



смещения  $I(V)$  и ее первая производная  $dI/dV(V)$  в фиксированных точках поверхности. Методика измерения во всех режимах описана в [1,2]. Исследования проводились в воздушной атмосфере на образцах с различным числом слоев в ЛБ пленке: от одного до шестнадцати.

При исследовании пленок, содержащих нечетное число слоев, была обнаружена аномалия в зависимости  $dI/dV(V)$  в виде пика проводимости шириной порядка 150–200 мВ вблизи нулевого смещения (рис.1d, кривые 1,3). Соответствующая зависимость  $I(V)$  представлена на кривой 1 рис.3. В то же время для четного числа слоев такая аномалия отсутствовала, и зависимость  $dI/dV(V)$  имела вид, показанный на рис.1d (кривая 2).

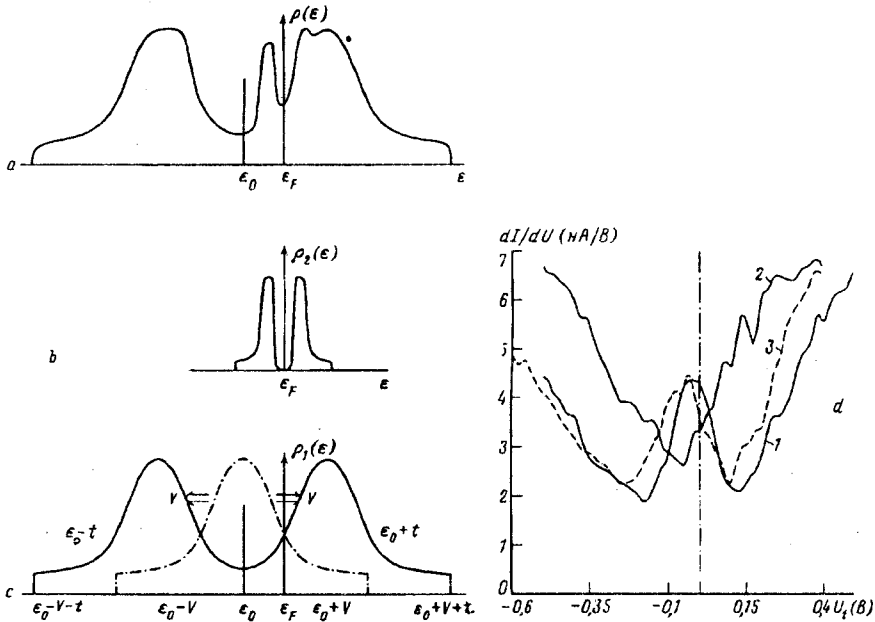


Рис.1. а, b, c – см. пояснения в тексте; d – зависимости проводимости от напряжения смещения  $dI/dV$ , полученные для ЛБ пленки, состоящей из различного числа слоев, при следующих параметрах: кривая 1 соответствует одному слою:  $U_t = -10$  мВ,  $I_t = 0,8$  нА, напряжение модуляции  $U_{mod} = 50$  мВ; кривая 2 соответствует двум слоям:  $U_t = -10$  мВ,  $I_t = 0,8$  нА,  $U_{mod} = 50$  мВ; кривая 3 соответствует трем слоям:  $U_t = 15$  мВ,  $I_t = 0,8$  нА,  $U_{mod} = 50$  мВ

При исследовании ЛБ пленки с нечетным числом слоев в режиме измерения проводимости  $dI/dV(x, y)$  была обнаружена упорядоченная сверхструктура с характерными размерами  $11,5 \text{ \AA} \times 11,5 \text{ \AA}$ , что соответствует реконструкции поверхности типа  $3 \times 2$  (рис.2), которая не наблюдалась в режиме топографии.

При четном числе слоев на образце не удалось получить устойчиво повторяющихся пространственных изображений поверхности ЛБ пленки ни в одном из описанных выше режимов.

В некоторых точках исследуемой поверхности на вольт-амперных характеристиках  $I(V)$  наблюдались участки с отрицательным наклоном (кривая 2 рис.3) и осцилляции (кривая 3 рис.3).

**Обсуждение результатов.** Представленные выше экспериментальные данные

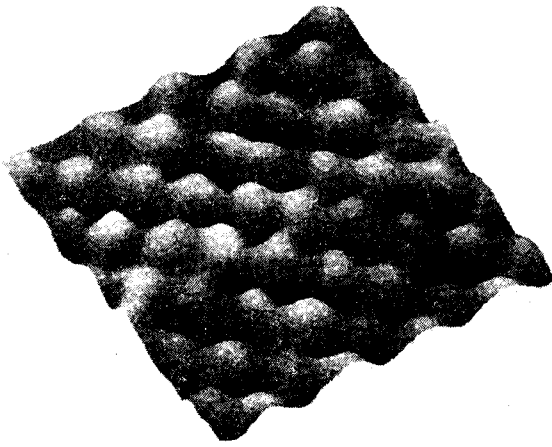


Рис.2. Изображение поверхности пленки, состоящей из трех слоев, полученное в режиме измерения проводимости  $dI/dV(x, y)$ . Размер изображения составляет  $70 \text{ \AA} \times 74 \text{ \AA}$ . Серая шкала градаций яркости соответствует относительным единицам. Изображение получено при  $I_t = 0,8 \text{ нА}$ ,  $U_t = -50 \text{ мВ}$  и напряжении модуляции  $U_{mod} = 50 \text{ мВ}$ .

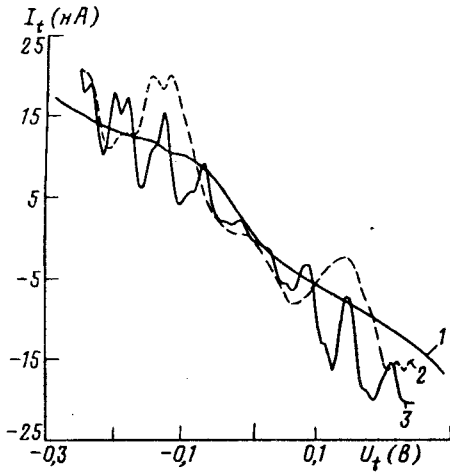


Рис.3. Вольт-амперные характеристики  $I(V)$ , полученные для ЛБ пленки, состоящей из трех слоев. Величины начальных туннельного тока и напряжения смещения составляют: кривая 1 -  $U_t = 15 \text{ мВ}$ ,  $I_t = 0,8 \text{ нА}$ , кривая 2 -  $U_t = -30 \text{ мВ}$ ,  $I_t = 0,8 \text{ нА}$ , кривая 3 -  $U_t = -10 \text{ мВ}$ ,  $I_t = 0,8 \text{ нА}$ .

допускают следующую трактовку. Ионы  $\text{Ag}$  в ЛБ пленке образуют квазидвумерную решетку. В случае, когда имеется нечетное число молекулярных слоев, верхний слой представляет практически идеальную двумерную решетку. Электроны в такой решетке можно описывать гамильтонианом  $H_0$ :

$$H_0 = \sum_{\langle j,i \rangle} t_{ij} a_{j\sigma}^+ a_{i\sigma} = \sum_{k\sigma} \epsilon_k a_{k\sigma}^+ a_{k\sigma},$$

где  $t_{ij}$  - амплитуда перескока электрона между ближайшими узлами решетки,  $\epsilon_k$  - энергия электрона в двумерной зоне. Плотность состояний  $\rho_1(E)$  в такой двумерной системе в модели сильной связи изображена на рис.1 с пунктирной линией (особенность Ван-Хова сглажена). Кроме того, внутри пленки существуют двойные слои, образованные ионами  $\text{Ag}$  соседних слоев. Они представляют собой две подрешетки, расположенные строго по вертикали одна над другой. В отсутствие взаимодействия между подрешетками поведение электронов в каждой из них описывается гамильтонианом  $H_0$ . Однако поскольку расстояние между подрешетками сравнимо с их периодом, необходимо учесть взаимодействие подрешеток. Гамильтониан взаимодействия имеет

следующий вид:

$$H_{int} = \sum_{i,j} V \delta_{ij} a_{i\sigma}^{\dagger} b_{j\sigma} + \text{э.с.} = \sum_{k,p} V \delta_{kp} a_{k\sigma}^{\dagger} b_{p\sigma} + \text{э.с.},$$

где индексы  $i, k$  относятся к одной подрешетке, а  $j, p$  – к другой. При этом электронный спектр будет определяться полюсами функции Грина  $G_{kk}(\omega)$  и  $G_{pp}(\omega)$ , для которых справедливы уравнения:

$$G_{kk'} = G_{kk'}^0 + G_{kk}^0 \sum_p V_{kp} G_{pk'}, \quad G_{pk'} = G_{pp}^0 \sum_{k''} V_{pk''} G_{k''k'},$$

где  $V_{pk} = V \delta_{kp}$ . Отсюда следует:

$$G_{kk'}(\omega) = \frac{\delta_{kk'} G_{kk}^0}{1 - V^2 (G_{kk}^0)^2} = \frac{1}{2} \delta_{kk'} \left( \frac{1}{\omega - (\epsilon_k - V) + i\delta} + \frac{1}{\omega - (\epsilon_k + V) + i\delta} \right). \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что взаимодействие приводит к перестройке электронного спектра. Ширина зоны изменяется от величины  $2t$  до величины  $2(t + V)$  (рис.1 с).

В том случае, когда имеется нечетное число слоев ЛБ пленки, в верхнем слое как в чисто двумерной системе возможна реконструкция  $3 \times 2$  типа волны зарядовой плотности (ВЗП). Экспериментальное СТМ изображение состоящей из трех слоев ЛБ пленки согласуется с этим утверждением (рис.2). Приведенное изображение соответствует первой производной туннельного тока по напряжению смещения  $dI/dV$ . В таком режиме контраст СТМ изображения может быть существенно выше, чем для обычной топографической моды работы СТМ. При наличии на поверхности ЛБ пленки ВЗП плотность состояний  $\rho_2(E)$  имеет вид, показанный на рис.1 б. Реально в эксперименте туннелирование происходит как из двойного слоя, так и из одинарного. Поэтому, в случае нечетного числа слоев, конечная величина плотности состояний  $\rho(E)$  (рис.1 а) представляет собой суперпозицию  $\rho_2(E)$  (рис.1 б) и  $\rho_1(E)$  (рис.1 с). В случае одного слоя фоновая плотность состояний  $\rho_1(E)$  может соответствовать плотности состояний подложки. На рис.1 а имеется провал в окрестности энергии Ферми  $E_F$ , величина которого составляет  $\approx 250$  мВ. Этот провал соответствует энергетической щели в спектре при наличии ВЗП. Указанная ширина щели не противоречит данным других экспериментов и теоретическим оценкам.

Помимо особенностей, соответствующих ВЗП и двойному слою, на зависимости  $I(V)$  наблюдались участки с отрицательным наклоном (кривая 2 рис.3) и осцилляции (кривая 3 рис.3), которые, по-видимому, обусловлены образованием коллективных связанных состояний в результате взаимодействий электронных состояний иглы и образца [1,3]. Такие состояния формируют дополнительные резонансные каналы для туннелирования электронов. Так как положение этих уровней относительно  $E_F$  и  $E_F - eV$  зависит от приложенного к туннельному переходу напряжения, это может приводить к осцилляциям на вольт-амперных характеристиках. Отметим, что вольт-амперные характеристики и зависимости  $dI/dV$ , аналогичные приведенным на рис.1,3, часто наблюдаются при низкотемпературных СТМ исследованиях сверхпроводников [4,5].

1. Н.С.Маслова, Ю.Н.Моисеев, В.И.Панов и др., ЖЭТФ, **102**, 925 (1992).
2. N.S.Maslova, Yu.N.Moiseev, V.I.Panov et al., Phys. Stat. Sol. (a) **131**, 35 (1991).
3. П.И.Арсеев, Н.С.Маслова. ЖЭТФ **75**, 575 (1992).
4. T.Oshio, J.Tanaka, A.Ono et al., J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 455 (1990).
5. M.C.Gallagher and J.G.Adler J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 464 (1990).