

06.3;12

Влияние ростовых параметров на электронную структуру квантовых точек в гетероструктурах InGaAs/GaAs

© А.А. Тонких, В.А. Егоров, Н.К. Поляков, Г.Э. Цырлин,
Б.В. Воловик, Н.А. Черкашин, В.М. Устинов

Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург
E-mail: tonkix@pop.ioffe.rssi.ru

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
С.-Петербургский государственный электротехнический университет
(ЛЭТИ)

Поступило в Редакцию 21 сентября 2001 г.

Исследованы оптические и структурные свойства гетероструктур с квантовыми точками в системе InAs/GaAs, зарощенных твердым раствором InGaAs, при использовании различных методик напыления из молекулярных пучков: молекулярно-пучковой эпитаксии и субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Максимумы спектров фотолюминесценции в исследованных образцах находятся в интервале 1.18–1.32 μm . Обнаружено влияние ростовых параметров на электронную структуру квантовых точек.

Создание лазерных диодов с длиной волны генерации 1.3 и 1.55 μm является актуальной задачей для их применения в опико-волоконных линиях связи. Недавно нами в [1,2] была продемонстрирована возможность получения фотолюминесцентного (ФЛ) излучения с максимумом длины волны в интервале 1.3–1.4 μm из гетероструктур с использованием вертикально складированных массивов квантовых точек (КТ).

В данной работе нами исследуется альтернативный метод, позволяющий достичь диапазона длин волн $\sim 1.3 \mu\text{m}$. Его суть заключается в зарощивании слоя квантовых точек твердым раствором InGaAs. Как было показано в работе [3], образцы, выращенные в такой геометрии, имели более длинноволновые максимумы ФЛ, по сравнению с образцами, в которых КТ не были зарощены твердым раствором. Выяснено [4], что это происходит благодаря стимулированному областями больших напряжений (КТ) распаду твердого раствора InGaAs и последующей

Номер образца	Метод получения КТ	Количество МС InAs в КТ	Позиция пика (пиков) ФЛ, μm
A	МПЭ	1.8	1.19
B	МПЭ	2.0	1.31
C	МПЭ	2.5	1.29
D	МПЭ	3.0	1.24
E	СМСЭ	2.0	1.12
F	СМСЭ	2.5	1.24
G	СМСЭ	3.0	—

диффузии атомов In к областям напряжений, что приводит к эффективному увеличению размеров КТ. В [5] авторы получили лазерную генерацию из подобных структур на длине волны, близкой к $1.3 \mu\text{m}$.

Помимо достижения заданной длины волны лазерной генерации существенным параметром, определяющим работу лазера, является температурная стабильность. Заращивание КТ твердым раствором InGaAs приводит к уменьшению степени локализации носителей в КТ по сравнению с КТ покрытых GaAs, поскольку носителям при повышении рабочей температуры "легче" выбраться в InGaAs матрицу. Кроме того, существенное влияние на длину волны излучения может оказать наличие в КТ нескольких уровней, имеющих различную степень заполнения при разных температурах, а следствием этого может быть смещение длины волны излучения, поэтому в данном контексте наличие в КТ возбужденных уровней должно рассматриваться как нежелательный эффект.

Учитывая последние замечания, нами была реализована модификация данного метода, в которой мы использовали, во-первых, прерывание роста структуры после получения на поверхности GaAs InAs КТ, а во-вторых — субмонослойную миграционно-стимулированную эпитаксию (СМСЭ).

Методика проведения ростовых экспериментов и контроля выращенных образцов аналогична описанной в работе [1]. Для выяснения влияния числа монослоев (МС) InAs в КТ, а также механизмов роста на положение пиков ФЛ были выращены две серии образцов. Краткое описание образцов представлено в таблице. В первой серии формирование КТ происходило методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), во втором — СМСЭ [6].

При выращивании КТ методом МПЭ варьировалась номинальная толщина InAs от 1.8 до 3.0 нм. После выращивания слоя КТ образец выдерживался 150 с в потоке As₄ для достижения большей однородности размеров наностроек и/или увеличения их размеров. Далее следовало наращивание КТ твердым раствором In_{0.15}Ga_{0.85}As толщиной 5 нм, слоем GaAs толщиной 2 нм, а затем температура поднималась до 600°C и выращивалось еще 8 нм GaAs. При выращивании КТ методом СМСЭ цикл осаждения включал напыление 0.4–0.5 нм In и 10-секундную выдержку поверхности в потоке As₄.

На рис. 1 изображены спектры ФЛ образцов А, В, С, D (см. таблицу). Из рисунка видна немонотонная зависимость максимума пика ФЛ от количества осажденного InAs, которая может быть объяснена следующим образом: при осаждении небольшого количества InAs (1.8 нм) происходит образование большого числа относительно маленьких островков, в которых не происходит локализации носителей. Однако из-за флуктуации размеров КТ есть некоторое количество "активных" островков InAs, которые способны локализовать носители. Участие последних в излучательной рекомбинации дает небольшой по интенсивности вклад в ФЛ (рис. 1, *a*). По мере увеличения количества осажденного InAs вплоть до 2.0 нм, КТ увеличиваются в размерах, что приводит к понижению основного уровня КТ и соответственно длинноволновому сдвигу ФЛ (рис. 1, *b*), что согласуется с результатами, полученными в работе [3]. Рост интенсивности ФЛ, наблюдаемый в образцах с 2.0 (рис. 1, *b*) и 2.5 нм (рис. 1, *c*) по отношению к образцу с 1.8 нм InAs, можно объяснить увеличением количества КТ, способных локализовать носители, участвующие в излучательной рекомбинации. На рис. 2 представлено изображение, полученное на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) поперечного сечения структуры с 2 нм КТ. Из рисунка можно определить характерный латеральный размер КТ ~ 23 нм, что превосходит латеральные размеры обычных КТ ~ 14 нм. При увеличении количества осажденного материала до 3.0 нм интенсивность ФЛ падает, поскольку "большие" точки, достигая некоторого критического размера, дислоцируются, что приводит к снижению эффективности люминесценции. А основной вклад в ФЛ начинают давать КТ меньшего размера, соответственно пик люминесценции сдвигается в коротковолновую сторону (рис. 1, *d*). Важно отметить, что в образцах этой серии ФЛ спектры помимо пика основного состояния имеют еще, по крайней мере, один пик, соответствующий первому

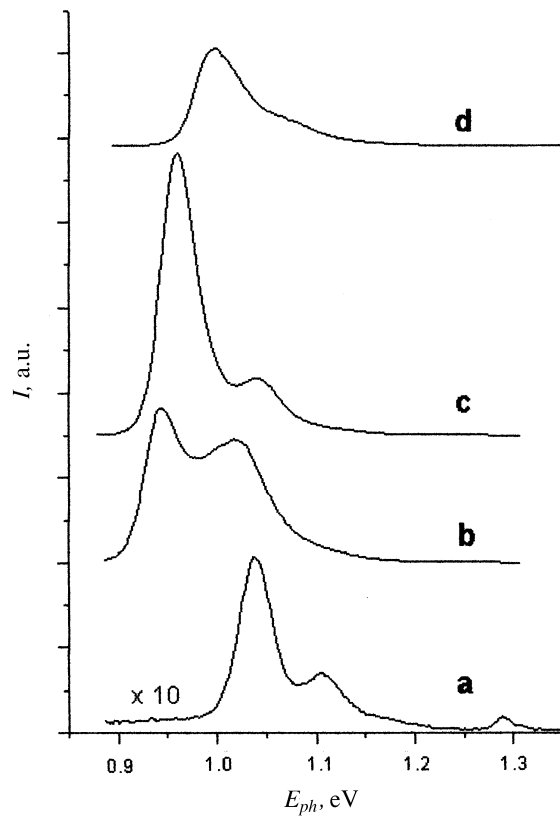


Рис. 1. ФЛ из структур с КТ, полученными методом МПЭ с последующей 150-секундной выдержкой в потоке As и заравиванием $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Номинальная толщина слоя КТ составила: *a* — 1.8 мс; *b* — 2.0 мс; *c* — 2.5 мс; *d* — 3.0 мс.

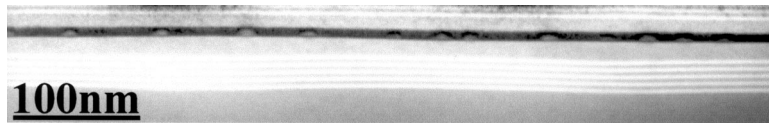


Рис. 2. ПЭМ изображение поперечного сечения структуры с 2.0 мс КТ, выращенных методом МПЭ.

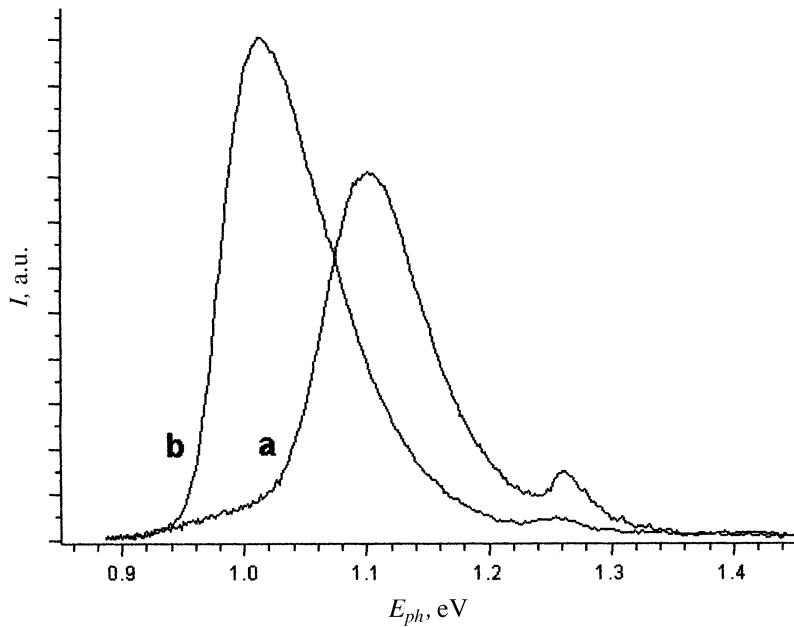


Рис. 3. ФЛ из структур с КТ, полученными методом СМСЭ с последующей 150-секундной выдержкой в потоке As и заравиванием $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Номинальная толщина слоя КТ составила: *a* — 2.0 мс; *b* — 2.5 мс.

возбужденному состоянию КТ точек, расположенный в коротковолновой области спектра по отношению к основному.

В своей работе мы применили метод СМСЭ, позволяющий получать КТ с увеличенными по отношению к МПЭ КТ латеральными размерами. В этой серии были выращены три образца. Первые два содержали слои КТ номинальными толщинами 2.0 (рис. 3, *a*) и 2.5 мс (рис. 3, *b*). Третий образец, содержащий 3.0 мс КТ, оказался оптически неактивен, что, по видимому, связано с большой плотностью дислокаций несоответствия в нем. Из сравнения рис. 1 и 3 можно заключить, что МПЭ образцы с одинаковым количеством осажденного InAs оказались более длинноволновыми по сравнению с аналогичными СМСЭ образцами (см. таблицу). Это может быть связано с тем, что при СМСЭ росте КТ имеют большие латеральные размеры [6], но меньшую высоту, что при-

водит к эффективному уменьшению объема КТ и увеличению энергии оптического перехода. Кроме того, интенсивность ФЛ образца с 2.0 МС InAs, выращенным по методу МПЭ, в 8 раз превосходит интенсивность ФЛ аналогичного образца, полученный по СМСЭ технологии. Ранее полученные нами результаты позволяют заключить, что СМСЭ островки имеют меньшую плотность и соответственно большие латеральные размеры по сравнению с МПЭ островками. В связи с этим явное снижение интенсивности ФЛ по сравнению с использованием метода традиционной МПЭ может объясняться тем, что после зарачивания InGaAs СМСЭ КТ их размеры начинают превышать критические и вероятность образования дефектов значительно возрастает.

Важно отметить, что ФЛ спектры этих образцов демонстрируют отсутствие дополнительных пиков в непосредственной близости от пика, соответствующего излучению из основного состояния КТ. Таким образом, можно предположить, что либо КТ такого типа вообще не имеют возбужденных уровней, либо расстояние между основным и первым возбужденным уровнями оказывается настолько незначительным, что отделить линию возбужденного уровня от основной линии методами, которыми мы располагаем, не представляется возможным.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность получения длины волны излучения $1.3 \mu\text{m}$ от структур на основе InAs КТ с активной областью, помещенной во внешнюю InGaAs квантовую яму при модификациях традиционного метода МПЭ. Предлагаемые подходы являются более простыми (например, по сравнению с многослойными структурами на основе InAs КТ) и позволяют добиться лучшего кристаллографического качества структур. А в случае использования СМСЭ существует возможность улучшить температурные характеристики вследствие отсутствия линии, соответствующей возбужденному состоянию КТ, что является важным для лазерных применений подобных структур.

Список литературы

- [1] Egorov V.A., Cirlin G.E., Polyakov N.K., Petrov V.N., Tonkikh A.A., Volovik B.V., Musikhin Yu.G., Zhukov A.E., Tsatsul'nikov A.F., Ustinov V.M. // Nanotechnology. 2000. V. 11(4). P. 323–326.
- [2] Egorov V.A., Polyakov N.K., Tonkikh A.A., Petrov V.N., Cirlin G.E., Volovik B.V., Zhukov A.E., Musikhin Yu.G., Cherkashin N.A., Ustinov V.M. // Appl. Surf. Sci. 2001. V. 175–176. P. 244–249.

- [3] Воловик Б.В., Цацульников А.Ф., Бедарев Д.А., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Малеев Н.А., Мусихин Ю.Г., Суворова А.А., Устинов В.М., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д., Вернер П. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 990.
- [4] Цацульников А.Ф., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Сахаров А.В., Суворова А.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 109.
- [5] Ковш А.Р., Жуков А.Е., Малеев Н.А., Михрин С.С., Устинов В.М., Цацульников А.Ф., Максимов М.В., Воловик Б.В., Бедарев Д.А., Шерняков Ю.М., Кондратьева Е.Ю., Леденцов Н.Н., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 1020.
- [6] Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Типисев С.Я., Леденцов Н.Н., Гурьянов Г.М. // ФТП. 1995. Т. 29. N 9. С. 1679–1701.