

СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОСТРУКТУР GaAs/AlGaAs С СУБМИКРОНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА БЛИЖНЕГО ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Д.В.Казанцев, Н.А.Гуппиус*, Дж.Ошиново⁺, А.Форхель⁺

Физический институт РАН
117333 Москва, Россия

*Институт общей физики РАН
117333 Москва, Россия

⁺ Technische Physik, Universität Würzburg
Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany

Поступила в редакцию 13 декабря 1995 г.

После переработки 1 февраля 1996 г.

С помощью созданного сканирующего микроскопа ближнего оптического поля (SNOM) были исследованы полосы шириной от 1 до 5 мкм на поверхности GaAs, содержащие слой – квантовую яму толщиной 10 нм. Получена карта интенсивности фотолюминесценции синхронно с топографическим профилем структур. Измеренное пространственное распределение интенсивности фотолюминесценции удовлетворительно описывается в рамках модели, учитывающей диффузию носителей в слое и существование области с малым временем жизни вблизи боковых границ слоя.

PACS: 73.61.-г

Перспективным направлением нанoeлектроники и оптоэлектроники является изготовление структур с пониженной размерностью – так называемых квантовых точек и квантовых нитей. Предполагается, что квантовый выход люминесценции в таких структурах должен быть выше, чем в объемном полупроводнике, за счет большей локализации носителей. Один из методов формирования таких структур состоит в том, что на поверхности полупроводника выращивается вначале двумерный активный слой толщиной несколько десятков нанометров (например, GaAs, окруженный AlGaAs для создания потенциального барьера), а затем с использованием электронной литографии часть слоя стравливается так, что остаются полосы (квантовые нити) или островки (квантовые точки) малых размеров с активным слоем внутри. Однако интенсивность фотолюминесценции наноструктур, полученных таким путем, оказывается значительно ниже ожидаемой. Распространенным объяснением является низкое качество границы структуры, на которой вероятность безызлучательной рекомбинации высока, однако нарушенный пограничный слой все же является для носителей потенциальной ямой той же глубины, что и остальная часть структуры. Это видно из размерного квантования спектров при уменьшении размера объектов, контролируемого на сканирующем электронном микроскопе. Таким образом, для улучшения качества квантовых точек и квантовых нитей необходимо более полное исследование свойств границы травления.

Пространственное распределение концентрации носителей может быть определено из распределения интенсивности люминесценции, однако субмикронные размеры структур с пониженной размерностью (квантовых точек и квантовых нитей) накладывают определенные технические ограничения, и это объясняет

малость числа работ, посвященных получению карты люминесценции наноструктур [1–3].

Нами были исследованы образцы, содержащие рабочий слой с квантовой ямой GaAs толщиной 10.6 нм, окруженный слоями $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$ толщиной 25–30 нм. Данная структура была выращена в установке молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности пластины GaAs по методике, описанной в [4].

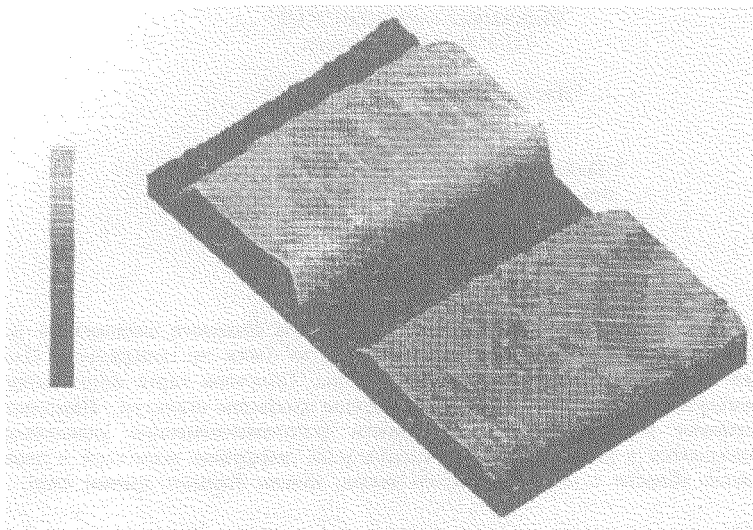


Рис.1. Топографическое изображение участка поверхности с шириной активных полос 2 мкм и расстоянием между ними 2 мкм. Радиус острия 0.7 мкм. Серая шкала соответствует 160 нм по вертикали, размер раstra сканирования 8 мкм (поперек полос) × 4.6 мкм (вдоль полос)

С помощью электронно-лучевой литографии и последующего жидкофазного травления на поверхности образца были оставлены полосы, содержащие активный слой GaAs, ширина которых задавалась нами от 5 мкм до 0.5 мкм. Во всем остальном, кроме ширины полос, техника приготовления не отличалась от применяемой на том же оборудовании для формирования квантовых точек и квантовых нитей с размерами до 8 нм. Области с различной шириной активной полосы были сформированы рядом на поверхности одного и того же образца, что позволило считать условия эксперимента для разных структур неизменными. С помощью изготовленного нами сканирующего микроскопа ближнего оптического поля (SNOM) производилось сканирование поверхности с синхронной записью рельефа и спектров люминесценции в каждой точке. Топографическое изображение участка исследованной поверхности приведено на рис.1. Радиус острия оптического волокна, использованного для сканирования, составлял 1 мкм, и в нанесенном на него алюминиевом покрытии было сформировано отверстие-диафрагма. Калибровка диаметра отверстия, проведенная с помощью образца, в слое золотого покрытия на котором нанесены отверстия, позволяет считать, что диаметр диафрагмы на игле не превышает 0.3–0.4 мкм. Луч лазера (длина волны 514 нм) для возбуждения люминесценции вводился с противоположного конца волокна, и поступивший обратно в волокно через отверстие-диафрагму сигнал люминесценции фокусировался затем на входную

цель монохроматора. В качестве детектора была использована ПЗС-матрица, охлаждаемая жидким азотом. Расстояние 30 нм между зондирующим волокном и образцом контролировалось с помощью вибрационного лазерного датчика. Измерения проводились при комнатной температуре.

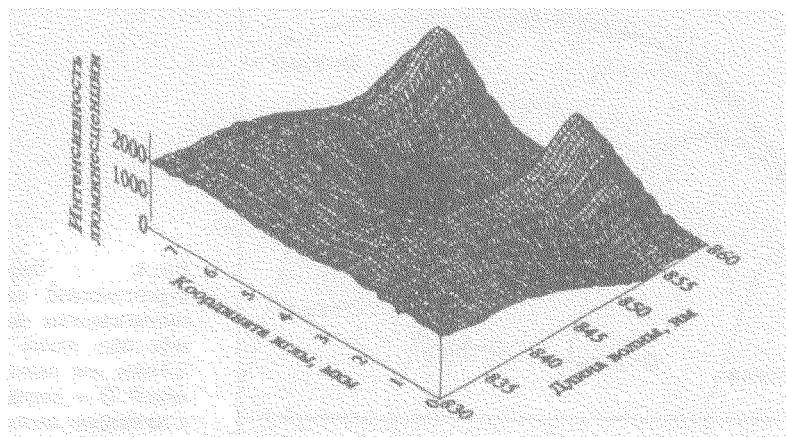


Рис.2. Серия последовательно полученных спектров люминесценции при сканировании поперек направления полос

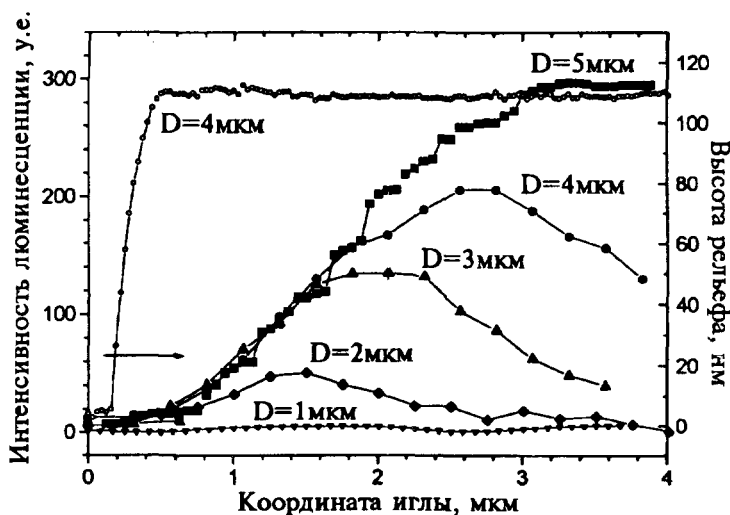


Рис.3. Зависимость интенсивности пика люминесценции $1\text{h}\text{h}\text{-1e}$ от положения иглы при пересечении активной полосы на поверхности. Семейства точек соответствуют различной ширине D активной полосы. Приведенное сечение полученного синхронно топографического изображения для полосы шириной $D = 4\text{ мкм}$ демонстрирует неизменность расстояния игла – поверхность в ходе сканирования

На рис.2 изображена эволюция спектра люминесценции при пересечении на образце в ходе сканирования двух полос шириной 2 мкм, содержащих исследуемый активный слой. Перемещение иглы в плоскости образца (сторона растра сканирования) равна 8 мкм. Хорошо виден пик $1\text{h}\text{h}\text{-1e}$ в спектре,

соответствующий рекомбинации экситона, образованного электроном и тяжелой дыркой на нижних уровнях размерного квантования по оси Z , нормальной к поверхности. Зависимости интенсивности люминесценции от положения иглы над образцом для различных ширин активной полосы приведены на рис.3.

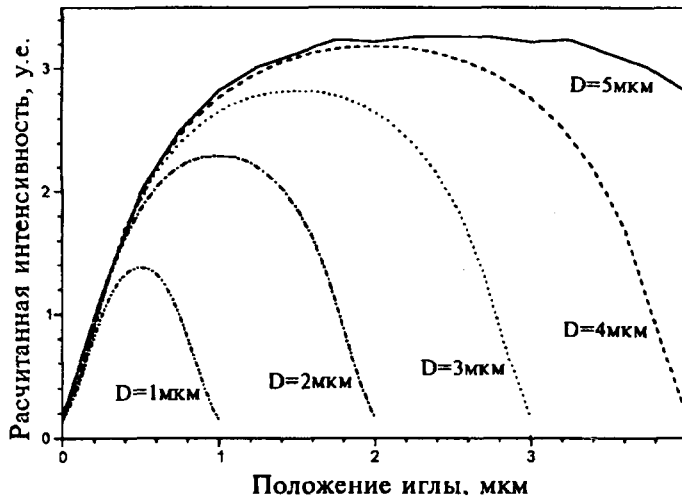


Рис.4. Расчет пространственной зависимости интенсивности люминесценции при длине диффузии 2.5 мкм для различных значений D - ширины полосы с активным слоем

Сечение зарегистрированного синхронно профиля поверхности образца с шириной полос 4 мкм, приведенное на рис.3 для сравнения, позволяет убедиться в корректности измерений: на участках изменения сигнала люминесценции высота иглы над поверхностью сохранялась неизменной. Все зависимости для структур разных размеров получены подряд в ходе одного эксперимента без подстройки оптической части, поэтому вертикальный масштаб для всех кривых общий. Также можно считать одинаковым для всех кривых диаметр отверстия на зонде.

При объяснении наблюдаемого поведения нами было использовано предположение о том, что основным процессом, ответственным за поведение концентрации носителей в плоскости образца является диффузия носителей в слое. Уравнение диффузии было численно решено на ЭВМ, и при подгонке зависимостей дополнительно нами было использовано предположение о существовании области с малым временем жизни вблизи боковой границы слоя (по существу, нулевое граничное условие для концентрации носителей). Данный подход уже применялся [5,6] при описании кинетики спада фотолюминесценции в аналогичных структурах. При расчетах для всех образцов использовались одинаковые значения времени жизни, коэффициента диффузии и параметры "мертвого слоя". Распределение интенсивности поля накачки в области диафрагмы, а также аппаратная функция диафрагмы при собирании сигнала люминесценции в волокно аппроксимировались гауссовой функцией с характерным радиусом 200 нм.

Результаты расчетов приведены на рис.4 и демонстрируют лучшее согласие с экспериментальными зависимостями при значениях длины диффузии 2.4–2.5 мкм. Длина диффузии при задании малого времени жизни на границе структуры остается единственным подгоночным параметром задачи. Отметим, что задание малой вероятности безызлучательной гибели носителей на границе структуры (граничные условия, соответствующие нулевому потоку через

границу) приводит в использованной модели к П-образному распределению интенсивности с размытием на краях порядка размера иглы, независимо от выбранных значений времени жизни и коэффициента диффузии.

Таким образом, продемонстрирована возможность оптических исследований полупроводниковых структур с субмикронным пространственным разрешением, и измеренное распределение носителей удастся удовлетворительно описать в рамках диффузионной модели.

Авторы благодарят В.И.Соустина за изготовление деталей механической головки, а также Р.Штеффена за помощь в приготовлении зондирующих игл и в подготовке текста. Работа частично поддержана грантами программ INTAS (грант 94-2112), "Наноструктуры" (грант 1-041), Российского фонда фундаментальных исследований (95-02-06062а).

-
1. J.W.P.Hsu, E.A.Fitzgerald, Y.H.Xie, and P.J.Silverman, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 344 (1994).
 2. R.D.Grober, T.D.Harris, J.K.Trautman et al., *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1421 (1994).
 3. M.Pfister, M.B.Johnson, S.F.Alvarado et al., *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1168 (1994).
 4. R.Steffen, A.Forchel, and F.Faller, *J. Vac. Sci. Technol. B***12**, 3653 (1994).
 5. G.Mayer, B.E.Maile, R.Germann et al., *Superlattices and Microstructures* **5**, 579 (1989).
 6. G.Mayer, B.E.Maile, R.Germann et al., *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2016 (1990).