

06;07;12

Самоорганизованные наноразмерные кластеры InP и InAsP, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии

© Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.В. Коваленков,
Д.А. Лившиц, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 февраля 1998 г.

Представлены результаты исследований по выращиванию самоорганизующихся наноразмерных кластеров InP и InAsP в матрице $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$. Характеризация структуры проводилась методами низкотемпературной фотолюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Фотолюминесцентные измерения показали высокую эффективность излучательной рекомбинации от квантовых точек и высокое оптическое совершенство полученных структур. Средняя плотность и размер InP кластеров, определенные по результатам ПЭМ измерений, составляют соответственно $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ и 80 nm.

Спонтанное образование наноразмерных кластеров при гетероэпитаксиальном выращивании сильно напряженных полупроводников привлекает к себе значительное внимание благодаря возможности создания трехмерного электронного ограничения в однородных и когерентных квантовых точках. При этом такие структуры, выращенные при стандартных процессах молекулярно-пучковой (МПЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и гидридов (МОС-гидридной эпитаксии), обладают высокой степенью квантования и излучательной эффективностью, что объясняется в основном значительно более низкой плотностью дефектов и загрязнений, чем при использовании сложных

литографических процедур. Введение трехмерного (3D) ограничения электронов, дырок и экситонов в таких полупроводниковых микроструктурах позволит как изучать новые физические явления [1,2], так и значительно улучшить характеристики электронных и оптоэлектронных приборов [3,4], в особенности полупроводниковых гетеролазеров с активной областью на квантовых точках. Предполагается, что такие гетеролазеры будут обладать большим дифференциальным усилением, высокой характеристической температурой T_0 и значительно меньшими пороговыми токами [3,5]. На данный момент даже первые лазеры на квантовых точках, выращенные в системе InGaAs/GaAs методами МПЭ и МОС-гидридной эпитаксии, имеют пороговые плотности тока 40 A/cm^2 ($T_0 = 430 \text{ K}$) [6,8] и 60 A/cm^2 ($T_0 = 530 \text{ K}$) [7,8].

Большинство экспериментальных работ посвящено способам получения квантовых точек InAs (InGaAs) в матрице GaAs (AlGaAs). Другим интересным объектом исследований является получение наноразмерных кластеров в системе InP/InGaP.

В нашей работе выращивание наноразмерных кластеров InP в матрице $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ проводилось на установке МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении в горизонтальном реакторе с высокочастотным нагревом подложкодержателя. В качестве реагентов использовались триметилгаллия (TMGa), триметилиндия (TMIn), арсин (AsH_3) (20% в водороде) и фосфин (PH_3) (30% в водороде). Выращивание проводилось при температуре 700°C и давлении в реакторе 50 mbar. На точно ориентированную подложку GaAs (100) наращивался 500 nm слой $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, согласованный с подложкой по параметру решетки, затем осаждался слой InP с номинальными толщинами от 0.7 до 15 монослоев. После 5-секундного отжига в атмосфере PH_3 проводилось наращивание InP кластеров слоем $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ толщиной 50 nm. Отжиг вводился для обеспечения условий полного формирования кластеров [9]. Номинальные скорости роста были 1.4 монослоя в секунду для InGaP барьеров и 0.7 монослоя в секунду для квантовых точек.

Исследования полученных образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии производились на высокоразрешающем микроскопе "Philips EM 420" при ускоряющем напряжении 120 kV. На рис. 1 приведены изображения наноразмерных кластеров при осаждении 3 монослоев InP. Средний поперечный размер квантовых точек $\sim 80 \text{ nm}$, средняя плотность $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

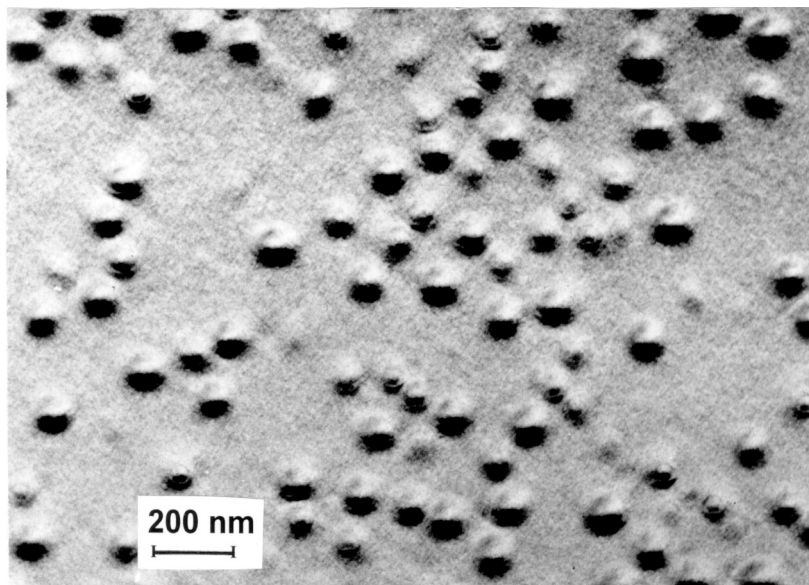


Рис. 1. ПЭМ изображение кластеров InP при номинальной толщине три монослоя.

Фотолюминесцентные (ФЛ) измерения образцов производились с помощью Ar^+ лазера (488 nm) с плотностью возбуждения $\sim 50 \text{ W/cm}^2$. При формировании квантовых точек InP в спектре ФЛ появляется интенсивный пик с энергией 1.2 eV (77 K) (или 1.68 eV при 300 K). При этом положение пика практически не изменяется при варьировании InP квантовых точек от 2 до 15 монослоев (рис. 2), что отличается от последовательного уменьшения энергии пика ФЛ при увеличении толщины слоя в случае квантовой ямы [10]. На основании этого можно сделать вывод, что, согласно модели Странски–Крастанова, трехмерные кластеры развиваются до своих критических размеров, определяемых равновесием напряжений между материалами матрицы и квантовых точек. Энергетическое положение пика ФЛ от InP кластеров теоретически соответствует $\sim 6\text{--}7$ многослойной квантовой яме InP (рис. 2).

Эффективность излучательной рекомбинации от квантовых точек на полтора порядка выше люминесценции от InGaP барьеров и составляет

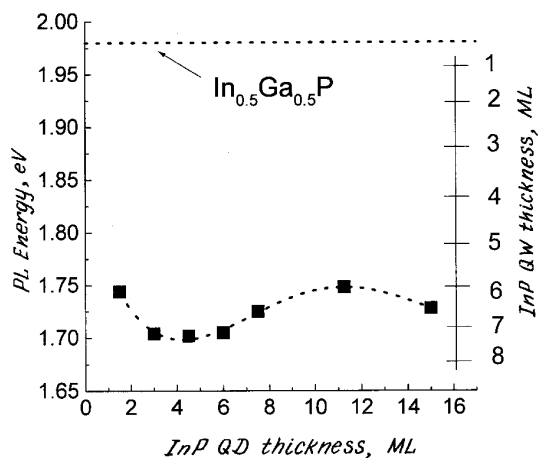


Рис. 2. Положение ФЛ пика (77 К) от InP квантовых точек в зависимости от толщины номинально осажденного слоя InP.

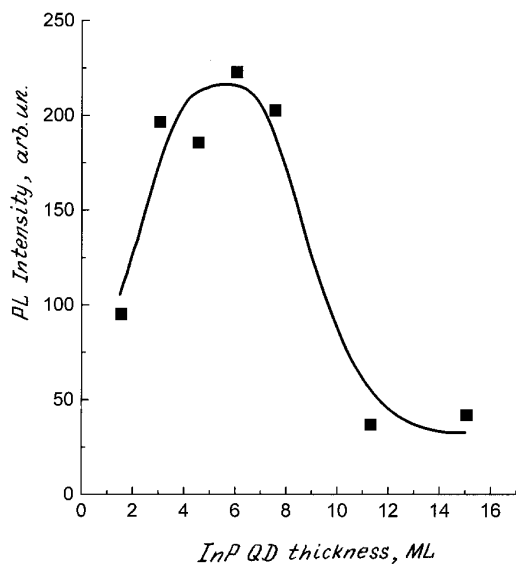


Рис. 3. Интенсивность ФЛ пика (77 К) от InP квантовых точек в зависимости от толщины номинально осажденного слоя InP.

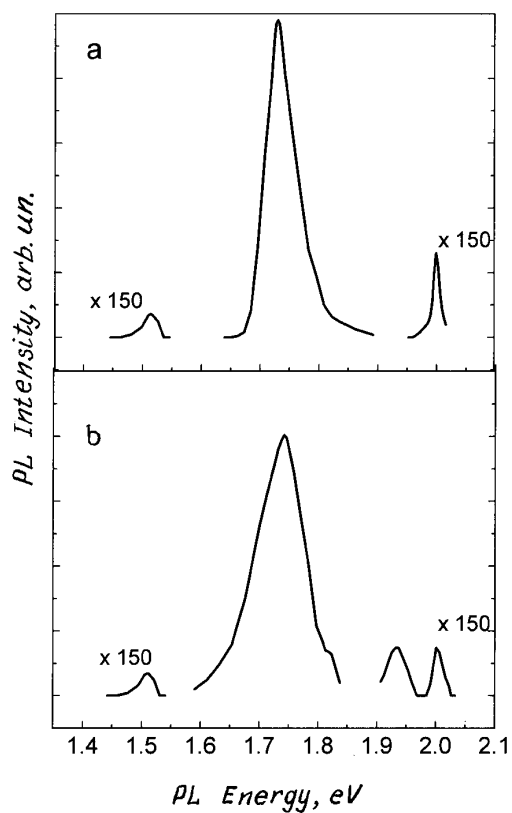


Рис. 4. Спектры ФЛ (77 К) от: *a* — InP квантовых точек. Толщина слоя InP номинально три монослоя; *b* — InAs_{0.25}P_{0.75} квантовых точек. Толщина слоя InAs_{0.25}P_{0.75} номинально три монослоя.

30% при 77 К (рис. 3). Высокая эффективность ФЛ демонстрирует очень высокое оптическое совершенство полученных структур и эффективную локализацию носителей в квантовых точках. Увеличение номинальной толщины InP более 8 монослоев приводит к резкому ухудшению излучательных характеристик от квантовых точек, что можно объяснить развитием значительного числа дислокаций.

Представленные в нашей работе результаты выращивания самоорганизованных наноразмерных кластеров тройных твердых растворов $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ в матрице $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ не имеют аналогов в литературе. Ожидалось, что добавление мышьяка в квантовые точки InP приведет к сдвигу спектров ФЛ от них в длинноволновую область. Однако в наших исследованиях положение пика ФЛ, соответствующего квантовым точкам $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$, оставалось постоянным во всем исследованном интервале составов $x = 0 \div 0.5$. Более того, его положение совпадает с положением пика, соответствующего квантовым точкам на основе InP (рис. 4). Это может быть объяснено, в частности, тем, что средний размер квантовых точек InP , полученный в разных условиях, варьируется от 40 до 100 нм [9–11], в то время как точки InAs имеют средний размер 15–30 нм [5–8]. Следовательно, введение мышьяка в кластеры InP может приводить к уменьшению их размеров и соответственно компенсации ожидаемого энергетического сдвига пика ФЛ.

Таким образом, нами были выращены наноразмерные кластеры InP и впервые в мире InAsP в матрице $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$. Высокая эффективность ФЛ от самоорганизованных квантовых точек свидетельствует о высоком оптическом совершенстве полученных наноструктур. Свойства тройных InAsP квантовых точек являются предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке проекта № 96–2005 по МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] Brus L. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. 22. N 9. P. 1909–1914.
- [2] Chelma D.S., Miller D.A.B. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 522–525.
- [3] Arakawa Y., Sakaki H. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 11. P. 939–941.
- [4] Sakaki H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 2. L314–L316.
- [5] Kurstaedter N., Ledentsov N.N., Grundmann M. et al. // Electron. Lett. 1994. V. 59. N 17. P. 1416–1417.
- [6] Алферов Ж.И., Берт Н.А., Егоров А.Ю. и др. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 2. С. 351–356.
- [7] Алферов Ж.И., Гордеев Н.Ю., Зайцев С.Ю. и др. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 2. С. 357–363.
- [8] Ustinov V.M., Zhukov A.E., Egorov A.U. et al. // Isnt. Phys. Conf. 1996. Ser. N 155. Ch. 7. P. 557–560.

- [9] Carlsson N., Seifert W., Petersson A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 24. P. 3093–3095.
- [10] Seifert W., Carlsson N., Pistol M.-E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. N 8. P. 1166–1167.
- [11] Kovalenko O.V., Vinokurov D.A., Livshits D.A. et al. // 1996 Intern. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. S.-Petersburg, Russia. P. 141–143.