

06;12

## Многослойные структуры с квантовыми точками в системе InAs/GaAs, излучающие на длине волны 1.3 $\mu\text{m}$

© Г.Э. Цырлин, Н.К. Поляков, В.А. Егоров, В.Н. Петров,  
Б.В. Воловик, Д.С. Сизов, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов

Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 18 января 2000 г.

Исследованы оптические свойства многослойных структур с квантовыми точками в гетероэпитаксиальной системе InAs/GaAs, полученные методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Показано, что при оптимизированных условиях роста возможно получение люминесценции с длиной волны 1.3  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре наблюдения.

Создание лазерных диодов с длиной волны генерации 1.3  $\mu\text{m}$  является актуальной задачей для их применения в волоконно-оптических линиях связи. В последнее время рассматриваются системы, альтернативные лазерам на фосфиде индия, использующие подложки и материалы, основным недостатком которых являются низкая температурная стабильность получаемых лазерных характеристик [1]. Для решения задачи получения длины волны излучения 1.3  $\mu\text{m}$  был предложен и реализован ряд подходов: один из них основан на использовании квантовых ям (КЯ) InGaAsN с малым содержанием азота в активной области [2], другой заключается во внедрении квантовых точек (КТ) InAs в кремниевую матрицу [3], а также при реализации роста КТ по механизму Странски–Крастанова в гетероэпитаксиальной системе (In,Ga)As/GaAs, что позволяет значительно сместить длину волны излучения по сравнению с (InGa)As/GaAs КЯ. В последнем случае возможными путями получения излучения на длине волны порядка 1.3  $\mu\text{m}$  являлись: а) формирование КТ InGaAs/GaAs осаждением достаточно большого (порядка 11 монослоев (МС) для твердого раствора (In,Ga)As пятидесятипроцентного состава) количества InGaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) при попеременном осаждении атомов индия, галлия и молекул

мышьяка с целью увеличения латеральных размеров наностроек [4]; б) помещения КТ InAs, сформированных в стандартном режиме МПЭ, во внешнюю КЯ (Al,In,Ga)As [5,6], что стимулирует распад твердого раствора и приводит к увеличению концентрации In вблизи КТ. Однако во многом проблемы достижения диапазона  $1.3 \mu\text{m}$  для структур с InGaAs/GaAs КТ связаны с тем, что средняя толщина InAs в активной области обычно достаточно велика и это приводит к высокой вероятности образования дислокаций несоответствия. Таким образом, актуальным представляется поиск новых подходов для создания приборов на основе КТ, излучающих на  $1.3 \mu\text{m}$ , минимизируя количество индия в активной области.

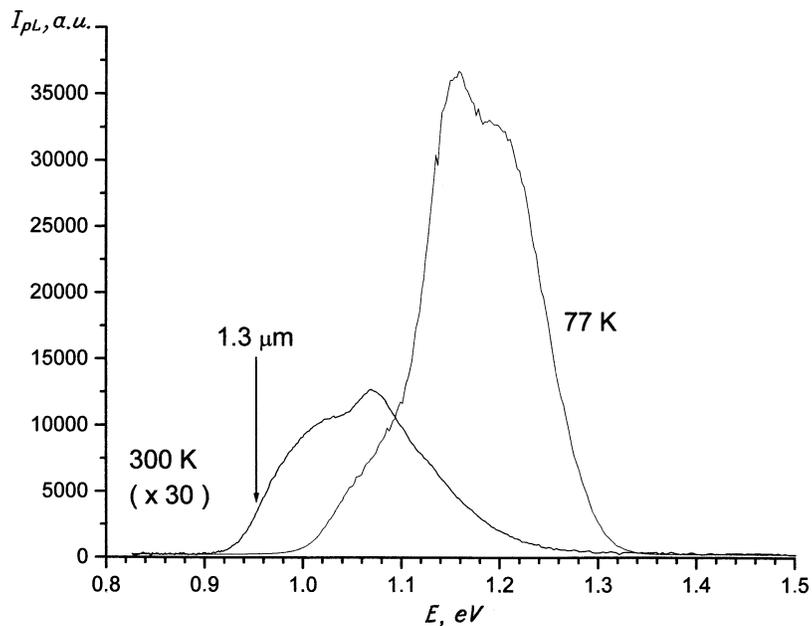
Известно, что использование метода субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии и/или ее комбинации с другими технологическими режимами приводят к увеличению латеральных размеров островков нанометрового диапазона в системе InAs/GaAs [7,8]. В случае многослойных структур InAs/GaAs, содержащих несколько плоскостей КТ InAs, разделенных спейсерами GaAs, средний размер островков также увеличивается [9]. В данной работе сообщается об оптических свойствах подобных многослойных структур, квантовые точки в активных областях которых формировались либо методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии (СМСЭ), либо его комбинацией с МПЭ. Оптимизация ростовых условий позволила получить структуры с максимумом фотолюминесценции (ФЛ) на длине волны  $1.3 \mu\text{m}$  при комнатной температуре наблюдения, со средней толщиной слоя InAs 2.5 МС в каждой из плоскостей КТ.

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (в случае активного слоя — ее разновидностью СМСЭ, т.е. потоки индия и мышьяка направлялись на поверхность подложки последовательно; каждый цикл осаждения атомов индия соответствовал напылению 0.5 МС с последующей выдержкой в потоке мышьяка в течение 10 с) на установке ЭП1203 на полуизолирующих сингулярных или вицинальных подложках GaAs (100). Активная область, помещенная между слоями GaAs толщиной 6 нм с каждой стороны, состояла из десяти слоев InAs квантовых точек, разделенных спейсерами GaAs толщиной 6–8 нм. Для различных структур эффективная толщина слоя InAs в КТ изменялась от 2.5 до 3.0 МС. Для предотвращения транспорта неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки активная область

ограничивалась с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$  (5 пар, 25Å/25Å). Температура роста составляла 480°C для активной области и 550°C для остальной части структуры. Формирование КТ контролировалось по картине дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с помощью системы регистрации и анализа картин ДБЭО. Скорости роста, измеренные предварительно на калибровочном образце с помощью методики осцилляции интенсивности ДБЭО в нулевом рефлексе, составляли 0.1, 0.24 и 0.70 МС/с для InAs, AlAs и GaAs соответственно. Общее давление паров мышьяка в ростовой камере, измеренное с помощью датчика типа ВМБ 1/8, было постоянным для всех экспериментов и составляло  $1.5 \cdot 10^{-6}$  Па. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась  $\text{Ar}^+$ -лазером ( $\lambda = 514.5$  nm, плотность возбуждения  $\sim 100$  W/cm<sup>2</sup>). Люминесценция детектировалась охлаждаемым Ge фотодиодом.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции, снятые при температуре наблюдения 77 и 300 К для образца, активная область которого состояла из 10 слоев InAs КТ номинальной толщиной 2.5 МС, выращенных методом СМСЭ (5 циклов) и разделенных спейсерами GaAs толщиной 8 nm. Спектры характеризуются типичными для ансамбля квантовых точек уширенными линиями с максимумами  $\sim 1.2$  и  $\sim 1.05$  eV для 77 и 300 К соответственно. Лишь длинноволновый край линии ФЛ при комнатной температуре захватывает область 1.3  $\mu\text{m}$ . Из приведенных спектров был сделан вывод о том, что размеры наностроек в данном случае невелики, что может быть объяснено либо частичным переиспарением атомов индия при напылении первого цикла методом СМСЭ (что приводит к эффективному уменьшению номинальной толщины слоя InAs), либо эффективной миграцией адатомов при используемом достаточно большом времени выдержки (10 s) между циклами напыления In.

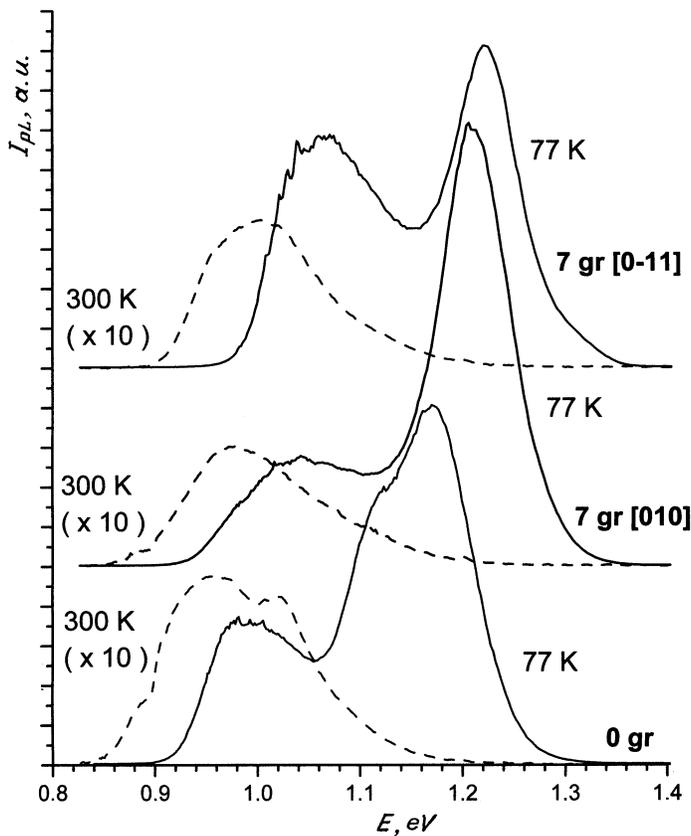
Для прояснения ситуации был выращен ряд многослойных структур с измененными технологическими параметрами. Увеличение количества InAs в каждом из слоев квантовых точек до 3 МС привело к смещению пика ФЛ в длинноволновую область, однако данное смещение сопровождалось резким снижением эффективности ФЛ по сравнению с предыдущей структурой. Таким образом, для данного случая, очевидно, размеры островков оказались выше критического объема образования дислокаций несоответствия, вследствие чего кристаллографическое качество структуры оказалось низким.



**Рис. 1.** Спектры ФЛ для структуры с 10 слоями КТ InAs (2.5 МС каждый слой), выращенных методом СМСЭ при температурах наблюдения 77 и 300 К. Толщина спейсера GaAs 8 nm.

Ситуация существенно изменилась для случая многослойной структуры, когда первый полумонослойный цикл InAs был выращен методом МПЭ, а последующие выращивались методом СМСЭ (всего в каждом слое КТ выращивалось 2.5 МС InAs). На рис. 2 приведены спектры ФЛ для сингулярного и вицинальных образцов ( $7^\circ$  разориентации в направлениях [010] и [0-11]) при 77 и 300 К. При температуре наблюдения 77 К спектры ФЛ характеризуются набором пиков в диапазоне 1.0–1.2 eV с типичным сдвигом в коротковолновую область для вицинальных образцов [10].

Существование нескольких пиков на приведенных спектрах может быть вызвано несколькими причинами: наличием нескольких групп КТ разного размера, возможным образованием конгломератов КТ в верхних



**Рис. 2.** Спектры ФЛ для структур с 10 слоями КТ InAs (2.5 МС каждый слой), выращенных комбинированным методом (0.5 МС МПЭ + 2.0 МС СМСЭ) на сингулярной и вицинальных подложках с разориентацией  $7^\circ$  в направлениях [010] и [01-1] при температурах наблюдения 77 и 300 К. Толщина спейсера GaAs 8 nm.

рядях вследствие латерального объединения соседних КТ [11] либо вкладом ФЛ возбужденных состояний КТ, что подтверждается изменением формы спектра при снижении плотности возбуждения. При комнатной температуре максимум пика ФЛ для сингулярного образца находится

при  $1.3 \mu\text{m}$ , для вицинальных образцов максимум находится в пределах  $1.20\text{--}1.25 \mu\text{m}$ , что также соотносится с данными ФЛ, снятыми при  $77 \text{ K}$ . Относительно невысокое уменьшение интенсивности излучения при  $77 \text{ K}$  к  $300 \text{ K}$  (порядка  $10\text{--}20$  раз) свидетельствует о достаточно высоком качестве выращенных структур как на сингулярной, так и на вицинальных подложках.

Согласно результатам компьютерного моделирования [12], при росте многослойных структур возможно несколько сценариев эволюции размеров островков. К ним относятся: а) уменьшение плотности с одновременным возрастанием размеров на вышележащих слоях, б) рождение новых островков на верхних слоях, в) сохранение плотности островков в различных слоях в зависимости от взаимного расположения островков в начальном слое и толщине спейсера. Зависимость оптических свойств выращенных структур является подтверждением критической зависимости технологических параметров и количества осажденного InAs на эволюцию системы КТ в многослойных структурах.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность получения излучения на длине волны  $1.3 \mu\text{m}$  при комнатной температуре при использовании в качестве активной области многослойной структуры КТ в гетероэпитаксиальной системе InAs/GaAs. Слои квантовых точек были получены комбинацией МПЭ и СМСЭ (номинальная толщина  $2.5 \text{ МС}$  в каждом слое). Проведенное исследование указывает на существенное влияние технологических параметров и кинетических процессов на поверхности на оптические свойства выращенных структур. Сравнение геометрических и оптических свойств подобных многослойных структур будет приведено в отдельной публикации.

Авторы благодарят Ю.Б. Самсоненко, Д.Н. Демидова и Н.П. Корнееву за участие в ростовых экспериментах, Н.Н. Леденцова и А.Е. Жукова за полезные обсуждения.

Данная работа выполнена при частичной поддержке научной программы "Физика твердотельных наноструктур" (гранты № 98–2029 и 99–2014) и РФФИ (грант № 98–02–18317).

## Список литературы

- [1] Seki S., Oohasi H., Sugiura H., Hirono T., Yokoyama K. // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 2192.
- [2] Kondow M., Uomi K., Niwa A., Kitatani T., Watahiki S., Yazawa Y. // Japan J. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 1273.
- [3] Cirlin G.E., Dubrovskii V.G., Petrov V.N., Polyakov N.K., Korneeva N.P., Demidov V.N., Golubok A.O., Masalov S.A., Kurochkin D.V., Gorbenko O.M., Komyak N.I., Ustinov V.M., Egorov A.Yu. Kovsh A.R., Maximov M.V., Tsatusul'nikov A.F., Volovik B.V., Zhukov A.E., Kor'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Grundman M., Bimberg D. // Semicond. Sci. Technol. 1998. V. 13. P. 1262.
- [4] Huffaker D.L., Park G., Zou Z., Shchekin O.B., Deppe D.G. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2564.
- [5] 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., Алферов Ж.И., Бимберг Д., Вернер П. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 990.
- [6] 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., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 1020.
- [7] Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Типисев С.Я., Леденцов Н.Н., Гурьянов Г.М. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1697.
- [8] Cirlin G.E., Petrov V.N., Golubok A.O., Tipishev S.Ya., Dubrovskii V.G., Guryanov G.M., Ledentsov N.N., Bimberg D. // Surf. Sci 1997. V. 377–379. P. 895.
- [9] Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Петров В.Н., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э. // ЖТФ. 1997. Т. 67. (8). С. 111.
- [10] Талалаев В.Г., Новиков Б.В., Вербин С.Ю., Новиков А.Б., Динь Шон Тхак, Щур И.В., Гобиц Г., Гольдхан Р., Штейн Н., Голомбек А., Цырлин Г.Э., Петров В.Н., Устинов В.М., Жуков А.Е., Егоров А.Ю. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 467.
- [11] Цацульников А.Ф., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Воловик Б.В., Суворова А.А., Берт Н.А., Копьев П.С. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 851.
- [12] Егоров В.А., Цырлин Г.Э. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26(5). С. 86.