20–30 мВ наблюдается резкое замедление роста или даже падение dI/dV (отмечено на рис. 1, б волнистой стрелкой).

2) Смена знака dV/dt приводит к заметному изменению положения E_C относительно E_F („0“ на шкале напряжений смещения). Если начинать развертку из положительной области, то $\langle E_F - E_C \rangle \approx 62$ мэВ, если из отрицательной — $\langle E_F - E_C \rangle \approx 32$ мэВ.

3) На некоторых зависимостях $I(V)$ и $dI/dV(V)$ наблюдаются нерегулярные осцилляции (рис. 2, а). Их положение и амплитуда различны для разных точек растра.

4) В отдельных случаях наблюдаются ВАХ, содержащие участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 2, б).

Первые две особенности наблюдаются и для планарных МДП структур на основе $PbTe\langle In \rangle$ [5]. Их объяснение вкратце состоит в следующем.

Примесь In в $PbTe$ создает квазилокальные состояния с отрицательной корреляционной энергией. Связанные состояния отделены от делокализованных потенциальным барьером в конфигурационном пространстве. Это обуславливает долговременные релаксации в системе примесь-зона (часы при $T=4.2$ К). Начиная с некоторых напряжений смещения (в шкале энергией электронов $E - E_C \approx \approx 100$ мэВ) туннелирующие электроны начинают эффективно захватываться примесями, создавая отрицательный объемный заряд в области под контактом. Электронные термы в $PbTe$, в том числе E_C , следует за изменением E_F в металле, туннельный ток и dI/dV перестают изменяться (1-я особенность). По мере подъема термов уменьшается высота барьера, увеличивается скорость разрядки центров, изгиб E_C начинает отставать от изменения V , I вновь начинает расти.

Если развертка начинается с $V_0 < 0$, центры заряжены отрицательно, край зоны проводимости изогнут вверх. При уменьшении $|V|$ этот изгиб, из-за наличия потенциального барьера, становится метастабильным. При $V_0 > 0$ центры обедняются электронами, зоны изгибаются вниз, и этот изгиб замораживается при изменении V к отрицательным значениям. Этим объясняется изменение $E_F - E_C$ при разных знаках dV/dt (2-я особенность).

Что касается третьей особенности, то она, как нам кажется, может следовать из рассмотренной модели в случае контакта малой площади [8]. В силу нерегулярного распределения примесей и случайного их положения в решетке и относительно острия возможно появление целой серии особенностей, аналогичных 1. Нельзя, впрочем, исключить влияния состояния поверхности (наличия поверхностных состояний и адсорбированных молекул, загрязнений и т.п.) на вид ВАХ.

Приведенные результаты свидетельствуют, по нашему мнению, о перспективности локальной туннельной спектроскопии для исследования свойств теллурида свинца. С другой стороны, $PbTe$ может оказаться удобным модельным объектом для раскрытия новых возможностей СТМ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] H a l l R.N. // Abstr. Cpnf. Semicond. Phys. Prague, 1960, Praha, 1960. P. 37-38.
- [2] В и н ч а к о в В.Н., К а й д а н о в В.И., Р ы к о в С.А. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. № 2. С. 66-68.
- [3] T s u i D.C., K a m i n s k y G., S c h m i d t P.H. // Phys. Rev. B: Solid State. 1974. V. 9. N 8. P. 3524-3531.
- [4] Е с а к и Л., С т а й л с П., Ч а н г Л. Тр. IX Межд. конф. по физике полупроводников. Москва, 1968. Т. 2. С. 1134-1139.
- [5] К а й д а н о в В.И., Р ы к о в С.А., Р ы к о в а М.А., С ю р и с О.В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 144-151.

- [6] Г о л у б о к А.О., Д а в ы д о в Д.Н., Н а х а б - ц е в Д.В., Т и м о ф е е в В.А., Т и п и с е в С.Я. Тез. докл. Всесоюз. конф. „Поверхность 89“. 1989. С. 152.
- [7] Г о л у б о к А.О., Д а в ы д о в Д.Н., Н а х а б - ц е в Д.Н. Научное приборостроение. „Электронная оптика“. 1989. С. 77-84.
- [8] Л и х а р е в Д.В., А в е р и н К.К. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. С. 733.

Поступило в Редакцию
12 октября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

05.4; 06.1

© 1991

ФОРМИРОВАНИЕ $Ag - Pd$ КОНТАКТА
К $Y - Ba - CuO$ КЕРАМИКЕ И ЕГО СВОЙСТВА

К.Г. Г а р ц м а н, Ш.М. Д у г у ж е в,
Л.С. П а р ф е н ь е в а, И.А. С м и р н о в

С момента открытия оксидных керамик с высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП) синтезирован целый ряд материалов, обладающих этим свойством. Возможное применение материалов с ВТСП в различных электротехнических и электронных устройствах ставит проблему создания простых и надежных омических контактов для них. Контакты должны обладать низким переходным сопротивлением, достаточно высокой механической прочностью, способностью к длительной работе без существенного изменения их свойств.

Известны работы [1-4], в которых опробован ряд материалов для использования их в качестве электрических контактов. Среди них наиболее часто упоминаются благородные металлы Ag , Au , Pt , а также Bi , In , Sn , Al . При этом опробовались различные способы нанесения контактного материала: нанесений пасты (как правило серебряной) с последующим вжиганием, напыление, ионная имплантация, наплавление, электроискровая сварка. Наиболее просто получаемые контакты с применением серебряных паст имеют, как правило, достаточно высокое контактное сопротивление $\sim 10^{-2} - 10$ Ом·см² [1]. Лучшие результаты ($10^{-4} - 10^{-5}$ Ом см²) получены при напылении или ионной имплантации благородных металлов [5]. Наиболее низкие контактные сопротивления получены путем напыления или ионной имплантации благородных металлов на поверхность, прошедшую предварительную очистку ионными пучками ($10^{-9} - 10^{-7}$ Ом·см²) - [5]. Очевидно, что стремление понизить величину