

Излучение на 1.3–1.4 мкм в структурах с массивами связанных квантовых точек, выращенных методом субмонослойной эпитаксии

© Б.В. Воловик, Д.С. Сизов, А.Ф. Цацульников, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Егоров*, В.Н. Петров*, Н.К. Поляков*, Г.Э. Цырлин*

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

*Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, 198103 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 апреля 2000 г. Принята к печати 28 апреля 2000 г.)

Были исследованы оптические свойства структур с вертикально-связанными квантовыми точками, выращенными методом комбинированной субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что при определенных параметрах роста возможно образование латерально-связанных конгломератов квантовых точек в верхних рядах, при этом соответствующее излучение фотолюминесценции находится при длинах волн 1.3–1.4 мкм при комнатной температуре.

Введение

Реализация излучения в диапазоне длин волн 1.3 и 1.55 мкм на основе гетероструктур на подложках GaAs является актуальной задачей современной микроэлектроники, так как лазеры этого диапазона являются основными компонентами современных систем оптоволоконной связи. Используемые на настоящий момент для их создания гетероструктуры на подложках InP обладают рядом существенных недостатков. Так, такие приборы характеризуются сильной температурной чувствительностью (типичные значения характеристической температуры $T_0 = (60–80) \text{ K}$) [1]. Кроме того, создание поверхностно-излучающих лазеров в этой системе затруднено недостаточной разницей показателей преломления в слоях, составляющих распределенные брэгговские отражатели. На текущий момент наибольшие успехи в создании лазеров на 1.3 мкм на подложках GaAs достигнуты при использовании гетероструктур InGaAsN/GaAs [2] и структур с InGaAs/GaAs квантовыми точками (КТ) [3,4]. Исследованиям возможности реализации длинноволнового излучения в последней системе посвящена данная работа.

Получение длинноволнового излучения в системе InGaAs/GaAs затруднено большим рассогласованием параметров решетки. Так, максимальная длина волны генерации лазера на основе InGaAs/GaAs-квантовой ямы (КЯ) составляет 1.21 мкм [5]; дальнейший длинноволновый сдвиг приводит к катастрофической деградации качества структуры вследствие образования дислокаций несоответствия. Использование массивов КТ позволяет существенно расширить диапазон излучения [6]. Для реализации длинноволнового излучения в квантовых точках In(Ga)As/GaAs были использованы различные методы: осаждение КТ при сверхнизких скоростях роста [7], использование чередующегося субмонослойного осаждения In, Ga и As [3], а также зарастивание КТ слоем InGaAs [4,8]. Последние два метода привели к созданию лазеров, излучающих на длине волны 1.3 мкм, на осно-

ве КТ. В данной работе мы показываем возможность реализации излучения на длинах волн вплоть до 1.39 мкм при комнатной температуре, используя структуры со связанными КТ, выращенными методом комбинированной субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии, включающей в себя осаждение субмонослойных покрытий InAs и чередующееся субмонослойное осаждение атомов In и As [9] (так называемый метод субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии [10]).

Эксперимент

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на установке ЭП1203 на полуизолирующих сингулярных и вицинальных подложках GaAs(100). Формирование КТ контролировалось по картине дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с помощью системы регистрации и анализа картин ДБЭО. Каждый слой КТ общей толщиной 2.5 монослоя (МС) InAs выращивался по следующей методике: первые 0.5 МС InAs осаждались непрерывно, последующие 2.0 МС InAs — методом субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии (СМСЭ), при котором потоки индия и мышьяка направлялись на поверхность подложки последовательно. При СМСЭ в каждом случае производилось 4 цикла осаждения. Один цикл осаждения атомов индия соответствовал напылению 0.5 МС InAs, после каждого цикла напыления In поверхность выдерживалась в потоке мышьяка в течение 10 с. Во время напыления индия наблюдалась реконструкция поверхности (4×1), во время выдержки поверхности под мышьяком сверхструктура вначале изменялась на (1×1), а после напыления 2 МС InAs на тяжах образовывались объемные рефлексы, свидетельствующие об образовании трехмерных островков. Активная область, помещенная между слоями GaAs толщиной 6 нм с каждой стороны, состояла из 6–15 слоев квантовых точек InAs, разделенных барьерами GaAs толщиной 8–12 нм. Для предотвраще-

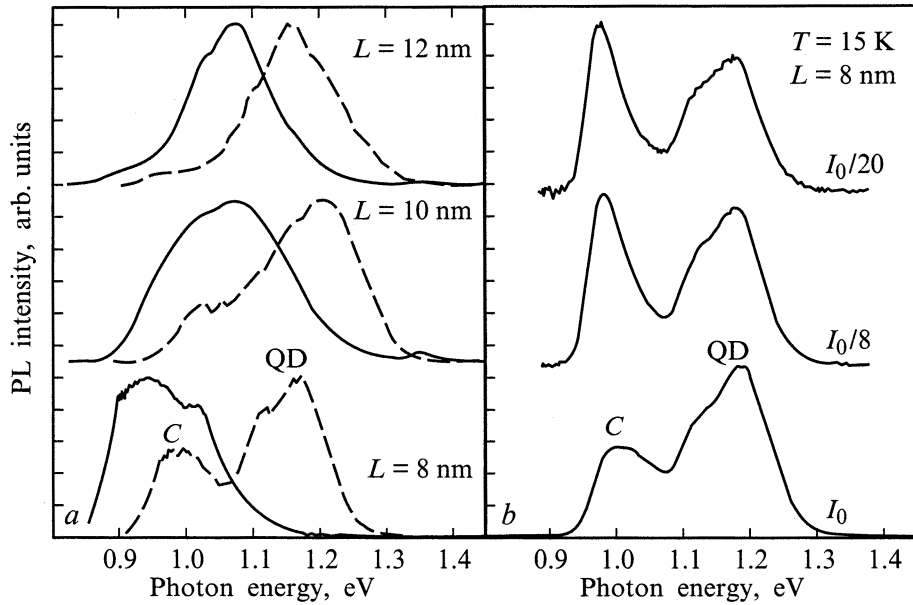


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции для образцов с 10 рядами квантовых точек: *a* — разделенных барьерами GaAs различной толщины L ; температура измерений T , К: сплошные линии — 300, штриховые — 77; *b* — при различной плотности возбуждения, $T = 15$ К, $L = 8$ нм.

ния переноса неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки, активная область ограничивалась с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ (5 пар, $25 \text{ \AA}/25 \text{ \AA}$). Сверху структура покрывалась слоем GaAs толщиной 5 нм. Температура роста составляла $470\text{--}480^\circ\text{C}$ для активной области (момент изменения поверхностной реконструкции с (2×4) на (4×4)) и 600°C для остальной части структуры (момент изменения поверхностной реконструкции с (2×4) на (3×1)). Скорости роста, измеренные предварительно на калибровочном образце с помощью методики осцилляции интенсивности ДБЭО в нулевом рефлексе, составляли 0.1, 0.3 и 0.77 MC/s для InAs, AlAs и GaAs соответственно. Общее давление паров мышьяка в ростовой камере, измеренное с помощью датчика типа ПММ-46, было постоянным при всех экспериментах и составляло $(1.5\text{--}2.1) \cdot 10^{-6}$ Па. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводились на электронном микроскопе Philips EM-420 при ускоряющем напряжении 100 кВ. Фотолуминесценция возбуждалась Ar^+ -лазером (длина волны 514.5 нм) и детектировалась охлаждаемым Ge-диодом.

Результаты исследования и обсуждение

В данной работе были исследованы структуры с несколькими слоями КТ, каждый из которых формировался в результате осаждения 2.5 МС InAs. Как было показано в наших предыдущих работах [11], мультиплицирование КТ, полученных осаждением большего (3 МС) коли-

чества InAs, возможно только при большой толщине барьера, а сужение барьера приводит к деградации интенсивности фотолуминесценции (ФЛ) вследствие образования дислокаций несоответствия.

На рис. 1 показаны спектры ФЛ для структур с несколькими слоями КТ толщиной 2.5 МС, разделенных барьерами GaAs толщиной от 8 до 12 нм. В спектре ФЛ каждого из образцов есть 2 основные полосы. Первая (линия QD), максимум которой находится при 1.16–1.18 эВ при низкой температуре, по своему положению соответствует излучению из обычных КТ, сформированных при осаждении 2.5 МС InAs. В то же время более длинноволновая полоса C, очевидно, имеет другую природу. Это предположение подтверждается тем, что при снижении плотности возбуждения при низкой температуре относительная интенсивность линий QD и C практически не изменяется (рис. 1, *b*). Отметим также, что относительная интенсивность полосы C возрастает при уменьшении толщины барьера GaAs между слоями КТ. Таким образом, можно предположить, что данная полоса соответствует излучению из связанных КТ, образующихся при мультиплицировании слоев КТ с малой толщиной барьера. В то же время, как показывают результаты наших предыдущих исследований [12], в случае туннельного взаимодействия электронных состояний в островках соседних слоев наблюдается монотонный сдвиг линии ФЛ в длинноволновую сторону при уменьшении толщины барьера. Так как при толщинах барьера 8–12 нм, используемых в данных структурах, степень вертикальной корреляции островков соседних рядов очень высока [13], то две линии ФЛ не могут определяться точками, связанными

и не связанными в вертикальном направлении. Таким образом, мы предполагаем, что длинноволновая полоса ФЛ связана с конгломератами КТ, образующимися в верхних рядах при достаточно малой толщине барьера. Как было показано в работах [12,14], при осаждении достаточно большого числа плоскостей КТ латеральные размеры КТ в верхних рядах возрастают, в то же время плотность массива задана плотностью островков первого ряда вследствие вертикальной корреляции. Таким образом, возможно перекрытие соседних островков верхних рядов в плоскости роста. Подобный эффект был ранее описан нами для КТ InGaAs, выращенных методом МПЭ без использования режимов СМСЭ [14]. Необходимо отметить, что для КТ, выращенных в режиме обычной МПЭ, эффект латерального перекрытия начинает играть роль при существенно меньших толщинах барьера GaAs. Это связано с тем, что КТ, выращенные в режиме СМСЭ, имеют большие размеры, чем КТ, выращенные обычной МПЭ [10]. Следовательно, в этом случае увеличение размера КТ верхних рядов приводит к латеральному перекрытию даже при больших толщинах барьера.

Нами были исследованы также структуры, в которых варьировалось число слоев КТ при постоянной толщине барьера GaAs (8 нм). Спектры ФЛ от таких структур представлены на рис. 2. Видно, что при увеличении количества рядов длинноволновая часть спектра (полоса С) становится доминирующей, и ее максимум сдвигается в длинноволновую сторону вплоть до 1.39 мкм

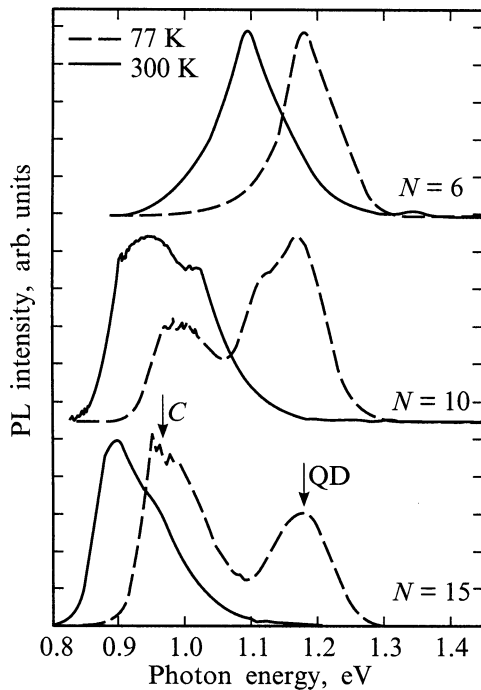


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции для образцов с различным количеством рядов квантовых точек, разделенных барьерами GaAs ($L = 8$ нм); N — число рядов квантовых точек; температура измерений T , К: сплошные линии — 300, штриховые — 77.

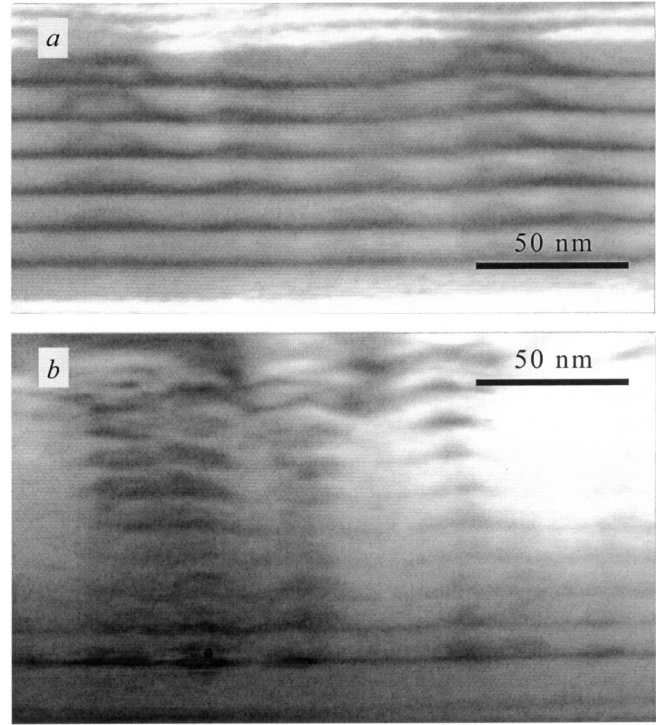


Рис. 3. Фотографии, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии в поперечном сечении для образцов с числом рядов квантовых точек N : a — 6, b — 10. Толщина барьеров GaAs $L = 8$ нм.

для 15 слоев КТ. Таким образом, данные ФЛ для этой серии образцов также подтверждают наше предположение о латеральном перекрытии КТ верхних рядов в плоскости роста. На рис. 3 представлены фотографии, полученные методом ПЭМ в поперечном сечении для образцов с 6 и 10 слоями КТ, разделенных барьерами GaAs толщиной 8 нм. На фотографии видны "колонки" точек, причем степень вертикальной корреляции очень велика. Латеральные размеры островков каждого следующего ряда превышают размеры точек предыдущего ряда, достигая ~ 30 нм для верхнего ряда КТ в структуре с 6 слоями КТ. Для образца с 10 слоями КТ увеличение латеральных размеров КТ верхних рядов приводит к их латеральному перекрытию, что видно на фотографии ПЭМ. Мы полагаем, что линия С в спектре ФЛ связана с такими конгломератами КТ. Эта линия находится в диапазоне длин волн 1.3–1.4 мкм при комнатной температуре, для структуры с 15 слоями КТ максимум линии ФЛ находится на длине волны 1.39 мкм.

Отметим, что если при низкой температуре относительная интенсивность полос QD и С сравнима, то при комнатной температуре линия С становится доминирующей в спектре. Это связано с тем, что при повышении температуры активируется термический выброс носителей из островков. При этом выброс более эффективен для КТ меньшего размера, имеющих меньшую энергию локализации (т.е. тех островков, с которыми связана

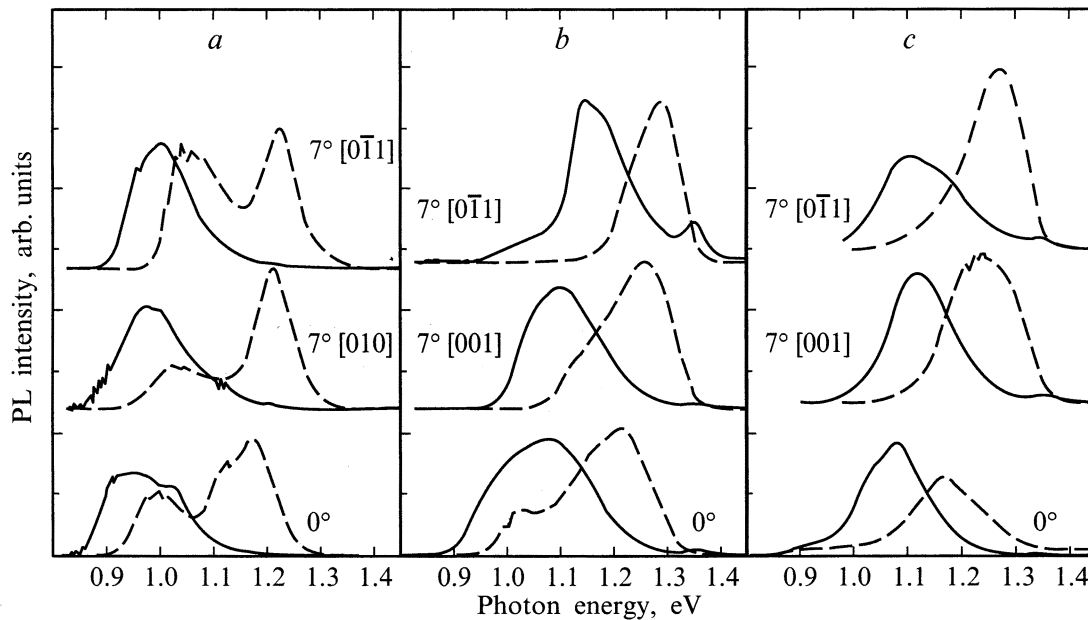


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции для образцов с 10 рядами квантовых точек, разделенных барьерами GaAs различной толщины L , выращенных на сингулярных и разориентированных подложках; температура измерений T , К: сплошные линии — 300, штриховые — 77; толщина барьеров L , нм: a — 8, b — 10, c — 12.

линия QD). Кроме того, при высоких температурах возрастает вероятность переноса носителей между КТ как в плоскости, так и в направлении роста. Данные причины приводят к уменьшению заселенности малых КТ и соответственно падению относительной интенсивности линии QD в спектре.

Нами также было исследовано влияние разориентации подложки на оптические свойства структур. В одном технологическом процессе выращивались структуры как на сингулярной (100) подложке, так и на подложках, разориентированных на углы $5\text{--}7^\circ$ (для различных образцов) вдоль различных кристаллографических направлений. На рис. 4 показаны спектры ФЛ для образцов с 10 слоями КТ и толщиной барьера 8, 10 и 12 нм, выращенных на сингулярных и разориентированных подложках. Разориентация подложки на 7° приводит к существенным изменениям в форме спектра и положении линий ФЛ, причем влияние разориентации различно для образцов с разной толщиной барьера GaAs между рядами КТ. При толщине барьера GaAs, равной 12 нм, разориентация приводит к исчезновению линии C в спектре ФЛ. Для образца с толщиной барьера 10 нм разориентация вдоль направления $[001]$ вызывает уменьшение интенсивности линии C и ее сильный коротковолновый сдвиг, а разориентация вдоль направления $[0\bar{1}0]$ — исчезновение этой линии в спектре ФЛ при низкой температуре. В то же время при уменьшении толщины барьера до 8 нм разориентация приводит к коротковолновому сдвигу как линии QD, так и линии C на величину 40–60 мэВ, при этом относительная интенсивность линий изменяется слабо.

Мы связываем данный эффект с тем, что при разориентации подложки происходит образование террас на поверхности, которое для КТ, выращенных методом СМСЭ, вызывает увеличение плотности массива КТ и уменьшение их размеров [10,11]. Мы предполагаем, что в этом случае поля напряжений, обусловленные КТ и вызывающие их вертикальную корреляцию, также изменяются, что приводит к падению латеральных размеров КТ верхних рядов. При этом вероятность их латерального перекрытия уменьшается и соответственно относительная интенсивность линии C в спектре также падает. Уменьшение размера КТ подтверждается коротковолновым смещением линии QD при разориентации. При большой толщине барьера размер КТ верхних рядов меньше, и влияние разориентации на вероятность латерального перекрытия велико. При малой толщине барьера латеральное перекрытие остается значительным и при росте на разориентированных подложках. Таким образом, разориентация подложки влияет на образование конгломератов КТ.

Заключение

Таким образом, мы исследовали оптические свойства структур, полученных при мультиплицировании слоев КТ, выращенных методом субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что при достаточно малой толщине барьера GaAs (менее 10 нм) увеличение латеральных размеров КТ верхних рядов приводит к перекрытию КТ в плоскости роста, что сопровождается

излучением ФЛ в диапазоне длин волн 1.3–1.4 мкм при комнатной температуре. Показано, что разориентация подложки влияет на образование таких конгломератов.

Работа выполнялась при поддержке программы Министерства науки и технологий РФ "Физика твердотельных наноструктур" (гранты 98-2029 и 99-2014), РФФИ, Volkswagen foundation и INTAS (гранты 1999-0928 и 97-0751).

Список литературы

- [1] A.F. Phillips, S.J. Sweeney, A.R. Adams, P.J.A. Thijs. IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electron., **5**, 401 (1999), и ссылки в этой работе.
- [2] A.Yu. Egorov, D. Bernklau, D. Livshits, V. Ustinov, Zh.I. Alferov, H. Riechert. Electron. Lett., **35**, 318 (1999).
- [3] D.L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O.B. Shchekin, D.G. Deppe. Appl. Phys. Lett., **73**, 2564 (1998).
- [4] 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 Phot. Technol. Lett., **11**, 1345 (1999).
- [5] S. Sato, S. Satoh. Jap. J. Appl. Phys., **38**, L990 (1999).
- [6] K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara, S. Yamazaki. Jap. J. Appl. Phys., **33**, L1710 (1994).
- [7] R. Murray, D. Childs, S. Malik, P. Siverns, C. Roberts, J.-M. Hartmann, P. Stavrinou. Jap. J. Appl. Phys., **38**, 528 (1999).
- [8] K. Nishi, H. Saito, S. Sugou. Appl. Phys. Lett., **74**, 1111 (1999).
- [9] G.M. Guryanov, G.E. Cirilin, V.N. Petrov, N.K. Polyakov, A.O. Golubok, S.Ya. Tipisev, E.P. Misikhina, V.B. Gubanov, Yu.B. Samsonenko, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, D. Bimberg. Surf. Sci., **352–354**, 651 (1996).
- [10] Г.Э. Цырлин, В.Н. Петров, В.Г. Дубровский, Н.К. Поляков, С.Я. Типисев, А.О. Голубок, Н.Н. Леденцов. ФТП, **31**, 902 (1997).
- [11] Г.Э. Цырлин, Н.К. Поляков, В.А. Егоров, В.Н. Петров, Б.В. Воловик, Д.С. Сизов, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, **26** (17), 52 (2000).
- [12] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Böhrer, O. Schmidt, D. Bimberg, S.V. Zaitsev, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, A.O. Kosogov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. Phys. Rev. B, **54**, 8743 (1996).
- [13] Q. Xie, Madhukar, P. Chen, N.P. Kobayashi. Phys. Rev. Lett., **75**, 2542 (1995).
- [14] А.Ф. Цацульников, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Б.В. Воловик, А.А. Суворова, Н.А. Берг, П.С. Копьев. ФТП, **31**, 851 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Laser emitting of structures with assembled quantum dots in spectral range 1.3–1.4 μm

B.V. Volovik, D.S. Sizov, A.F. Tsatsulnikov, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, V.A. Yegorov*, V.N. Petrov*, N.K. Polyakov*, G.E. Tsyrlin*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
*Institute for Analytical Instrumentation,
Russian Academy of Sciences,
198103 St. Petersburg, Russia