

ПРОЯВЛЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ В СПЕКТРАХ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОК InGaAs/GaAs

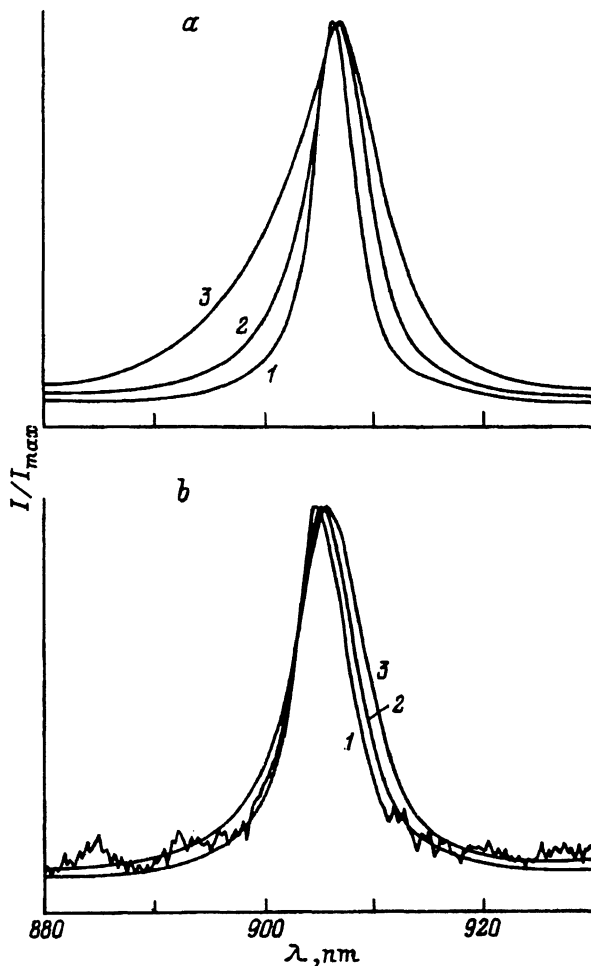
*С.А.Гуревич, Л.Г.Гладышева, С.О.Когновицкий, С.И.Котановский,
И.В.Кочнев, С.И.Нестеров, В.И.Скопина, В.Б.Смирницкий,
В.В.Травников, С.И.Трошков, А.С.Усиков*

Полупроводниковые квантовые проволоки являются в настоящее время объектом пристального внимания исследователей, что обусловлено их необычными физическими свойствами [1-4]. Основная часть работ по исследованию квантовых проволок была посвящена изучению поляризационной анизотропии оптических переходов и особенностей структуры энергетических уровней в квантовых проволоках (см., например, [2-4] и ссылки в них). Вместе с тем авторам не известны работы, которые были бы посвящены исследованию такого специфического свойства квантовых проволок как уменьшение плотности состояний с ростом энергии. Целью данной работы была демонстрация проявления этого свойства в спектрах люминесценции квантовых проволок.

Образцы с квантовыми проволоками изготавливались на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, выращенных методом МOCVD и содержащих квантовую яму $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 10 нм, которая заключена между слоями нелегированного GaAs. На поверхности пластины методом голографической фотолитографии создавалась маска в виде узких параллельных полос из плазموустойкого фоторезиста (с периодом маски 200 нм), после чего производилось реактивное ионное травление образцов в плазме $\text{Cl}_2 : \text{BCl}_3 : \text{N}_2$. В результате травления образовывался периодический рельеф поверхности, так что внутри каждого гребня находилась полоса $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ шириной 80 нм. Окончательное формирование квантовых проволок происходило в процессе подтравливания и последующего зарощивания структур арсенидом галлия методом хлорид-гидридной эпитаксии из газовой фазы. В зарощенных структурах ширина квантовых проволок 30-50 нм. Более детально методика изготовления квантовых проволок будет изложена в отдельной статье.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) полученных образцов исследовались при температуре жидкого азота, возбуждение ФЛ осуществлялось линиями аргонового лазера.

Спектры ФЛ исходных (контрольных) образцов с квантовыми ямами и образцов с квантовыми проволоками исследовались в смежных точках, которые на плоскости исходной пластины были удалены друг от друга не далее 1 мм. В таких смежных точках положение максимумов полос ФЛ в образцах с квантовыми проволоками сдвигалось в коротковолновую сторону относительно максимумов ФЛ квантовых ям. Сдвиг достигал $\sim 7 \text{ meV}$. Обнаруженный сдвиг демонстрирует проявление дополнительного (по отношению к квантовой яме) квантования энергетических уровней в квантовых проволоках [3].



Спектры ФЛ исходного (а) и обработанного (б) образцов при трех значениях интенсивности возбуждающего света.

I_{ex} ($W \cdot cm^{-2}$): 1 — 1, 2 — 15, 3 — 500. Для удобства сравнения спектров интенсивности в максимумах линий приравнены друг другу.

На рисунке представлены спектры люминесценции исходного (квантовая яма) и обработанного (квантовая проволока) образцов при трех значениях интенсивности возбуждающего света I_{ex} . В обработанном образце при увеличении I_{ex} наблюдаются небольшое уширение полосы ФЛ и смещение максимума в длинноволновую сторону. Аналогичное смещение максимума наблюдается и в исходном образце. Однако в этом случае уширение существенно больше и оно носит выраженный асимметричный характер: у полосы появляется затянутый коротковолновый хвост.

Формирование спектра ФЛ квантовых ям рассмотрено в большом числе работ (см. [5] и ссылки в ней). По своей природе излучение в области максимума полосы ФЛ квантовых ям обычно соответствует экситонной рекомбинации. В длинноволновую часть полосы основной

вклад дают локализованные экситонные состояния, а в коротковолновую — межзонные переходы. Уширение полосы ФЛ носит в основном неоднородный характер, связанный с вариацией ширины квантовой ямы и флуктуациями состава твердого раствора.

Как видно из рисунка, при минимальной величине I_{ex} полуширина полос ФЛ образцов с квантовыми проволоками заметно (на 20–30%) превышает полуширину полос ФЛ контрольных образцов. Это, очевидно, связано с появлением дополнительного неоднородного уширения, обусловленного разбросом ширины квантовых проволок и появлением дополнительных центров локализации экситонов на вновь создаваемых интерфейсах.

Наблюдаемое с ростом I_{ex} смещение максимумов полос люминесценции квантовых проволок и квантовых ям в длинноволновую сторону частично, по-видимому, связано с разогревом решеточной подсистемы и соответствующим длинноволновым сдвигом края зоны под действием интенсивного фотовозбуждения. С ростом I_{ex} возможно также существенное увеличение эффективной температуры в экситонной и электронной подсистемах [6,7]. В системе локализованных экситонных состояний их взаимодействие с «горячими» фононами и электронами приводит к увеличению энергетической диффузии слаболокализованных экситонов в более глубокие состояния [8], что, по-видимому, является причиной относительного увеличения интенсивности длинноволновых крыльев и частично ответственно за наблюдаемое длинноволновое смещение максимумов.

Разогрев в подсистеме свободных экситонов с ростом I_{ex} приводит к увеличению вероятности заполнения состояний с большей энергией и, как следствие диссоциации экситонов к увеличению относительной концентрации свободных электронов, эффективная температура которых с ростом I_{ex} также увеличивается. В результате в квантовых ямах, где функция плотности состояний имеет ступенчатый характер, с ростом I_{ex} происходит существенное увеличение интенсивности коротковолнового крыла полосы ФЛ. В отличие от этого в квантовых проволоках плотность состояний по мере удаления от резонансов с ростом энергии быстро уменьшается ($P(E) \propto E^{-1/2}$), поэтому разогрев экситонов и носителей не может привести к существенному увеличению интенсивности излучения в коротковолновой области.

Таким образом, полученные результаты позволили обнаружить в спектрах ФЛ проявление специфического характера одномерной плотности состояний в созданных нами квантовых проволоках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Sakaki H. // Jap. J. Appl. Phys. 1980. V. 19. P. L735.
- [2] Kash K. // J. Lum. 1990. V. 46. N 1. P. 69–82.
- [3] Kohl M., Heitmann D., Grambow P., Ploog K. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. N 5. P. 2941–2950.
- [4] Weman H., Miller M.S., Pryor C.E., Li Y.J., Bergman P., Petroff P.M., Merz J.L. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 11. P. 8047–8060.
- [5] Herman M.A., Bimberg D., Earisten J. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 2. P. R1–R52.

- [6] Жиляев Ю.В., Маркарян Г.Р., Россин В.В., Россина Т.В., Травников В.В. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 9. С. 2688–2695.
[7] Aaviksoo J., Reimand I., Rossin V.V., Travnikov V.V. // Phys. Rev. B. 1992. V. 43. N 3. P. 1473–1476.
[8] Ashkinadze B.M., Cohen E., Ron A., Pfeiffer L. // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 16. P. 10613–10618.

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
22 декабря 1993 г.

© Физика твердого тела, том 36, № 6, 1994
Solid State Physics, vol. 36, N 6, 1994

ГЕНЕРАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ В МАЛЫХ КЛАСТЕРАХ СЕРЕБРА НА ГРАФИТЕ

*Ю.С.Гордеев, М.В.Гомоюнова, В.М.Микушкин,
И.И.Пронин, С.Е.Сысоев*

Важным вопросом при изучении электронных свойств кластеров является установление закономерностей формирования в них плазменных колебаний в зависимости от размера частиц. Имеющиеся в этой области результаты получены главным образом с помощью оптических методов, а также методом спектроскопии потерь энергии электронов (СПЭЭ) на прострел [1]. При этом большинство данных относится к области достаточно больших частиц диаметром выше 100 Å и вопрос определения минимальных размеров кластеров, в которых могут существовать коллективные моды электронных возбуждений, до сих пор не решен.

Целью настоящего исследования было изучение размерного эффекта в спектре плазменных колебаний малых кластеров серебра, сформированных на поверхности графита. Основные результаты получены с помощью СПЭЭ на отражение. Нам известна лишь одна работа [2], в которой данный метод ранее использовался для изучения кластеров и была обнаружена размерная зависимость одной из характеристических одноэлектронных потерь энергии в кластерах меди на графите.

Настоящая работа выполнена на электронном спектрометре LHS-11 фирмы «Leibold-AG», обладавшем энергетическим разрешением $\Delta E = 1.1$ eV. Измерения проводились в режиме счета отдельных импульсов при токах первичного пучка 10^{-8} Å. Энергия падающих электронов варьировалась в диапазоне 0.2 – 1.5 keV. Кластеры формировались *in situ* напылением серебра на поверхность пиролитического графита, очищенную методом скола в сверхвысоком вакууме. Более подробно этот процесс описан в работе [3]. Средний радиус частиц, монотонно увеличивающийся с дозой напыленного Ag, оценивался в соответствии с данными работ [4,5] и варьировался в интервале от 3 до 20 Å. Контроль состояния поверхности образцов проводился методами рентгено-электронной и оже-спектроскопии. При этом особое