

вением кристалла (поликристалла), который пиннингуются на неоднородностях случайного потенциала. При увеличении температуры выше критической, когда кристалл расплавлен и электроны делокализуются, сигнал интегральной люминесценции возрастает и перестает зависеть от величины магнитного поля.

Очень интересной оказывается фазовая диаграмма перехода жидкость — кристалл. Согласно известным теоретическим представлениям, линия фазового равновесия в плоскости $\nu - T$ берет начало при $\nu \leq \nu_{cr}$ и ведет себя монотонно. По нашим наблюдениям (рис. 3) фазовая диаграмма жидкость — кристалл изрезана провалами при $\nu = 1/5, 1/7$ и $1/9$, где оказываются более устойчивыми состояния НФЖ.

Нам представляется, что наиболее интересные направления исследований в этой области в ближайшее время будут связаны с изучением фазовой диаграммы жидкость — кристалл в координатах (n_s, T, H) , и самого спектра коллективных возбуждений электронной кристаллической фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ando T., Fowler A., Stern F.* // *Rev. Mod. Phys.* 1982. V. 54. P. 437.
2. *Wigner E. P.* // *Phys. Rev.* 1934. V. 46. P. 1002.
3. *Grimes C.C., Adams G.* // *Phys. Rev. Lett.* 1979. V. 42. P. 795.
4. *Deville G.* // *J. Low-Temp. Phys.* 1988. V. 72. P. 135.
5. *Imada M., Takahashi M.* // *J. Phys. Soc. Japan.* 1984. V. 53. P. 3770.
6. *Von Klitzing K., Dordav G., Pepper M.* // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 45. P. 494.
7. *Kvantовый эффект Холла / Под ред. Р. Пранге, С. Гирвина.*— М.: Мир, 1989.
8. *Tsui D. C., Störmer H. L., Gossard A. C.* // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V. 48. P. 1559.
9. *Laughlin R. B.* // *Ibidem.* 1983. V. 50. P. 1395.
10. *Goldman V. J., Shayegan M., Tsui D. C.* // *Ibidem.* 1988. V. 61. P. 881.
11. *Lam P. K., Girvin S. H.* // *Phys. Rev. Ser. B.* 1984. V. 30. P. 483.
12. *Levesque D., Weiss J.J., MacDonald A. H.* // *Ibidem.* P. 1056.
13. *Chui S. T., Hakim T. M., Ma K. B.* // *Ibidem.* 1986. V. 33. P. 7110.
14. *Kivelson S., Kallin C., Arovas D.P., Schrieffer J. P.* // *Ibidem.* 1987. V. 136. P. 1620.
- [11] *Andrei E. Y., Deville G., Glatthli D. C., Williams F. I. B., Paris E., Etienne B.* // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 60. P. 2765.
12. *Кукушкин И. В., Тимофеев В. Б.* // *Surf. Sci.* 1986. V. 170. P. 1948; *Sov. Sci. Rev. / Ed. I. M. Khalatnikov.*—1988. V. 12.
13. *Kukushkin I. V. et al.* // *Phys. Rev.* 1988. V. 37. P. 8509.
14. *Кукушкин И. В., фон Клитцинг К., Плаут А., Плог К., Буман Х., Йосс В., Мартинес Ж., Тимофеев В. Б.* // *Письма ЖЭТФ.* 1990. Т. 51. С. 575; *Phys. Rev. Lett.* 1990. V. 65. P. 1050.
15. *Буман Х., Йосс В., фон Клитцинг К., Кукушкин И. В., Мартинес Ж., Плаут А., Плог К., Тимофеев В. Б.* // *Письма ЖЭТФ.* 1990. V. 52. P. 925; *Phys. Rev. Lett.* 1990 (in press).

537.543.35

В. С. Эдельман. Развитие сканирующей туннельной микроскопии. Начатое классическими работами Г. Биннига и Г. Рорера развитие сканирующей микроскопии набирает все больший темп. Расширяется круг исследований, развивается инструментальная база, появляются новые идеи, методические приемы, осваиваются комбинации различных методов (см. обзор [1]). Наиболее впечатляющие результаты метода — получение изображений поверхности с атомным разрешением. К настоящему времени подобные измерения перестали быть уникальными и вошли в широкую практику физики твердого тела. Основная проблема при проведении таких работ, если не говорить об особо инертных материалах, таких как пиррографит, это очистка поверхности и сохранение этого

состояния, что обычно достигается обработкой *in situ* (скол, ионное травление, отжиг) в глубоком вакууме. Среди наиболее интересных работ отметим наблюдение границы GaAs — AlGaAs на поперечном сколе тестовой структуры, содержащей чередующиеся слои GaAs—Al_{0,38}Ga_{0,62}As [2]. Было установлено, что переход от одной области к другой происходит в пределах 1—2 постоянных решетки. При исследовании в условиях глубокого вакуума сколов предварительно деформированного арсенида галлия с плотностью дислокаций $\sim 10^8$ см⁻² удалось наблюдать выход дислокаций на поверхность [3]. На СТМ-изображении было видно, что кристаллическая решетка даже в непосредственной близости от ядра дислокации изменяется весьма слабо, а сама дислокация проявляется в том, что от ее ядра начинается ступень двухатомной высоты.

В цикле работ (см. [4] и содержащиеся в ней ссылки) Аворис с соавторами провели элегантное исследование химических реакций в атомном масштабе, дополнив свои предыдущие опыты по взаимодействию Si с NH₃ изучением реакций Si—O₂, Si—N₂O, Si—B₁₀H₁₄ (декаборан), Si—H₂O, причем исследовалась реакция на 7 × 7-реконструированной поверхности Si(111).

В настоящее время исследователи, работающие в области СТМ, стремятся расширить возможности метода путем наблюдения различных нелинейных эффектов. Открывающиеся здесь перспективы продемонстрируем на нескольких характерных примерах.

1. *СТМ в условиях оптического фотовозбуждения.* Освещение области туннельного контакта вызывает фотовольтаический эффект. Это явление наблюдалось в [5]. Фото-э.д.с. отражает структуру поверхности в атомном масштабе, и на ее величину сильно влияют дефекты. Так, сорбированный на поверхности атом кислорода приводит к спаду фото-э.д.с. в об-

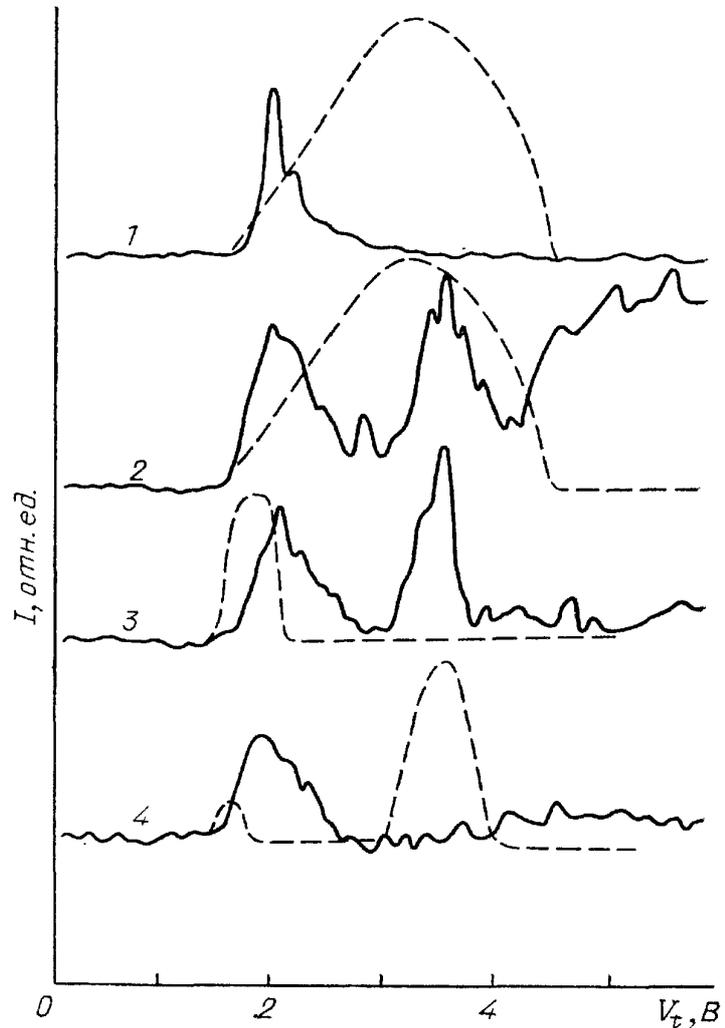


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения I от напряжения на туннельном промежутке V_T для туннельного промежутка Au—Au (1) и для случая, когда образец Au покрыт монослоем фталоцианина меди (2—4). При измерении зависимостей 3, 4 перед ФЭУ устанавливался фильтр с областью прозрачности около 1,8 или 3,6 эВ соответственно (области прозрачности показаны штриховыми линиями). Штриховые линии на 1, 2 — спектральная чувствительность ФЭУ [7]

ласти с размерами ~ 2 нм из-за роста скорости рекомбинации электронно-дырочных пар. Ускорение рекомбинации обусловлено, по-видимому, нарушением трансляционной симметрии на поверхности.

2. *Излучение света из туннельного промежутка.* Первые эксперименты по детектированию света, излучаемого при неупругом туннелировании в СТМ [6], показали, что для систематического исследования этого эффекта надо увеличивать светосбор. Довольно простой прием увеличения телесного угла светосбора θ до значения $\sim \pi$ предложен в [7]. В этой работе острие СТМ формировалось следующим образом. С конца световолокна удалялся наружный слой и на освободившуюся кварцевую сердцевину диаметром ~ 100 мкм наносился тонкий слой металла (Ag, Au, Pt). Затем кварцевое волокно переламавалось, так что открывался торец кварца для приема фотонов, а металлическое покрытие по периметру могло служить острием СТМ. Другой конец световода подводился к ФЭУ непосредственно или между ними размещался светофильтр.

С таким фото-СТМ удалось принимать излучение от поверхностных плазмонов и показать, что их спектр зависит от материала как образца, так и острия. Один из спектров для пары Au — Au показан на рис. 1. Было так же продемонстрировано резонансное возбуждение и излучение света примесными молекулами. Для этого на поверхность пленки Au был напылен фталоцианин меди с расчетной толщиной ~ 1 монослой. В этом случае появилось дополнительное излучение при $\sim 3,5$ В, причем этот пик соответствует генерации фотонов с энергией ~ 2 эВ (рис. 1). По-видимому, механизм излучения таков: возбуждение известного перехода в спектре фталоцианина 3,6 эВ и затем усиленный взаимодействием с поверхностным плазмоном близкой частоты переход на уровень $\sim 1,8$ эВ либо с этого уровня на основное состояние.

Весьма интересные возможности, открывающиеся при фотолюминесценции в полупроводниках, были продемонстрированы в работе [8]. В ней изучались поперечные сколы многослойных структур GaAs — AlGaAs. Сколы делались *in situ* в глубоком вакууме. Было установлено, что при напряжении на туннельном промежутке $U_T = -2$ В светятся только слои GaAs. Интенсивность излучения быстро спадает при перемещении острия в область AlGaAs — примерно на порядок на первые 100 нм от границы слоев, и далее имеется более медленно спадающий «хвост». По-видимому, это явление связано с диффузией энергичных электронов в слой GaAs и, таким образом, может служить для изучения релаксации энергии электронов в полупроводниках. Методом СТМ-люминесценции можно локализовать слои GaAs с точностью ~ 2 нм и выявить слои толщиной 5 и даже 2 нм.

3. *Контраст изображения, обусловленный различием вольт-амперных характеристик.* В многослойных структурах с близким к методу фотолюминесценции разрешением слои могут быть выявлены и способом «токовых изображений», основанным на различии вольт-амперных характеристик разных слоев [9]. В этом случае, даже если скол сделан при атмосферных условиях, удастся выделять слои разного состава с разрешением 5—50 нм (в зависимости от физических свойств материалов по обе стороны границы) и выделять слои шириной ~ 10 нм (рис. 2).

Важное приложение СТМ — исследование высокотемпературных сверхпроводников. Хотя у ВТСП типа Y—Ba—Cu—O поверхностный слой по составу обычно не соответствует объему, что делает невозможным сканирование по поверхности с атомным разрешением, оказалось возмож-

ным получать распределение энергетической щели с разрешением порядка 0,1 мкм, выявить ее связь с составом материала и установить наличие неоднородности материала на размерах порядка 0,1–1 мкм. Для ВТСП

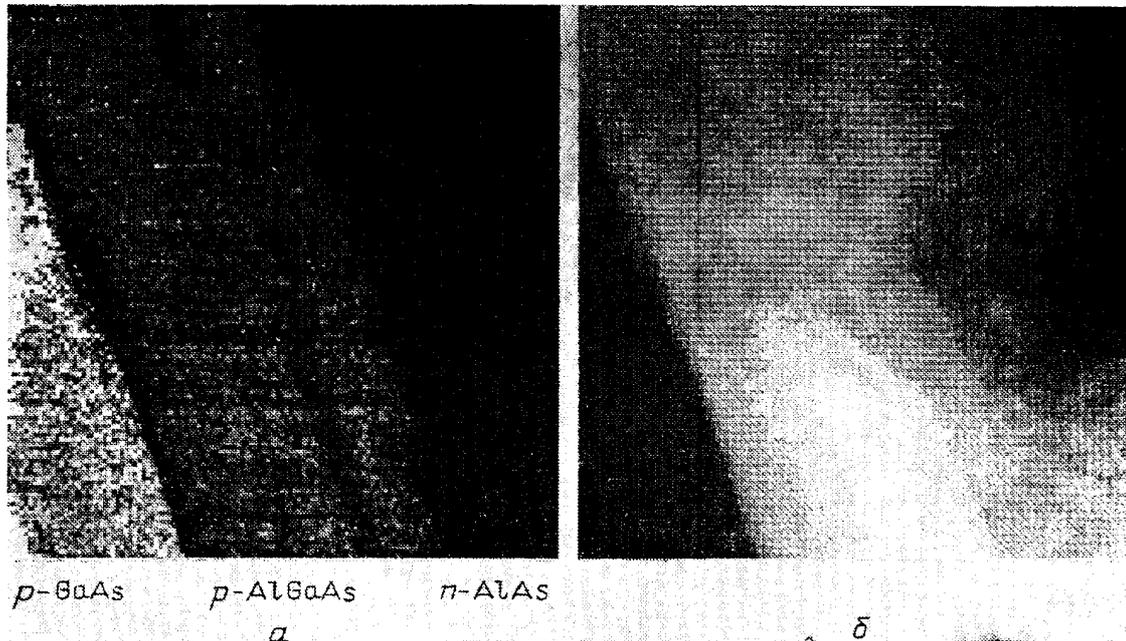


Рис. 2. Топограмма (б) и токовое изображение (а) поперечного скола многослойной структуры на основе GaAs. Размеры кадра 630×520 нм², диапазон изменения z-координаты 66 нм; изменения тока 1,8 нА при переключении напряжения образец — острое от -5 до $+5$ В [9]

типа Bi—Sr—Ca—Cu—O удалось при низких температурах наблюдать сверхструктуру с периодом порядка 27 Å, т. е. вплотную приблизиться к атомному разрешению [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдельман В. С. // ПТЭ. 1989. № 5. С. 25.
2. Albreksten O., Arent D.J., Meier H.P., Salemink H. W. M. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 31.
3. Cox G., Szyuka D., Poppe U., Graf K. H., Urban K. // Phys. Rev. Lett. 1990, V. 64. P. 2402.
4. Avouris Ph. // J. Phys. Chem. 1990. V. 94. P. 2246.
5. Hamers R. J., Market K. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 1051.
6. Gimzewski J. K., Reihl B., Combs J. H., Schlittler R. R. // Zs. Phys. Kl. B. 1988. Bd 72. S. 497.
7. Смольянинов И. И., Хайкин М. С., Эдельман В. С. // Письма ЖЭТФ. 1990. Т. 52-С. 830.
8. Abraham D. L., Veider A., Schonenberger Ch., Meier H.P., Arent D.J., Alvarado S. F. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. P. 1564.
9. Трояновский А. М., Хайкин М. С., Эдельман В. С. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 1359.
10. Volodin A. P., Khaikin M. S., Stepanyan G. A. // High T_c from Russia.— Singapore a.o.: World Scientific, 1989.— P. 201.