

# Формирование двумерных nanoостровков при осаждении сверхтонких слоев InSb на поверхность GaSb

© А.Ф. Цацульников, Д.А. Бедарев, Б.В. Воловик, С.В. Иванов, М.В. Максимов, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, Б.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, П.С. Копьев, А.Ю. Чернышов\*, М.В. Белоусов\*

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

\* Санкт-Петербургский государственный университет (Институт физики), 198904 Петродворец, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 29 декабря 1998 г. Принята к печати 30 декабря 1998 г.)

Показано, что при выращивании сверхтонких ( $\sim 1.5$  монослоя) слоев InSb на поверхности GaSb(100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии происходит формирование массива двумерных островков. При осаждении нескольких слоев InSb, разделенных узкими барьерами, островки следующих рядов образуются над островками первого ряда (эффект вертикальной корреляции). Формирование островков подтверждается исследованиями спектров фотолуминесценции.

## 1. Введение

В настоящее время достигнут значительный прогресс в получении и исследовании свойств гетероструктур с квантовыми точками (КТ). Наибольший интерес представляют массивы КТ, образующиеся *in situ* в процессе роста тонких напряженных слоев при гетероэпитаксии [1]. Эффект самоорганизации КТ позволяет получить упорядоченные массивы трехмерных когерентных наноразмерных островков с низкой дисперсией по размеру. В настоящее время наибольший прогресс достигнут в получении (In,Ga)As/(Al,Ga)As КТ [2–5]. Интерес представляют как исследования фундаментальных физических свойств структур с КТ, так и создание оптоэлектронных приборов на основе КТ. Так, созданы лазеры на основе КТ, демонстрирующие сверхвысокую температурную стабильность порогового тока и высокое материальное усиление [6,7].

Однако помимо трехмерных КТ интерес представляет формирование двумерных островков при осаждении напряженного слоя с эффективной толщиной меньше одного монослоя. При этом образуется плотный массив островков с высокой плотностью. Из-за высокой однородности таких островков по высоте линия фотолуминесценции (ФЛ), связанная с ними, характеризуется малым неоднородным уширением. Это обстоятельство, а также высокая сила осциллятора экситона приводят к существенному резонансному увеличению показателя преломления и возможности формирования экситонного волновода, что является перспективным для создания инжекционных лазеров на основе таких систем. Формирование массивов двумерных nanoостровков было показано для систем  $A^{III}B^{VI}$  (CdSe/ZnSSe [8]) и  $A^{III}B^V$  (InAs/(Al,Ga)As [9,10]).

В наших предыдущих работах [11] мы показали, что при осаждении тонких слоев InSb на поверхность GaSb(100) форма и размеры образующихся островков очень сильно зависят от эффективной толщины осажденного слоя InSb. Если для напряженной системы InAs/GaAs формирование КТ происходит в достаточно

широком пределе толщин слоя InAs (до 4 монослоев), то для системы InSb/GaSb уже при осаждении  $\sim 2$  монослоев InSb происходит образование трехмерных кластеров, приводящее к катастрофическому ухудшению оптических свойств. При осаждении  $\sim 1.7$  монослоя InSb происходит образование островков с латеральными размерами  $\sim 30$  нм [11]. В данной работе мы исследуем формирование массива двумерных островков InSb в матрице GaSb при осаждении нескольких слоев InSb с эффективной толщиной  $\sim 1.5$  монослоя в каждом цикле осаждения.

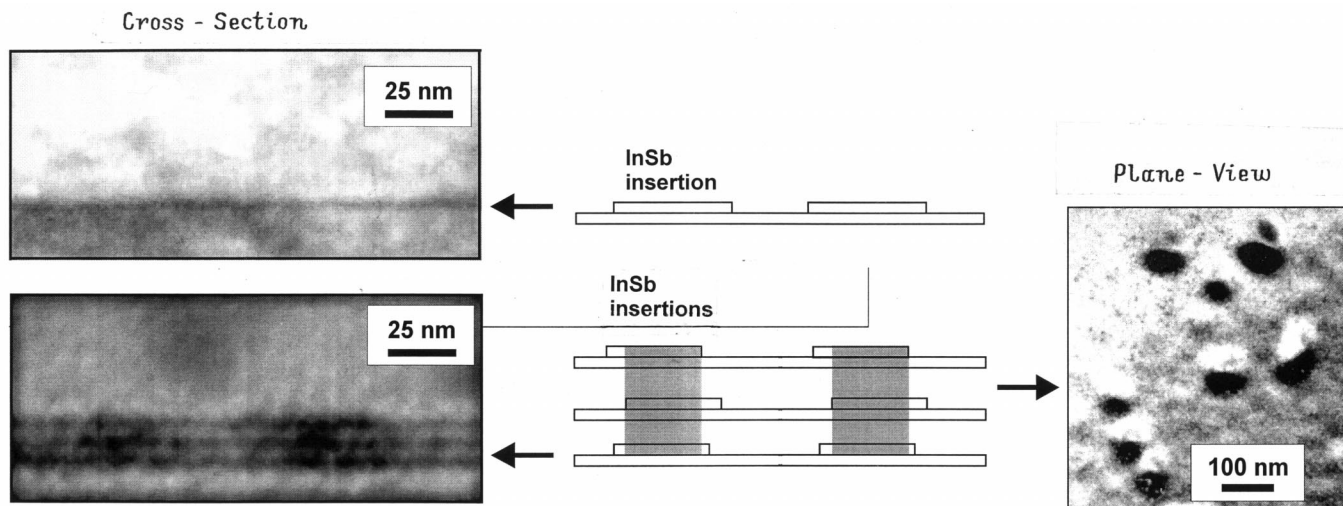
## 2. Эксперимент

Исследованные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber-32. Нами были выращены образцы с одним, тремя и пятью слоями InSb, осажденными на матрицу GaSb. Эффективная толщина каждого слоя InSb составляла  $\sim 1.5$  монослоя (МС). При многослойном осаждении слои InSb разделялись 5 МС барьерами GaSb. Температура роста активной области для всех образцов составляла  $420^\circ\text{C}$ . С обеих сторон область, содержащая InSb, ограничивалась короткопериодными  $20 \text{ \AA}$  GaSb– $20 \text{ \AA}$  AlSb сверхрешетками для предотвращения транспорта неравновесных носителей на поверхность образца и к границе с подложкой.

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии проводились на электронном микроскопе Philips EM 420 при ускоряющем напряжении 100 кВ. ФЛ возбуждалась  $\text{Ar}^+$ -лазером ( $\lambda = 514.5$  нм, плотность возбуждения  $\sim 100$  мВ/см<sup>2</sup>) и детектировалась охлаждаемым InSb фотодиодом.

## 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), для образцов с одним и тремя слоями InSb (изображения



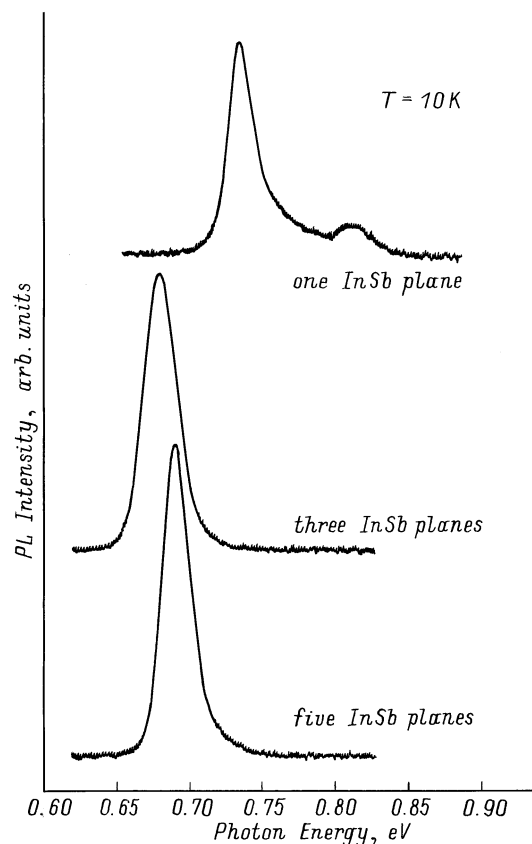
**Рис. 1.** Изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии в плоскости роста и в поперечном сечении, для структур с одним и тремя слоями InSb.

в плоскости и в поперечном сечении). Из данных изображений видно, что образования трехмерных кластеров, содержащих дислокации, не происходит. На изображениях в плоскости роста и в поперечном сечении видно формирование двумерных островков с латеральными размерами около 50 нм. Из изображения поперечного сечения структуры с тремя слоями InSb видно, что островки верхних слоев образуются над островками первого слоя (эффект вертикальной корреляции).

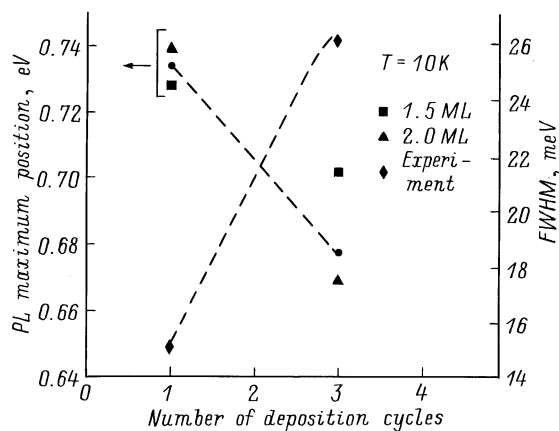
На рис. 2 показаны спектры ФЛ указанных образцов. Видно, что увеличение числа слоев InSb приводит к значительному уменьшению энергии оптического перехода, что связано с увеличением энергии локализации носителей вследствие туннельного взаимодействия между соседними плоскостями InSb. На рис. 3 показаны энергии оптических переходов, рассчитанные в предположении формирования в исследованных структурах твердого раствора InGaSb [12]. Средний состав раствора определялся, исходя из эффективной толщины InSb в каждом цикле осаждения, которая полагалась равной либо 1.5, либо 2 МС. Видно, что для образцов с одним и тремя слоями InSb экспериментальное значение энергии оптического перехода близко к расчетному, полученному в результате аппроксимации твердого раствора последовательностью слоев InSb толщиной 2 МС. Таким образом, можно предположить, что при осаждении трех слоев InSb помимо двумерного слоя толщиной 1 МС в каждом цикле осаждения образуются локальные области, имеющие большую толщину (двумерные островки). Перекрытие островков в направлении роста приводит к электронному взаимодействию между ними и к увеличению энергии локализации. На увеличение степени локализации также указывает возрастание ширины линии ФЛ при увеличении циклов осаждения InSb (рис. 3).

Формирование островков в структуре с тремя слоями InSb также подтверждается температурной зависимо-

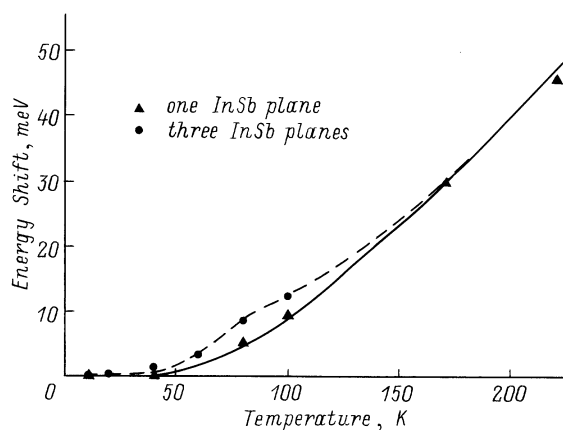
стью положения максимума линии ФЛ (рис. 4). С ростом температуры наблюдается более резкое смещение полосы ФЛ в область меньших энергий, обусловленное термическим выбросом носителей из отсрочек с меньшей энергией локализации, с которыми связано корот-



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции структур с разным числом слоев InSb.



**Рис. 3.** Экспериментальные значения положения максимума и ширины линии ФЛ, а также расчетные значения энергии оптического перехода при аппроксимации слоев твердым раствором InGaSb. Толщина слоев InSb для определения состава твердого раствора полагалась равной 1.5 или 2 монослоям.



**Рис. 4.** Температурная зависимость сдвига максимума линии ФЛ для структур с одним и тремя слоями InSb.

ковольное плечо линии ФЛ. Такое поведение линии ФЛ с температурой является типичным для структур с КТ [13]. Для образца с одним слоем InSb температурный сдвиг ФЛ значительно меньше, что указывает на меньшее влияние локализации носителей в островках на форму линии ФЛ.

#### 4. Заключение

Нами исследованы свойства структур со сверхтонкими внедрениями InSb в матрице GaSb. Показано, что при осаждении нескольких слоев InSb с эффективной толщиной  $\sim 1.5$  монослоя в GaSb происходит формирование массива вертикально-связанных островков, имеющих высоту  $\sim 2$  монослоя и латеральные размеры  $\sim 50$  нм.

Работа проводилась при поддержке РФФИ (грант 97-02-18175).

#### Список литературы

- [1] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. Le Roux. Appl. Phys. Lett., **47**, 1099 (1985).
- [2] P.M. Petroff, S.P. DenBaars. Superlat. Microstruct., **15**(1), 15 (1994).
- [3] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, N. Kobayashi. Phys. Rev. Lett., **75**, 2542 (1995).
- [4] J.M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. Andre, O. Vatel. Appl. Phys. Lett., **64**, 196 (1994).
- [5] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, O. Schmidt, R. Heitz, J. Buhner, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich. Sol. St. Electron., **40**, 785 (1996).
- [6] Ж.И. Алфёров, Н.А. Берт, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоков, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацуньников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. ФТП, **30**, 351 (1996).
- [7] D. Bimberg, N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, P.S. Kop'ev, V.M. Ustinov. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **3**(2), 196 (1997).
- [8] M. Strassburg, V. Kutzer, U.W. Pohl, A. Hoffmann, I. Broser, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A. Rosenauer, U. Fischer, D. Gerthsen, I.L. Krestnikov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Appl. Phys. Lett., **72** 942 (1998).
- [9] V. Bressler-Hill, A. Lorke, S. Varma, P.M. Petroff, K. Pond, W.H. Weinberg. Phys. Rev. B, **50** 8479 (1994).
- [10] B.V. Volovik, A.Yu. Egorov, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, I.E. Kozin, I.L. Krestnikov, M.V. Maximov, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsul'nikov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, M. Strassburg, A. Hoffmann, D. Bimberg, I.P. Soshnikov, P. Werner. Proc. ICPS24, Jerusalem, August 2-7, 1998 (World Scientific, 1998).
- [11] A.F. Tsatsul'nikov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, A.K. Kryganovskii, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, B.Ya. Mel'tser, P.V. Nekludov, A.A. Suvorova, A.N. Titkov, B.V. Volovik, M. Grundmann, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. J. Electron. Mater., **27**(5), 414 (1998).
- [12] M.P.C.M. Krijn. Semicond. Sci. Technol., **6**, 27 (1991).
- [13] А.Ф. Цацуньников, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, С.С. Рувимов, В.М. Устинов, В.В. Комин, И.В. Кочнев, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. ФТП, **30** 1797 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

#### Formation of two-dimensional nanoislands under deposits of superthin InSb layers in GaSb matrix

A.F. Tsatsul'nikov, D.A. Bedarev, B.V. Volovik, S.V. Ivanov, M.V. Maximov, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, B.Ya. Meltser, V.A. Solovyev, P.S., Kop'ev, A.Yu. Chernyshev\*, M.V. Belousov\*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* St. Petersburg State University,  
198904 St. Petersburg, Russia