

Лазерная электронно-лучевая трубка с монолитным лазерным экраном

В.Ю.Бондарев, В.И.Козловский, А.Б.Крыса, Ю.М.Попов, Д.Е.Свиридов, Я.К.Скасырский

Методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений была выращена монолитная наноструктура, содержащая 13 квантовых ям GaInP/AlGaInP между двумя брэгговскими зеркалами из слоев AlGaAs/AlAs. Реализован лазер на основе этой структуры с продольной накачкой сканирующим электронным пучком. При комнатной температуре достигнута мощность генерации 8 Вт на длине волны 660 нм с эффективностью 7.5 %.

Ключевые слова: лазерная электронно-лучевая трубка, соединения A_3B_5 , низкоразмерные гетероструктуры.

1. Введение

Лазерная электронно-лучевая трубка (ЛЭЛТ) является перспективным средством для проекции изображения, созданного активным элементом, на внешний большой экран [1]. В последнее время рассматривается также возможность использования миниатюрных ЛЭЛТ в качестве эффективных источников монохроматического света для пассивных дисплеев [2]. Достоинствами таких источников являются монохроматичность и высокая яркость их излучения.

Однако до сих пор технология изготовления лазерного экрана была недостаточно совершенна. Она включает в себя ряд разнородных операций: эпитаксиальный рост структуры, напыление первого зеркального покрытия из окислов, приклеивание структуры на сапфировую подложку, стравливание ростовой подложки, нанесение второго зеркального покрытия из окислов и верхнего металлического слоя [3, 4]. Недостаточно хорошая адгезия покрытий, а также наличие клеевого слоя существенно ухудшали надежность таких лазеров и затрудняли изготовление отпаянных вакуумных приборов.

Для решения этих проблем было предложено использовать монолитный лазерный экран, полученный в едином технологическом процессе [5]. В этом случае на ростовой подложке выращиваются сначала распределенное брэгговское зеркало, затем активная структура, содержащая несколько квантовых ям, и второе брэгговское зеркало. Однако данное предложение до сих пор не было экспериментально реализовано в лазерах с продольной накачкой электронным пучком. В настоящей работе представлены первые результаты экспериментов по созданию такого лазера на основе структуры GaInP/AlGaInP с брэг-

говскими зеркалами из слоев AlGaAs/AlAs, излучающей в красной области спектра.

2. Структура и эксперимент

Исследуемая структура была получена в Технологическом центре при Университете Шеффилда (Великобритания) методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке GaAs, разориентированной на 10° от кристаллографической плоскости (001) к плоскости (111)A. Подложка в процессе эпитаксии не вращалась. Структура содержала последовательно наращенные: буферный слой GaAs толщиной 0.5 мкм; брэгговское зеркало из 40.5 пар чередующихся четвертьволновых слоев AlAs и $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$; активную среду из 13 квантовых ям (КЯ) $Ga_{0.46}In_{0.54}P$, разделенных барьерными слоями $(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$; верхнее брэгговское зеркало из 17.5 пар чередующихся четвертьволновых слоев AlAs и $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$. Для предотвращения окисления слоев AlAs верхнего брэгговского зеркала структура была покрыта слоем $Ga_{0.52}In_{0.48}P$ толщиной 6 нм. Толщина слоев КЯ была 6 нм, а толщина барьерных слоев – 401 нм. Первая и последняя КЯ были отделены от ближайших слоев AlAs брэгговских зеркал слоями, аналогичными по составу барьерным слоям внутри активной среды, но толщиной 197 нм. Толщины слоев AlAs и AlGaAs в брэгговском зеркале были 54 и 47 нм соответственно (указанные толщины являются расчетными). Толщина барьерных слоев выбиралась так, чтобы суммарная оптическая толщина барьерного слоя и слоя КЯ равнялась двум длинам волн генерации. Структура рассчитывалась на длину волны генерации 660 нм. Реальная структура была неоднородна по толщине. Неоднородность на большей части поверхности структуры составляла 3 интерференционные полосы в свете натриевой лампы, что при полной толщине структуры 11.15 мкм (без буфера GaAs) соответствовало примерно 3 % неоднородности по толщине. Скол структуры исследовался с помощью зондового микроскопа Solver P-47 (г. Зеленоград). Спектры катодолуминесценции структуры измерялись в непрерывном режиме при энергии электронов $E_e = 30$ кэВ, токе электронного пучка $I_e = 1$ мкА, диаметре пятна $d_e = 1$ мм и комнатной температуре (КТ), а также при $T \leq 14$ К.

В.Ю.Бондарев, В.И.Козловский, Ю.М.Попов, Д.Е.Свиридов, Я.К.Скасырский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: vikoz@mail1.lebedev.ru

А.Б.Крыса. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; адрес в настоящее время: EPSRC National Centre for III-V Technologies, University of Sheffield, Sir Frederick Mappin Building, Sheffield S1 3JD, United Kingdom

Поступила в редакцию 18 декабря 2006 г., после доработки – 12 февраля 2007 г.

Низкая температура достигалась с помощью криогенератора, работающего на тепловом цикле МакМагона. Излучение собиралось с облучаемой пучком поверхности.

Исследование лазерных характеристик активного элемента проводилось в разборной ЛЭЛТ. Активный элемент крепился к медной подложке серебряной пастой. Подложка закреплялась в криостате, через который можно было прокачивать воду или заливать жидкий азот. Электронный пучок возбуждал активный элемент под углом примерно 30° от нормали к поверхности элемента. Излучение лазера выходило с возбуждаемой поверхности, отражалось от полированной поверхности зеркала из нержавеющей стали и выводилось наружу из вакуумной камеры через окно из свинцового стекла ТФ-5. Диаметр d_e электронного пятна на поверхности активного элемента составлял примерно 25 мкм при полном токе электронного пучка $I_e = 200$ мкА и энергии электронов $E_e = 40$ кэВ. Однако пятно увеличивалось с ростом I_e и уменьшением E_e . Характеристики исследовались в импульсно-сканирующем режиме вдоль выбранной строки при $E_e = 25 - 60$ кэВ, $I_e = 0 - 2$ мА. Длина строки составляла 2 см, частота импульсов – 50 Гц и скорость сканирования – 4×10^5 см/с. Ток измерялся танталовым токосъемником, калиброванным по цилиндру Фарадея. Спектр генерации фиксировался фотоприемником на основе ПЗС-линейки, изготовленным в Институте спектроскопии РАН. Фотоприемник размещался на выходе монохроматора МДР-4 (ЛОМО). Мощность измерялась калиброванным фотоэлементом коаксиальным ФЭК-29.

Для увеличения коэффициента отражения верхнего брэгговского зеркала на поверхность структуры было нанесено 5 дополнительных пар слоев Ta_2O_5 и SiO_2 . В другом варианте коэффициент отражения был увеличен путем травления структуры в течение 30 секунд в растворе, состоящем из двух частей HF и одной части HCl. В результате такого травления удалялся верхний защитный слой InGaP и верхний слой AlAs однородно по всей поверхности образца площадью 2 см^2 . Однородность травления обусловлена высоким контрастом скорости травления слоев AlGaAs и AlAs [6]. Таким образом, оставшееся брэгговское зеркало содержало 17 пар слоев AlGaAs и AlAs. Более длительное травление приводило к появлению ступенчатых кратеров на поверхности структуры. Их образование было вызвано тем, что верхний слой AlGaAs начинал вскрываться лишь вблизи дефектов. После его вскрытия происходило быстрое боковое травление слоев AlAs вокруг дефектов и удаление материала брэгговского зеркала парами слоев AlAs и AlGaAs. Высота образовавшихся ступеней измерялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.1,*a* представлено изображение скола структуры в зондовом микроскопе в режиме полуконтактного сканирования. В средней части изображения видна активная часть структуры с тринадцатью КЯ. Она граничит с обеих сторон с брэгговскими зеркалами (на изображении видны только фрагменты этих зеркал). Контраст двух КЯ вблизи глухого зеркала и одной КЯ вблизи полупрозрачного зеркала едва заметен на фоне рельефа, образуемого слоями этих зеркал. Контраст также неоднороден по поверхности скола. На изображении виден дефект, об-

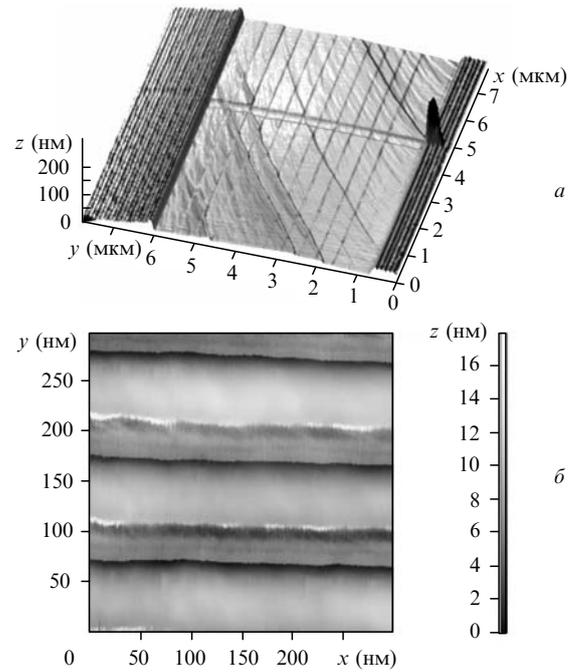


Рис.1. Изображения участка скола структуры, который содержит 13 КЯ (GaInP/AlGaInP) между фрагментами брэгговских зеркал (AlGaAs/AlAs) (*a*), и участка брэгговского зеркала с большим увеличением (*b*), полученные с помощью зондового микроскопа в режиме полуконтактного сканирования.

разовавшийся в верхних слоях глухого брэгговского зеркала. На рис.1,*b* представлено изображение в зондовом микроскопе фрагмента брэгговского зеркала, полученное при малой площади сканирования. Данные результаты в целом подтверждают расчетные параметры структуры, хотя соотношение толщин слоев в брэгговском зеркале (67 и 34 нм для слоев AlAs и GaAlAs соответственно) несколько отличается от значения, рассчитанного из полученной в экспериментах по выращиванию толстых слоев скорости роста.

На рис.2 представлены спектры катодоллюминесценции аналогичной структуры без брэгговских зеркал. Максимум излучения КЯ находится вблизи 660 и 630 нм при КТ и $T = 14$ К соответственно. При низкой температуре видны также линии излучения барьерных слоев ($\lambda_{\text{max}} = 536$ нм).

На рис.3 представлены расчетные спектры отражения верхнего полупрозрачного брэгговского зеркала для двух пар толщин слоев AlAs и AlGaAs: 67 и 34 нм, полученных из измерений на зондовом микроскопе (рис.3,*a*), и 54 и 47

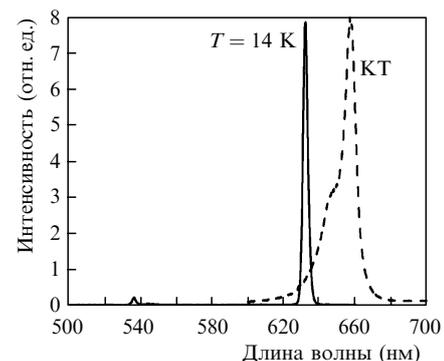


Рис.2. Спектры катодоллюминесценции структуры без брэгговских зеркал при КТ и $T = 14$ К.

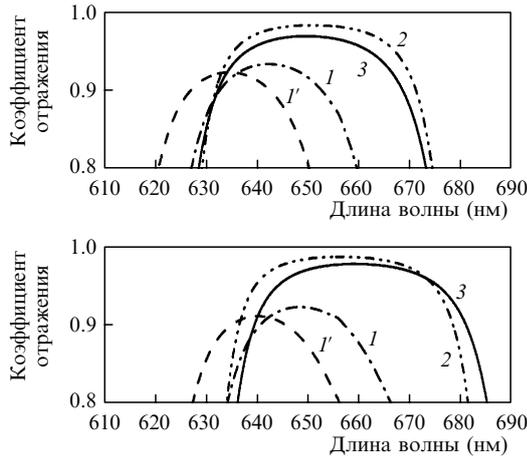


Рис.3. Расчетные спектры отражения верхнего брэгговского зеркала у исходной структуры (кривые 1 и 1'), после напыления дополнительных пяти чередующихся слоев Ta_2O_5 и SiO_2 (кривые 2) и после стравливания верхних двух слоев исходной структуры (кривые 3) для двух комбинаций толщин слоев AlAs и AlGaAs: 67 и 34 нм (а), 54 и 47 нм (б). Кривые 1' соответствуют $T = 80$ К, остальные кривые – КТ.

нм, заложенных в программу процесса роста (рис.3,б). Наблюдается коротковолновый сдвиг максимума спектра отражения при отклонении толщин слоев брэгговских зеркал от своих оптимальных значений, при этом фаза отраженной волны остается равной нулю при $\lambda = 660$ нм. В расчетах использовались данные по дисперсии показателей преломления для AlAs, $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ при КТ и $T = 80$ К [7] и для $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ и $(\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ при КТ [8], суммированные на рис.4. Из-за отсутствия для двух последних соединений данных при $T = 80$ К для расчета спектра отражения при низкой температуре мы использовали значения показателей преломления этих соединений при КТ. Численное моделирование показало, что варьирование данных величин не сильно влияет на спектр отражения брэгговского зеркала.

У исходного образца коэффициент отражения при $\lambda = 660$ нм (0.79 и 0.88, см. рис.3,а и б) оказался недостаточно высоким для достижения генерации при КТ. Генерация была получена при температуре жидкого азота. Пороговый ток составил 26 мкА, что при $d_e = 25$ мкм соответствует плотности тока 5 А/см². Максимальная мощность генерации была достигнута при $E_e = 60$ кэВ и $I_e = 2$ мА и составила примерно 7 Вт. Спектр генерации состоял из одной аксиальной моды на длине волны 630 нм.

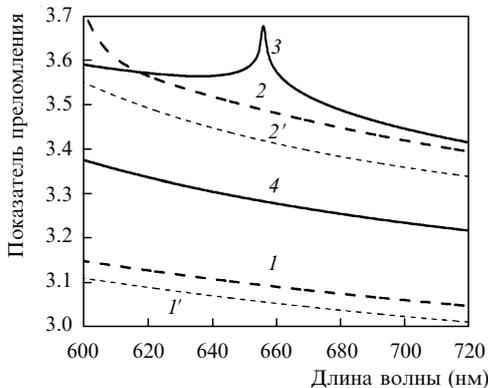


Рис.4. Спектральные зависимости показателей преломления слоев AlAs и $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ при КТ (кривые 1 и 2) и $T = 80$ К (кривые 1' и 2') [6], а также слоев $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (кривая 3) и $(\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (кривая 4) [7] при КТ.

Согласно расчетному спектру, коэффициенты отражения R брэгговского зеркала при $T = 80$ К составляют 0.92 (кривая 1' на рис.3,а) или 0.85 (кривая 1' на рис.3,б) при $\lambda = 630$ нм. Если бы в эксперименте реализовывался случай, соответствующий рис.3,б, то при КТ коэффициент отражения зеркала увеличился бы до 0.88 и достигался бы порог генерации, поскольку при $T = 80$ К он достаточно низкий (5 А/см²). Даже при неизменных потерях на зеркалах порог генерации увеличивается менее, чем на порядок, при росте температуры от 80 К до КТ. С другой стороны, максимально достижимая на установке плотность тока составляла примерно 200 А·см⁻². Поэтому далее мы будем считать, что данные на рис.3,а лучше соответствуют эксперименту.

Если предположить, что полные потери лазера – это только потери на зеркалах (оценка снизу), то средний по длине резонатора коэффициент усиления ($g = 0.5l^{-1} \times \ln R^{-1}$) составляет примерно 73 см⁻¹ при толщине l активной части структуры 5.7 мкм и $R = 0.92$. При одномодовой генерации и рассогласовании периода структуры с длиной волны генерации не все КЯ попадают в пучности моды. Эффективное число КЯ N_{ef} при рассогласовании составляет примерно половину числа КЯ всей структуры [9]. В нашем случае при $T = 80$ К имеет место сильное рассогласование, поэтому $N_{\text{ef}} = 6.5$. Тогда коэффициент усиления G на одну эффективно работающую КЯ равен 6.4×10^{-3} (при материальном коэффициенте усиления $g_{\text{mat}} = 1.1 \times 10^4$ см⁻¹). Это высокое значение коэффициента усиления, близкое к предельному для перехода между основными подзонами электронов и дырок в КЯ [9]. С увеличением температуры оптическое усиление падает, а потери растут. Потери только на брэгговском зеркале для исходной структуры возрастают с 0.08 при $T = 80$ К до 0.21 при КТ на длине волны генерации (660 нм при КТ).

Из представленных результатов следует, что для реализации лазера необходимо увеличить коэффициент отражения полупрозрачного зеркала. Расчетный спектр отражения верхнего зеркала после напыления на него пяти дополнительных пар слоев Ta_2O_5 и SiO_2 представлен кривой 2 на рис.3,а. Коэффициент отражения зеркала на длине волны 660 нм составил 0.977, и была достигнута генерация при КТ на двух продольных модах резонатора с длинами волн 658.9 и 650.8 нм. Мощность генерации составила 6.5 Вт при $E_e = 60$ кэВ и $I_e = 1.6$ мА. КПД лазера по отношению к энергии электронного пучка был лишь немного меньше 7%. Пороговый ток генерации был равен 50 мкА. Однако при уменьшении энергии электронов до 40 кэВ мощность падала примерно в 5 раз. Связано это с большими потерями энергии электронного пучка в доволно толстом выходном зеркале, общая толщина которого составляла 2.2 мкм.

Расчеты (кривая 3 на рис.3,а) показали, что коэффициент отражения выходного зеркала может быть повышен до 0.958 также путем удаления защитного слоя InGaP и верхнего слоя AlAs. Полученные с таким зеркалом результаты представлены на рис.5–7. Генерация наблюдалась преимущественно на одной продольной моде резонатора. Однако ее спектральное положение изменялось в пределах межмодового расстояния в зависимости от положения области возбуждения на образце. Спектр генерации трех различных областей представлен на рис.5. Здесь же приведен спектр излучения структуры в резонаторе при допороговом уровне накачки. Каждая

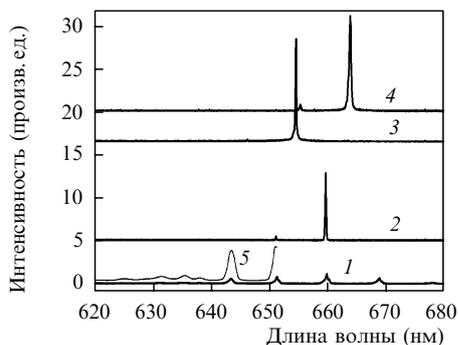


Рис.5. Спектры излучения структуры с двумя брэгговскими зеркалами при накачке ниже (кривая 1) и выше (кривые 2–4) порога генерации. Спектры генерации представлены для различных участков структуры при КТ. Для наглядности участок кривой 1 показан в увеличенном масштабе (кривая 5).

мода до порога генерации представляет собой дублет, компоненты которого имеют взаимно перпендикулярную поляризацию. Лишь одна из этих компонент переходит в режим генерации. Ее поляризация связана с кристаллографической ориентацией структуры, соответствующей ориентации использованной подложки GaAs, и направлена вдоль направления $[-110]$. Степень поляризации была не хуже 1:200. Возникновение поляризации связано с зависимостью матричного элемента перехода от ориентации кристалла относительно оси резонатора [10]. В спектральной области 620–640 нм кроме мод резонатора наблюдается еще одна серия линий, происхождение которых пока не выяснено.

На рис.6 приведены зависимости порогового тока и мощности генерации от энергии электронов. Минимальный порог и максимальная мощность составили 18 мкА и 8 Вт при $E_c = 60$ кэВ. При этом эффективность преобразования энергии электронного пучка в лазерное излучение была 7.5%. С уменьшением энергии электронов характеристики лазера ухудшаются, хотя и не так быстро, как при дополнительном напылении пяти диэлектрических слоев. При $E_c = 35$ кэВ была достигнута мощность 0.65 Вт. Относительно большая толщина брэгговского зеркала является препятствием для увеличения эффективности лазера при малых энергиях электронов. Генерация наблюдалась и в кратерах с меньшим числом пар слоев в брэгговском зеркале (до 14 пар). Однако это не привело к заметному увеличению мощности генерации при малых значениях E_c из-за роста порога генерации.

На рис.7 представлена ватт-амперная характеристика лазера при $E_c = 46.5$ кэВ, близкая к линейной. Направленность излучения симметрична с полным углом на по-

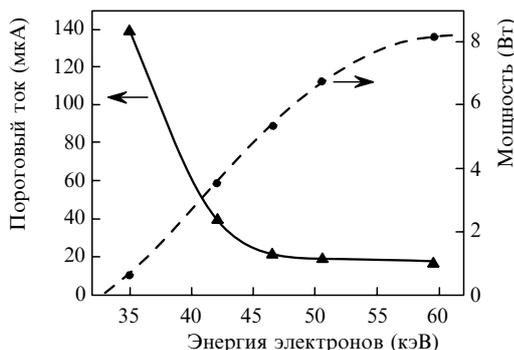


Рис.6. Зависимость порогового тока и мощности генерации ($I_c = 1.8$ мА) от энергии электронов при КТ.

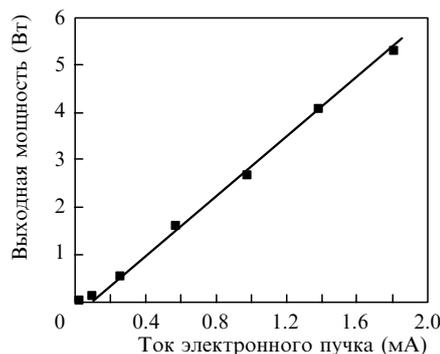


Рис.7. Ватт-амперная характеристика лазера при $E_c = 46.5$ кэВ и КТ.

лувысоте, составляющим примерно 10° . При этом не наблюдаются кольца рассеяния, типичные для лазеров с широкополосными диэлектрическими зеркалами.

Важно и то, что неравновесные носители, генерируемые в барьерных слоях, эффективно сваливаются в КЯ, хотя толщина барьерных слоев равна 0.4 мкм. Это самая большая толщина в лазерах с продольной накачкой, реализованных до сих пор. Отсюда можно сделать вывод, что длина диффузии в данной структуре превышает 0.2 мкм даже при довольно высоком уровне накачки, достигнутом в работе.

4. Заключение

Впервые реализован эффективный лазер на основе монокристаллической структуры с двумя брэгговскими зеркалами с продольной накачкой электронным пучком. Использована структура GaInP/AlGaInP с 13 квантовыми ямами, разделенными барьерными слоями толщиной 0.4 мкм. Достигнута мощность генерации 8 Вт на длине волны 660 нм с эффективностью в 7.5% при комнатной температуре, что свидетельствует о высоком транспорте неравновесных носителей в барьерных слоях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 04-02-16877, 05-02-16390, 07-02-01139), программы «Ведущие научные школы» (грант НШ-6055.2006.2), программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур», Учебно-научного комплекса ФИАН, а также компании Principia LightWorks Inc.

1. Басов Н.Г., Богданкевич О.В., Насибов А.С., Козловский В.И., Папуша В.П., Печенов А.Н. *Квантовая электроника*, **1**, 2521 (1974).
2. Bondarev V.Yu., Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Kuznetsov P.I., Sannikov D.A., Skasyrsky Ya.K., Tiberi M.D., Popov Yu.M. *Proc. 15th Int. Symp. «Advanced Display Technologies (ADT'06)»* (Moscow, 2006, p. 64).
3. Bondarev V.Yu., Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Roberts J.S., Skasyrsky Ya.K. *J. Cryst. Growth*, **272**, 559 (2004).
4. Бондарев В.Ю., Козловский В.И., Крыса А.Б., Попов Ю.М., Скасырский Я.К. *Квантовая электроника*, **34**, 919 (2004).
5. Козловский В.И., Лаврушин Б.М. Патент России № 2056665; *Бюл. изобрет.*, № 8, 269 (1996).
6. Yablonoitch E., Gmitter T., Harbison J.P., Bhat R. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 2222 (1987).
7. Gehrsitz S., Reinhardt F.K., Gourgon C., Herres N., Vonlanthen A., Sigg H. *J. Appl. Phys.*, **87**, 7825 (2000).
8. Kaneko Y., Kishino K. *J. Appl. Phys.*, **76**, 1809 (1994).
9. Bondarev V.Yu., Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Roberts J.S., Skasyrsky Ya.K. *Int. J. Nanoscience*, **3**, 193 (2004).
10. Ohtoshi T. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1886 (1994).