

Метаморфные брэгговские отражатели спектрального диапазона 1440–1600 нм: эпитаксия, формирование и заращивание мезаструктур

© А.Ю. Егоров^{†‡¶}, Л.Я. Карачинский^{†‡}, И.И. Новиков^{†‡}, А.В. Бабичев^{†‡*},
Т.Н. Березовская^{*}, В.Н. Неведомский[†]

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

^{*} Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия

[‡] ООО „Коннектор Оптик“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

[¶] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 апреля 2015 г. Принята к печати 27 апреля 2015 г.)

Показана возможность создания метаморфных распределенных брэгговских отражателей $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ с полосой отражения 1440–1600 нм и с коэффициентом отражения не менее 0.999 на подложке GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Продемонстрированы возможность заращивания методом молекулярно-пучковой эпитаксии мезаструктур, изготовленных из метаморфных распределенных брэгговских отражателей на подложке GaAs, а также возможность локального формирования микрорезонаторов за два эпитаксиальных процесса. Полученные результаты найдут широкое применение при формировании вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) с захороненным туннельным переходом.

1. Введение

Интерес к исследованиям в области материалов с варьируемым параметром кристаллической решетки в значительной степени связан с возможностью создания метаморфных транзисторных гетероструктур на подложках GaAs, приборные характеристики которых не уступали бы характеристикам гетероструктур на подложках InP [1]. Преимуществом применения подложек InP в сравнении со случаем GaAs является возможность роста гетероструктур InGaAs/AlGaAs с более высоким содержанием индия. Большой разрыв зоны проводимости на гетерогранице канал/барьер, а также меньшая эффективная масса электронов в модулированно-легированных гетероструктурах позволяют достичь более высоких значений концентрации и подвижности электронов в двумерном газе ($> 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $10\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, соответственно) [2] и, как следствие, повысить рабочие характеристики транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT-транзисторов) в системе материалов AlInAs/InGaAs/InP (промышленно производятся в США, Японии и Франции). Тем не менее существует альтернативное активно развивающееся и имеющее практические успехи в последнее время направление исследований — метаморфные гетероструктуры AlInAs/InGaAs/GaAs для HEMT-транзисторов с мольной долей индия, превышающей 0.3 [3].

Концепция использования метаморфных гетероструктур применяется и при создании оптоэлектронных устройств. Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ,

VCSEL) с длиной волны излучения в диапазоне 1.3 мкм реализованы на подложке GaAs за счет использования в качестве активной области гетероструктуры квантовых точек (КТ) [4,5], твердых растворов с азотом [6–9], а также структур с напряженными слоями GaAsSb [10] или InGaAs [11].

Формирование ВИЛ в более длинноволновой области, излучающих вблизи 1.5 мкм, возможно как за счет выращивания активной области на основе квантовых точек (КТ), так и на основе квантовых ям (КЯ). Реализация ВИЛ на основе КТ на принципах метаморфного роста буферных слоев InGaAlAs на подложках GaAs представлена в [12,13]. В [14] показана работа в непрерывном режиме при комнатной температуре метаморфных полосковых лазеров на КТ. Технология ВИЛ спектрального диапазона 1.5 мкм с использованием в качестве активной области КЯ представлена несколькими концепциями. Одна из наиболее перспективных, но в то же время трудоемких, состоит в раздельном росте, переносе, и склейке эпитаксиальных пластин (wafer fusion technology), где распределенные брэгговские отражатели (РБО) выращиваются на подложке GaAs, а активная область формируется на подложке InP [15–17]. При этом токовая и оптическая апертуры формируются за счет захороненного туннельного перехода (ТП). Вторая концепция предполагает использование гибридного нижнего РБО металл/диэлектрик (short-cavity design), активной области на подложке InP и встраивания ТП на основе $p^+-\text{AlGaInAs}/n^+-\text{GaInAs}$ [18–20]. Также продолжает развиваться подход, основанный на разработке ВИЛ на основе InP с ТП и эпитаксиально выращенными РБО на основе материалов InGaAlAs/InAlAs [21].

[¶] E-mail: anton@beam.ioffe.ru

Настоящая работа направлена на исследование возможности применения концепции метаморфного роста гетероструктур $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs для оптоэлектронных применений и прежде всего для создания ВИЛ.

При создании вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм на подложках InP серьезной проблемой является малая разница показателей преломления между твердыми растворами $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$, согласованными по постоянной кристаллической решетки с подложкой InP. РБО, сформированные на поверхности InP посредством выращивания пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ и $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$, имеют недостаточный для реализации ВИЛ коэффициент отражения, менее 0.99. В свою очередь, согласно расчетам, использование 33 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ позволяет достичь необходимое для работы ВИЛ значение величины коэффициента отражения. Более того, активная область для ВИЛ спектрального диапазона 1300–1550 нм с данным РБО также может быть успешно реализована либо за счет применения КТ [12], либо КЯ, например, $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Очевидно, что постоянная кристаллической решетки таких гетероструктур существенно превышает постоянную решетки GaAs, но в то же время и существенно меньше постоянной решетки InP. Если учесть, что подложки InP по сравнению с GaAs обладают существенными недостатками (меньший размер коммерчески доступных пластин, высокая хрупкость и значительно более высокая стоимость), то выбор GaAs в качестве подложки является предпочтительным.

Типичная проблема подхода, использующего метаморфный рост, — существенное развитие рельефа (увеличение шероховатости поверхности) кристалла при выращивании метаморфных слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs. Однако использование специфических условий эпитаксии позволяет не только реализовывать метаморфные гетероструктуры РБО $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs с гладкими гетерограницами и с высоким коэффициентом отражения, но и локально сформировать микрорезонаторы за два эпитаксиальных процесса, что и показано в настоящей работе.

2. Эксперимент

Гетероструктуры, исследуемые в настоящей работе, были изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на промышленной установке Riber MBE49 компанией ООО „Коннектор Оптикс“ на подложках GaAs(100) диаметром 3 дюйма. Спектры оптического отражения образцов были зарегистрированы с использованием установки RPM 2000. Изображения поперечного скола гетероструктур получены при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ)

JSM-7001F. Для формирования гребешковых мезоструктур с шириной полоска 100 мкм использовались методы оптической фотолитографии и жидкостного травления.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведен спектр оптического отражения гетероструктуры РБО, состоящей из 22 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs и покрывающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Толщины слоев РБО приблизительно соответствуют величинам отношения $\lambda/4n$, толщина покрывающего слоя λ/n , где λ — длина волны центра спектра отражения, а n — показатель преломления материала соответствующего слоя. Методом компьютерного моделирования спектра отражения проведена оценка толщин слоев гетероструктуры. Толщина покрывающего слоя составила 461.1 нм, толщины четвертьволновых слоев РБО 112.1 и 122.1 нм для слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$, соответственно. Изображение поперечного сечения выращенного образца, полученное в СЭМ, представлено на рис. 2. Шероховатость гетерограниц выращенной гетероструктуры незначительная и практически не влияет на спектр и величину коэффициента отражения. При численном моделировании спектра отражения РБО, состоящего из 33 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$, можно убедиться, что максимальное значение коэффициента отражения в центре полосы отражения превышает величину 0.999. Таким образом, необходимое значение величины коэффициента отражения для реализации ВИЛ может быть достигнуто за счет использования таких метаморфных зеркал. Смоделированный спектр отражения РБО, содержащего 33 пары чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ толщиной 112.1 и 122.1 нм соответственно,

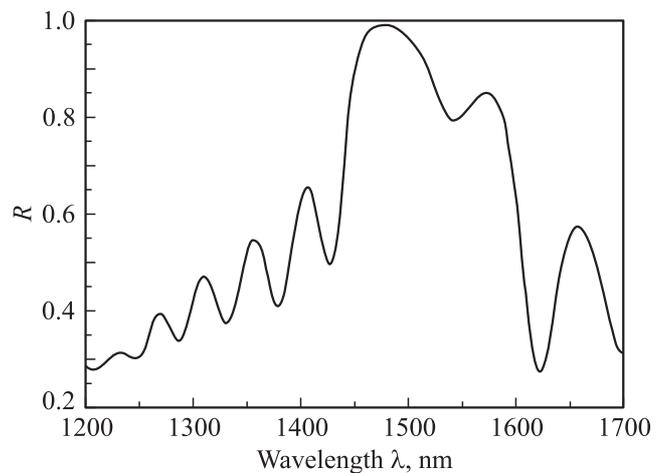


Рис. 1. Спектр оптического отражения R выращенной гетероструктуры РБО, состоящей из 22 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs и покрывающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Толщины слоев РБО приблизительно соответствуют величинам отношения $\lambda/4n$, толщина покрывающего слоя λ/n .

приведен на рис. 3. На рис. 4 показано изображение гетероструктуры РБО, состоящей из 22 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ и покрывающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, после формирования гребешковой мезаструктуры методами фотолитографии и жидкостного травления. Изображение получено методом сканирующей электронной микроскопии. Профиль мезаструктуры сформирован за счет жидкостного травления через маску фоторезиста AZ 3027. Глубина профиля, сформированного жидкостным травлением, составляет ~ 2 мкм, что соответствует удалению покрывающего слоя и 6 пар РБО. Травление проводилось при комнатной температуре в травителе, имеющем состав $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (1 : 1 : 10) [22]. При жидкостном травлении гетероструктур, содержащих слои $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$, в указанном растворе наблюдается определенная селективность травления. Для твердого раствора $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ характерно формирование профиля с вертикальными и даже немного отрицательными боковыми стенками, растрав в латеральном направлении незначителен (верхняя часть мезы). Для твердого раствора $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ характерен растрав в латеральном направлении. Поскольку верхние слои РБО подвергаются воздействию травителя более длительное время и растрав в латеральном направлении более выражен, то в результате травления РБО, состоящего из чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$, формируется профиль с отрицательным наклоном боковых стенок.

После проведения процессов травления, удаления фоторезиста и очистки поверхности образец был снова помещен в эпитаксиальный реактор. В ходе второго эпитаксиального процесса с предварительным отжигом образца при температуре 600°C в потоке мышьяка на поверхности образца был выращен слой $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ такой толщины, чтобы в сумме с ранее выращенным покрывающим слоем $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ сформировать микрорезонатор с резонансной длиной волны, совпадающей с центром полосы отражения нижнего РБО. После выращивания данного слоя, на поверхности образца был сформирован верхний РБО, состоящий из 5 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Из рис. 4., на котором приведено изображение гребешковой мезаструктуры после проведения второго эпитаксиального процесса, процесс эпитаксии происходит и на горизонтальных, и на наклонных поверхностях мезаструктуры, за исключением стенок с отрицательным наклоном. В результате проведения двух эпитаксий с промежуточным этапом жидкостного травления, на гребне мезаструктуры был сформирован микрорезонатор, состоящий из нижнего РБО (22 пары чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$), полости микрорезонатора $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (толщиной $2\lambda/n$) и верхнего РБО (5 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$). Спектр оптического отражения гребешковой мезаструктуры (на гребне), сформированной за два эпитаксиальных процесса, выполненных методом МПЭ и методом промежуточного жидкостного травления, приведен на рис. 5. В результате корректировки толщины полости

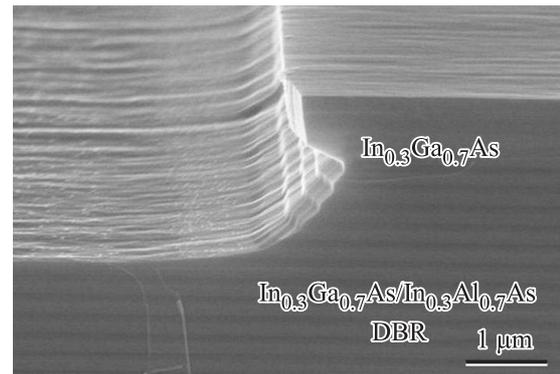


Рис. 2. СЭМ изображение гетероструктуры РБО (DBR), состоящей из 22 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ и покрывающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, после формирования гребешковой мезаструктуры методом жидкостного травления, снятое под углом 30° .

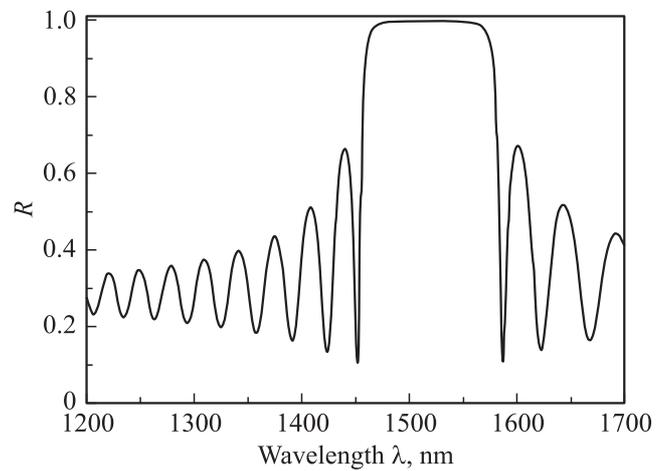


Рис. 3. Смоделированный спектр отражения РБО, содержащего 33 пары чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на поверхности GaAs.

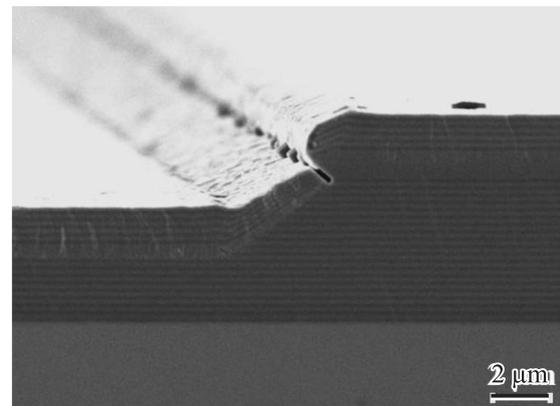


Рис. 4. СЭМ изображение гребешковой мезаструктуры гетероструктуры РБО после дорастивания (2-я эпитаксия) на ее поверхности слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и 5 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, снятое под углом 7° . Толщина дорощенного слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ соответствует величине отношения λ/n , а толщины слоев верхнего РБО $\lambda/4n$.

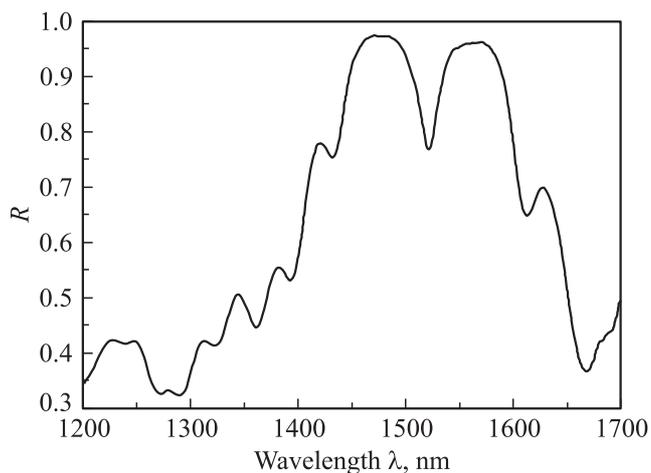


Рис. 5. Спектр оптического отражения гребешковой мезоструктуры (на плоской части гребня), сформированной за два эпитаксиальных процесса, выполненных методом МПЭ, и промежуточного жидкостного травления. На гребне мезоструктуры сформирован микрорезонатор, состоящий из нижнего РБО (22 пары чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$), полости микрорезонатора $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (толщиной $2\lambda/n$), верхнего РБО (5 пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$).

микрорезонатора во время второго эпитаксиального процесса сформирован микрорезонатор с резонансной длиной волны, совпадающей с центром полосы отражения нижнего и верхнего РБО.

4. Заключение

Продемонстрирована возможность создания метаморфных РБО, состоящих из пар чередующихся слоев $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на подложке GaAs с полосой отражения в диапазоне 1440–1600 нм и коэффициентом отражения не менее 0.999 методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Показана возможность эпитаксиального зарастивания мезоструктур, изготовленных из метаморфных РБО $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ на подложке GaAs; продемонстрирована возможность локального создания микрорезонаторов, сформированных за два эпитаксиальных процесса, с промежуточным формированием мезоструктур методами фотолитографии и жидкостного травления. Технология локального формирования микрорезонаторов за два эпитаксиальных процесса, несомненно, может найти применение при создании ВИЛ с захороненным туннельным переходом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-29-08273 офи_м, 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, а также с

использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержана Минобрнауки России (соглашение о предоставлении субсидии № 14.621.21.0007 id RFMEFI62114X0007).

Список литературы

- [1] A. Leuther, A. Tessmann, I. Kallfass, H. Massler, R. Loesch, M. Schlechtweg, M. Mikulla, O. Ambacher. *Indium Phosphide & Related Materials (IPRM)* (2010) p. 1; G. Ng, K. Radhakrishnan, H. Wang. *Eur. Conf.: Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium (EGAS 2005)* (2005).
- [2] F. Capotondi, G. Biasiol, I. Vobornik, L. Sorba, F. Giazotto, A. Cavallini, B. Fraboni. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22** (2), 702 (2004).
- [3] Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, Р.М. Имамов. *ФТП*, **47** (7), 990 (2013).
- [4] Л.Я. Карачинский, Т. Kettler, Н.Ю. Гордеев, И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, А.Р. Ковш, В.А. Щукин, С.С. Михрин, А. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, D. Bimberg. *ФТП*, **39** (12), 1464 (2005).
- [5] 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).
- [6] D.A. Louderback, M.A. Fish, J.F. Klem, D.K. Serkland, K.D. Choquette, G.W. Pickrell, R.V. Stone, P.S. Guilfoyle. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16** (4), 963 (2004).
- [7] A. Yue, K. Shen, R. Wang, J. Shi. *IEEE Photon. Lett.*, **16** (3), 717 (2004).
- [8] G. Steinle, H. Riechert, A.Y. Egorov. *Electron. Lett.*, **37** (2), 93 (2001); G. Steinle, F. Mederer, M. Kicherer, R. Michalzik, G. Kristen, A.Y. Egorov, H. Riechert, H.D. Wolf, K.J. Ebeling. *Electron. Lett.*, **37** (10), 632 (2001).
- [9] M. Hofmann, A. Wagner, C. Ellmers, C. Schlichenmeier, S. Schafer, F. Hohnsdorf, J. Koch, W. Stolz, S.W. Koch, W.W. Ruhle, J. Hader, J.V. Moloney, E.P. O'Reilly, B. Borchert, A.Yu. Egorov, H. Riechert. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (20), 3009 (2001); M.R. Hofmann, N. Gerhardt, A.M. Wagner, C. Ellmers, F. Hohnsdorf, J. Koch, W. Stolz, S.W. Koch, W.W. Ruhle, J. Hader, J.V. Moloney, E.P. O'Reilly, B. Borchert, A.Y. Egorov, H. Riechert, H.C. Schneider, W.W. Chow. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38** (2), 213 (2002).
- [10] F. Quochi, J.E. Cunningham, M. Dinu, J. Shah. *Electron. Lett.*, **36** (25), 2075 (2000).
- [11] E. Soderberg, J.S. Gustavsson, P. Modh, A. Larsson, Z. Zhang, J. Berggren, M. Hammar, J. Lightw. Technol., **25** (9), 2791 (2007).
- [12] А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, А.Ю. Егоров, В.А. Однблюдов, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алферов. *ФТП*, **37** (12), 1461 (2003).
- [13] N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, V.M. Ustinov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **39** (15), 1126 (2003).

- [14] L.Y. Karachinsky, T. Kettler, N.Y. Gordeev, I.I. Novikov, M.V. Maximov, Y.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, V.A. Shchukin, S.S. Mikhrin, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **41** (8), 478 (2005).
- [15] D. Ellafi, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Suruceanu, Z. Mickovic, A. Caliman, A. Mereuta, E. Kapon. *Opt. Express*, **22** (26), 32 180 (2014),
- [16] T. Czyszanowski, N. Volet, J. Walczak, M. Dems, R. Sarzala, V. Iakovlev, A. Sirbu, A. Mereuta, A. Caliman, E. Kapon. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50** (9), 732 (2014).
- [17] A. Syrbu, V. Iakovlev, A. Caliman, P. Royo, E. Kapon. *Optical Fiber Communication Conference* (California, USA, February, 2008), p. OThS2.
- [18] C. Gierl, T. Grundl, S. Paul, K. Zogal, M.T. Haidar, P. Meissner, M.-C. Amann, F. Kuppers. *Opt. Express*, **22** (11), 13 063 (2014).
- [19] S. Spiga, C. Xie, P. Dong, M.C. Amann, P. Winzer. *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (Graz, Austria, July, 2014), p. 1,
- [20] C. Grasse, M. Mueller, T. Gruendl, G. Boehm, E. Roenneberg, P. Wiecha, J. Roskopf, M. Ortsiefer, R. Meyer, M.C. Amann. *J. Cryst. Growth*, **370**, 217 (2013).
- [21] M. Ortsiefer, J. Roskopf, B. Kogel, A. Daly, M. Gorblich, Y. Xu, C. Greus, C. Neumeyer. *Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, (Palma de Mallorca, Spain, 2014) p. 74.
- [22] A.R. Clawson. *Mater. Sci. Eng. R-Rep.*, **31** (1), 1 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

1440–1600 nm spectral range metamorphic distributed bragg reflectors: epitaxy, formation and regrowth of mesa structures

A.Yu. Egorov^{+*‡}, L.Ya. Karachinsky^{+*‡},
I.I. Novikov^{+*‡}, A.V. Babichev^{+*‡•},
T.N. Berezovskaya[•], V.N. Nevedomskiy⁺

⁺ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

[‡] Connector Optics LLC,
194292 St. Petersburg, Russia

[•] Saint Petersburg National Research Academic
University of the Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The possibility of creation of metamorphic $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ distributed Bragg reflectors (DBRs) grown by molecular beam epitaxy (MBE) on GaAs substrate with stop band 1440–1600 nm and reflection coefficient not less than 0.999 has been shown. The possibility of MBE regrowth of mesa structures formed from metamorphic DBRs grown on GaAs substrate and local microcavity formation using two separate growth processes by MBE have been demonstrated. Obtained results will be used in development of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with buried tunnel junction.