

06;11;12

Применение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) для исследования локальной фотопроводимости квантоворазмерных полупроводниковых структур

© В.Я. Алешкин, А.В. Бирюков, С.В. Гапонов,
З.Ф. Красильник, В.Л. Миронов

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 27 января 1999 г.

Показана возможность применения СТМ для регистрации спектров фотопроводимости полупроводниковых квантоворазмерных структур с высоким пространственным разрешением. Исследована локальная фотопроводимость квантовых ям и квантовых точек на основе GaAs/In_xGa_{1-x}As в зависимости от глубины залегания квантоворазмерной структуры относительно приповерхностной области пространственного заряда. Для квантовых точек вблизи поверхности образца получены спектры, содержащие особенности, связанные с их индивидуальным энергетическим спектром.

Стандартные методы исследования фотопроводимости фотолюминесценции полупроводниковых структур с квантовыми ямами и квантовыми точками позволяют получать информацию, усредненную по области наблюдения, которая значительно превышает характерные латеральные масштабы в структуре — размеры квантовых точек, масштабы неоднородностей легирования квантовых ям и др. [1–3]. Применение методов зондовой микроскопии позволяет существенно увеличить

пространственное разрешение за счет уменьшения апертуры пучка возбуждающего или принимаемого излучения. Основные успехи в этом направлении связаны с использованием ближнепольного оптического микроскопа для исследования фотопроводимости [4,5] и фотолюминесценции [6–8] квантоворазмерных структур. Однако, на наш взгляд, особенно перспективным представляется изучение локальной фотопроводимости таких структур по фотоотклику в туннельном токе сканирующего туннельного микроскопа, поскольку использование туннельного контакта в качестве датчика фототока позволяет локализовать область зондирования в пределах одной квантовой точки.

В данной работе приводятся результаты исследований локальной фотопроводимости квантовых ям и квантовых точек на основе GaAs/In_xGa_{1-x}As с помощью СТМ, сопряженного с оптической системой [9]. Идея эксперимента состояла в наблюдении зависимости тока туннельного контакта между зондом СТМ и полупроводниковой структурой от длины волны возбуждающего излучения. Для оптической накачки использовалось излучение галогенной лампы, пропущенное через монохроматор МДР-23 и пассивный фильтр КС-19, отсекающий видимую часть спектра. С помощью многожильного световода монохроматическое излучение подводилось к полупроводниковой структуре со стороны подложки, служившей фильтром, отсекавшим кванты света с энергией большей, чем ширина запрещенной зоны GaAs. Благодаря этому фотоносители генерировались только в In_xGa_{1-x}As. Исследовались эпитаксиальные структуры GaAs/In_xGa_{1-x}As [3], обладающие проводимостью *n*-типа и имеющие вольт-амперную характеристику (ВАХ) туннельного контакта, типичную для барьера Шоттки. Удержание зонда над поверхностью осуществлялось системой обратной связи СТМ в режиме $j_t = \text{const}$ при напряжении, соответствующем прямой ветви ВАХ. Фототок измерялся как разность между током в обратной ветви ВАХ при освещении контакта и темновым током.

Пространственное разрешение предлагаемой методики существенным образом зависит от глубины залегания квантоворазмерной структуры относительно приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ). Если квантовая яма или слой квантовых точек находятся вне ОПЗ, то латеральный размер области, с которой фотоносители собираются на зонд СТМ, порядка длины диффузии носителей в GaAs ($\sim 1 \mu\text{m}$). Если квантовая яма находится в ОПЗ, то на пространственное разрешение решающее влияние оказывают такие факторы, как диффузия

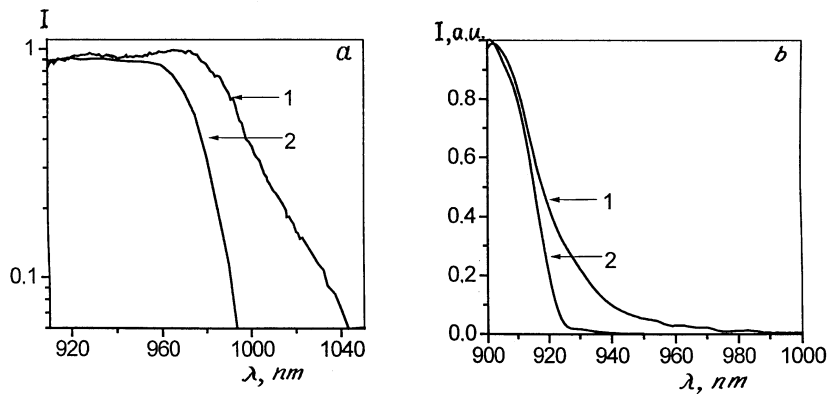


Рис. 1. Спектры фотопроводимости структур, содержащих квантовую яму GaAs/In_xGa_{1-x}As (*a*) и слой квантовых точек GaAs/InAs (*b*). Толщина покрывающего слоя GaAs составляет 250 и 320 nm соответственно. Кривые *I* получены с помощью стандартной методики измерения фототока на макроконтактах. Кривые 2 получены посредством регистрации локального фотоотклика в СТМ.

носителей вдоль ямы до момента ухода вследствие термоактивации или туннелирования, пролет фотоносителей в сильном приповерхностном поле (оно составляет $\sim 10^5$ V/cm) и процесс захвата их на глубоких поверхностных состояниях. Для квантовых точек, находящихся вблизи поверхности, роль диффузионных процессов становится несущественной и пространственное разрешение, в принципе, может быть доведено до размеров волновой функции неосновных носителей на одной квантовой точке.

Эксперименты показали достаточно сильную зависимость величины фототока СТМ от интенсивности и длины волны возбуждающего света. На рис. 1 приведены спектры фотовозбуждения гетероструктуры In_xGa_{1-x}As/GaAs с квантовой ямой, расположенной на глубине ~ 250 nm, и гетероструктуры, содержащей слой квантовых точек InAs в GaAs на глубине ~ 320 nm. СТМ спектры сравнивались со спектрами, полученными с помощью стандартной методики измерения фототока через нанесенные на образец макроконтакты диаметром ~ 500 μ m [3]. Как показали эксперименты, спектры фотопроводимости, полученные

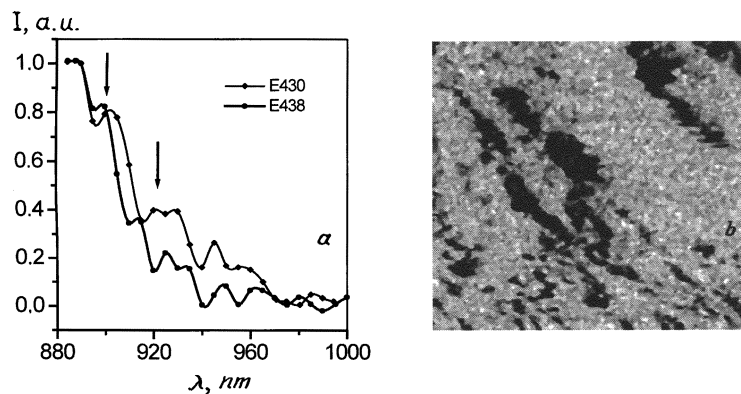


Рис. 2. (а) — СТМ спектры фотопроводимости структур с квантовыми точками InAs/GaAs, расположенными в приповерхностной области. Толщина покрывающего слоя для образца E438 составляет 2 nm, для образца E430 — 1.5 nm. (б) — распределение фотоотклика по поверхности образца, содержащего квантовую яму на глубине 250 nm. Размер кадра $1 \times 1 \mu\text{m}$.

на СТМ, имеют более резкий длинноволновый край, ответственный за поглощение на уровнях размерного квантования. Это может объясняться тем, что область, с которой собираются фотоносители на зонде СТМ, существенно меньше размеров макроконтатов, и, следовательно, меньше степень размытия спектра из-за флуктуаций толщины и состава слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

На рис. 2 (а) приведены спектры фотопроводимости слоев квантовых точек, выращенных вблизи поверхности образца. Для предотвращения окисления такие структуры погружались в вакуумное масло непосредственно после роста, так что спектры снимались с туннельного контакта, осуществляемого через масляную прослойку. В этом случае процессы диффузии были несущественны, и наблюдалась тонкая структура длинноволнового края фотовозбуждения (показана на рисунке стрелками), которая связывается с уровнями размерного квантования в квантовых точках и в тонком смачивающем слое InAs.

Наряду со спектральными измерениями проводились исследования неоднородности распределения величины фотоотклика по поверхности

образцов. Для этого при сканировании образца в каждой точке кадра петля обратной связи разрывалась, и записывалось значение тока в обратной ветви полупроводниковой характеристики. На рис. 2 (b), в качестве примера, приведено распределение фотоотклика по поверхности структуры с квантовой ямой, расположенной на глубине 250 nm. Темные области на рисунке соответствуют участкам структуры, в которых фотоотклик отсутствует. Контраст изображения может определяться как неоднородностью квантовой ямы, так и локальными электрическими свойствами покрывающего слоя, поэтому для корректной интерпретации требуются дополнительные исследования морфологии и свойств покрывающего слоя.

Таким образом, в работе показана возможность применения СТМ для регистрации локальной фотопроводимости квантоворазмерных структур с высоким пространственным разрешением. Для структур с квантовыми точками на поверхности образца возможна локализация области зондирования в пределах одной квантовой точки, что позволяет изучать ее индивидуальный энергетический спектр.

Авторы выражают благодарность Д.Г. Ревину за помощь в работе, А.В. Мурелю за предоставленные данные по измерению фотопроводимости на макроконтактах, а также О.И. Хрыкину и В.М. Данильцеву за предоставленные образцы.

Работа выполнена при поддержке программы ГКНТ "Фундаментальная метрология" (проект 3.45) и РФФИ (гранты 96-02-16990а, 98-02-16625).

Список литературы

- [1] *Leitch A.W., Ehlers H.L.* // *Infrared Phys.* 1988. 28. N 6. P. 433–440.
- [2] *Marzin J.-Y., Gerard J.-M., Izraël A.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. N 5. P. 716–719.
- [3] *Алешкин В.Я., Гапонова Д.М., Гусев С.А.* и др. // *ФТП.* 1998. Т. 32. № 1. С. 111–116.
- [4] *Buratto S.K., Hsu J.W.P., Betzig E.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. N 21. P. 2654–2656.
- [5] *Ünlü M.S., Goldberg B.B., Herzog W.D.* // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. N 13. P. 1862–1864.

- [6] *Grober R.D., Harris T.D., Trautman J.K.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64. N 11. P. 1421–1423.
- [7] *Harris T.D., Gershoni D., Pfeiffer L.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 1996. V. 11. P. 1569–1574.
- [8] *Chavez-Pirson A., Temmyo J., Kamada H.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72. N 26. P. 3494–3496.
- [9] *Волгунов Д.Г., Гапонов С.В., Дряхлушин В.Ф.* и др. // *Приборы и техника эксперимента.* 1998. № 2. С. 132–137.