

# Концепции создания монокристаллических вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм

© А.Ю. Егоров<sup>†\*</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>†\*</sup>, И.И. Новиков<sup>†\*</sup>, А.В. Бабичев<sup>†\*</sup>,  
В.Н. Неведомский<sup>†</sup>, В.Е. Бугров<sup>\*</sup>

<sup>†</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> ООО «Коннектор Оптикс»,  
194292 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 29 апреля 2015 г. Принята к печати 6 мая 2015 г.)

Предложены возможные концепции реализации длинноволновых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм на подложках GaAs. Показана возможность формирования методом молекулярно-пучковой эпитаксии метаморфной гетероструктуры GaAs–InGaAs с тонким буферным слоем, обеспечивающим быстрый переход от постоянной решетки подложки GaAs к постоянной решетке эпитаксиального метаморфного слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с долей индия  $x > 0.3$ . Исследования методами просвечивающей электронной микроскопии показали эффективную локализацию дислокаций несоответствия в области тонкого буферного слоя и практически полное подавление проникновения дислокаций в вышележащий метаморфный слой InGaAs.

## 1. Введение

Интерес к лазерным излучателям с длиной волны излучения 1550 нм в первую очередь связан с наличием окна прозрачности в оптическом волокне на этой длине волны, а также высокой доступностью эффективных эрбиевых усилителей [1], способных усиливать оптические сигналы практически без искажения. Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, англоязычное название vertical-cavity surface-emitting laser — VCSEL) за последнее десятилетие стали ключевыми компонентами оптоволоконных систем внутри- и межсистемного обмена информацией, газовых датчиков, устройств ввода–вывода на оптических принципах. К числу основных преимуществ ВИЛ по сравнению с традиционными инжекционными лазерами Фабри–Перо с полосковой геометрией контактов и выводом излучения с торца резонатора относятся малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, возможность обеспечения субмиллиамперных пороговых токов, сверхнизкое энергопотребление и малая рассеиваемая мощность, повышенная температурная и радиационная стабильность, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов непосредственно на пластине, возможность формирования линейных массивов и матричных лазерных излучателей с индивидуальной адресацией. Однако разработка эффективных ВИЛ диапазона 1300–1550 нм столкнулась с трудностями вследствие ряда физических ограничений систем материалов на основе InP.

Вертикально-излучающие лазеры на основе подложек InP обладают малым контрастом показателей преломления слоев InGaAsP и InGaAlAs и недостаточным электронным ограничением в активной области [2,3], что наряду с большой толщиной (из-за большой длины волны) и низкой теплопроводностью слоев ведет к усилению эффекта саморазогрева и низкой температурной стабильности. Более того, технология латерального окисления AlAs, представляющая собой эффективный и хорошо разработанный метод для получения токового и оптического ограничения при создании ВИЛ с длиной волны генерации 850 и 970 нм, недоступна в системе материалов на основе InP. К настоящему моменту для создания ВИЛ на длину волны 1300–1550 нм можно выделить несколько основных подходов. Первый состоит в росте ВИЛ на подложке InP и формировании токового и оптического ограничения за счет селективного травления слоев [4], при таком подходе получаемые ВИЛ обладают малой механической стабильностью за счет существования воздушного зазора и грибовидной конфигурации одного из зеркал ВИЛ. Другим подходом является использование сложной конструкции, сочетающей туннельный переход для оптического и токового ограничения, диэлектрическое зеркало и вывод излучения через подложку [5]. Еще одним подходом при создании ВИЛ диапазона 1300–1550 нм является применение метода спекания (wafer fusion) слоев InP и GaAs [6]. При данном подходе два распределенных брэгговских отражателя (РБО) ВИЛ формируются из пар чередующихся слоев AlGaAs/GaAs с достаточно высоким контрастом показателей преломления, выращиваются на двух отдельных подложках GaAs. Активная область выращивается на подложке InP, гетерострукту-

<sup>†</sup> E-mail: anton@beam.ioffe.ru

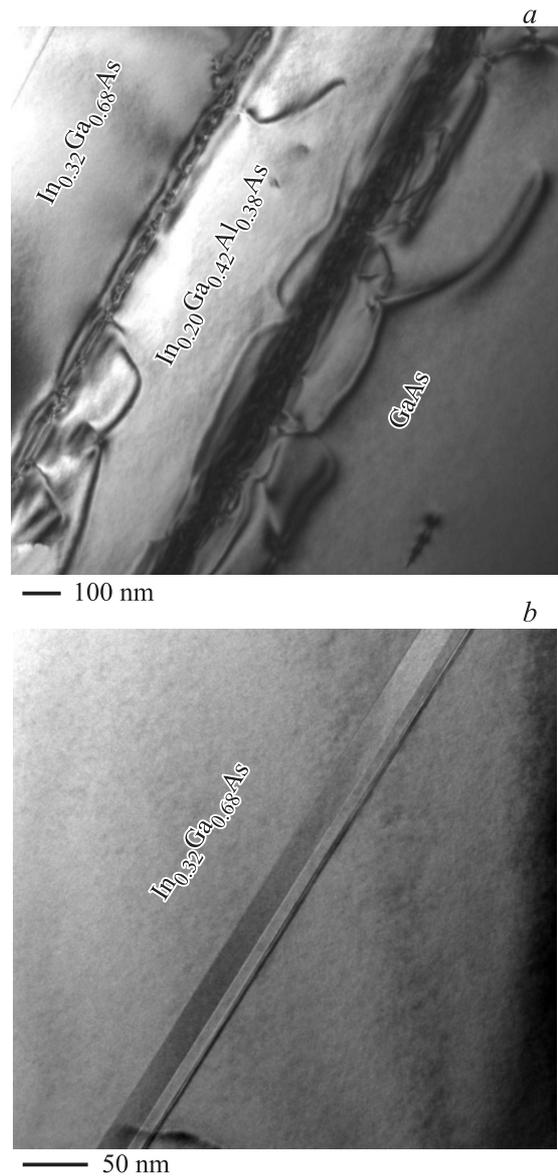
ра завершается туннельным переходом. После формирования мезоструктуры и повторного эпитаксиального процесса на пластине с активной областью формируется захороненный туннельный переход, обеспечивающий токовое и оптическое ограничение. После завершения эпитаксиальных процессов все три пластины спекаются, обеспечивая формирование монолитной гетероструктуры ВИЛ. Данный подход позволяет изготовить ВИЛ, который может обеспечить высокую выходную мощность оптического излучения, до 6 мВт [6] в одночастотном режиме лазерной генерации. В свою очередь необходимость использования трех отдельных эпитаксиальных процессов на различных подложках серьезно усложняет процесс изготовления данных ВИЛ и увеличивает в несколько раз конечную стоимость прибора. В рамках данной работы предлагается альтернативная концепция реализации монолитного ВИЛ спектрального диапазона 1300–1550 нм — концепция создания метаморфных вертикально-излучающих лазеров. Ранее данная концепция была с успехом применена для создания полупроводниковых лазеров данного спектрального диапазона с торцевым выводом излучения [7].

## 2. Эксперимент

Экспериментальные образцы были изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на промышленной установке Riber MBE49 компанией ООО «Коннектор Оптикс» на подложках GaAs (100). Спектры оптического отражения образцов были зарегистрированы с использованием установки RPM 2000. Структурные свойства образцов исследовались с помощью рентгеновского дифрактометра фирмы PANalytical и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM 2100F при ускоряющем напряжении  $\sim 200$  кВ. Образцы для исследований методом ПЭМ были приготовлены в геометрии поперечного сечения ( $1\bar{1}0$ ) с использованием механической обработки и последующим распылением на конечном этапе до перфорации пучком  $\text{Ar}^+$ -ионов с энергией 4 кэВ под углом  $11^\circ$  к поверхности.

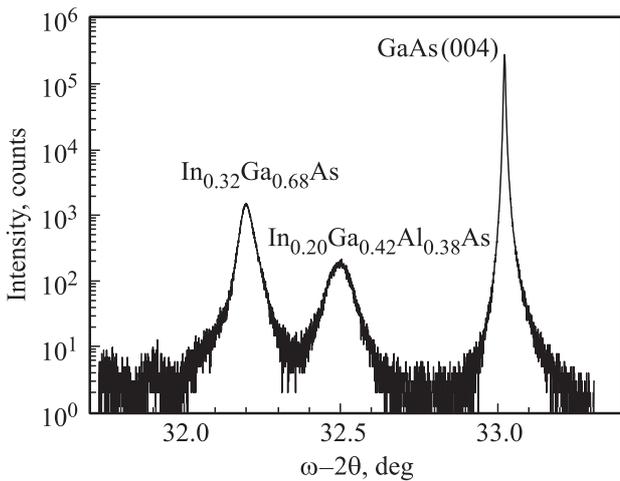
## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В ходе работы методом МПЭ на подложках GaAs были реализованы метаморфные гетероструктуры со ступенчатыми переходными буферными слоями. На рис. 1, *a* и *b* приведены изображения поперечного сечения экспериментального образца с метаморфным двухступенчатым буферным слоем. Изображения получены с помощью метода ПЭМ. В данном образце переход от постоянной решетки подложки GaAs к постоянной решетке эпитаксиального слоя InGaAs осуществлялся в два этапа. Сначала сформирован резкий переход от GaAs к четверному твердому раствору  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.42}\text{Al}_{0.38}\text{As}$ , что



**Рис. 1.** ПЭМ-изображения поперечного сечения метаморфной гетероструктуры InGaAlAs/InAlAs с двухступенчатым метаморфным буферным слоем, выращенной на подложке GaAs (100) методом МПЭ: *a* — в области двухступенчатого метаморфного буферного слоя; *b* — в области вышележащих слоев гетероструктуры.

обеспечило основную релаксацию механических напряжений на гетерогранице указанных материалов, и уже только затем сформирован резкий переход от четверного твердого раствора  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.42}\text{Al}_{0.38}\text{As}$  к тройному твердому раствору  $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ . Данный подход обеспечил эффективную локализацию дислокаций несоответствия на гетерогранице указанных материалов и полное подавление их проникновения в слой  $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  и вышележащие слои гетероструктуры (см. рис. 1, *b*). Исследования обсуждаемого образца методом рентгеновской дифракции (рис. 2) подтвердили наличие характерных, хорошо выраженных и достаточно узких

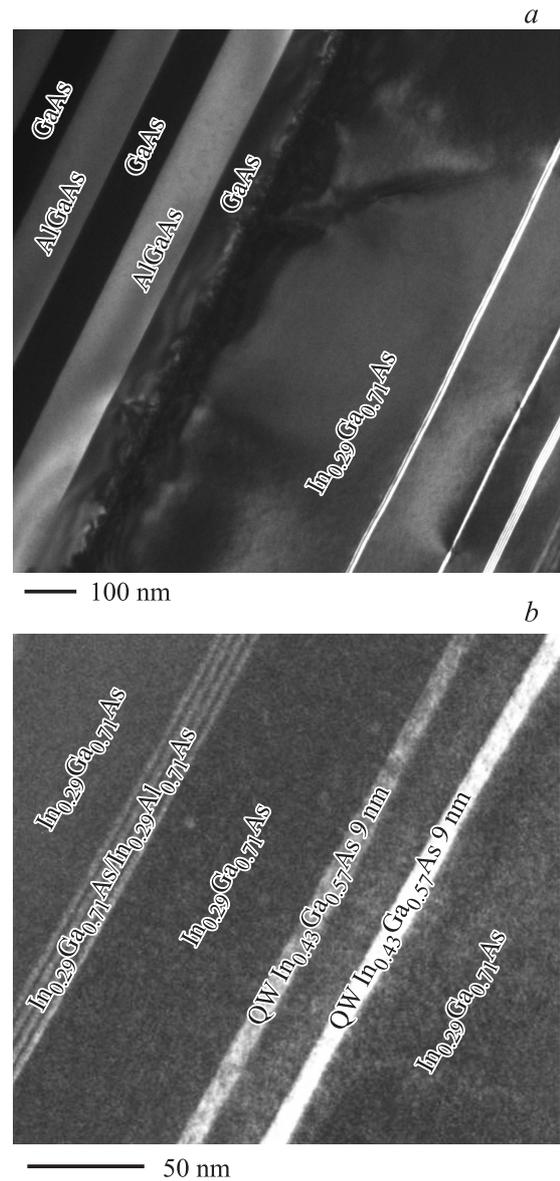


**Рис. 2.** Дифракционная кривая метаморфной гетероструктуры InGaAs/InAlAs с двухступенчатым метаморфным буферным слоем, выращенной на подложке GaAs (100) методом МПЭ.

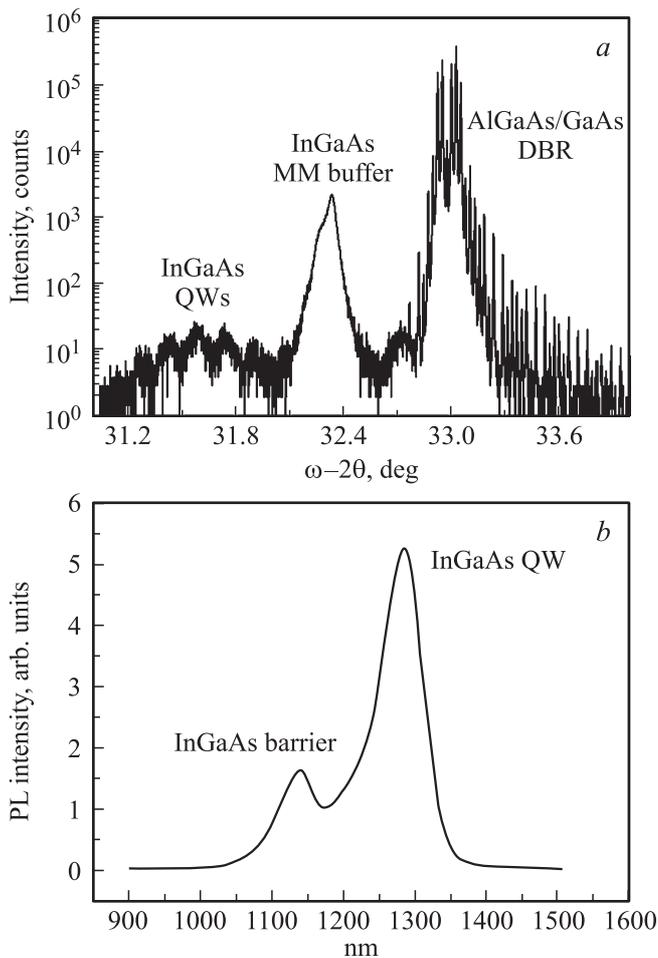
дифракционных пиков, соответствующих метаморфным слоям In<sub>0.20</sub>Ga<sub>0.42</sub>Al<sub>0.38</sub>As и In<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As на поверхности GaAs, со степенью релаксации упругих напряжений, практически близкой к 100%. Важно отметить, что суммарная толщина слоев буферной гетероструктуры невелика и составляет ~ 500 нм (рис. 1, а). В случае реализации ВИЛ с длиной волны оптического излучения λ = 1550 нм такая толщина соответствует оптической длине порядка 1λ с учетом показателя преломления используемого полупроводникового материала. Один из способов реализации ВИЛ — конструкция с контактными слоями, расположенными внутри резонатора, между РБО. Характерные оптические длины таких резонаторов от 5 до 7λ. Таким образом, за счет использования технологии формирования тонкого метаморфного буферного слоя можно предложить конструкцию ВИЛ с внутрирезонаторными контактами, с метаморфным буферным слоем, расположенным непосредственно в резонаторе, эффективно локализуя дислокации несоответствия вблизи гетерограницы. Использование более толстых метаморфных буферных слоев, расположенных внутри резонатора, не представляет интереса по причине существенного уменьшения интеграла перекрытия активной области со световой волной, существенного увеличения пороговых токов генерации и понижения максимально возможных рабочих частот ВИЛ [8].

Изображения поперечного сечения образца, состоящего из РБО AlGaAs/GaAs, сформированного на поверхности подложки GaAs, одноступенчатого метаморфного буферного слоя, в основном состоящего из тройного твердого раствора In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As со вставками In<sub>0.29</sub>Al<sub>0.71</sub>As (более светлые слои) и активной области, содержащей две квантовые ямы In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As, представлено на рис. 3, а и б. Изображение получено с помощью метода ПЭМ. Использование тонких вставок In<sub>0.29</sub>Al<sub>0.71</sub>As и сверхрешеток In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As/In<sub>0.29</sub>Al<sub>0.71</sub>As помогает полно-

стью подавить проникновение дислокаций несоответствия в активную область гетероструктуры (рис. 3, б) и обеспечить эффективную фотолюминесценцию квантовых ям, сформированных посредством выращивания слоев In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As толщиной 9 нм между слоями In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As. Спектр фотолюминесценции гетероструктуры, зарегистрированный при комнатной температуре, приведен на рис. 4, б. Максимум спектра фотолюминесценции расположен на длине волны 1300 нм и соот-



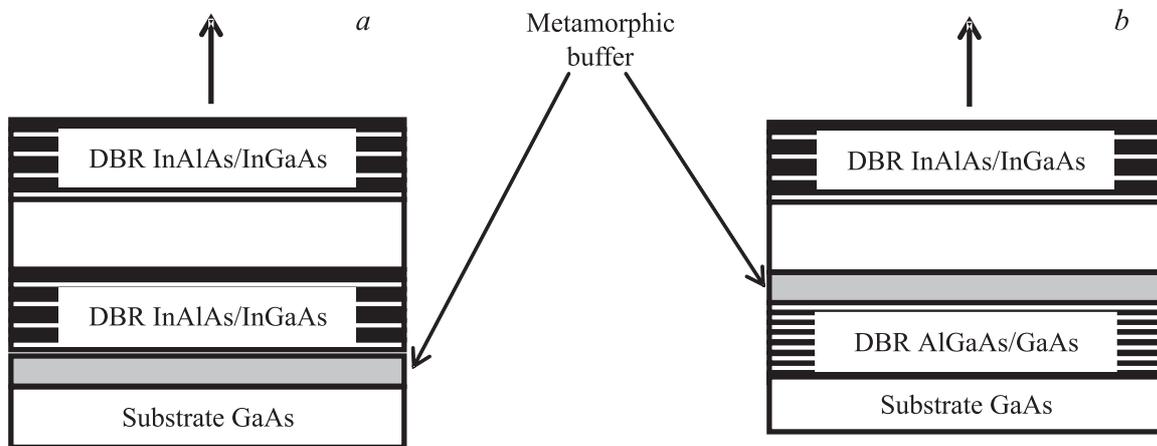
**Рис. 3.** ПЭМ-изображения поперечного сечения гетероструктуры, состоящей из РБО AlGaAs/GaAs, сформированного на поверхности подложки GaAs, одноступенчатого метаморфного буферного слоя, в основном состоящего из тройного твердого раствора In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As со вставками In<sub>0.29</sub>Al<sub>0.71</sub>As (более светлые слои) и активной области, содержащей две квантовые ямы In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As: а — в области РБО и одноступенчатого метаморфного буферного слоя (сверху); б — в области вышележащих слоев гетероструктуры и квантовых ям.



**Рис. 4.** Дифракционная кривая метаморфной гетероструктуры, состоящей из распределенного брэгговского отражателя (DBR) AlGaAs/GaAs, сформированного на поверхности подложки GaAs, одноступенчатого метаморфного буферного слоя (MM buffer) In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As и активной области, содержащей две квантовые ямы (QWs) In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As (a), и спектр фотолюминесценции (PL) при комнатной температуре (b).

ответствует рекомбинации носителей заряда, находящихся на основных уровнях размерного квантования квантовых ям In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As. Спектральный максимум, расположенный на длине волны 1140 нм, соответствует рекомбинации носителей в барьерных слоях In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As, окружающих слои квантовых ям. Интегральная интенсивность фотолюминесценции исследуемого образца не уступает интегральной интенсивности фотолюминесценции эталонного псевдоморфного образца с квантово-размерной гетероструктурой GaAs/In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As/GaAs. Дифракционная кривая эталонного образца представлена на рис. 4, a. Характерные области дифракционной кривой, соответствующие дифракции на РБО AlGaAs/GaAs, метаморфном слое In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As и слоях квантовых ям In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>As, помечены на рисунке соответствующими обозначениями. Хорошо выраженный и достаточно узкий дифракционный пик, соответствующий метаморфному слою In<sub>0.29</sub>Ga<sub>0.71</sub>As, подтверждает, что степень релаксации упругих напряжений практически близка к 100%. Данный факт подтверждается высокой интенсивностью фотолюминесценции гетероструктуры и отсутствием дислокаций в активной области гетероструктуры.

Таким образом, наряду с концепцией создания ВИЛ путем прямого формирования метаморфного РБО In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/In<sub>0.3</sub>Al<sub>0.7</sub>As на поверхности GaAs, о которой мы сообщали ранее [9], предлагается реализация и метаморфного ВИЛ с тонким метаморфным буферным слоем, расположенным внутри области резонатора. Концепции реализации метаморфных ВИЛ схематически показаны на рис. 5. В качестве базовых конструкций ВИЛ можно использовать два варианта гетероструктур с различным расположением метаморфного буферного слоя: между подложкой GaAs и метаморфным РБО InGaAs/InAlAs (рис. 5, a) и внутри резонатора, после формирования РБО AlGaAs/GaAs (рис. 5, b). В случае реализации ВИЛ с метаморфным



**Рис. 5.** Возможные концепции создания монолитных метаморфных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм на подложке GaAs.

РБО InGaAs/InAlAs (рис. 5, а), 33 пар чередующихся слоев  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$  будет достаточно для формирования эффективного РБО со значением коэффициента отражения в центре полосы отражения  $> 0.999$ . Для сравнения: в случае прямого формирования РБО на поверхности InP с согласованным параметром кристаллической решетки и таким же коэффициентом отражения понадобится  $> 50$  пар чередующихся слоев. Токовое и оптическое ограничение можно обеспечить за счет формирования захороненного туннельного перехода, технология которого хорошо отработана для узкозонных материалов [10], или за счет селективного окисления слоев InAlAs [11], как в случае ВИЛ, излучающих на длине волны 850 нм [12], что позволит выращивать полностью монокристаллический ВИЛ диапазона 1300–1550 нм за один эпитаксиальный процесс. Важно отметить, что использование метода метаморфного выращивания позволяет создавать ВИЛ с длиной волны излучения 1300–1550 нм с использованием высококонтрастных РБО AlGaAs/GaAs, и это должно положительно сказываться на селективности по длине волны и модовому составу излучения конечного прибора.

#### 4. Заключение

В настоящей работе предложены и рассмотрены концепции реализации монокристаллических ВИЛ спектрального диапазона 1300–1550 нм за один эпитаксиальный процесс. Показана принципиальная возможность реализации методом молекулярно-пучковой эпитаксии таких ВИЛ. Показана возможность формирования метаморфной гетероструктуры GaAs–InGaAs с тонким буферным слоем, обеспечивающим быстрый переход от постоянной решетки подложки GaAs к постоянной решетке эпитаксиального метаморфного слоя  $\text{In}_x\text{GaAs}_{1-x}$  с долей индия  $x > 0.3$ . Исследования методами просвечивающей электронной микроскопии показали эффективную локализацию дислокаций несоответствия в области тонкого буферного слоя и практически полное подавление проникновения дислокаций в вышележащие слои гетероструктуры.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, шифр 2015-14-579-0014, соглашение № 14.579.21.0096, уникальный идентификатор RFMEFI57915X0096.

#### Список литературы

- [1] A.W. Naji, B.A. Hamida, X.S. Cheng, M.A. Mahdi, S. Harun, S. Khan, W.F. Al-Khateeb, A.A. Zaidan, B.B. Zaidan, H. Ahmad. *Int. J. Phys. Sci.*, **6** (20), 4674 (2011).
- [2] M. Yano, H. Imai, M. Tukasagawa. *J. Appl. Phys.*, **52**, 3172 (1981).

- [3] H. Ishikawa, I. Suemune. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 344 (1994).
- [4] D. Pasquariello, E. Staffan Björlin, D. Lasaosa, Yi-Jen Chiu, J. Piprek, John E. Bowers. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 1470 (2006).
- [5] R. Shau, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, C. Lauer, M. Maute, M.-C. Amann. *Proc. SPIE*, **5364**, 1 (2004).
- [6] E. Kapon, A. Sirbu. *Nature Photon.*, **3**, 27 (2009).
- [7] T. Kettler, L.Y. Karachinsky, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, G. Fiol, M. Kuntz, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, K. Posilovic, D. Bimberg, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (4), 041113 (2006).
- [8] М.А. Бобров, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, Н.А. Малеев, А.А. Блохин, Ю.М. Задиранов, Е.В. Никитина, В.М. Устинов. *ФТП*, **48** (12), 1697 (2014).
- [9] А.Ю. Егоров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.В. Бабичев, Т.Н. Березовская, В.Н. Неведомский. *ФТП*, **49**, 1434 (2015).
- [10] R.L. Woo, W.D. Hong, S. Mesropian, M.S. Leite. *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., PVSC* (2011) p. 000295.
- [11] H. Gebretsadik, K. Kamath, W.-D. Zhou, P. Bhattacharya, C. Caneau, R. Bhat. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (2), 135 (1998).
- [12] L.Ya. Karachinsky, S.A. Blokhin, I.I. Novikov, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.A. Bobrov, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J.-R. Kropp, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **28** (6), 065010 (2013).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Concepts for creation of monolithic metamorphic vertical cavity surface emitting lasers for 1300–1550 nm spectral range

A.Yu. Egorov<sup>+,\*‡</sup>, L.Ya. Karachinsky<sup>+,\*‡</sup>,  
I.I. Novikov<sup>+,\*‡</sup>, A.V. Babichev<sup>+,\*‡</sup>,  
V.N. Nevedomskiy<sup>+</sup>, V.E. Bugrov<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> ITMO University,  
197101 St. Petersburg, Russia

<sup>‡</sup> Connector Optics LLC,  
194292 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Possible concepts for creation of long-wavelength vertical cavity surface emitting lasers of 1300–1550 nm spectral range on GaAs substrates were suggested. Feasibility to form a metamorphic heterostructure GaAs–InGaAs with thin buffer layer providing the change of lattice constant from GaAs to InGaAs with indium content  $> 0.3$  was demonstrated using MBE technique. Transmission electron microscopy studies have shown the effective localization of mismatch dislocations in the thin buffer layer and full suppression of their propagation to upper metamorphic layer InGaAs.