

Гетероструктуры с несколькими слоями InAs/InGaAs-квантовых точек для источников оптического излучения диапазона длин волн 1.3 мкм

© Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, В.М. Устинов, Д.А. Бедарев, Б.В. Воловик, И.Л. Крестников, И.Н. Каяндер, В.А. Одноблюдов, А.А. Суворова, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг*

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

* Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

(Получена 1 декабря 1999 г. Принята к печати 2 декабря 1999 г.)

Предложен способ получения гетероструктур с несколькими слоями InAs/InGaAs-квантовых точек методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, обеспечивающий высокую интенсивность и малую ширину линии фотолюминесценции в диапазоне длин волн 1.3 мкм. Исследованы зависимости структурных и оптических свойств от режимов роста. Продемонстрированы потенциальные возможности разработанной технологии для создания поверхностно-излучающих приборов с вертикальными оптическими резонаторами.

Дальнейшее развитие быстродействующих оптоволоконных систем передачи информации требует совершенствования полупроводниковых источников и приемников оптического излучения диапазонов длин волн 1.3 и 1.55 мкм. Недостатки традиционных инжекционных гетеролазеров на структурах InGaAsP/InP связаны с несимметричной диаграммой направленности лазерного излучения, затрудняющей ввод светового пучка в оптический волновод, низкой температурной стабильностью и сложной технологией изготовления, включающей индивидуальную обработку и измерение каждого лазерного кристалла [1]. В связи с этим ведется активный поиск новых полупроводниковых материалов для указанных спектральных диапазонов. К их числу относятся структуры на основе квантовых ям (КЯ) InGaAsN [2] и GaAsSb [3], а также структуры с массивами квантовых точек (КТ) InGaAs [4,5], выращиваемые на подложках арсенида галлия методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Использование подложек GaAs открывает возможность для создания длинноволновых поверхностно излучающих лазеров с вертикальными оптическими резонаторами (VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) за счет использования высококачественных четвертьволновых брэгговских отражателей на основе AlGaAs/GaAs. Такие источники потенциально обеспечивают эффективный ввод оптического излучения в волокно и повышенную температурную стабильность, а также позволяют применять групповую технологию изготовления и тестирования [6].

Максимальная длина волны лазерного излучения, достигнутая для структур с КЯ InGaAs/GaAs, составляет 1.22 мкм [7], что обусловлено ограничением на ширину КЯ, налагаемым пределами псевдоморфного роста [8]. В то же время применение массивов InGaAs- и InAs/InGaAs-КТ позволило реализовать фотодетекторы с вертикальным оптическим резонатором [9] и продемонстрировать низкопороговую лазерную генерацию, в том

числе в непрерывном режиме, для диапазона длин волн 1.3 мкм [4,10]. Однако уровень оптического усиления, продемонстрированный в структурах с массивами КТ, является недостаточным для преодоления потерь, типичных для поверхностно излучающих лазеров указанного спектрального диапазона. Наблюдаемое насыщение усиления обусловлено конечным значением поверхностной плотности КТ в сочетании с неоднородным уширением плотности состояний из-за разброса в параметрах отдельных точек [11]. Поэтому исключительно важной задачей является разработка методов получения массивов однородных КТ, имеющих высокую поверхностную плотность и излучающих в диапазоне длин волн 1.3 мкм.

В настоящей работе представлены результаты оптимизации конструкции и условий молекулярно-пучковой эпитаксии структур с несколькими слоями InAs/InGaAs-КТ, обеспечивающих увеличение поверхностной плотности массива КТ при сохранении высокой яркости линии фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне длин волн 1.3 мкм без увеличения ее полуширины по сравнению со структурами, содержащими только один слой КТ. Для эпитаксиальных структур с вертикальными оптическими резонаторами демонстрируется фото- и электролюминесценция в диапазоне длин волн 1.26–1.33 мкм.

Исследуемые в настоящей работе структуры выращивались методом МПЭ с твердотельным источником As₄ в установке Riber-32P на подложках полуизолирующего GaAs(100). Температура подложки при формировании КТ, КЯ, а также всей или части толщины спейсеров составляла 485°C, а при выращивании остальной части структуры — 600°C. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были выполнены на электронном микроскопе Philips EM 420, работающем при ускоряющем напряжении 100÷120 кВ. Фотолюминесценцию возбуждали Ar⁺-лазером (514.5 нм) и регистрировали Ge фотодиодом. Плотность возбуждения составляла 100 Вт/см².

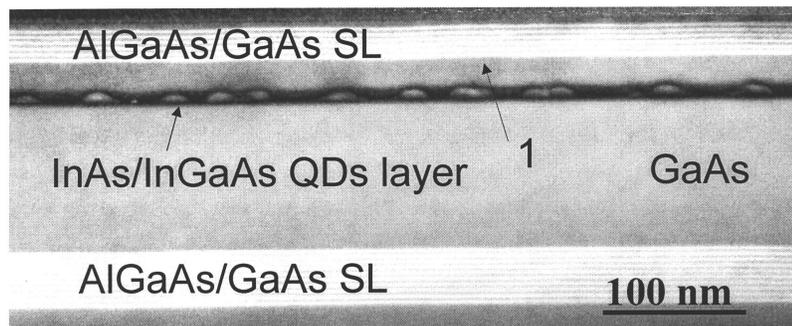


Рис. 1. ПЭМ микрофотография (вид в поперечном сечении) образца, содержащего 1 слой КТ InAs, сформированных на подслое $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ толщиной 4 нм и покрытых слоем $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ толщиной 6 нм и слоем GaAs толщиной 10 нм.

На рис. 1 приведено ПЭМ изображение скола структуры с КТ InAs, помещенными во внешнюю КЯ InGaAs. Такие структуры обеспечивают относительно высокую поверхностную плотность ($3.5\text{--}4.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) [5] по сравнению с КТ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ($1.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) [4], также излучающими в диапазоне длин волн 1.3 мкм. Нами исследуется возможность дальнейшего увеличения поверхностной плотности с помощью повторного осаждения нескольких слоев КТ, разделенных спейсерами GaAs (так называемое складирование).

При создании инжекционных лазеров с массивами КТ более коротковолновых диапазонов ранее было успешно использовано складирование КТ с относительно тонкими спейсерами GaAs (от 1.5 до 10 нм) [12]. Однако попытка напрямую использовать такой подход для InAs/InGaAs-структур диапазона длин волн 1.3 мкм показала, что в данном случае наблюдается существенное уменьшение интенсивности ФЛ как при азотной, так и при комнатной температурах, а также изменение форм соответствующих спектров ФЛ. В качестве примера на рис. 2 показаны спектры ФЛ (77 и 300 К) для структур с одним и тремя слоями КТ InAs, сформированных на подслое InGaAs толщиной 3 нм и покрытых слоем InGaAs толщиной 5 нм и слоем GaAs толщиной 10 нм. Спейсеры были полностью выращены при температуре 480–490°C. Существенное падение интенсивности ФЛ указывает на ухудшение качества трехслойной структуры, выращенной таким способом. Возможная причина состоит во влиянии нижнего слоя с КТ на формирование последующих слоев, обусловленного полями напряжений, возникающими над отдельными островками (рис. 1, область 1).

Нами были проведены исследования, направленные на оптимизацию выращивания структур с несколькими слоями InAs/InGaAs-КТ. Было обнаружено, что ключевым моментом является максимально возможное снижение общего количества In в отдельных слоях [13]. Это было достигнуто за счет перехода к использованию КТ InAs, формируемых непосредственно на GaAs, зарываемом затем слоем InGaAs с низким содержанием индия ($x_{\text{InAs}} = 0.1\text{--}0.15$). Другой принципиальный

момент состоит в использовании относительно толстых спейсеров GaAs (20–40 нм). При этом лишь первая, относительно тонкая часть спейсера толщиной 3–5 нм, предназначенная для консервации формы InAs/InGaAs КТ, выращивается при температуре 480–490°C, а остальная часть — при температуре 600°C, типичной для выращивания GaAs методом МПЭ. ПЭМ микрофотография (вид в поперечном сечении) образца, содержащего 3 слоя КТ InAs, покрытых слоем $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ толщиной 6 нм, разделенных GaAs спейсерами полной толщиной 50 нм, приведена на рис. 3. Отметим, что в отличие от традиционных структур со складированными массивами КТ, для которых наблюдается эффект вертикального совмещения положения КТ соседних слоев, в данном случае их положение оказывается некоррелированным. Мы полагаем, что это обусловлено относительно высокой толщиной спейсеров. Более детальный анализ пока-

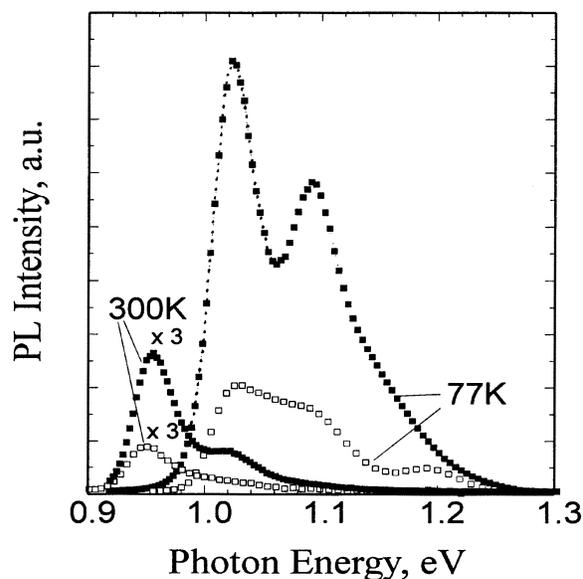


Рис. 2. Спектры ФЛ для структур с одним (темные квадраты) и тремя (светлые квадраты) слоями КТ InAs, сформированных на подслое InGaAs толщиной 3 нм и покрытых слоем InGaAs, толщиной 5 нм и слоем GaAs толщиной 10 нм.

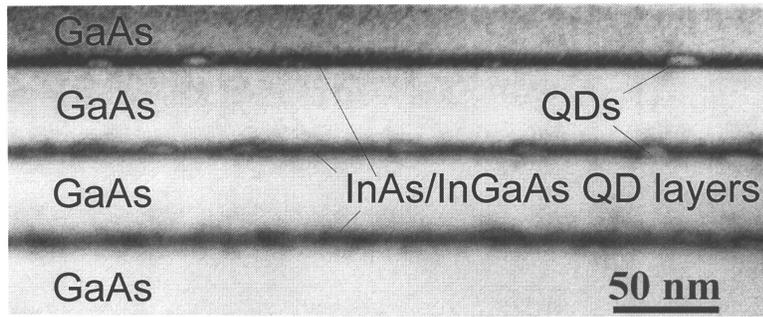


Рис. 3. ПЭМ микрофотография (вид в поперечном сечении) образца, содержащего 3 слоя InAs/InGaAs-КТ, сформированных непосредственно на арсениде галлия и разделенных GaAs-спейсерами полной толщиной 50 нм.

зывает, что поверхностная плотность КТ и их распределение по размерам одинаково для отдельных слоев. Измеренные при комнатной температуре спектры ФЛ для 3 образцов, содержащих 1 или 3 массива InAs/InGaAs-КТ при разной толщине GaAs спейсеров, приведены на рис. 4. Представленные результаты подтверждают, что предложенный метод выращивания позволяет сохранить форму спектра ФЛ в диапазоне длин волн 1.3 мкм для складированных структур с InAs/InGaAs-КТ. При этом не наблюдается падения интенсивности ФЛ для образцов с несколькими слоями КТ по сравнению с однослойными структурами.

Ранее нами была продемонстрирована возможность использования структур с несколькими слоями InAs/InGaAs-КТ для создания лазерных диодов диапазона длин волн 1.3 мкм [10]. Диоды со сколотыми зеркалами и шириной полоска 100 мкм демонстрируют низкие пороговые токи ($90\text{--}105\text{ А/см}^2$) и высокую выходную мощность (2.7 Вт) при длине волны лазерного излучения $1.26\text{--}1.28\text{ мкм}$. Далее представлены результаты, демонстрирующие потенциальные возможности предложенной технологии для создания поверхностно излучающих структур с вертикальными оптическими резонаторами. Исследуемые структуры формировались в два этапа. Сперва методом МПЭ выращивалось нижнее зеркало на основе нелегированной структуры AlAs/GaAs с толщинами слоев $\lambda/4n_i$ (здесь λ — рабочая длина волны, n_i — показатель преломления AlAs ($i = 1$) или GaAs ($i = 2$) на рабочей длине волны). Затем на тот же держатель помещался кусок полуизолирующей подложки GaAs и осуществлялось выращивание второй части структуры, представляющей собой слой GaAs, содержащий несколько рядов InAs/InGaAs-КТ. Активная область с КТ ограничивалась сверху и снизу короткопериодными сверхрешетками AlGaAs/GaAs. Чтобы избежать проблем, связанных с возможностью окисления AlAs, все структуры зеркал завершались слоем GaAs толщиной $\lambda/8n_2$ и покрывались слоем аморфного мышьяка толщиной $\sim 0.1\text{ мкм}$ [14]. Номинальная длина оптического резонатора (расстояние от последнего

четвертьволнового слоя AlAs до поверхности структуры) составляло $m\lambda_c/2n_2$, где m — целое число. Затем образцы вынимались из ростовой камеры и проводились измерения спектров отражения и ФЛ.

На рис. 5 приведены спектры отражения и ФЛ для образца с нижним брэгговским отражателем, а также спектр ФЛ для образца без отражателя, измеренные при комнатной температуре. Активная часть структуры выращивалась с использованием описанной выше технологии и содержала три слоя InAs/InGaAs-КТ, разделенных спейсерами GaAs полной толщиной 25 нм. Для образца с нижним зеркалом наблюдается сужение спектра ФЛ и существенное (на порядок) возрастание яркости, что подтверждает существенное влияние оптического резонатора на излучательные характеристики массивов КТ [15,16]. В зависимости от особенностей активной области и параметров оптического резонатора положение максимума спектров ФЛ для изготовленных образцов лежало в диапазоне длин волн от 1.26 до 1.33 мкм.

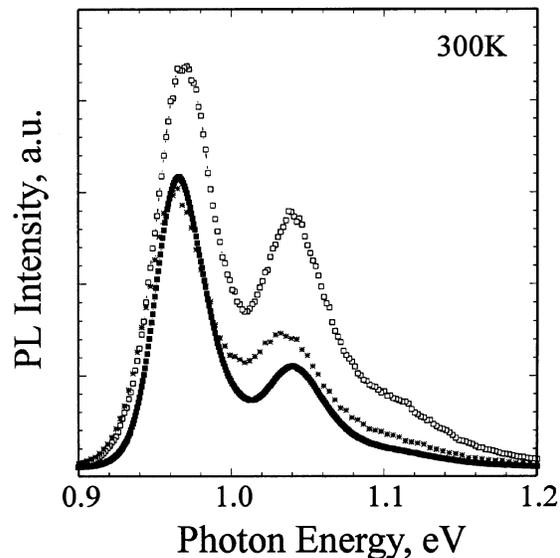


Рис. 4. Спектры ФЛ для 3 образцов, содержащих 1 (темные квадраты) или 3 массива InAs/InGaAs-КТ при толщине GaAs-спейсеров 18 (звездочки) и 30 нм (светлые квадраты).

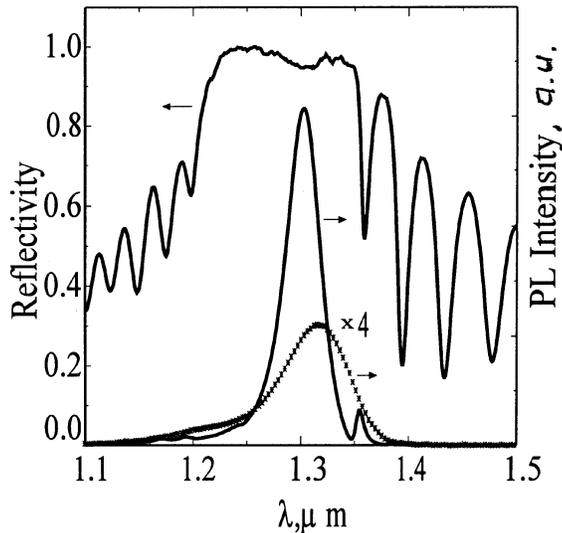


Рис. 5. Спектры отражения и ФЛ для структуры с тремя слоями InAs/InGaAs-КТ, выращенной на брэгговском отражателе (сплошная линия), и спектр ФЛ для аналогичной структуры, выращенной на полужизолирующей подложке GaAs (звездочки).

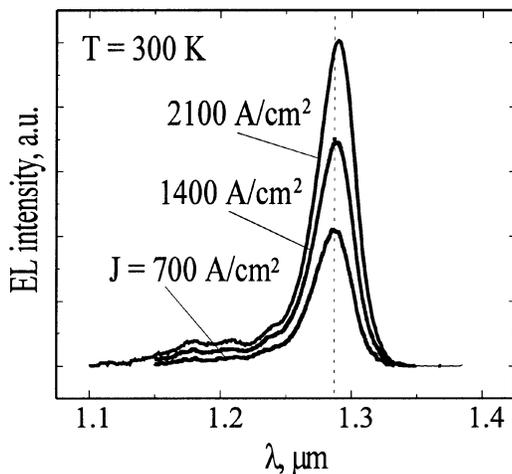


Рис. 6. Спектры электролюминесценции для поверхностно излучающего диода с активной областью на основе трех слоев InAs/InGaAs-КТ и нижним брэгговским отражателем.

Для исследования электролюминесцентных характеристик на легированной Si подложке GaAs была выращена структура с нижним брэгговским зеркалом на основе 25 пар *n*-AlAs/*n*-GaAs, активной областью (резонатором) с тремя рядами InAs/InGaAs-КТ и верхним контактным слоем *p*-GaAs. Использовалась конструкция поверхностно излучающих диодов со сплошной металлизацией обратной стороны и верхним кольцевым контактом. Для формирования омического контакта к слоям *n*-типа использовалась металлизация AuGa/Ni/Au, а для контактов к *p*-GaAs — металлизация Cr/Au. Область протекания тока цилиндрической формы ограничивалась имплантацией протонов. На рис. 6 приведены спектры

электролюминесценции поверхностно излучающего диода с диаметром активной области 30 мкм, измеренные при комнатной температуре в импульсном режиме в направлении, нормальном к поверхности структуры. Величина плотности тока оценивалась в предположении ее равномерного распределения по площади прибора. С ростом уровня возбуждения форма и полуширина спектров электролюминесценции изменяются слабо по сравнению со спектрами спонтанного излучения лазерных структур на основе массивов КТ InAs/InGaAs [10,13] и поверхностно излучающих структур с КТ без оптического резонатора [17], для которых характерен рост интенсивности излучения через возбужденные состояния. Это обусловлено влиянием оптического резонатора. Относительно большая полуширина спектров электролюминесценции обусловлена использованием низкодобротного резонатора, поскольку коэффициент отражения верхнего зеркала, образованного границей GaAs–воздух, составляет только порядка 30%.

Таким образом, в настоящей работе предложен способ формирования структур с несколькими слоями InAs/InGaAs-квантовых точек, обеспечивающий малую ширину и высокую яркость линии ФЛ в диапазоне длин волн 1.3 мкм. Полученные полупроводниковые гетероструктуры с вертикальными оптическими резонаторами и активными областями на основе нескольких массивов InAs/InGaAs-квантовых точек потенциально пригодны для создания вертикальных излучателей диапазона длин волн 1.3 мкм на подложках арсенида галлия.

Работа выполнена при поддержке Программы Министерства науки и технологий РФ "Физика твердотельных наноструктур" (грант 99-2014), РФФИ, NanoOp и INTAS (grant 96-0467).

Список литературы

- [1] G.P. Agrawal, N.K. Dutta. *Long Wavelength Semiconductor Lasers* (N.Y., Van Nostrend Reinhold, 1986).
- [2] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson, K. Uomi. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **10**, 487 (1998).
- [3] K. Nishi, T. Anan, S.Sugou. *IEEE/LEOS Summer Topical Meeting* (San Diego, CA, USA, July 28–30, 1999) IEEE Catalog Number 99 TH8455, 39.
- [4] D. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O.B. Shcekin, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2564 (1998).
- [5] V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, A.V. Lunev, B.V. Volovik, I.L. Krestnikov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2815 (1999).
- [6] T.E. Sale. *Vertical cavity surface emitting lasers* (N.Y., J. Wiley & Son Inc., 1995).
- [7] F. Koyama, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, A. Matsutani, T.S. Sakaguchi, K. Iga. *Electron. Lett.*, **35**, 1079 (1999).
- [8] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. *J. Cryst. Growth*, **27**, 118 (1974).
- [9] J.C. Campbell, D.L. Huffaker, H. Deng, D.G. Deppe. *Electron. Lett.*, **33**, 1337 (1997).

- [10] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, S.S. Mikhlin, N.A. Maleev, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 1345 (1999).
- [11] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, В.М. Устинов. *ФТП*, **33**, 1395 (1999).
- [12] D. Bimberg, N. Kirstaeder, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, P.S. Kop'ev, V.M. Ustinov. *J. Select. Top. Quant. Electron.*, **3**, 196 (1997).
- [13] N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, I.L. Krestnikov, A.V. Lunev, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Proc. Xth European workshop on MBE*, Les Arcs, France, March 28-April 1, 1999 (Nanostructures, p. 2).
- [14] Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, И.Л. Крестников, А.В. Лунев, А.В. Сахаров, Б.В. Воловик, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. *ФТП*, **33**, 629 (1999).
- [15] N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov, M.V. Maximov, Zh.I. Alferov, V.P. Kalosha, J.A. Lott. *Semicond. Sci Technol.*, **14**, 99 (1999).
- [16] L.A. Graham, D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2408 (1999).
- [17] D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 520 (1998).

Редактор В.В. Чалдышев

Stacked InAs / InGaAs quantum dot heterostructures for optical sources in 1.3 μm wavelength range

N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov, D.A. Bedarev, B.V. Volovik, I.L. Krestnikov, I.N. Kaiander, V.A. Odnobludov, A.A. Suvorova, A.F. Tsatsul'nikov, Yu.M. Shernyakov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institut für Festkörperphysik,
Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract We describe a method of growing the Stacked InAs/InGaAs self-organized quantum dots on GaAs substrates. Proposed technique allows us to fabricate the structures showing bright and narrow photoluminescence line in the 1.3 μm wavelength range. The influence of the growth regimes on structural and optical characteristics has been studied. The structures proposed are shown to be promising candidates for vertical-cavity surface-emitting devices.