

ПОЛУЧЕНИЕ МОС ГИДРИДНЫМ МЕТОДОМ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ GaAs/AlGaAs КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Кузьмин И. А., Машевский А. Г., Строганов Д. Р.,
Федорова О. М., Явич Б. С.

Получены квантово-размерные структуры (КРС), состоящие из слоев GaAs толщиной от 10 до 300 Å, разделенных барьерными слоями $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. Структуры выращивались методом газовой эпитаксии в системе $Ga(CH_3)_3-Al(CH_3)_3-AsH_3-H_2$ в реакторе горизонтального типа при давлении 76 Тор (метод LP MOCVD). На основании исследований энергетического положения и формы экситонных полос фотолюминесценции (77 и 2 К) установлено: а) профиль изменения концентрации алюминия в структурах близок к прямоугольному; б) флуктуации ширины квантово-размерных слоев не превышают двух монослоев; в) указанные флуктуации обусловлены монослойными островковыми неоднородностями на гетерограницах, продольные размеры которых меняются в широких пределах.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком совершенстве КРС, полученных данным методом.

Введение. Для выращивания совершенных GaAs/AlGaAs квантово-размерных структур (КРС) наряду с методом молекулярно-пучковой эпитаксии успешно применяется МОС гидридный метод газовой эпитаксии, обычно реализуемый в проточных реакторах, в объеме которых давление близко к атмосферному [1, 2]. Проведение эпитаксиального процесса при пониженном давлении из диапазона 20–300 Тор (так называемый метод LP MOCVD) открывает дополнительные возможности для выращивания структур с предельно резкими гетеропереходами. Это обусловлено отсутствием застойных и турбулентных зон в таких реакторах и быстрой сменой состава газовой смеси у поверхности подложек [3].

В настоящей работе представлены результаты исследований GaAs/AlGaAs КРС, полученных в реакторе горизонтального типа при давлении 76 Тор. Структуры состояли из нескольких GaAs квантово-размерных слоев, разделенных широкозонными слоями твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.3$). Методом фотолюминесценции (ФЛ) проведено исследование однородности толщины квантовых ям вдоль направления газового потока, резкости гетерограниц и особенностей флуктуаций ширины ям в таких КРС.

Изготовление образцов и методика измерений

Структуры выращивались в потоке газа-носителя водорода. В качестве исходных реагентов применялись триметилгаллий (ТМГ) — $Ga(CH_3)_3$, триметилалюминий (ТМА) — $Al(CH_3)_3$ и разбавленная водородом 10%-я смесь арсина (AsH_3).

Горизонтальный реактор состоял из двух вставленных одна в другую кварцевых труб: наружной — диаметром 8 см, продуваемой очищенным аргоном, и прямоугольной внутренней трубы с сечением 2×6 см. Парогазовая смесь подавалась во внутреннюю трубу реактора. К внешней стороне нижней стенки

этой трубы примыкал плоский резистивный нагреватель, который обеспечивал получение нагретой до заданной температуры зоны роста длиной около 10 см. Размещение подложкодержателя во внутренней трубе осуществлялось с помощью предварительно продуваемого аргоном и вакуумированного пилэзового загрузочного устройства.

Получаемые в данной системе нелегированные слои GaAs и AlGaAs толщиной $2 \div 3$ мкм имели n -тип проводимости с концентрацией электронов $(0.5 \div 2) \cdot 10^{16}$ и $(0.5 \div 1) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ соответственно. КРС были получены путем последовательного выращивания на подложках из полужолирующего GaAs с ориентацией $(100) \pm 0.5^\circ$ буферных слоев GaAs и Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As толщиной $0.3 \div 0.5$ мкм и четырех квантово-размерных слоев GaAs с толщиной L_z от 300 до 10 Å, разделенных и ограниченных сверху барьерными слоями Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As толщиной $L_b \approx \approx 300$ Å. Температура роста составляла 750 °C, скорости роста — около 5 Å/с.

Спектры ФЛ образцов исследовались при 77 и 2 К. Для регистрации спектров ФЛ при 77 К применялся спектрограф типа ИСП-51, источником возбуждения служил Ar-лазер ($h\nu = 2.41$ эВ). Плотность возбуждения P варьировалась в пределах от 1 до 1200 Вт/см 2 . Регистрация спектров ФЛ при 2 К осуществлялась с помощью монохроматора ДФС-12. В качестве источника возбуждения ФЛ применялся Ar—Kr-лазер ($h\nu = 2.54$ эВ), плотность возбуждения которого варьировалась в пределах от 0.2 до 200 Вт/см 2 , приемником излучения служил охлаждаемый арсенид-галлиевый ФЭУ. Точность регистрации спектров составляла ± 0.3 мэВ.

Толщины L_z слоев GaAs рассчитывались по энергетическому положению соответствующих им экситонных полос в спектрах ФЛ КРС. В расчете принималось, что состав барьеров Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As соответствовал $x = 0.3$, величина разрыва зоны проводимости $\Delta E_c = 0.60 \Delta E_g$, и использовались данные работы [4] по зависимости энергии связи квазидвумерного экситона от ширины квантовой ямы L_z .

Результаты измерений и их обсуждение

Спектры ФЛ двух КРС, измеренные при 77 К, приведены на рис. 1. В спектрах наряду с полосами, обусловленными излучением из квантовых ям с заданной толщиной вплоть до 10 Å, присутствуют полосы люминесценции AlGaAs. Минимальная полуширина линий ФЛ для ям с заданной толщиной 100, 50, 20 Å составила соответственно 5, 9 и 10 мэВ. Сопоставление этих значений с оценкой изменения положения уровней размерного квантования δE при локальном увеличении L_z на δL_z ($\delta E = = 2E_1 \delta L_z / L_z$, где E_1 — энергетическое положение первых уровней размерного квантования электронов и дырок) позволяет заключить, что в исследованных квантовых ямах флуктуации ширины не превышают двух монослоев.

В таблице приведены результаты сопоставления заданных и рассчитанных по ФЛ измерениям толщин слоев GaAs в КРС. Хорошее совпадение величин L_z свидетельствует о близости профиля распределения алюминия в КРС к прямоугольному.

Дополнительным подтверждением резкости и планарности гетерограниц в КРС служит фотография поперечного сечения (110) одной из структур (рис. 2). Изображение получено с прямым увеличением $3 \cdot 10^5$ в режиме просвечивающей электронной микроскопии с помощью микроскопа EM-420. Высокая степень разрешения позволяет отчетливо видеть все квантово-размерные слои в структуре. Измеренные на этой фотографии толщины слоев GaAs и AlGaAs согласуются с заданными по скорости роста и рассчитанными по результатам ФЛ измерений.

Заданная величина L_z , Å	Значения L_z , рассчитанные по энергетическому положению линий ФЛ, Å	
	рис. 2, а	рис. 2, б
100	111	97
50	46	49
20	22	19
10	—	11

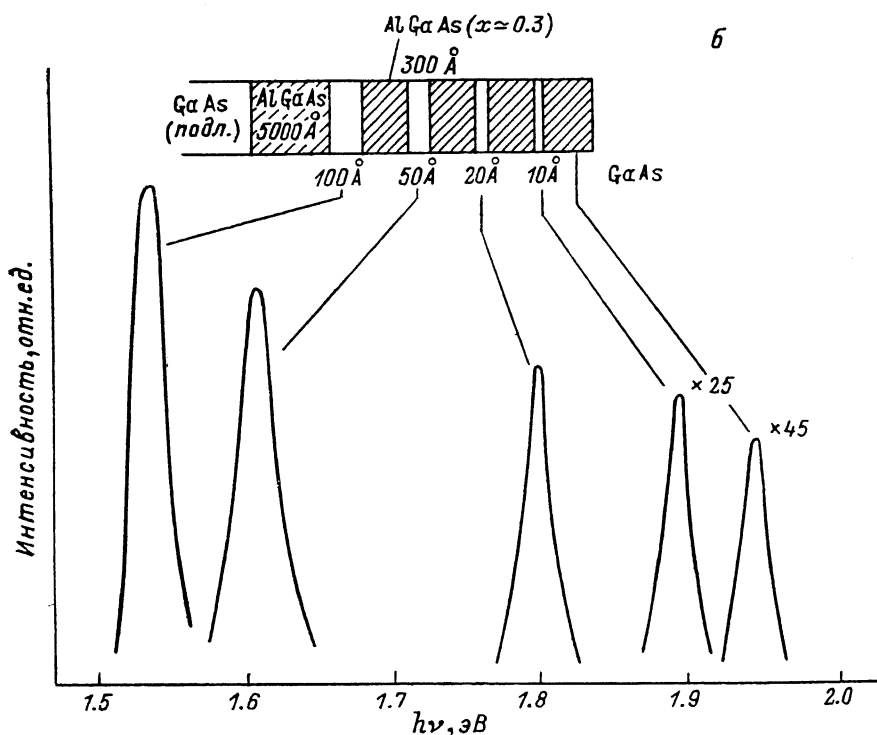
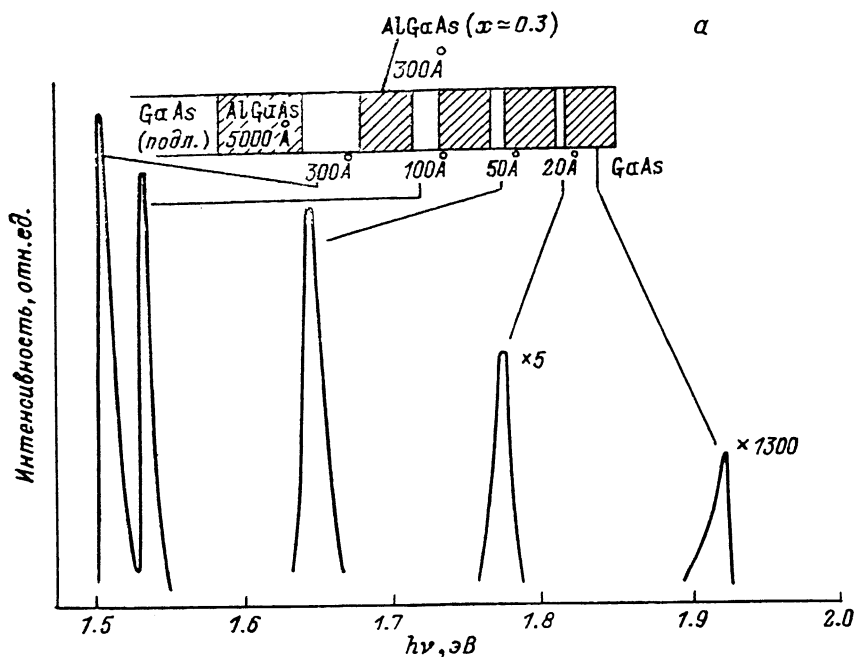


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции GaAs/AlGaAs-структур с четырьмя квантовыми ямами.

$T=77 \text{ K}$, $\lambda=5167 \text{ \AA}$. $P, \text{ Вт/см}^2$: а — 0.4, б — 150.

ФЛ методика определения ширины квантовых ям была применена для изучения скорости роста (v_p) слоев GaAs вдоль направления газового потока. Обнаружено линейное уменьшение v_p по направлению газового потока, вызванное, вероятно, обеднением исходной газовой смеси при ее движении над поверхностью подложкодержателя. Падение v_p при общем расходе водорода 11 л/мин составляло около 20 % на подложках диаметром 40 мм. В работе [5] показано, что путем оптимизации газодинамических условий в реакторах данного типа возможно получение слоев с более однородным распределением толщины.

Для исследования особенностей рельефа гетерограниц в полученных КРС проводились измерения спектров низкотемпературной фотолюминесценции (НТФЛ) в широком диапазоне плотностей возбуждения. Форма экситонной полосы НТФЛ и характер ее изменения с увеличением мощности засветки (P) определяются локализацией квазидвумерных экситонов на островковых флуктуациях L_x . Было обнаружено, что с увеличением P линии люминесценции из широких и узких ям ведут себя по-разному. На рис. 3 представлена полоса, соответствующая рекомбинации в широкой яме с $L_x=119$ Å. При низких уровнях возбуждения ее максимум смещен в длинноволновую область (Стоксов сдвиг), $h\nu=1.5413$ эВ, имеется также длинноволновый хвост, уширяющий линию фотолюминесценции. Увеличение мощности засветки на 2 порядка сдвигает

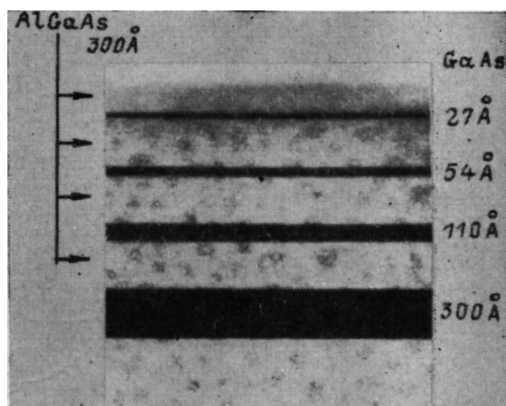


Рис. 2. Фотография сечения (110) КРС, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии.

максимум линии в коротковолновую область на 2 мэВ ($h\nu=1.5433$ эВ), пропадает длинноволновая затыжка, полуширина уменьшается до $\Delta h\nu=4.5$ мэВ.

В отличие от линии люминесценции, связанной с широкой ямой, полоса излучения из ямы с $L_x=27$ Å практически не изменила своего спектрального положения при увеличении P от 0.4 до 128 Вт/см² (рис. 4). Подобная картина наблюдалась и в случае ямы с $L_x=51$ Å. Следует подчеркнуть, что в спектрах НТФЛ этих квантовых ям не наблюдались переходы, связанные с акцепторами. Это коррелирует с практическим отсутствием акцепторной полосы в спектре излучения буферного GaAs.

Обращает на себя внимание зависимость спектрального положения максимума линии излучения из ямы с $L_x=119$ Å от мощности возбуждения. Как показано в работах [6, 7], такой спектр может быть связан с локализацией квазидвумерного экситона на монослойных неоднородностях ширины квантовой ямы. При увеличении интенсивности возбуждающего света происходит заполнение локализованных состояний и основной вклад в излучение начинает вносить рекомбинация делокализованных экситонов. Это соответствует смещению линии фотолюминесценции в коротковолновую область на 2–4 мэВ. Размеры указанных неоднородностей в плоскости гетерограницы (L_x) колеблются в широких пределах. Экситон начинает локализоваться как целое на островках с размером L_x , превышающим экситонный радиус в ~ 2.5 раза [6]. Смещение линии фотолюминесценции при низких уровнях засветки относительно пика в спектре возбуждения люминесценции (Стоксов сдвиг) пропадает, когда при уменьшении толщины ямы раздельная локализация электронов и дырок становится более эффективной, чем локализация экситона как целого [6]. Действительно, в спектрах излучения ям с $L_x=51$ и 27 Å нам не удалось за-

фиксировать сдвигов максимумов соответствующих линий с увеличением мощности засветки.

Таким образом, флуктуации ширины квантовых ям, выращенных данным методом, обусловлены существованием на гетерограницах островков (ступеней) монослойной толщины с большой дисперсией по L_x . Это отличает структуры, полученные при пониженном давлении, от структур, выращенных при атмо-

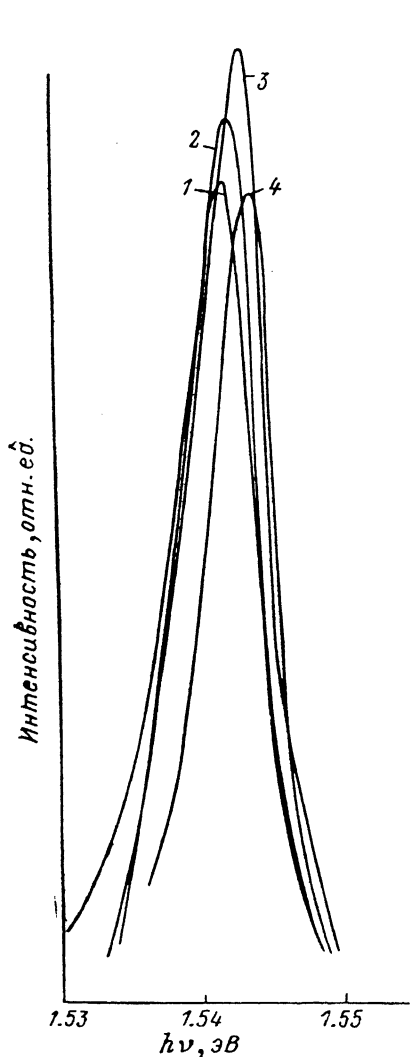


Рис. 3. Спектр НТФЛ ямы с $L_z=119 \text{ \AA}$ при разных уровнях возбуждения P .

P , Вт/см²: 1 — 8.1, 2 — 32, 3 — 63, 4 — 215. $T=2 \text{ К}$. 1 — $\times 150$, 2 — $\times 8$, 3 — $\times 4$, 4 — $\times 1$.

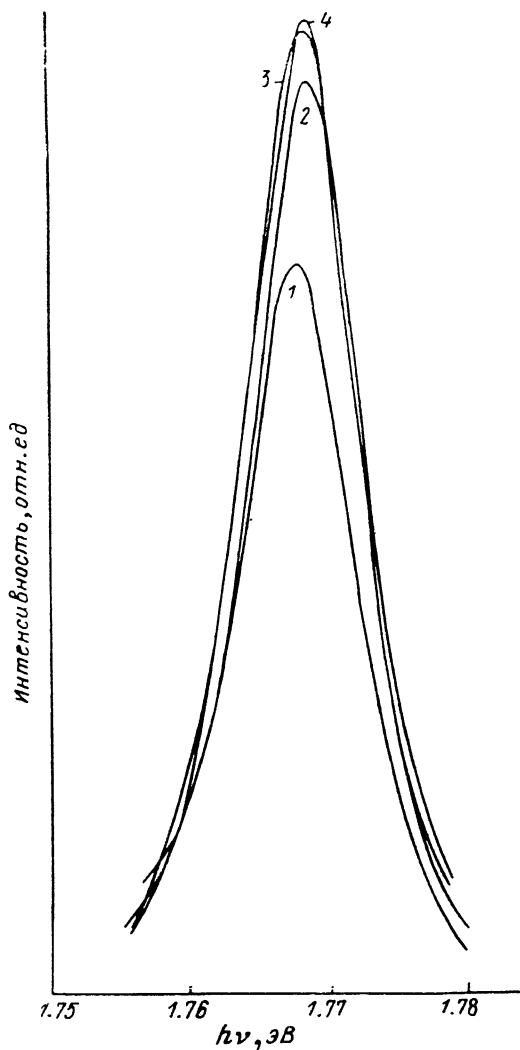


Рис. 4. Спектр НТФЛ ямы с $L_z=27 \text{ \AA}$ при разных уровнях возбуждения P .

P , Вт/см²: 1 — 2.1, 2 — 19, 3 — 63, 4 — 128. $T=2 \text{ К}$. 1 — $\times 30$, 2 — $\times 6$, 3 — $\times 2$, 4 — $\times 1$.

сферном давлении [8]. В последних большая концентрация на гетерогранице островков с характерным размером $L_x \geq 300 \text{ \AA}$ приводила к появлению в спектрах НТФЛ квантовых ям нескольких экситонных максимумов.

Выводы. Методом МОС гидридной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе горизонтального типа получены GaAs/AlGaAs-структуры с набором квантовых ям, минимальная толщина которых составила около 10 \AA . Обнаружено линейное уменьшение скорости роста эпитаксиальных слоев вдоль направления газового потока. Показано, что профиль изменения содержания алюминия в КРС близок к прямоугольному. Флуктуации L_x у лучших образцов не пре-

выпадают двух монослоев, причем размеры таких островковых флуктуаций в плоскости гетерограницы изменяются в широких пределах.

В заключение авторы выражают благодарность Ж. И. Алферову за поддержку и внимание к настоящей работе, а также С. Г. Конникову, Н. А. Берту, А. О. Косонову за исследование образцов методом просвечивающей электронной микроскопии и И. В. Кочеву за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Dupuis R. D., Miller R. C., Petroff P. M. // *J. Cryst. Growth*. 1984. V. 68. N 1. P. 395—405.
- [2] Коваленков О. В., Машевский А. Г., Сивичев М. А., Федорова О. М., Явич Б. С. // *Письма ЖТФ*. 1988. Т. 14. В. 3. С. 222—226.
- [3] Duchemin J. P. // *J. Phys.* 1982. V. 43. N 12. P. C5-87—C5-92.
- [4] Green R. L., Vajaj K. K. // *J. Vac. Sci. Techn. B*. 1983. V. 1. N 2. P. 391—397.
- [5] Жмакин А. И., Кадянский Л. А., Кузьмин И. А., Макаров Ю. Н., Сивичев М. А., Фурсенко А. А., Явич Б. С. // *Тез. докл. II Всес. конф. «Моделирование роста кристаллов»*. Рига, 1987. С. 285—287.
- [6] Копьев П. С., Мельцер Б. Я., Уральцев И. Н., Эфрос А. Л., Яковлев Д. Р. // *Письма ЖТФ*. 1985. Т. 42. В. 8. С. 327—330.
- [7] Deveand V., Regreny A., Emery J. V. // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59. N 5. P. 1633—1640.
- [8] Машевский А. Г., Сивичев М. А., Строганов Д. Р., Федорова О. М., Явич Б. С. // *Письма ЖТФ*. 1988. Т. 14. В. 13. С. 1217—1220.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 27.06.1988
Принята к печати 5.04.1989