

## Фотолюминесценция квантовых точек InSb в матрицах GaAs и GaSb

© А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Б.Я. Мельцер, П.В. Неклюдов, С.В. Шапошников, Б.В. Воловик, И.Л. Крестников, А.В. Сахаров, Н.А. Берт, П.С. Копьев, Д. Бимберг\*, Ж.И. Алферов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Institute für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

(Получена 27 февраля 1996 г. Принята к печати 2 марта 1996 г.)

Проведены исследования фотолюминесцентных свойств квантовых точек, образующихся при осаждении тонкого слоя InSb (1–3 монослоя) на поверхности GaAs(100) и GaSb(100). Результаты работы указывают на важность реакций замещения As–Sb при формировании квантовых точек на поверхности GaAs.

Создание оптоэлектронных светоизлучающих приборов с длиной волны излучения вблизи 1.3 и 1.5 мкм является важной задачей физики полупроводников, что связано с резким уменьшением коэффициента поглощения в оптических волокнах при этих длинах волн. До настоящего времени не было выработанных способов получения бездислокационных гетероструктур на GaAs, излучение которых было бы в области 1.5 мкм при температуре 300 К. Это обусловлено тем, что материалы с малой шириной запрещенной зоны, например, такие как  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ,  $In_xGa_{1-x}As$ , имеют постоянную решетки, сильно отличающуюся от постоянной решетки GaAs. Такое различие приводит к очень малой критической толщине слоя узкозонного материала, осаждаемого на GaAs, что не позволяет существенно сдвинуть линию фотолюминесценции (ФЛ) в длинноволновую сторону от края поглощения GaAs вследствие эффектов размерного квантования. Выращивание слоев с толщиной больше критической приводит к образованию дислокаций несоответствия и к катастрофической деградации оптических свойств.

В последнее время большой прогресс в физике и технологии полупроводников связан с созданием и изучением свойств объектов, имеющих ограничение по всем направлениям, — квантовых точек (КТ). Одним из методов формирования *in situ* таких КТ является спонтанная трансформация упругонапряженного слоя одного материала, выращенного на поверхности другого материала с отличающейся постоянной решетки [1]. При осаждении слоя толщиной больше критической происходит его распад на отдельные островки. Наибольший прогресс связан с созданием КТ (In,Ga)As на поверхности GaAs(100). Полученные КТ имеют бездислокационную природу и отличаются высокой однородностью по размерам. С помощью этого метода можно получать островки узкозонного материала в матрице широкозонного с высотой, значительно превышающей критическую толщину, что приводит к уменьшению энергии размерного квантования и сдвигу линии ФЛ в сторону меньших энергий. На основе структур с InAs КТ, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии,

удалось реализовать преимущества лазера на КТ — высокую характеристическую температуру и низкую пороговую плотность тока [2–4].

В данной работе мы получили и исследовали свойства КТ, сформированных при осаждении тонкого слоя InSb (~1–3 монослоев (МС)) на поверхности GaAs(100) и GaSb(100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Ширина запрещенной зоны InSb ( $E_g \approx 0.17$  эВ) мала по сравнению с шириной запрещенной зоны GaAs ( $E_g \approx 1.42$  эВ) и GaSb ( $E_g \approx 0.72$  эВ). Что еще более важно, величина разрыва в валентной зоне для гетерограницы InSb/GaAs составляет большую часть от полной величины разрыва зон, что с учетом большой эффективной массы тяжелой дырки приводит к кардинальному увеличению энергии локализации. С другой стороны, постоянная решетки InSb ( $a = 6.4794$  Å) превышает постоянную решетки GaAs ( $a = 5.6533$  Å) на ~15%. Такое сильное различие должно приводить к тому, что трансформация поверхности с образованием трехмерных островков будет происходить при осаждении очень тонкого ~1 МС слоя InSb.

Исследованные структуры были выращены на установке молекулярно-пучковой эпитаксии RIBER-32 на подложках GaAs(100) и GaSb(100). Для структур, выращенных на подложках GaAs, на 1000 Å слой GaAs осаждался слой InSb различной толщины и 200 Å слой GaAs. С обеих сторон структура была заключена ограничивающую сверхрешетку ( $20 \text{ Å Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/20 \text{ Å GaAs}$ ) $\times 10$ . Температура подложки при росте структуры составляла 610°C. Перед осаждением InSb температура уменьшалась до 420°C и затем, после осаждения слоя InSb и 50 Å GaAs, снова поднималась до 610°C. Скорость роста InSb составляла 18 Å/мин. Структуры, выращенные на подложках GaSb, состояли из следующей последовательности слоев: GaSb 0.3 мкм, сверхрешетка 55 Å AlSb/20 Å GaSb, состоящая из 5 периодов, GaSb 1000 Å, слой InSb разной эффективной толщины, GaSb 300 Å, сверхрешетка, аналогичная описанной выше, GaSb 20 Å. Температура подложки составляла 500°C, перед

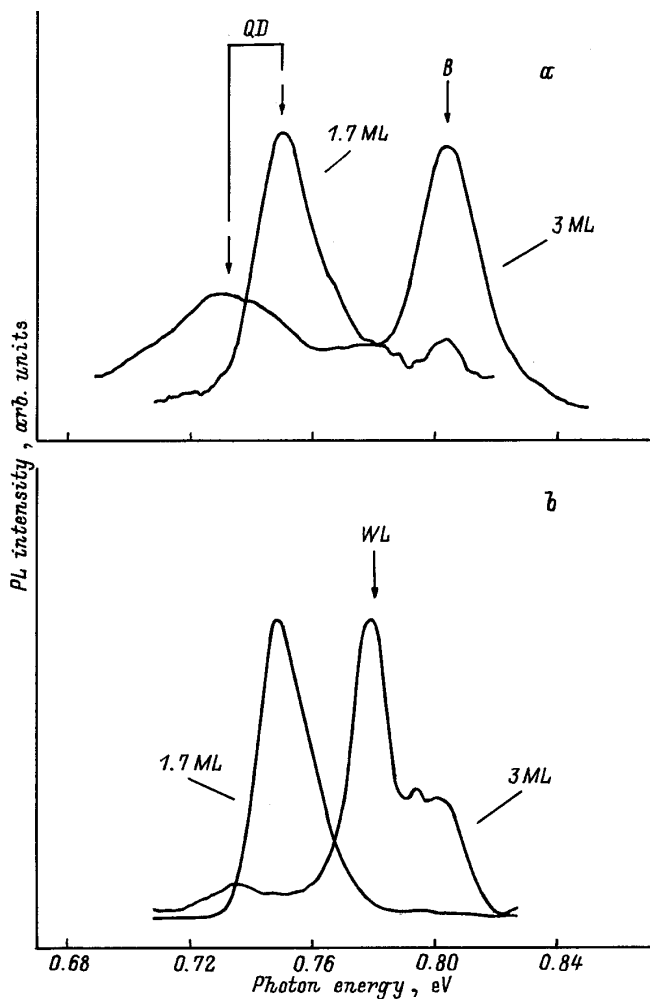


Рис. 1. Спектры ФЛ структур с толщиной слоя InSb, осажденного на поверхность GaSb, равной 1.7 и 3 МС при температурах 77 (a) и 4 К (b).

осаждением точек температура понижалась до 420°С и сохранялась до конца роста структуры. Процесс трансформации поверхности контролировался по картине дифракции быстрых электронов. ФЛ возбуждалась  $Ar^+$  (энергия кванта  $\sim 2.56$  эВ, мощность  $\sim 200$  Вт/см<sup>2</sup>) и полупроводниковым лазером (энергия возбуждения 1.55 эВ, мощность  $\sim 60$  Вт/см<sup>2</sup>), регистрировалась с помощью Ge-фотодиода.

В работе [5] было показано, что трансформация поверхности GaSb с образованием КТ происходит при осаждении слоя InSb эффективной толщиной  $\sim 1.7$ – $2.8$  МС. В соответствии с моделью роста Странски-Крастанова КТ образуются на тонком слое (смачивающем слое) InSb. На рис. 1, a приведены спектры ФЛ структур с эффективной толщиной осажденного InSb  $\sim 1.7$  и  $\sim 3$  МС при  $T = 77$  К. Для обеих структур образование КТ контролировалось по дифракции быстрых электронов. Осаждение  $\sim 1.7$  МС InSb приводит к появлению в спектре ФЛ

помимо линии B, связанной с рекомбинацией неравновесных носителей в области GaSb, интенсивной линии QD с максимумом при  $\sim 0.75$  эВ, обусловленной рекомбинацией носителей через КТ. Ширина полосы составляет  $\sim 25$  мэВ. Увеличение толщины InSb вызывает сдвиг линии QD в длинноволновую сторону до  $\sim 0.73$  эВ и ее уширение до  $\sim 40$  мэВ. Такое поведение ФЛ связано с возрастанием размеров образующихся КТ и увеличением дисперсии по размерам. На рис. 1, b приведены спектры ФЛ этих структур при  $T = 5$  К. Как видно из этого рисунка, понижение температуры приводит к появлению в спектре образца с 3 МС InSb интенсивной линии WL с максимумом при  $\sim 0.78$  эВ. Возникновение этой полосы, по-видимому, связано с рекомбинацией электронно-дырочных пар в смачивающем слое InSb. Увеличение температуры приводит к возрастанию термического выброса носителей из состояний смачивающего слоя и падению интенсивности линии WL.

При осаждении InSb на поверхность GaAs одной из важных проблем является замещение атомов As атомами Sb, которое приводит к формированию тонкого слоя GaSb на поверхности GaAs. Поскольку GaSb имеет постоянную решетки ( $a = 6.0959 \text{ \AA}$ ), отличающуюся от постоянной решетки GaAs на  $\sim 7.8\%$ , может возникать длинноволновая гофрировка поверх-

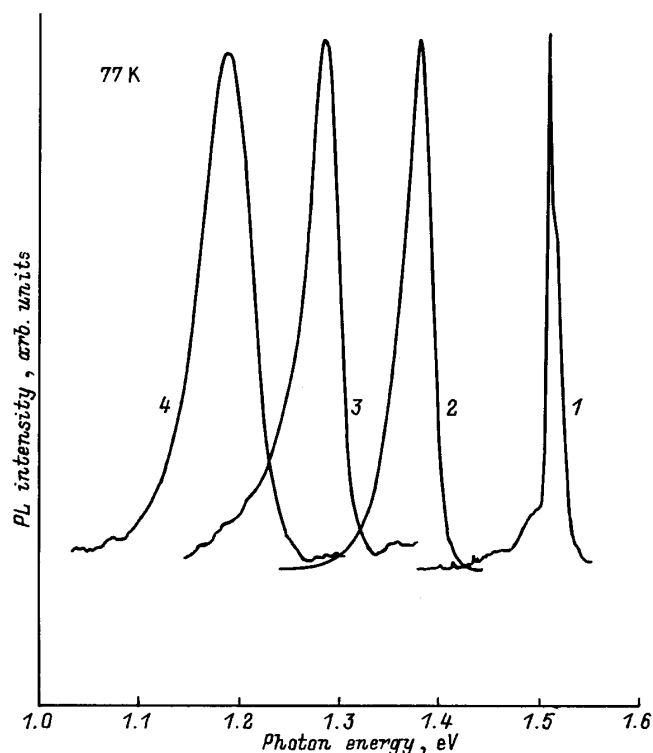


Рис. 2. Спектры ФЛ структур, выращенных на GaAs, которые были выдержаны под потоком Sb в течение 10 с при температурах 550 (1), 470 (2), 420°С (3). Кривая 4 соответствует образцу, в котором после экспозиции под потоком Sb в течение 10 с был осажден слой InSb эффективной толщины 1.7 МС.

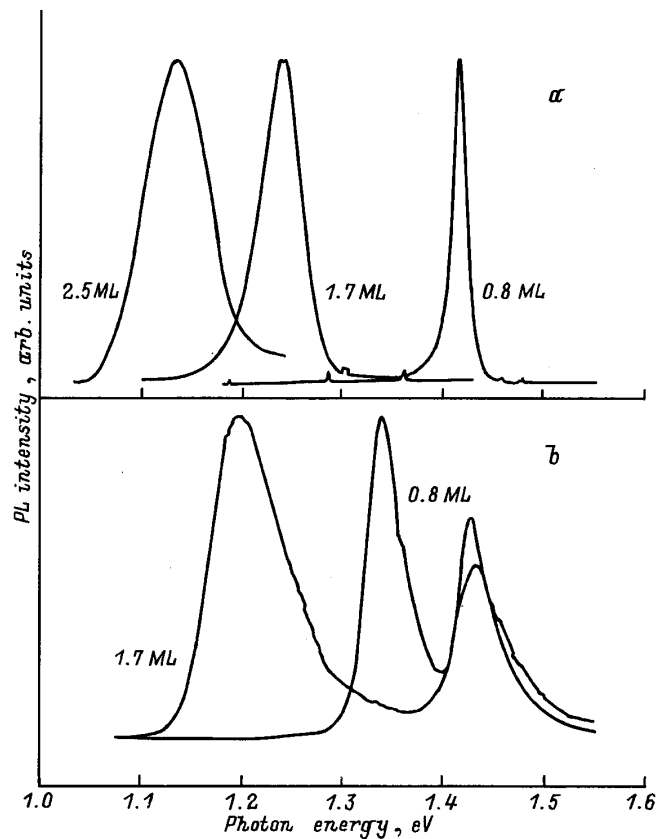


Рис. 3. Спектры ФЛ структур, выращенных на GaAs, с эффективной толщиной слоя InSb 0.8, 1.7 и 2.5 МС при температурах 77 (а) и 300 К (b).

ности и происходит частичная релаксация упругих напряжений. Кроме того, после осаждения  $\sim 3$  МС GaSb начинается распад слоя GaSb на КТ. Эти эффекты могут влиять на кинетику процесса трансформации.

Нами было изучено влияние условий осаждения InSb на процесс образования точек. Как известно [6,7], на поверхности GaAs, находящейся при температуре  $\sim 470^\circ\text{C}$  под потоком атомов Sb в течение примерно 10 с, происходит образование слоя GaSb толщиной  $\sim 1$  МС. На рис. 2 приведены спектры структур, в которых при разных температурах подложки производилась остановка роста на  $\sim 10$  с под потоком Sb. Как видно из этого рисунка, увеличение температуры приводит к сдвигу линии ФЛ в область больших энергий и ее исчезновению при температуре  $\sim 550^\circ\text{C}$ , что связано, по-видимому, с уменьшением толщины слоя GaSb. Сопоставляя положение максимума линии с результатами работы [7], можно сделать вывод, что экспозиция при  $T = 420^\circ\text{C}$  приводит к образованию слоя GaSb толщиной  $\sim 3$  МС, а при  $T = 470^\circ\text{C}$  к образованию слоя толщиной  $\sim 1$  МС, что свидетельствует о высокой скорости замещения атомов мышьяка атомами сурьмы при низких температурах роста. На рис. 2 также приведен спектр

ФЛ структуры, в которой после 10 с экспозиции под потоком Sb при  $T = 420^\circ\text{C}$  был осажден слой InSb толщиной 1.7 МС. Это привело к уширению линии ФЛ и ее сдвигу в длинноволновую сторону.

На рис. 3, а приведены спектры ФЛ структур с разной толщиной осажденного InSb при  $T = 77$  К. При осаждении  $\sim 0.8$  МС InSb в спектре наблюдается узкая линия с максимумом при  $\sim 1.415$  эВ и шириной  $\sim 15$  мэВ. Увеличение количества осажденного материала приводит к значительному сдвигу энергии максимума линии в длинноволновую сторону и ее уширению до  $\sim 75$  мэВ. Этот факт согласуется с данными дифракции быстрых электронов, демонстрируя уширение дифракционных рефлексов, указывающее на морфологическую трансформацию слоя InSb. Увеличение температуры до 300 К приводит к сдвигу линии в длинноволновую сторону и ее уширению (рис. 3, b).

На рис. 4 приведено изображение поверхности GaAs после осаждения 1 МС InSb, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии (вид сверху). Как видно из этого изображения, в этой структуре произошла трансформация поверхности с образованием островков. Характерные латеральные размеры этих островков составляют  $\sim 200$  Å.

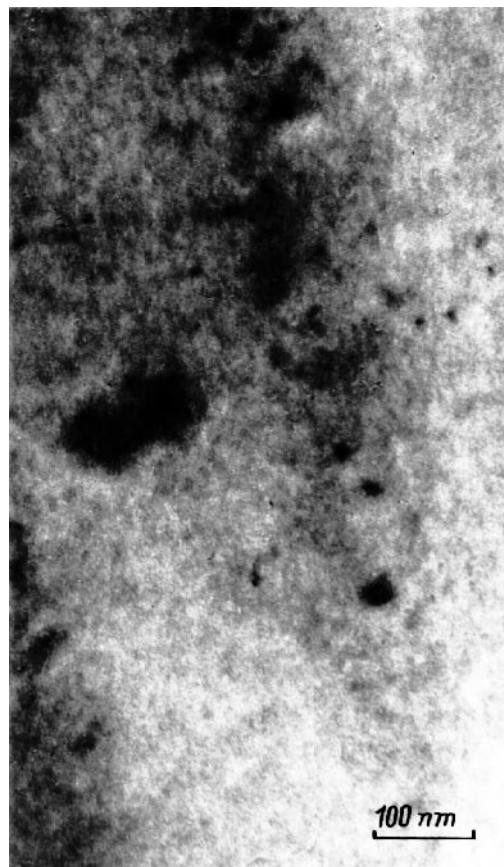


Рис. 4. Изображения островков, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии (вид сверху), для структуры с 1.7 МС InSb на поверхности GaAs.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что при осаждении тонкого слоя InSb толщиной более  $\sim 1.7$  МС на поверхности GaAs и GaSb происходит его спонтанная трансформация на КТ. Результаты работы указывают на важность реакций замещения As–Sb при формировании островков.

## Список литературы

- [1] P.M. Petroff, S.P. DenBaars. *Superlat. Microstruct.*, **15**, 15 (1994).
- [2] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich. *Electron. Lett.*, **30**, 1416 (1994).
- [3] Ж.И. Алферов, Н.А. Берт, А.Ф. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоогов, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 351 (1996).
- [4] Ж.И. Алферов, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, И.В. Кочнев, В.В. Комин, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, С.С. Рувимов, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 357 (1996).
- [5] N. Bertu, O. Brandt, M. Wessermcier, K. Ploog. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 31 (1996).
- [6] F. Hatami, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, J. Bohrer, F. Heinrichsdorff, M. Beer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich, U. Richter, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 656 (1995).
- [7] N.N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, I.N. Yassievich, N.N. Faleev, S.V. Shaposhnikov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Phys. Rev. B*, **52**, 14058 (1995).

Редактор В.В. Чалдышев

## Photoluminescence study of InSb quantum dots in GaAs and GaSb matrix

A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, B.Ya. Meltser, P.V. Nekludov, S.V. Shaposhnikov, B.V. Volovik, I.L. Krestnikov, A.V. Sakharov, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, D. Bimberg\*, Zh.I. Alferov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russia Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* Technische Universitat Berlin, Hardenbergstr. 36,  
D-10623 Berlin, Germany

**Abstract** Photoluminescence of quantum dots, which are formed by deposition of a thin (1–3 monolayers) InSb layer on GaAs(100) and GaSb(100) surfaces, was studied. Obtained results point to the importance of As–Sb substitution reactions in the dot formation process on GaAs surface.