

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ КЛАСТЕРОВ (In,Ga)As В МАТРИЦЕ GaAs

*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 5 марта 1994 г. Принята к печати 14 марта 1994 г.)

При определенных условиях выращивания методом молекулярно-пучковой эпитаксии происходит трансформация упруго-напряженного слоя (In,Ga)As, осаждаемого на подложке GaAs(100), в массив трехмерных зародышей. Используя данный эффект, нами были получены кластеры (In,Ga)As в матрице объемного GaAs, которые могут рассматриваться как массив квантовых точек. Показано, что температура подложки, соотношение In/Ga и средняя толщина осажденного материала оказывают влияние на процесс образования кластеров и их оптические свойства. Впервые наблюдалась лазерная генерация при инжекционной накачке с использованием в качестве активной среды массива квантовых точек, полученных непосредственно в процессе эпитаксиального выращивания структур.

Создание и исследование гетероструктур с ограничением носителей более чем в одном направлении является в настоящее время весьма актуальной задачей с точки зрения как фундаментальных свойств систем с пониженной размерностью, так и возможного приборного применения [1]. В [2] нами была продемонстрирована возможность получения методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) структур с массивом квантовых кластеров (In,Ga)As в матрице GaAs. Метод основан на распаде напряженного слоя на микроскопические трехмерные островки [3], зарастаемые затем слоем GaAs. Подобные структуры проявляют высокую интенсивность люминесценции и показывают свою перспективность для использования в приборах оптоэлектроники. В частности, в [2] впервые наблюдалась лазерная генерация через состояния квантовых кластеров при оптической накачке.

В настоящей работе мы покажем, что средний состав и толщина осажденного (In,Ga)As, а также температура выращивания оказывают влияние на процесс формирования указанных кластеров и их оптические свойства.

Структуры выращивались методом МПЭ на подложках GaAs(100). Область, содержащая In, помещалась в середину слоя GaAs толщиной 0.2 мкм, ограниченного с обеих сторон короткопериодной сверхрешеткой AlAs(20 Å)/GaAs(20 Å) во избежание ухода неравновесных носителей в подложку и на поверхность [4]. Температура выращивания всей структуры, за исключением активной (содержащей In) области, составляла 600 °С. Рост (In, Ga)As осуществлялся путем поочередного осаждения субмонослойного количества InAs и GaAs со средней толщиной порядка 1 Å. Как было показано нами в [4], при таком способе выращивания атомы In не собираются в монослойные островки, а равномерно распределяются по поверхности, что, по-видимому, связано с выигрыванием в упругой энергии в случае однородного распределения атомов In. Равномерный характер распределения индия, вследствие минимизации каких-либо флуктуаций состава и толщины осаждаемого (In,Ga)As, препятствует локальной релаксации напряжения. Как нам представляется, это имеет решающее влияние на возможность получения массива бездислокационных кластеров.

Исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводились при 77 К с использованием непрерывного He-Ne-лазера, монохроматора и охлаждаемого фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов. Плотность возбуждения составляла 1 Вт/см².

В первой серии экспериментов нами исследовалось влияние полной толщины осажденного (In,Ga)As на процесс формирования кластеров. Температура выращивания (In,Ga)As составляла 460 °С, а число периодов InAs(1 Å)/GaAs(1 Å) варьировалось в различных образцах от 4 до 13. Структура поверхности в процессе роста контролировалась с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. На начальной стадии роста (In,Ga)As картина ДБЭ представляет собой набор дифракционных полос, перпендикулярных поверхности подложки, что соответствует поверхности, гладкой на атомном уровне [5]. Такая картина наблюдалась вплоть до 4–5 циклов InAs(1 Å)/GaAs(1 Å). В случае наращивания данного количества осажденного (In,Ga)As слоем GaAs в спектре фотолюминесценции наблюдается относительно узкий пик, спектральное положение которого соответствует излучению из квантовой ямы In_{0.5}Ga_{0.5}As соответствующей ширины (рис. 1, кривая 1). Увеличение числа осажденных пар InAs(1 Å)/GaAs(1 Å) до 7–8 приводит к изменению наблюдаемой картины дифракции: сплошные тяжи превращаются в прерывистые штрихи, расположенные в шахматном порядке, что связано с возникновением дифракции электронов при прохождении через микроскопические островки на поверхности. Согласно предложенной нами интерпретации [2], эти изменения являются результатом трансформации упруго-напряженного слоя (In,Ga)As в массив трехмерных зародышей. При этом в спектре ФЛ (рис. 1, кривая 2) наблюдается значительное смещение линии в длинноволновую сторону по сравнению с положением, соответствующим излучению из двумерной квантовой ямы соответствующей толщины. Мы приписываем этот факт образованию трехмерных кластеров (In,Ga)As, обладающих значительно большей энергией локализации экситона по сравнению со случаем равномерного распределения того же количе-

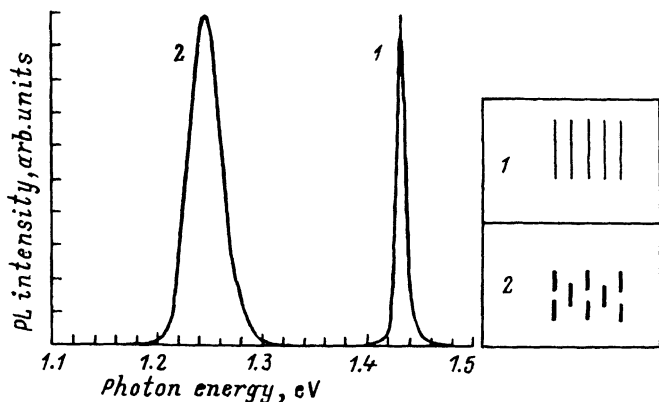


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции при температуре наблюдения 77 К, полученные от структур с двумерным распределением осажденного (In,Ga)As (1) и со сформированными квантовыми кластерами (2).

Кривые нормированы на интенсивность сигнала в максимуме. На вставке — дифракция, наблюдавшаяся в конце роста (In,Ga)As для соответствующих структур.

ства материала двумерным образом. Интенсивность люминесценции остается очень высокой, что свидетельствует об отсутствии в структуре дислокаций, снимающих напряжение. Исследования скола подобных структур с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения дают латеральные размеры образовавшихся кластеров порядка 45–50 Å. Результатам исследований методом ПЭМ будет посвящена отдельная работа.

Дальнейшее увеличение числа осажденных периодов (10–13) приводит к появлению точечной картины дифракции, характерной для массива мезоскопических трехмерных островков. Интенсивность ФЛ при этом резко падала, как следствие возникновения в структуре дислокаций несоответствия с высокой плотностью.

Увеличение среднего состава по In осаждаемого материала за счет использования циклов InAs(1.2 Å)/GaAs(0.8 Å) привело к тому, что возникновение штриховой картины дифракции и формирование трехмерных кластеров происходит при меньшем количестве осажденного материала по сравнению со случаем InAs(1 Å)/GaAs(1 Å). Уже в структуре с 5 парами InAs(1.2 Å)/GaAs(0.8 Å), осажденными при 490 °С, наблюдалась кластерная люминесценция (рис. 2, кривая 1), сходная с показанной на рис. 1 (кривая 1). Данный факт свидетельствует о том, что причиной реорганизации слоя (In,Ga)As в массив трехмерных зародышей является упругое напряжение, нарастающее с толщиной материала быстрее в случае увеличения среднего состава по In.

Для изучения влияния температуры осаждения на процесс трансформации упруго-напряженного слоя нами была выращена серия образцов с одинаковым средним составом и средней толщиной (In,Ga)As [InAs(1.2 Å)/GaAs(0.8 Å)×5], но используя температуру подложки во время роста слоя, содержащего In, в диапазоне 490–250 °С. Снижение температуры до 400 °С не приводит к заметному изменению картины ДБЭ в конце роста (In,Ga)As по сравнению со случаем 490 °С. В спектре ФЛ по-прежнему наблюдается широкая длинноволновая по-

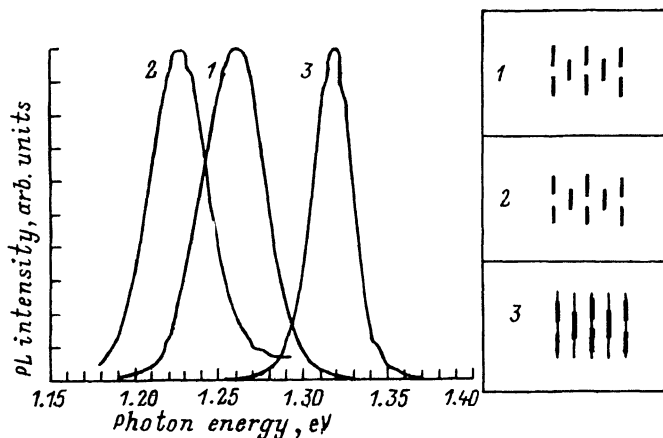


Рис. 2. Спектр лазерной генерации при 77 К для плотности тока — 6 кА/см².

лоса кластерной люминесценции (рис. 2, кривая 2). Сдвиг максимума в сторону меньших энергий связан, по-видимому, с меньшим переиспарением атомов In с растущей поверхности, что приводит к увеличению средней молярной доли InAs.

В то же время для температуры роста 300 °С наблюдаются значительные отличия: в картине ЛБЭ штриховая модуляция выражена очень слабо, накладываясь на полосатую картину дифракции. Это указывает на незавершенность процесса формирования кластеров и существование как планарных, так и островковых участков поверхности. Соответственно, энергетическое положение пика ФЛ заметно более коротковолновое (рис. 2, кривая 3). Все это позволяет говорить о данном случае, как о переходном между кластерным (рис. 1, кривая 2; рис. 2, кривые 1, 2) и двумерным (рис. 1; кривая 1) распределением осажденного (In,Ga)As по поверхности. Снижение температуры осаждения до 250 °С приводит, с одной стороны, к сохранению во время всего роста картины дифракции, состоящей из линий, а с другой — к

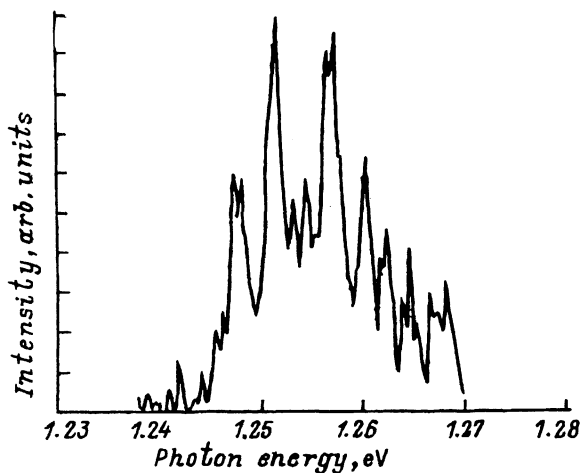


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции при температуре наблюдения 77 К, иллюстрирующие влияние температуры осаждения на процесс формирования кластеров (In,Ga)As.

Температура, °С: 1 — 490, 2 — 400, 3 — 320. Кривые нормированы на интенсивность сигнала в максимуме. На вставке — дифракция, наблюдавшаяся в конце роста (In,Ga)As для соответствующих структур.

практически полному исчезновению сигнала ФЛ от $(\text{In,Ga})\text{As}$, что говорит о большом числе дефектов в материале, осажденном при столь низкой температуре.

В случае использования циклов $\text{InAs}(1 \text{ \AA})/\text{GaAs}(1 \text{ \AA})$ наблюдается сходная температурная зависимость. Однако переход от кластерного к двумерному распределению $(\text{In,Ga})\text{As}$ по поверхности происходил при существенно более высокой температуре 430°C .

Влияние температуры подложки на процесс трансформации осажденного $(\text{In,Ga})\text{As}$, как нам представляется, может быть объяснено принимая во внимание уменьшение подвижности атомов In и Ga на растущей поверхности. Возникающие кинетические барьеры «замораживают» систему и не позволяют ей достичь термодинамически равновесного состояния за время выращивания.

Исключительно высокая интенсивность люминесценции, наблюдаемая в структурах с кластерами, указывает на возможность их применения в светоизлучающих приборах на длину волны в области 1 мкм . В качестве примера на рис. 3 приведен спектр лазерной генерации при 77 K , полученный от структуры, в которой квантовые кластеры $(\text{In,Ga})\text{As}$ были вставлены в активную область инжекционного гетеролазера на основе $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$. Пороговая плотность тока составила 1 кА/см^2 для четырехсклоного лазера с размерами $150 \times 80 \text{ мкм}$. Насколько нам известно, это первое сообщение о лазерной генерации при инжекционной накачке для структур, использующих в качестве активной среды массив трехмерных квантовых кластеров.

Таким образом, нами исследовано влияние условий роста на процесс формирования кластеров $(\text{In,Ga})\text{As}$ в матрице объемного GaAs . По достижении некоторой толщины осажденного материала, зависящей от среднего состава и температуры, происходит трансформация напряженного слоя в массив трехмерных зародышей с латеральными размерами около 50 \AA . Увеличение содержания In в осаждаемом слое снижает толщину, необходимую для формирования кластеров. Снижение температуры роста препятствует процессу трансформации. Впервые наблюдалась лазерная генерация при инжекционной накачке для структур, использующих в качестве активной среды квантовые точки.

Авторы благодарны Г.Э. Штенгелю за помощь в измерении лазерных характеристик.

Работа написана при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] H. Sakaki. Japan. J. Appl. Phys., **19**, L735 (1980).
- [2] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, И.Г. Табатадзе, П.С. Копьев. ФТП, **28** (1994).
- [3] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **63**, 3203 (1993).
- [4] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов. ФТП, **28**, 604 (1994).
- [5] P.I. Cohen, P.R. Pukite, J.M. van Hove, C.S. Lent. J. Vac. Sci. Techn. A, **4**, 1251 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев

Influence of Deposition Conditions on Formation Processes of Quantum Clusters (In,Ga)As in GaAs Matrix

A. Yu. Yegorov, A. E. Zhukov, P. S. Kopyev, N. N. Ledentzov, M. V. Maximov, and V. M. Ustinov

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, 194021, St.-Petersburg, Russia
