

©1994 г.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ КЛАСТЕРАМИ InGaAs–GaAs

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

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 29 декабря 1993 г. Принята к печати 13 января 1994 г.)

Мы исследовали оптические свойства структур InGaAs–GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Рост осуществлялся путем попеременного осаждения молекул InAs и GaAs на поверхности GaAs (100). Количество InAs, осажденного во время каждого цикла, соответствовало слою со средней толщиной 1 Å. На начальной стадии роста (In,Ga)As картина дифракции быстрых электронов соответствовала планарной поверхности, однако при достижении некоторой критической толщины в ней наблюдались изменения, связанные с трансформацией упруго-напряженного слоя в массив трехмерных зародышей (In,Ga)As, которые затем зарастивались GaAs. Уменьшение температуры подложки приводило к увеличению критической толщины слоя (In,Ga)As, и таким образом могли быть получены как гетероструктуры с квантовыми ямами, так и с квантовыми кластерами при одном и том же среднем количестве осажденного материала. В спектрах фотолюминесценции и в спектрах возбуждения люминесценции структур с кластерами наблюдался пик, сильно смещенный в длинноволновую сторону от положения, соответствующего случаю слоевого роста, с шириной 30–40 мэВ, который доминировал в спектре вплоть до высоких плотностей возбуждения и температур наблюдения. Впервые наблюдалась лазерная генерация через состояния квантовых кластеров.

Получение высокосовершенных гетероструктур с размерностью ниже чем два, является в настоящее время актуальной задачей как для исследования фундаментальных свойств низкоразмерных систем, так и для приборных применений [1]. Для использования таких структур в оптоэлектронных приборах, например в лазерах, помимо эффективного ограничения носителей заряда в двух или трех измерениях необходимо обеспечить высокую квантовую эффективность излучательной рекомбинации. Кроме того, для получения достаточно высокого коэффициента усиления, требуемого для преодоления неизбежных потерь, необходимо иметь однородный массив близко расположенных квантовых проволок или точек. Для реализации указанных структур непосредственно в процессе роста в настоящее время используются

несколько методов: выращивание сверхрешеток с частичным заполнением поверхности на подложках, слабо разориентированных от направления $\langle 100 \rangle$ [2]; выращивание гофрированных сверхрешеток на микроскопически упорядоченных фасетированных поверхностях [3,4]; формирование изолированных квантовых кластеров на фасетированных поверхностях [5]; формирование массивов квантовых нитей за счет спонтанного распада тонкого слоя однородного твердого раствора на упорядоченную сверхрешетку из чередующихся слоев различного состава [6]. Ни один из этих методов, однако, пока не привел к получению структур, обладающих свойствами, необходимыми для изготовления совершенных оптоэлектронных приборов. В данной работе мы показываем возможность получения методом молекулярно-пучковой эпитаксии высокосовершенных структур с массивом изолированных квантовых кластеров $(\text{In,Ga})\text{As}$, пригодных для использования в современных оптоэлектронных приборах. Получение структур основано на спонтанном распаде псевдоморфного напряженного слоя на микроскопические трехмерные кластеры [7,8].

Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке ЭП-203 (Россия). Концентрация фоновых примесей в слоях составляла $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, как это следовало из спектров экситонной люминесценции толстых слоев GaAs при 4.2 К. Скорость роста контролировалась по осцилляциям интенсивности рефлексов в картинах дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. Исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводились при температурах 77 и 300 К с использованием гелий-неонового лазера непрерывного действия или импульсного лазера на парах азота. Для снятия спектров возбуждения ФЛ при 77 К использовался свет галогеновой лампы, пропущенный через монохроматор. В качестве регистрирующей системы использовался монохроматор и охлаждаемый фотоумножитель, работающий в режиме счета фотонов (непрерывное возбуждение) или синхронного детектирования (импульсное возбуждение). Исследованные структуры выращивались на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и состояли из буферного слоя GaAs толщиной 0.2 мкм, сверхрешетки GaAs/AlAs с толщинами слоев по 20 Å, состоящей из 50 периодов, слоя GaAs толщиной 0.2 мкм. Температура подложки при росте указанных слоев составляла 600 °С, затем она понижалась до 430–460 °С, и на поверхности осаждалось некоторое количество $(\text{In,Ga})\text{As}$. После этого при той же температуре на поверхности выращивался слой GaAs толщиной 250 Å. Для исследования лазерной генерации выращивались специальные структуры, в которых область $(\text{In,Ga})\text{As}$ помещалась в середину слоя GaAs толщиной 0.4 мкм. Слой GaAs был ограничен слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 1 мкм со стороны подложки и 0.1 мкм со стороны поверхности. Давление мышьяка во время роста было постоянным и примерно в 1.5 раза превышало минимально необходимое для роста GaAs в условиях обогащения мышьяком.

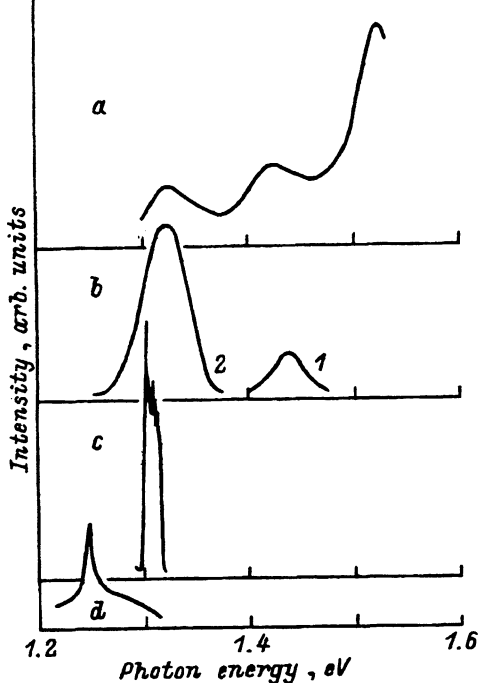
Рост $(\text{In,Ga})\text{As}$ осуществлялся путем попеременного осаждения атомов индия и галлия в потоке атомов мышьяка. Количество InAs или GaAs, осажденных во время каждого цикла, соответствовало слою со средней толщиной 1 Å. При таком способе выращивания молекулы InAs

равномерно распределяются по поверхности, а не собираются в монослойные островки, как это имеет место при росте GaAs. Этот факт, по всей видимости, связан с большим локальным выигрышем в упругой энергии в случае однородного распределения. В нашей предыдущей работе [9] мы показали, что люминесцентные свойства структур (In,Ga)As/GaAs, выращенных таким методом, свидетельствуют об их исключительно высоком совершенстве. Такое качество исходного слоя оказывает решающее влияние на возможность получения бездислокационного массива трехмерных кластеров (In,Ga)As.

На начальной стадии роста (In,Ga)As картина ДБЭ соответствовала планарной поверхности с высокой концентрацией мономолекулярных ступеней и представляла собой набор дифракционных полос, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки. При достижении некоторой критической толщины слоя (In,Ga)As (7–8 полных циклов при температуре подложки 460 °C) сплошные полосы в картине ДБЭ превращались в прерывистые штрихи, что указывало на появление на планарной поверхности микроскопических рассеивателей. При дальнейшем осаждении (In,Ga)As картина ДБЭ представляла собой массив расположенных в шахматном порядке точек, характерных для объемной дифракции, и свидетельствовала об образовании мезоскопических трехмерных образований. Согласно нашей интерпретации, эти изменения связаны с трансформацией упруго-напряженного слоя в массив трехмерных микроскопических зародышей (In,Ga)As. После своего формирования зародыши зарацивались GaAs. Уменьшение температуры подложки до 430 °C приводило к увеличению числа циклов, соответствующих планарному росту, и соответственно к увеличению критической толщины слоя (In,Ga)As, при котором разложение на трехмерные зародыши (кластеры) еще не происходит. Таким образом могли быть получены как гетероструктуры с квантовыми ямами, так и с квантовыми кластерами при одном и том же среднем количестве осажденного (In,Ga)As.

На рисунке представлены спектры ФЛ (*b*) при 77 К для гетероструктур с одинаковым количеством (In,Ga)As, но выращенных при двух различных температурах подложки T_s , когда изменения в дифракционной картине не наблюдались ($T_s = 430$ °C, кривая 1) или были отчетливо выражены ($T_s = 460$ °C, кривая 2). Из рисунка следует, что в последнем случае имеет место драматическое изменение спектра ФЛ — основная линия в спектре значительно смещается в сторону меньших энергий фотона. Мы связываем данный эффект с образованием трехмерных кластеров (In,Ga)As, обладающих существенно большей величиной энергии локализации экситонов по сравнению со случаем однородного распределения того же количества материала на поверхности. При комнатной температуре ширина линии кластерной ФЛ составляет всего 35–40 мэВ и сопоставима с шириной линии в случае совершенных структур с квантовыми ямами.

На рисунке показан также спектр возбуждения люминесценции структуры с кластерами, в котором отчетливо проявляются два пика, которые мы интерпретируем как состояния экситонов, образованных с участием тяжелых и легких дырок (спектр *a*). Из рисунка видно, что пики тяжелых экситонов в спектре ФЛ и спектре возбуждения ФЛ совпадают, что свидетельствует о высокой плотности состояний,



Спектры: *a* — возбуждения люминесценции структуры с квантовыми кластерами (In,Ga)As; *b* — ФЛ гетероструктур с одинаковым количеством (In,Ga)As, но выращенных при двух различных температурах подложки T_s , °C: 1 — 430 (распад на кластеры не наблюдается), 2 — 460 (распад на кластеры отчетливо выражен); *c* — ФЛ при наблюдении с поверхности структуры с квантовыми кластерами; *d* — ФЛ при наблюдении с торца структуры, изготовленной в виде резонатора Фабри-Перо. Плотность возбуждения, Вт · см⁻²: *a* — 10⁻⁶, *b-d* — 10⁴. T , K: *a-c* — 77, *d* — 300.

связанных с квантовыми кластерами. Если из указанной структуры сформирован резонатор Фабри-Перо, то при наблюдении ФЛ из торца структуры при высоких плотностях возбуждения наблюдается лазерная генерация как при 77 К, так и при 300 К (см. спектры *c, d*).

В случае, если штрихи на картине ДБЭ при прекращении осаждения (In,Ga)As отчетливо видны, но модуляция интенсивности вдоль рефлекса выражена слабо, то спектр ФЛ структуры существенно уширен, особенно при высоких плотностях возбуждения. Наблюдается заметный сдвиг между максимумом люминесценции и уширенным краем поглощения для структур с кластерами. В данном случае при возбуждении фотонами с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны GaAs, форма линии ФЛ сильно зависит от энергии возбуждающего кванта. Такое поведение свидетельствует об образовании системы неупорядоченных кластеров (In,Ga)As и подтверждает данные ДБЭ о том, что процесс их формирования не завершен.

Напротив, появление в картине ДБЭ отчетливой картины точечной дифракции, свидетельствующее об образовании мезоскопических кластеров, обуславливает резкое уменьшение интенсивности ФЛ. В данном случае, по всей видимости, происходит релаксация упругих напряжений в кластерах (In,Ga)As, сопровождающаяся образованием большого количества дислокаций несоответствия.

Таким образом, в данной работе мы показали, что при определенных условиях выращивания удается получать высокооднородные массивы квантовых кластеров (In,Ga)As в матрице GaAs. Оптические свойства указывают на перспективность использования указанных структур в опто- и микроэлектронных приборах нового поколения.

Данная работа была поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] H. Sakaki. *Japan. J. Appl. Phys.*, **19**, L735 (1980).
- [2] P.M. Petroff, J. Gaines, M. Tsuchiya, R. Simes, L. Coldren, H. Kroemer, J. English, A.C. Gossard. *J. Cryst. Growth*, **95**, 260 (1989).
- [3] R. Notzel, N.N. Ledentsov, L. Daweritz, M. Hohentein, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 3812 (1991).
- [4] M. Kasu, N. Kobayashi. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1262 (1993).
- [5] Ж.И. Алферов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, С.И. Иванов, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, Б.Я. Мельцер, В.М. Устинов. *ФТП*, **26**, 1715 (1992).
- [6] P.J. Pearah, A.C. Chen, A.M. Moy, K.C. Hsieh, K.Y. Cheng. *J. Cryst. Growth*, **127**, 900 (1993).
- [7] J.F. Carlin, R. Houdre, A. Rudra, M. Pegems. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 3018 (1991).
- [8] J. Tersoff, R.M. Tromp. *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 2782 (1993).
- [9] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов. *ФТП*, **28**, 604 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

Optical Properties of Heterostructures with Quantum Clusters InGaAs-GaAs

*N.N.Ledentsov, V.M.Ustinov, A.Yu.Yegorov, A.E.Zhukov, M.V.Mazimov,
I.G.Tabatadse, and P.S.Kopyev*

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