

Структуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками в вертикальных оптических резонаторах для диапазона длин волн вблизи 1.3 мкм

© 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*

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

*Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, Hardenbergstr. 36, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 29 октября 1998 г. Принята к печати 5 ноября 1998 г.)

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs получены полупроводниковые гетероструктуры с вертикальными оптическими резонаторами, имеющие активные области на основе массивов квантовых точек InAs, помещенных во внешнюю квантовую яму InGaAs. Исследованы зависимости спектров отражения и фотолюминесценции от особенностей структуры активной области и оптических резонаторов. Предложенные гетероструктуры потенциально пригодны для создания оптоэлектронных приборов на диапазон длин волн вблизи 1.3 мкм.

Полупроводниковые гетероструктуры с массивами квантовых точек (КТ) в последние годы вызывают интерес не только из-за их уникальных физических свойств, но и как перспективные материалы для различных оптоэлектронных приборов [1]. Одно из преимуществ структур InGaAs/GaAs с КТ состоит в принципиальной возможности освоения диапазона длин волн вблизи 1.3 мкм [2], недостижимого в указанной системе материалов при использовании напряженных квантовых ям (КЯ) из-за ограничений на ширину КЯ, налагаемых условиями псевдоморфного роста [3]. Это открывает новые возможности в поиске оптоэлектронных материалов для диапазона длин волн вблизи $\lambda = 1.3$ мкм, альтернативных традиционным гетероструктурам InGaAsP/InP. Хотя упомянутые гетероструктуры обеспечивают возможность согласования параметров кристаллической решетки и требуемую ширину запрещенной зоны, они имеют два принципиальных недостатка: плохие температурные характеристики лазерных диодов из-за слабого ограничения электронов в активной области и низкие параметры брэгговских зеркал на основе InGaAsP/InP из-за малого различия коэффициентов преломления слоев и плохой теплопроводности InGaAsP [4,5]. Плохое качество зеркал InGaAsP/InP ведет к необходимости использования сложной технологии для поверхностно-излучающих лазеров и фотоприемников с вертикальными оптическими резонаторами (ОР), основанной либо на отдельном выращивании брэгговских зеркал в системе AlGaAs/GaAs и их последующем спекании с активным слоем [6], либо на применении диэлектрических зеркал [7].

Получение гетероструктур в системе материалов InGaAs/AlGaAs/GaAs, обеспечивающих необходимые спектральные характеристики вблизи $\lambda = 1.3$ мкм, позволило бы создавать структуры для поверхностно-излучающих лазеров и резонансных фотоприемников с брэгговскими зеркалами на основе AlGaAs/GaAs в одном эпитаксиальном процессе. В последние 3–4 года для гетероструктур в системе InGaAs/AlGaAs/GaAs намети-

лись два основных направления освоения длинноволнового диапазона: добавление малых количеств азота в слой InGaAs и использование массивов КТ, получаемых при осаждении сильно напряженного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \geq 0.5$). Для приборов с активной областью в виде КЯ на основе четырехкомпонентного соединения InGaAsN удалось достичь лазерной генерации на длине волны 1.3 мкм при комнатной температуре [8], а применение массивов InGaAs-КТ с 50%-м содержанием InAs позволило реализовать фотодетектор с вертикальным оптическим резонатором для 1.3 мкм [9]. Результаты последних исследований показывают возможность получения фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне от 1.3 до 1.75 мкм и электролюминесценции (ЭЛ) на длине волны 1.3 мкм при комнатной температуре для структур с InGaAs-КТ, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs [10,11].

В настоящей работе мы исследуем возможность получения методом МПЭ на подложках GaAs гетероструктур с вертикальным оптическим резонатором и активной областью на основе InAs-КТ, помещенных во внешнюю InGaAs-КЯ, которые потенциально пригодны для создания оптоэлектронных приборов диапазона длин волн вблизи 1.3 мкм.

Помещение массива квантовых точек InAs во внешнюю напряженную квантовую яму InGaAs позволяет значительно расширить длинноволновый предел излучения в структурах, выращенных методом МПЭ на подложках арсенида галлия. При этом положение максимумов в спектрах фото- и электролюминесценции может управляемо изменяться в широком диапазоне с помощью изменения содержания In во внешней квантовой яме [12]. Для создания активных областей структур с вертикальными оптическими резонаторами (ОР) в настоящей работе использовались массивы InAs-КТ, помещенные во внешнюю КЯ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ шириной 4 нм. Исследуемые структуры выращивались методом МПЭ с твердотельным источником As_4 в

установке Riber 32P на подложках полуизолирующего GaAs (100). Температура подложки составляла 485°C при осаждении активной области и 600°C для остальной части структуры. Фотолюминесценцию возбуждали Ag⁺-лазером (514.5 нм) и регистрировали Ge-фотодиодом. Плотность мощности возбуждения составляла 100 Вт/см². Спектры отражения измерялись в нормальной геометрии при комнатной температуре с использованием Ge-фотодиода.

Исследуемые структуры формировались в три этапа. Сначала методом МПЭ выращивались нижнее зеркало на основе нелегированной структуры AlAs/GaAs с номинальными толщинами слоев в четверть рабочей длины волны ($\lambda/4$). Зеркала такого типа используются для структур со скрытыми контактными p^+ - и n^+ -слоями, формируемыми внутри активного слоя ОР. После выращивания зеркала структура вынималась из камеры, проводились измерения спектров отражения, затем разделялась на отдельные части, на которых выращивались различные варианты активных слоев. Такой подход позволяет исследовать различные типы активных слоев при одинаковом нижнем зеркале. Чтобы избежать проблем, связанных с возможностью окисления AlAs, все структуры зеркал завершались ($\lambda/4$)-слоем GaAs. Для обеспечения высокого кристаллографического совершенства материала активного слоя необходима соответствующая подготовка поверхности нижнего зеркала или ее защита после завершения эпитаксиального процесса. Мы использовали защиту поверхности нижнего зеркала слоем аморфного мышьяка толщиной ~ 0.1 мкм, который осаждался на поверхность структуры при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$ непосредственно после завершения эпитаксиального процесса. Перед началом роста активного слоя защитное покрытие удалялось в камере установки МПЭ путем отжига подложки при 610°C в течение 10 мин при избыточном потоке As₄. Четкая дифракционная картина наблюдалась уже при температуре $< 400^\circ\text{C}$, что свидетельствует об отсутствии окисных пленок под слоем мышьяка. После измерения спектров отражения и ФЛ структур с выращенной активной областью формировались верхние диэлектрические зеркала различного типа и исследовалось их влияние на спектральные характеристики. Окончательный вариант исследуемой структуры с верхним и нижним зеркалами схематически изображен на рис. 1.

При проектировании ($\lambda/4$)-отражателя на определенную длину волны предполагается, что она является центральной длиной волны (λ_c) для спектра отражения структуры с периодически повторяющимися слоями, параметры которых связаны соотношением [13]

$$\lambda_c = 2n_L(\lambda_c)h_L + 2n_H(\lambda_c)h_H. \quad (1)$$

Здесь $n_L(\lambda_c)$ и h_L — показатель преломления и толщина слоя с низким показателем преломления (AlAs), а $n_H(\lambda_c)$ и h_H — аналогичные параметры слоя с высоким

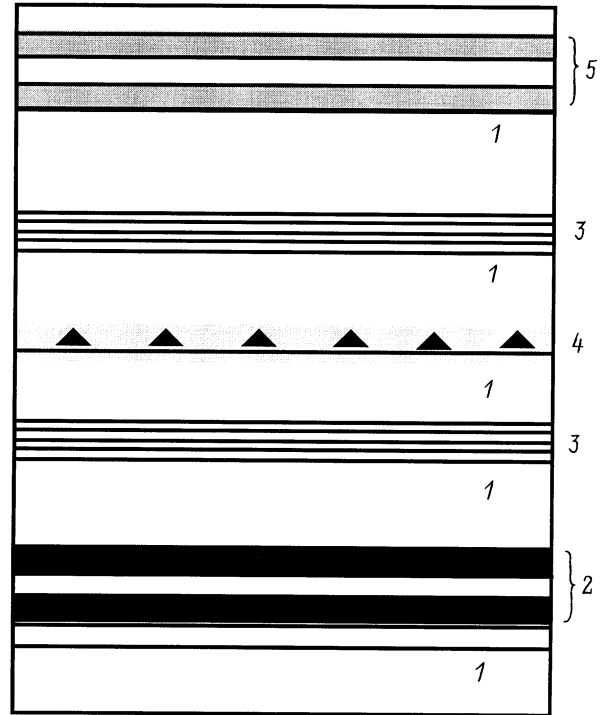


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения исследуемой структуры с нижним полупроводниковым (2) и верхним диэлектрическим (5) брэгговскими зеркалами. 1 — GaAs, 3 — короткопериодная сверхрешетка AlAs/GaAs, 4 — активная область с InAs-КТ в квантовой яме InGaAs.

показателем преломления (GaAs). Кроме того, предполагается, что отношение оптических толщин слоев

$$\rho = n_H(\lambda_c)h_H/n_L(\lambda_c)h_L \quad (2)$$

точно равно 1. В случае отражателя AlAs/GaAs при $\lambda_c = 1.3$ мкм и значениях показателей преломления $n_H = 3.44$, $n_L = 2.90$ соответствующие номинальные толщины слоев составляют: $h_H = 94.4$ нм и $h_L = 111.9$ нм.

Однако для реальных зеркал условие (2) выполняется только приблизительно. Существенное влияние на отклонение экспериментальных спектров отражения от расчетных может оказывать несоответствие реальных и проектных толщин слоев. Причинами этого являются неточности в калибровке скорости роста, а также возможная нестабильность параметров эпитаксиального процесса (например, медленное изменение скорости роста для слоев GaAs или AlAs или сбой при выращивании одного из слоев). Кроме того, имеются некоторые различия в данных по зависимости показателей преломления $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от состава и длины волны [14,15]. Поэтому актуальной задачей является анализ экспериментальных спектров отражения и их сопоставление с расчетными. При расчете спектров отражения формируемых многослойных структур использовались следующие

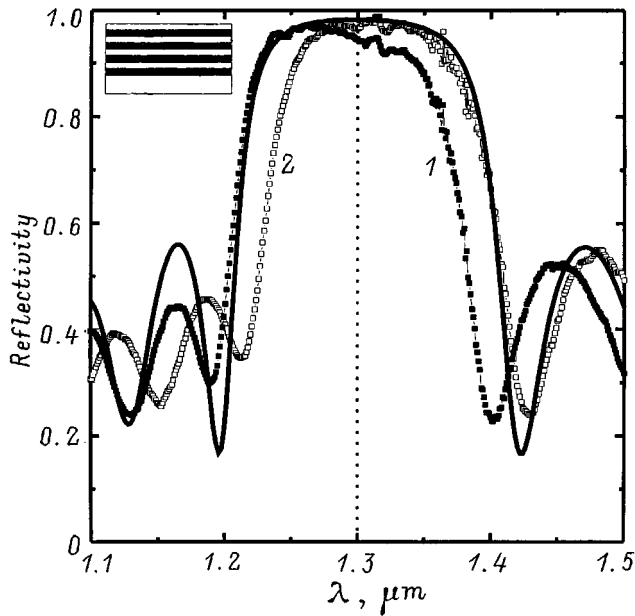


Рис. 2. Расчетный спектр отражения для брэгговского отражателя AlAs/GaAs при 12 парах слоев $\lambda/4$ (сплошная линия) и измеренные спектры в центре (1) и у края (2) структуры.

соотношения [16]:

$$R_{i+1}(\lambda) = \left\{ r_{i+1}(\lambda) + R_i(\lambda) \right. \\ \left. \times \exp[-2j\beta_i(\lambda)l_i] \right\} / \left\{ 1 + r_{i+1}(\lambda)R_i(\lambda) \right. \\ \left. \times \exp[-2j\beta_i(\lambda)l_i] \right\}, \quad (3)$$

$$R_1(\lambda) = r_1(\lambda),$$

$$r_1(\lambda) = (n_i - n_{i-1}) / (n_i + n_{i-1}),$$

$$\beta_i(\lambda) = 2\pi n_i(\lambda) / \lambda,$$

где λ — длина волны оптического излучения, $R_i(\lambda)$ — коэффициент отражения для части структуры, содержащей i слоев, $r_i(\lambda)$ — локальный коэффициент отражения между i -м и $(i-1)$ -м слоями, $\beta_i(\lambda)$ — постоянная распространения для i -го слоя, $l_i = h_i \cos(\theta_i)$ — эффективная толщина i -го слоя, а h_i , n_i и θ_i — соответственно толщина, показатель преломления и угол распространения для i -го слоя. На рис. 2 приводятся расчетный и измеренные спектры отражения при нормальном падении оптического излучения для изготовленного брэгговского зеркала, состоящего из 12 пар ($\lambda/4$)-слоев AlAs/GaAs и предназначенного для создания приборов диапазона вблизи 1.3 мкм. Выбранное число пар слоев недостаточно для реализации вертикально-излучающих лазеров, поскольку максимальное значение коэффициента отражения не превышает 0.98, но вполне достаточно для исследования принципиальных особенностей структур с вертикальными ОР. Тщательная калибровка, проведенная с использованием предварительно выращенных тестовых структур

в виде нескольких слоев AlAs/GaAs, позволяет получить спектры отражения, близкие к расчетным. Однако, как следует из рис. 2, реальные структуры имеют градиент параметров по площади подложки. В нашем случае при использовании вращения подложки в процессе эпитаксии имела место четко выраженная радиальная неоднородность параметров. Эта особенность учитывалась при проектировании активной области структур, поскольку любые отклонения от номинальных параметров зеркала ведут к появлению дополнительного фазового сдвига на рабочей длине волны [13].

На рис. 3 представлены спектры ФЛ для структуры с нелегированным ОР общей номинальной толщиной $L = 377.6$ нм, соответствующей (с учетом показателя преломления GaAs) одной длине волны $\lambda = 1.3$ мкм. Параметры активного слоя соответствовали тестовому образцу с максимумом спектра ФЛ при $\lambda = 1.3$ мкм. Для устранения влияния поверхностей на расстоянии 20 нм сверху и снизу от активного слоя помещались короткопериодные сверхрешетки AlGaAs/GaAs. Роль верхнего зеркала выполняла граница GaAs–воздух. При комнатной температуре максимум спектра ФЛ соответствует 1.33 мкм. Ширина линии ФЛ, определенная по уровню 1/2 от максимальной амплитуды, для структуры с вертикальным ОР составляет 40 нм, а для тестовой структуры 70 нм. Это показывает, что в данном случае форма спектра ФЛ в существенной степени определяется параметрами ОР. Малое падение интенсивности ФЛ при изменении температуры от 77 до 300 К свидетельствует о высоком качестве эпитаксиальной структуры.

Измеренный спектр отражения для рассматриваемой структуры приводится на рис. 4, а, а расчетные спектры при различной толщине ОР — на рис. 4, б. Анализ показывает, что реальная толщина слоя ОР несколько больше проектной, что и приводит к длинноволновому сдвигу по-

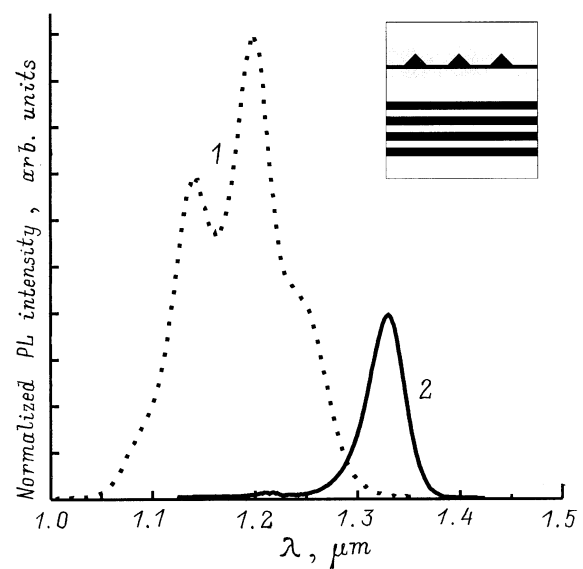


Рис. 3. Спектры ФЛ (PL) образца с активным слоем, выращенным на брэгговском отражателе, при 77 (1) и 300 К (2).

ложения минимума в спектре коэффициента отражения. Расчет с использованием соотношений (3) при длине резонатора $L = 401$ нм (что соответствует $17\lambda/16n$ для GaAs при $\lambda = 1.3$ мкм) дает для резонансной длины волны в вакууме значение $\lambda_r = 1.335$ мкм, находящееся в хорошем соответствии с экспериментальным значением $\lambda_r = 1.331$ мкм. В то же время простая оценка с использованием хорошо известного соотношения [13]

$$2\beta L + \phi_1 + \phi_2 = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3 \dots,$$

где $\beta = 2\pi/\lambda_r$, n — показатель преломления материала активного слоя резонатора, в пренебрежении фазовыми поправками ($\phi_1, \phi_2 = 0$) дает значение $\lambda_r = 1.381$ мкм. Таким образом, фазовые поправки при неточном соответствии центральной длины волны четвертьволнового отражателя резонансной длине волны играют существенную роль и их необходимо учитывать при проектировании активной области.

Для исследования влияния параметров ОР на спектральные характеристики формировались верхние ди-

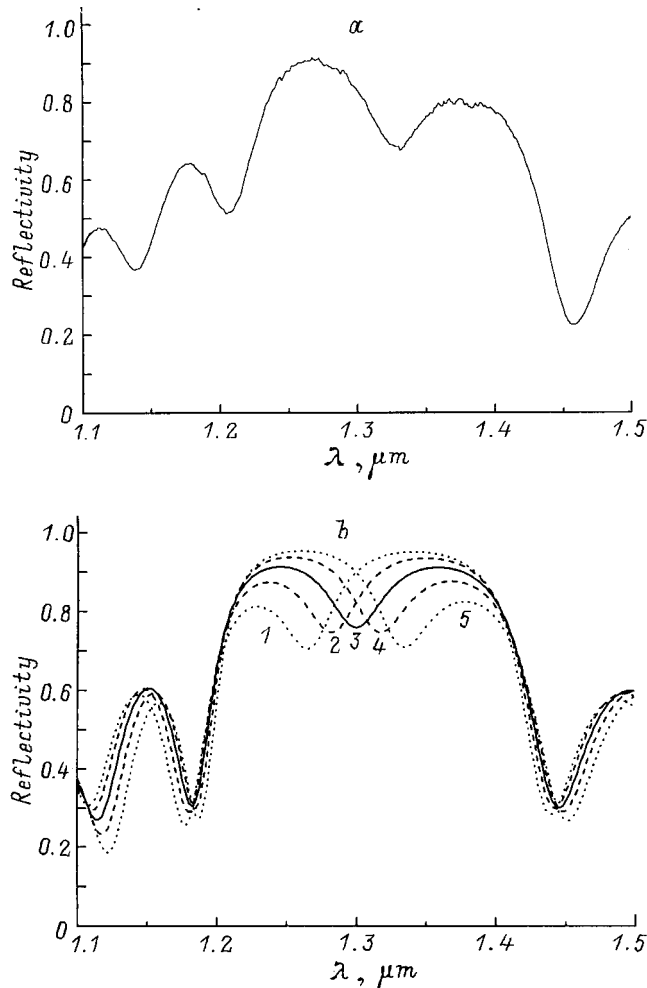


Рис. 4. Спектры отражения для образца с активным слоем, измеренный (а) и рассчитанные (б) при различной толщине активного слоя GaAs: 1 — $15\lambda/16n$, 2 — $31\lambda/32n$, 3 — λ/n , 4 — $33\lambda/32n$, 5 — $17\lambda/16n$. $\lambda = 1300$ нм, $n = 3.44$.

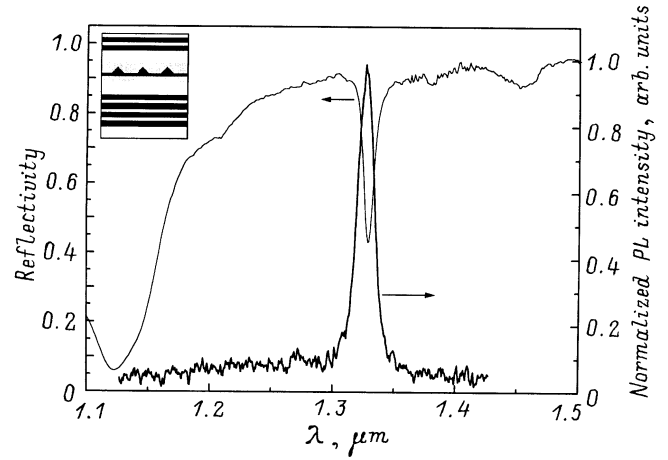


Рис. 5. Спектры отражения и ФЛ (PL) для образца с активным слоем после формирования верхнего диэлектрического ($\lambda/4$)-зеркала.

электрические зеркала. На рис. 5 представлены измеренные спектры отражения и ФЛ для структуры с верхним четвертьволновым отражателем на основе SiO_2/ZnS . Как и ожидалось, повышение добротности ОР ведет к существенному сужению спектральной линии ФЛ (до 15 нм).

Таким образом, в настоящей работе методом МПЭ на подложках GaAs получены полупроводниковые гетероструктуры с вертикальными ОР, имеющие активные области на основе массивов квантовых точек InAs, помещенных во внешнюю квантовую яму InGaAs. Для формирования ОР использовались брэгговские отражатели: нижний на основе AlAs/GaAs и верхний на основе SiO_2/ZnS . Исследованы зависимости спектров отражения и фотолюминесценции от особенностей структуры активной области и оптических резонаторов. Разработанная технология потенциально пригодна для создания вертикальных излучателей и резонансных фотоприемников диапазона длин волн вблизи 1.3 мкм на подложках арсенида галлия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и INTAS-96-0467. Б.В. Воловик выражает отдельную благодарность за поддержку по гранту INTAS 94-1028-YSF41.

Список литературы

- [1] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. ФТП, **32**, 385 (1998).
- [2] R.P. Mirin, J.P. Ibbetson, K. Nishi, A.C. Gossard, J.E. Bowers. Appl. Phys. Lett., **67**, 3795 (1995).
- [3] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. J. Cryst. Growth, **27**, 118 (1974).
- [4] G.P. Agrawal, N.K. Dutta. *Long Wavelength Semiconductor Lasers* (N.Y., Van Nostrend Reinhold, 1986).
- [5] A. Tsigopoulos, V. Paschos, C. Caroubalos, P. Salet, J. Jacquet. IEEE J. Quant. Electron., **33**, 2221 (1997).

- [6] Y. Qian, Z.H. Zhu, Y.H. Lo, D.F. Huffaker, D.G. Deppe, H.Q. Hou, B.E. Hammons, W. Lin, Y.K. Tu. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 25 (1997).
- [7] T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, K. Iga. *Quant. Optoelectron. Conf.* (Palm Springs, 1994) PD2-2.
- [8] M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson, K. Nakamura, K. Uomi, H. Inoue. *LEOS'97* (San Francisco, 1997) ThE3.
- [9] J.C. Campbell, D.L. Huffaker, H. Deng, D.G. Deppe. *Electron. Lett.*, **33**, 1337 (1997).
- [10] D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 520 (1998).
- [11] V. Ustinov, A. Egorov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, A.F. Tsatsul'nikov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Z. Alferov. *Tenth Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy* (Cannes, France, 1998) PT4.9.
- [12] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.Ю. Егоров, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Б.В. Воловик, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Ю.М. Шерняков, А.В. Лунев, Ю.Г. Мусихин, Н.А. Берт, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **33**, 180 (1999).
- [13] M.S. Unlu, S. Strite. *J. Appl. Phys.*, **78**, 607 (1995).
- [14] M.A. Fromovitz. *Sol. St. Commun.*, **15**, 59 (1974).
- [15] *Properties of Aluminium Gallium Arsenide*, ed. by S. Adachi [INSPEC, EMIS Datareviews, N7 (1993)].
- [16] P. Yeh. *Optical waves in layered media* (Wiley, N.Y., 1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Vertical optical cavity InGaAs/GaAs quantum dot structures for 1.3 μm wavelength range

N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov, I.L. Krestnikov, A.V. Lunev, A.V. Sakharov, B.V. Volovik, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
*Institut für Festkörperphysik,
Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract Semiconductor vertical optical microcavities with InAs quantum dots inserted in InGaAs quantum well were grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates. The influence of the cavity parameters on the luminescence and reflectivity spectra has been studied. The structures proposed are shown to be promising candidates for optoelectronic devices operating in the wavelength range around 1.3 μm .