

©1994 г.

**ВЫРАЩИВАНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР (In, Ga) As/GaAs
МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ
«СУБМОНОСЛОЙНЫХ» НАПРЯЖЕННЫХ СЛОЕВ InAs**

*А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, П.С.Копьев, Н.Н.Леденцов,
М.В.Максимов, В.М.Устинов*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 28 сентября 1993 г. Принята к печати 8 октября 1993 г.)

Предложен и реализован новый метод эпитаксиального выращивания гетероструктур на основе напряженных слоев (In, Ga) As, основанный на замене твердого раствора InGaAs «субмонослойной» сверхрешеткой InAs/GaAs, позволяющий значительно повысить интенсивность фотолюминесценции из квантовой ямы, а также реализовать сверхтонкие кванто-размерные слои с высокой однородностью по среднему составу и эффективной толщине. Проведено сравнение люминесцентных свойств структур с различными типами активного слоя, содержащего In.

В последние годы значительно вырос интерес к светоизлучающим приборам на длину волны $0.9 \leq \lambda \leq 1.1$ мкм, применяемым для оптической накачки твердотельных лазеров и волоконных усилителей на основе редкоземельных ионов [1]. Такие приборы создаются на основе напряженных структур с квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs и требуют относительно большого содержания InAs в активной области или большой ширины квантовой ямы. Следствием этого является большая вероятность образования в активной области дислокаций, снимающих механическое напряжение двухосно сжатого InGaAs. Хотя теория упругого напряжения [2] предсказывает существование критической толщины, начиная с которой происходит образование дислокаций несоответствия, имеются экспериментальные доказательства того, что заметная плотность дислокаций существует и в слоях, толщина которых не превышает критическую [3]. Такая локальная релаксация напряжения, приводящая к образованию в материале центров безызлучательной рекомбинации ухудшает характеристики светоизлучающих приборов с напряженной активной областью [4]. Как средство залечивания слоев InGaAs используется быстрый термический отжиг [5].

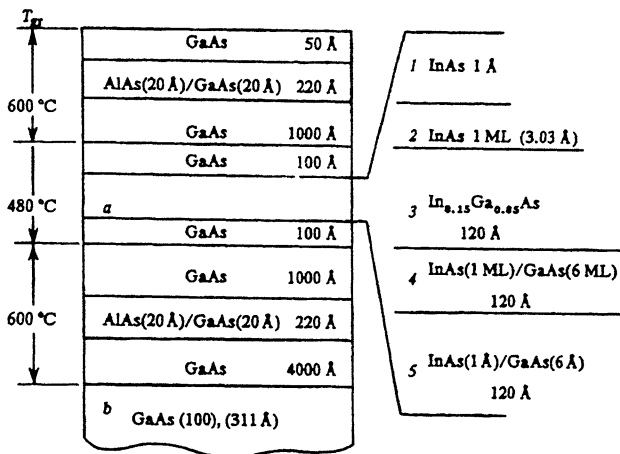


Рис. 1. Схематическое изображение 5 типов структур исследуемых образцов и режимов эпитаксиального роста.

В левой части рисунка: *a* — активный слой, *b* — полуизолирующая подложка. В правой части рисунка: 1–5 — тип активного слоя.

Этот метод имеет однако тот недостаток, что при высоких температурах отжига может происходить перемешивание соседних слоев, образующих барьеры и квантовые ямы, размытие профиля легирования и другие нежелательные эффекты.

В настоящей работе мы предлагаем «субмонослойные» сверхрешетки InAs/GaAs в качестве материала для активной области светозлучающих приборов на длину волны ≈ 1 мкм. Мы обнаружили, что «субмонослойный» слой InAs в GaAs-матрице обуславливает высокую эффективность излучательной рекомбинации и исключительно малую полуширину линии фотолюминесценции. При замене в квантовой яме GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs тройного раствора на «субмонослойную» сверхрешетку InAs(1 Å)/GaAs(6 Å) было обнаружено значительное (приблизительно в 20 раз при 77 К) увеличение интенсивности фотолюминесценции. Наиболее вероятной причиной улучшения люминесцентных свойств является снижение плотности центров безызлучательной рекомбинации, связанных с дефектами в напряженном слое InGaAs докритической толщины.

Схематическое изображение структуры исследуемых образцов представлено на рис. 1. Для сравнения люминесцентных свойств различных типов активных слоев, содержащих In, с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) была выращена серия из 5 образцов, отличающихся лишь структурой активной области, которая представляла собой: 1 — слой InAs толщиной 1 Å; 2 — слой InAs толщиной 3.03 Å (1 монослой (МС)); 3 — квантовая яма шириной 120 Å (слой твердого раствора In_{0.15}Ga_{0.85}As); 4 — квантовая яма шириной 120 Å, набранная с помощью монослойной сверхрешетки InAs(1 МС)/GaAs(6 МС); 5 — квантовая яма шириной 120 Å, набранная с помощью «субмонослойной» сверхрешетки InAs(1 Å)/GaAs(6 Å). Номинально средняя молярная доля InAs в сверхрешетках составля-

ет $\bar{x} \approx 0.14$, что близко к выбранному составу объемного материала. Ширина квантовых ям не превышает критическую толщину для данного состава ($\approx 200 \text{ \AA}$) согласно теории [2]. Активный слой, содержащий In, помещался в середину слоя GaAs толщиной 0.22 мкм, ограниченного с обеих сторон короткопериодной сверхрешеткой AlAs(20 Å)/GaAs(20 Å), для предотвращения ухода неравновесных носителей в полуизолирующую подложку или на поверхность, где они могут рекомбинировать безызлучательно. Структуры выращивались на буферном слое GaAs толщиной 0.4 мкм и прикрывались сверху 50 Å GaAs. В качестве подложки использовались полуизолирующие пластины GaAs с ориентацией (100). Структуры со слоями типа 1 и 2 выращивались также на подложках GaAs с ориентацией (311 Å), наклеенных бок о бок с подложками GaAs (100). После осаждения слоев InAs в структурах со слоями 1 и 2 типов применялась остановка роста на 10 с.

Температура подложки измерялась ИК пирометром IRCON Modline Plus, скорости роста GaAs и AlAs калибровались с помощью осцилляций интенсивности отраженного пучка быстрых электронов и составляли соответственно 2.4 и 0.8 Å/с. Слои GaAs и сверхрешетки AlAs/GaAs выращивались при температуре 600°C и при отношении потоков Ga(Al)/As приблизительно в 1.5 раза превышающем отношение, соответствующее переходу от картины дифракции быстрых электронов (2×4) к (4×2). Состав по In калибровался с помощью электронно-зондового микроанализа на слоях InGaAs толщиной 1.5 мкм. Время осаждения 1 Å InAs составляло 4 с, что позволяет надежно управлять выращиванием «субмонослойных» слоев в условиях МПЭ.

Чтобы избежать переиспарения атомов In с поверхности роста [6], активные слои выращивались при 480°C. Остановка роста для снижения температуры подложки производилась за 100 Å до слоя, содержащего In. При этом наблюдалась картина дифракции (2×4) во время роста GaAs и c(4×4) при прерывании роста. При выращивании твердого раствора InGaAs и слоев InAs (1 и 2.85 Å) картина дифракции была (1×1), в то время как во время роста сверхрешеток InAs/GaAs происходила поочередная смена картин (1×1) и (2×4). Вслед за областью, содержащей In, осаждалось 100 Å GaAs при низкой температуре, после чего температура роста повышалась до исходного значения 600°C. Технологические режимы показаны на рис. 1.

Спектры фотолюминесценции для структур 1 и 2 типа, выращенных на подложках GaAs (100), при температуре наблюдения 77 К представлены на рис. 2, а, б соответственно. Плотность возбуждения составляла 1 Вт/см², энергия возбуждающего кванта 1.954 эВ. Из сравнения спектров видно, что «субмонослойный» слой InAs приводит к появлению узкой ($\approx 2 \text{ мэВ}$) интенсивной линии фотолюминесценции (ФЛ), сдвинутой относительно краевого излучения, характерного для GaAs, в длинноволновую сторону приблизительно на 14 мэВ (рис. 2, а). В то же время в структуре с монослоем InAs наблюдается значительно более широкая линия ($\approx 8 \text{ мэВ}$), отстоящая от краевого излучения, характерного для GaAs, на 51 мэВ (рис. 2, б). Кроме того, интегральная интенсивность ФЛ в последнем случае заметно меньше. Указанный

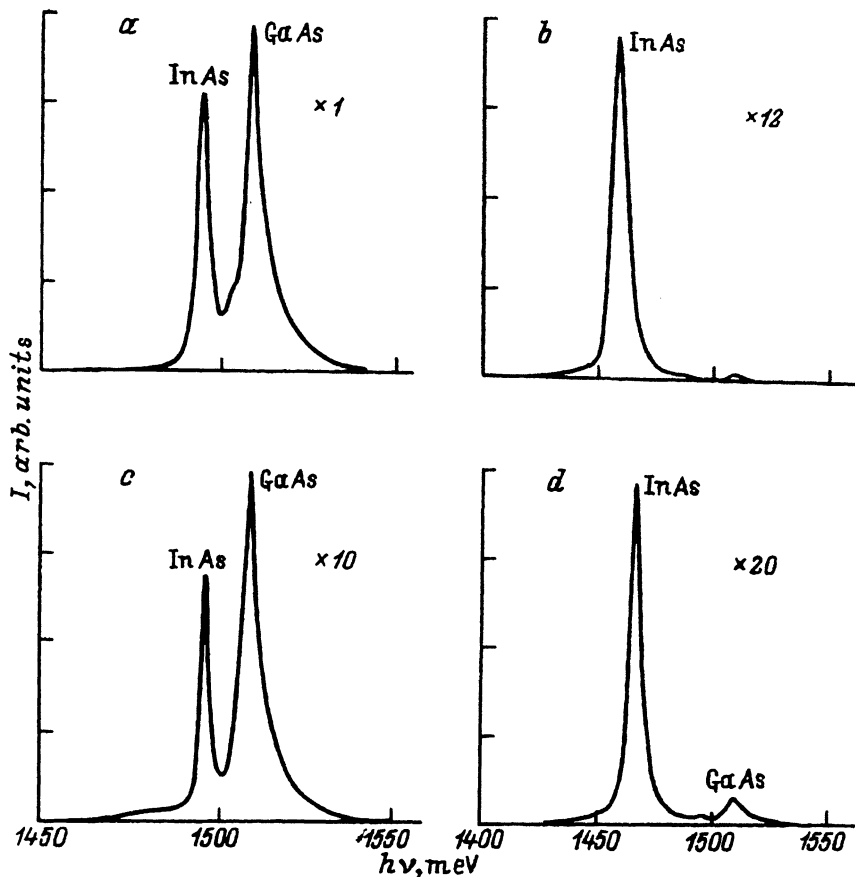


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции структур типа 1 и типа 2 при $T = 77$ К. Тип структуры, ориентация: $a - 1$ (100), $b - 2$ (100), $c - 1$ (311 A), $d - 2$ (311 A).

эффект наблюдается и в случае использования подложек, ориентированных по (311 Å) (рис. 2, c, d).

Такая картина не укладывается в распространенные представления о процессах роста при МПЭ [7], согласно которым рост осуществляется посредством образования монослойных островков InAs, покрывающих в случае «субмонослойного» осаждения часть поверхности роста. Но при этом, вследствие статического характера распределения размеров островков, должно наблюдаться излучение как от больших, так и от малых островков, приводя к существенно неоднородному уширению линии люминесценции.

На основе полученных данных можно предположить, что атомы In в случае «субмонослойного» покрытия распределены по поверхности однородно и не формируют монослойных островков InAs, о чем свидетельствует малая ширина линии, обусловленной осаждением In в структуре типа 1. Таким образом, нам представляется, что при «субмонослойном» осаждении в матрице GaAs образуется атомный слой, состоящий из почти равномерно распределенных атомов In и Ga, в то

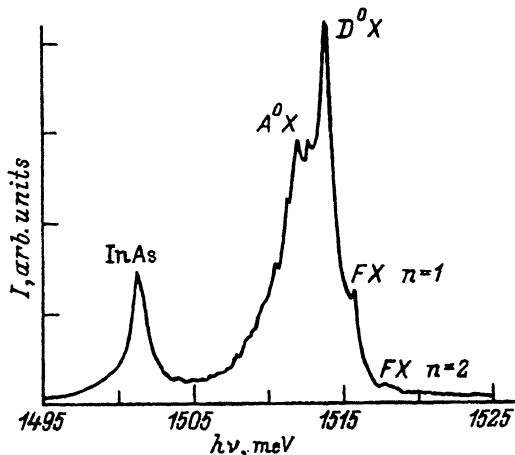


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции структуры типа 1 ориентации (311 А) при $T = 5$ К.

время как при монослойном осаждении такой атомный слой полностью состоит из атомов In. Этим можно объяснить различие в спектральном положении линий, связанных с InAs, в структурах типов 1 и 2. Механизм, приводящий к образованию стабильного «субмонослойного» покрытия в настоящее время не ясен, но очевидно, что образование кластеров InAs, служащих центрами формирования дислокаций, в случае «субмонослойного» осаждения затруднено, что и приводит к более высокой интенсивности излучательной рекомбинации по сравнению с монослойным осаждением.

На рис. 3 приведен спектр ФЛ структуры типа 1 (для ориентации (311 А)) при температуре наблюдения 5 К. Полная ширина на половине высоты линии ФЛ для «субмонослойного» слоя InAs менее 1 мэВ, что свидетельствует о высокой однородности распределения атомов In по поверхности.

Сравнение фотолюминесценции структур с квантовой ямой $(\text{In,Ga})\text{As}/\text{GaAs}$, полученной различными способами формирования слоя, содержащего In (структуры типа 3, 4 и 5), при температуре наблюдения 77 К, представлено на рис. 4, а, б, с соответственно. Отличие в спектральном положении линий ФЛ структур различного типа может быть объяснено незначительным ($\approx 3\%$) различием среднего состава [8]. Как следует из рис. 4, «субмонослойная» сверхрешетка обладает наивысшей интенсивностью излучательной рекомбинации. Кроме того, сбор носителей в квантовую яму также наиболее эффективен в случае сверхрешетки $\text{InAs}(1 \text{ \AA})/\text{GaAs}(6 \text{ \AA})$, так как излучение из GaAs при 77 К практически не наблюдается. Данный факт указывает на отсутствие неоднородностей в структуре, например, неоднородных полей деформации, обусловленных дислокациями. Указанный эффект наблюдается и при комнатной температуре (рис. 5). Интенсивность люминесценции (линия QW) от структуры типа 5 (сверхрешетка $\text{InAs}(1 \text{ \AA})/\text{GaAs}(6 \text{ \AA})$) превосходит примерно в 40 раз интенсивность ФЛ от структуры типа 3 (твердый раствор $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$). Высокая эффективность излучательной рекомбинации в квантовых ямах на основе «субмонослойных» слоев InAs указывает на перспективность их использования в светоизлучающих приборах нового поколения.

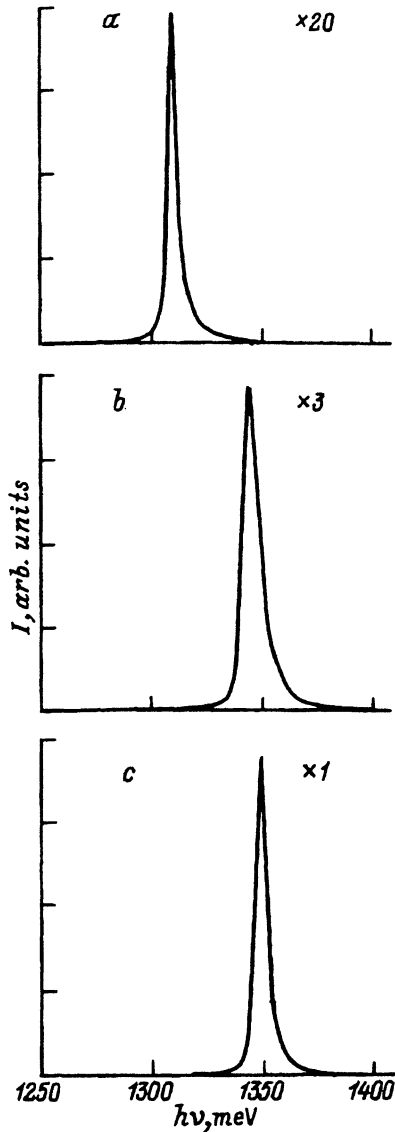


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции структур с квантовой ямой (In,Ga)As/GaAs, полученной различными способами формирования слоя, содержащего In, при $T = 77$ К.

Тип структуры: а — 3, б — 4, с — 5.

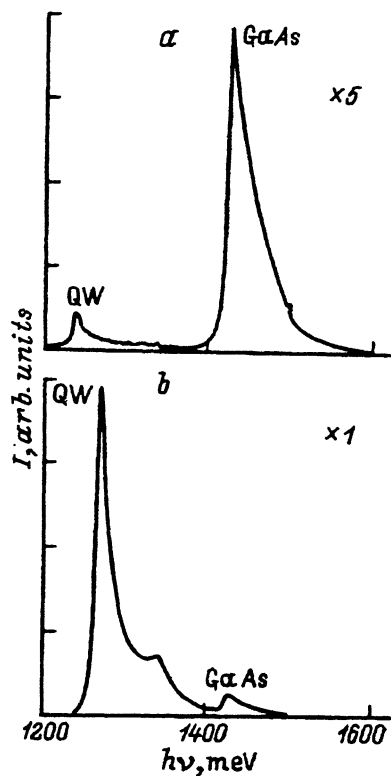


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции структур с квантовой ямой (In,Ga)As/GaAs, полученной различными способами формирования слоя, содержащего In, при $T = 300$ К.

Тип структуры: а — 3, б — 5. Излучение из квантовой ямы обозначено QW.

Таким образом, предложен и реализован новый метод эпитаксиального выращивания гетероструктур на основе напряженных слоев (In,Ga)As, позволяющий как значительно повысить эффективность излучательной рекомбинации в указанных структурах, так и реализовать сверхтонкие квантово-размерные слои с исключительной одно-

родностью по среднему составу и эффективной толщине. Метод может быть использован для получения напряженных слоев и в других системах.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] S.E. Fischer, D. Fekete, G.B. Feak, J.M. Ballantyne. Appl. Phys. Lett., **50**, 714 (1987).
- [2] J.W. Matthews, A.E. Blackeslee, J. Cryst. Growth, **27**, 118 (1974).
- [3] P.L. Gourley, I.J. Fritz, L.R. Dawson. Appl. Phys. Lett., **52**, 377 (1988).
- [4] D.P. Bour, R.U. Martinelli, D.B. Gilbert, L. Elbaum, M.G. Harvey. Appl. Phys. Lett. **55**, 1501 (1989).
- [5] P. Maurel, J. Nagle, J.P. Hirtz. Japan. J. Appl. Phys., **32**, P. 1, 1056 (1993).
- [6] T. Susuki, T. Nishinaga. VI Int. Conf. on MBE (San Diego, CA, USA), PI-10 (1990).
- [7] Б.А. Джойс. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры, 37, М.: Мир (1989).
- [8] B. Elman, E.S. Koteles, P Melman, C. Jagannath, J. Lee, D. Dugger. Appl. Phys. Lett., **55**, 1969 (1989).

Редактор Т.А. Полянская
