

средней линией сверхпроводящей петли. Верхняя и нижняя огибающие связаны с квантами потока $\Phi_0/2$ и Φ_0 через нормальное кольцо.

Хотя причину осцилляций можно считать установленной, детальный механизма их возникновения в настоящее время не выяснен. Нет адекватного объяснения формы линии, периода и фазы осцилляций, особенностей картины осцилляций в магнитном поле (рис. 3). Построение количественной теории может превратить описанные выше измерения в уникальный метод исследования.

Список литературы

1. Петрашов В Т, Антонов В Н *Письма в ЖЭТФ* **54** 245 (1991)
2. Petrashov V T, Antonov V N, Persson M *Physica Scripta* **42** 136 (1992)
3. Petrashov V T, Antonov V N, Delsing P, Claeson T *Phys. Rev. Lett.* **70** 347 (1993)
4. Петрашов В Т, Антонов В Н, Максимов С В, Шайхайдоров Р Ш *Письма в ЖЭТФ* **58** 48 (1993)
5. Петрашов В Т, Антонов В Н, Максимов С В, Шайхайдоров Р Ш *Письма в ЖЭТФ* **59** 523 (1994)
6. Антонов В Н, Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук (Черноголовка: ИПТМ РАН, 1994)
7. Petrashov V T, Antonov V N, Delsing P, Claeson T *Physica B* **194–196** 1105 (1994)
8. Petrashov V T, Antonov V N, Maksimov S, Shaikhaidarov R, in *Int. Conf. on the Physics and Technology of Metallic Nanostructures: Metallic Nano-Electronics* (Chernogolovka, 12–15 September, 1994)
9. Petrashov V T, Antonov V N, Delsing P, Claeson T, Submitted to *Phys. Rev. Lett.* (1994)
10. Petrashov V T, Antonov V N, Delsing P, Claeson T *JETP Lett.* **61** 589 (1994)
11. Петрашов В Т *Микроэлектроника* **23** 3 (1994)
12. de Vegvar P G N, Fulton T A, Mallison W H, Miller R E *Phys. Rev. Lett.* **73** 1416 (1994)
13. Андреев А Ф *ЖЭТФ* **46** 1823 (1964)
14. Абрикосов А А *Основы теории металлов* (М.: Наука, 1987)
15. Hui V C, Lambert C J *Europhys. Lett.* **23** 203 (1993); Lambert C J, Robinson S J *Physica B* **194–196** 1641 (1994)
16. Альтшулер Б Л, Аронов А Г, Зюзин А Ю *ЖЭТФ* **86** 709 (1984)
17. Ларкин А И *Письма в ЖЭТФ* **31** 239 (1980)
18. Спивак Б З, Хмельницкий Д Е *Письма в ЖЭТФ* **35** 334 (1982)

PACS numbers: 07.80

Влияние локализованных состояний и межчастичных взаимодействий на диагностику наноструктур методами СТМ/СТС и АСМ

Н.С. Маслова, Ю.Н. Моисеев,
В.И. Панов, С.В. Савинов

Создание сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) привело к развитию новых методов диагностики наноструктур и исследования физических процессов на поверхности и границах раздела твердого тела. Эти методы, получившие в последнее время обобщенное название "наноскопия", включают в себя СТМ/СТС, АСМ, оптическую микроскопию ближнего поля, емкостную и магнитную силовую микроскопию.

Однако лишь методы СТМ/СТС и АСМ позволяют получать атомное пространственное разрешение, дают

возможность исследовать широкий класс физических свойств и процессов в наноструктурах и, в основном, используются для модификации топологических и электронных свойств приповерхностных слоев твердотельных и молекулярных структур.

Вместе с тем, несмотря на значительное количество экспериментов, проведенных этими методами, остается невыясненным ряд вопросов о влиянии индивидуальных локализованных состояний и межчастичных взаимодействий на туннельные процессы в контактах нанометровых размеров и результаты, получаемые методами СТМ/СТС и АСМ.

По этой причине ниже преимущественно представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, в которых проявляется влияние локализованных состояний и межчастичных взаимодействий на туннелирование и адекватное описание эффектов, наблюдаемых в СТМ/СТС- и АСМ-экспериментах.

Существенное влияние локализованных состояний на туннельные процессы в наноструктурах и низкоразмерных системах вызвано следующими причинами:

1) уменьшение ширины туннельного барьера до размеров межатомных расстояний приводит к сильной перестройке первоначального электронного спектра вследствие эффектов гибридизации;

2) характерный радиус локализации и размер туннельного перехода имеют один порядок величины, поэтому характер туннелирования может определяться свойствами локализованного состояния;

3) в низкоразмерных электронных системах энергетические уровни связанных локализованных состояний могут смещаться в область запрещенной зоны даже в том случае, если первоначальные примесные уровни энергии находятся ниже границы энергетического спектра валентной зоны;

4) конечное время релаксации неравновесных электронов приводит к существенному изменению временных характеристик туннельного тока, особенно в присутствии локализованных состояний.

Экспериментальные исследования проводились методами СТМ/СТС и АСМ. В туннельных структурах нанометровых размеров, образуемых острием СТМ и поверхностью различных упорядоченных мономолекулярных слоев, обнаружены периодические, соответствующие волне зарядовой плотности (ВЗП) структуры, соизмеримые и несоизмеримые с периодом молекулярных решеток (рис. 1).

Периодические структуры, отвечающие ВЗП, проявляются в СТМ-изображении при энергии $eV_t \ll \Delta$ (где Δ — ширина энергетической щели, отвечающая ВЗП, $\Delta > kT$), что указывает на присутствие в щели каналов, туннелирования, соответствующих уровням связанных локализованных состояний.

Возникновение таких уровней внутри энергетической щели за счет эффектов гибридизации проявляется в резком (на два-три порядка) увеличении туннельной проводимости при уменьшении расстояния между острием СТМ и поверхностью на $\Delta z \approx 0,1$ нм, наличии участков с отрицательной проводимостью на ВАХ $I_t(V_t)$ туннельного тока (рис. 2) и возникновении осцилляций туннельного тока I_t при изменении расстояния Δz между электродами (рис. 3).

Следует отметить, что осцилляции в плотности состояний и резкое возрастание туннельной проводимости

© Н.С. Маслова, Ю.Н. Моисеев, В.И. Панов, С.В. Савинов 1995

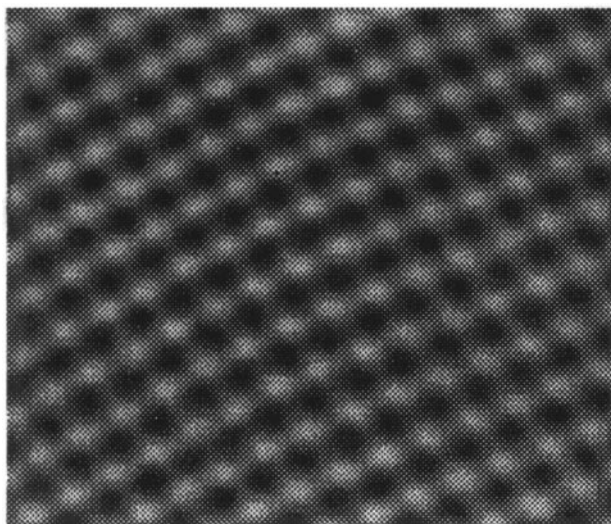


Рис. 1. СТС-изображение ВЗП на поверхности мономолекулярной ленгмюровской пленки

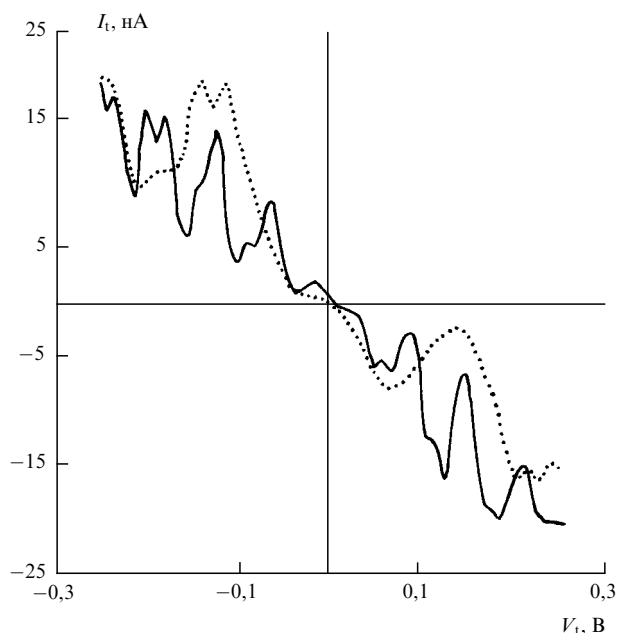


Рис. 2. ВАХ туннельного перехода над различными участками мономолекулярной ленгмюровской пленки

сти возникают в туннельных контактах, образуемых кластерными системами и острием СТМ. Однако такого рода эффекты наиболее ярко проявляются при наличии дефектов и примесей на поверхности электродов, что, по-видимому, также указывает на возникновение в них уровней локализованных состояний.

Возникновение локализованных состояний на поверхности полупроводников может приводить к существенному изменению временных характеристик туннельного тока.

При исследовании поверхности кремния, легированного бором, в СТМ/СТС-изображениях были обнаружены области размером около 2 нм, в пределах которых на ВАХ $I_t(V_t)$ появлялись особенности, соответствующие энергии 1,2 эВ. Контраст изображения областей на поверхности, формируемых интенсивностью туннель-

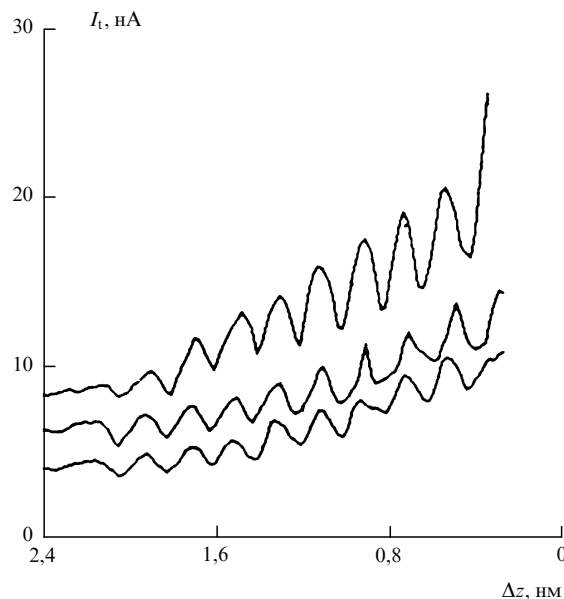


Рис. 3. Осцилляции туннельного тока при изменении расстояния между острием СТМ и поверхностью молекулярной пленки для различных туннельных напряжений

ного тока, уменьшается при возрастании скорости сканирования. Кроме того, изображение таких областей практически исчезает, если измерения проводятся при разности потенциалов V_t , меньшей значения, соответствующего пику на ВАХ $I_t(V_t)$.

По нашему мнению, наблюдаемые на поверхности области с особенностями в графиках $I_t(V_t)$ или $\partial I/\partial V$ отвечают наличию индивидуальных состояний с характерным радиусом локализации, превышающим размеры туннельного перехода и ширину барьера. В результате туннельный ток в значительной степени может определяться энергетическими характеристиками этих состояний, если разность потенциалов на переходе равна или превышает их энергию.

При этих условиях туннельный ток имеет вклад флуктуаций, отвечающих спектру "телеграфного" шума с несколькими дискретными амплитудами и периодами. Отсюда можно сделать вывод о наличии вклада неравновесных электронных процессов в туннелирование в пределах областей локализации.

Объяснение полученных результатов было дано в рамках самосогласованной теории туннелирования, учитывающей перенормировку первоначального электронного спектра, конечное время релаксации неравновесных электронов и наличие кулоновских корреляций.

В рамках этой модели получено общее выражение для туннельного тока через связанные локализованные состояния, из которого следует немонотонный характер ВАХ туннельного перехода, найдены значения энергии связанных локализованных состояний, лежащих в энергетической щели, для квазиодномерного и квазидвумерного характера плотности электронных состояний исследуемых образцов на границе спектра соответственно:

$$\tilde{E}_d = E_v + \frac{1}{W_1} \left(\frac{V^2}{E_v - E_d} \right)^2,$$

$$\tilde{E}_d = E_v + W_2 \exp \left(-W_2 \frac{\tilde{E}_d - E_d}{V^2} \right),$$

где E_v — граница валентной зоны, V — амплитуда туннелирования, W_1 и W_2 — характерные ширины зон. Отсюда следует, что положение уровней зависит от напряжения на контакте и расстояния между электродами.

Исследовано влияние внутриузельного кулоновского отталкивания электронов на положение уровней. Получена оценка радиуса локализации этих состояний

$$R_0 \approx a \left(\frac{W}{\tilde{E}_d - E_v} \right)^{1/D},$$

где D — размерность исследуемой структуры, a — ее период.

Рассмотрено нестационарное туннелирование из локализованных состояний при наличии кулоновских корреляций. Получена временная зависимость туннельного тока и оценены его относительные флуктуации.

Из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что с уменьшением размеров наноструктур вклад локализованных состояний в туннельные процессы может носить определяющий характер и приводить к существенному изменению электронных свойств наноструктур.

Вместе с тем индивидуальные локализованные состояния, образующие резонансные каналы туннелирования, в пределах радиуса локализации можно отождествить с туннельной структурой нанометровых размеров. Однако пока остаются неясными вопросы о возможности создания таких структур с надежно воспроизводимыми и контролируруемыми параметрами.

В заключительной части доклада приведены результаты, демонстрирующие применение наноскопии в физи-

ческих исследованиях и прецизионных измерениях. Среди них: наблюдение диффузии единичных атомов и малых металлических кластеров на поверхности, выявление природы гигантского нелинейно-оптического отражения от неоднородной поверхности металлов, изучение фотопроводимости единичных органических молекул, определение топологии углеродных нанотрубных молекул, диагностика границ раздела, применение СТМ для манипуляций с единичными молекулами, для модификации поверхности и в целях создания датчиков малых перемещений, а также применение АСМ для спектроскопии межатомных взаимодействий, в экспериментах по определению параметров гипотетических дальнотействующих сил и др.

Работа выполнена при частичной поддержке программы "Физика твердотельных наноструктур" (№ 1-032) и проектов РФФИ (№ 93-02-2214) и ISF (No. M5D000).

Список литературы

1. Aksipetrov O A, Nikulin A A, Panov V I, Vasil'ev S I *Solid State Commun.* **73** 411 (1990)
2. Maslova N S, Moiseev Yu N, Panov V I et al. *Phys. Stat. Sol. A* **131** 35 (1991)
3. Маслова Н С, Моисеев Ю Н, Панов В И и др. *ЖЭТФ* **102** 925 (1992)
4. Маслова Н С, Арсеев П И *ЖЭТФ* **102** 1056 (1992)
5. Маслова Н С, Моисеев Ю Н, Савинов С В, Юсупов Р Г *Письма в ЖЭТФ* **58** 524 (1993)
6. Chernozatonskii L A, Fedorov E A, Kosakovskaya Z Ya et al. *Письма в ЖЭТФ* **57** 35 (1993)
7. Todorov T N, Briggs G A D, Sutton A P *J. Phys. Cond. Matter* **5** 2389 (1993)
8. Moiseev Yu N, Panov V I, Savinov S V, Yaminsky I V *J. Vac. Sci. Technol. B* **12** 1690 (1994)