

# Метаморфные лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs

© А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, Ю.Г. Мусихин, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров

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

(Получена 27 февраля 2003 г. Принята к печати 4 марта 2003 г.)

Реализован метод эпитаксиального формирования инжекционных лазеров на диапазон длин волн 1.3 мкм на подложках GaAs. Метод основан на использовании метаморфной гетероструктуры с содержанием индия около 20%, осаждаемой на переходном буферном слое, предназначенном для релаксации напряжения рассогласования. В качестве активной области лазера используются квантовые ямы с более высоким (около 40%) содержанием индия. В лазерах полосковой конструкции шириной 100 мкм продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре на длине волны 1.29 мкм с минимальной пороговой плотностью тока 3.3 кА/см<sup>2</sup> (0.4 кА/см<sup>2</sup> при 85 К).

## 1. Введение

В последние годы значительное внимание уделялось разработке гетероструктур на подложках GaAs, излучающих в спектральном диапазоне 1.3 мкм, с целью замены инжекционных лазеров на основе InP в волоконно-оптических линиях связи средней дальности. Переход к подложкам GaAs может позволить реализовать неохлаждаемые полосковые лазеры с распределенной обратной связью, а также вертикально излучающие лазеры со стандартными брэгговскими зеркалами на основе GaAs–AlAs для диапазона 1.3–1.6 мкм, используемого в волоконно-оптических линиях связи. Ранее были продемонстрированы лазеры полосковой конструкции этого спектрального диапазона, использующие в качестве активной области массивы самоорганизующихся квантовых точек In(Ga)As [1–3] или напряженные квантовые ямы InGaAsN [4,5]. В то же время возможность создания длинноволновых лазеров на квантовых ямах на основе метаморфных гетероструктур на подложках GaAs, насколько нам известно, не обсуждалась в литературе, хотя подобный подход широко применяется для формирования транзисторных структур [6–8].

В настоящей работе показано, что при использовании специальных режимов осаждения переходного буферного слоя релаксация напряжения происходит преимущественно путем образования дислокаций несоответствия, локализованных в области интерфейса. Это позволяет затем выращивать свободные от дислокаций слои InGa(Al)As с содержанием индия около 20%, формирующие лазерную структуру. Квантовые ямы In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As толщиной 8 нм, помещенные в подобную метаморфную структуру, обладают резкими интерфейсами и являются упругонапряженными. Вследствие более высокого содержания индия как в квантовой яме, так и в окружающей матрице, по сравнению с аналогичны-

ми структурами InGaAs/GaAs, длина волны излучения 1.3 мкм может быть достигнута в свободных от азота квантовых ямах, что позволяет, с одной стороны, избежать нетипично низких температур осаждения активной области, а с другой стороны, использовать высокие значения оптического усиления, характерные для квантовых ям.

## 2. Эксперимент

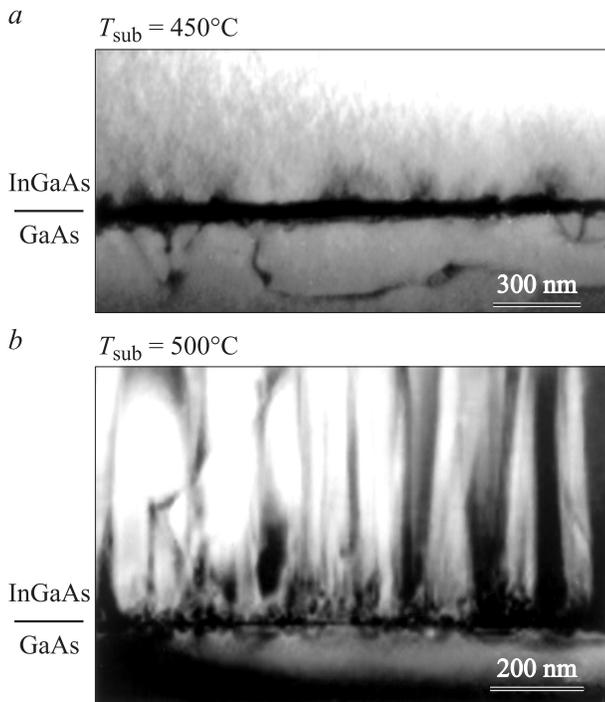
Исследуемая лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32P с твердотельным источником As на подложках n<sup>+</sup>-GaAs(100). Легированный кремнием переходной буферный слой InGaAs толщиной около 0.5 мкм с содержанием индия около 20% осаждался непосредственно на поверхность GaAs. Температура осаждения буферного слоя составила 400°C, последующие слои осаждались при температуре 500°C. Из выращенных структур были изготовлены лазеры в геометрии мелкой мезы с шириной полоска 100 мкм. На грани резонатора, полученные скальвованием, какие-либо покрытия не наносились. Контакты n- и p-типа формировались напылением и вплавлением (450°C) металлических слоев AuGe/Ni/Au и AuZn/Ni/Au соответственно. Характеристики лазеров исследовались в температурном диапазоне 85–290 К при возбуждении импульсами тока длительностью 0.2 мкс. Для регистрации сигнала использовался германиевый фотодиод.

Исследование структуры проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии поперечного сечения на электронном микроскопе Philips EM420 с ускоряющим напряжением 100 кВ. Образцы поперечного сечения были приготовлены по стандартной процедуре с финишной обработкой ионами Ag<sup>+</sup> на установке Gatan DouMill600.

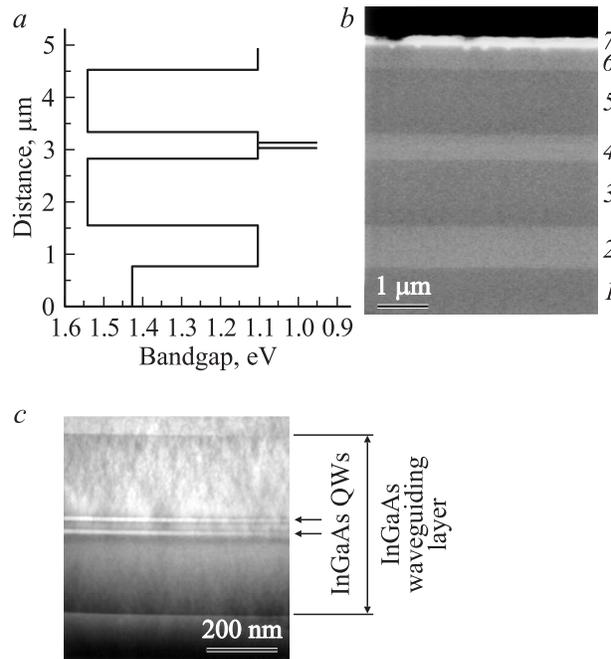
### 3. Результаты исследований и их обсуждения

В общем случае релаксация напряжения рассогласования при осаждении переходного буферного слоя InGaAs на поверхности GaAs сопровождается формированием как дислокаций несоответствия интерфейсного типа, распространяющихся вдоль гетерограницы (буферный слой)–подложка, так и прорастающих дислокаций, линии которых лежат в направлении эпитаксиального роста. Существенным для возможности использования концепции метаморфного роста в светоизлучающих приборах является минимизация плотности дислокаций, способных прорасти в верхние слои структуры, в которых происходит рекомбинация инжектированных носителей заряда.

На рис. 1 показано влияние температуры осаждения буферного слоя на характер релаксации напряжения. Показаны микрофотографии поперечного сечения тестовых образцов, полученных методом просвечивающей ПЭМ, вблизи интерфейса InGaAs/GaAs. При осаждении буферного слоя при температурах 450°C (рис. 1, *a*) и ниже наблюдается преимущественное образование дислокаций несоответствия, локализованных в области интерфейсов. Плотность прорастающих дислокаций в этом случае не превышает  $10^6 \text{ см}^{-2}$ . В то же время при более высоких температурах осаждения буферного слоя плотность прорастающих дислокаций резко возрастает,



**Рис. 1.** ПЭМ-микрофотографии поперечного сечения тестовых слоев  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , осажденных на GaAs при температурах 450 (*a*) и 500°C (*b*), полученные в режиме светлого поля с использованием рефлекса (220).



**Рис. 2.** Изменение ширины запрещенной зоны слоев лазерной структуры в направлении роста (*a*). Общее СЭМ-изображение скола лазерной структуры (*b*). Цифрами отмечены: 1 — подложка  $n^+$ -GaAs, 2 — буферный слой  $n^+$ -InGaAs, 3 — нижний эмиттер  $n$ -InAlGaAs, 4 — волноводный слой InGaAs, 5 — верхний эмиттер  $p$ -InAlGaAs, 6 — контактный слой InGaAs, 7 — омический контакт. ПЭМ-микрофотография активной области, полученная в режиме темного поля с использованием рефлекса (200) (*c*).

достигая  $10^9 \text{ см}^{-2}$  при 500°C (рис. 1, *b*). Таким образом, осаждение буферного слоя при достаточно низкой температуре позволяет подавить проращение дислокаций в последующие слои метаморфной лазерной структуры.

Зонная диаграмма лазерной структуры, исследованной в настоящей работе, схематически показана на рис. 2, *a*. В качестве лазерного волновода использовался нелегированный слой  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  толщиной около 0.4 мкм, ограниченный эмиттерными слоями  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  толщиной 1.2 мкм  $n$ - и  $p$ -типа, легированными Si или Be соответственно, с концентрацией  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В середине волноводного слоя помещены две квантовые ямы  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  толщиной 8 нм. Структура завершается контактным слоем  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  толщиной около 0.4 мкм, легированным Be с концентрацией  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, конструкция метаморфной лазерной структуры близка к типичному дизайну лазера на основе квантовых ям на подложках GaAs. Однако использование переходного буфера позволяет увеличить содержание индия во всех слоях лазерной структуры примерно на 20%.

При эпитаксиальном выращивании метаморфных структур часто наблюдается формирование микроскопической шероховатости ростовой поверхности и образование гофрированных структур [9]. Осаждение мета-

морфной структуры (за исключением буферного слоя) при температуре 500°C позволяет подавить это нежелательное явление. В результате достигается высокая планарность всех гетероинтерфейсов, как видно на микрофотографии скола лазерной структуры, полученной методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 2, b).

Скачок содержания индия на границе волновод-(квантовая яма) выбран таким образом, чтобы при комнатной температуре достигалась длина волны излучения около 1.3 мкм, а ширина квантовой ямы не превысила критическую толщину псевдоморфного слоя. На рис. 2, c показана ПЭМ-микрофотография активной области лазерной структуры (волновод и квантовые ямы). Как видно, слои  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  толщиной 8 нм, помещенные в матрицу  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , обладают резкими интерфейсами (отсутствует переход к режиму островкового роста), а формирование дислокаций не наблюдается. Таким образом, активная область исследуемого метаморфного лазера представляет собой упругонапряженные квантовые ямы. Следует отметить, что не обнаружено также дислокаций, прорастающих из буферного слоя.

Отметим также хорошие электрические характеристики слоев  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ , использованных в качестве эмиттеров лазерной структуры.  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  является прямозонным полупроводником в отличие, например, от  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x > 40\%$ ), что позволяет избежать заглупления донорного уровня и связанного с этим снижения концентрации свободных электронов. В частности, тестовые слои  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ , легированные кремнием на уровне  $2.5 \cdot 10^{18}$  ат/см<sup>3</sup>, обладали при комнатной температуре концентрацией свободных электронов  $(2.4-2.5) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Подвижность составила 600–700 см<sup>2</sup>/(В·с), что приблизительно на порядок превышает типичные значения в слоях  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  *n*-типа, используемых в качестве эмиттеров в лазерных структурах диапазона 1.3 мкм на основе квантовых точек на подложках GaAs. Напряжение отсечки вольт-амперной характеристики лазерных диодов составило 0.9 В, что хорошо согласуется с ожидаемой энергией оптического перехода основного состояния. Это свидетельствует об отсутствии дополнительных барьеров для инжекции носителей заряда внутри метаморфной структуры, например на гетерограницах буфер-(нижний эмиттер) или (верхний эмиттер)-(контактный слой).

На рис. 3 приведены записанные с поверхности спектры фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре от части лазерной структуры, подвергнутой травлению в растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ . Увеличение длительности травления позволяет последовательно наблюдать люминесценцию от контактного слоя  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}:\text{Be}$  (максимум линии при энергии 1.10 эВ), эмиттерного слоя  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}:\text{Be}$  (1.54 эВ), квантовых ям  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  и волновода  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  (0.96 и 1.12 эВ соответственно).

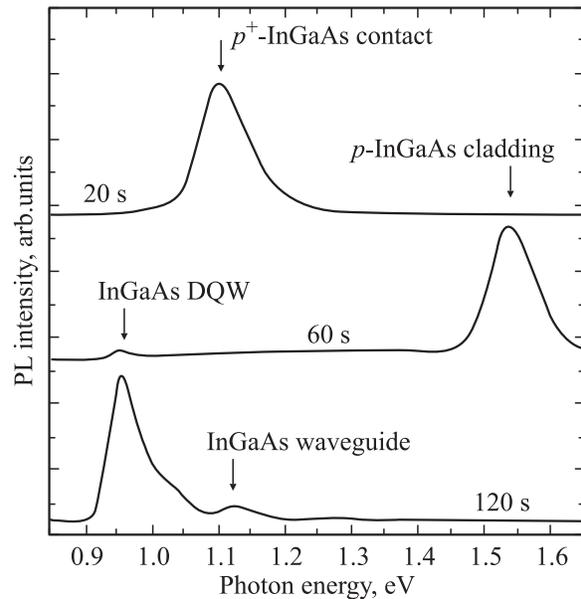


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции при комнатной температуре от части лазерной структуры, подвергнутой травлению в растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  в течение времени, указанного на рисунке.

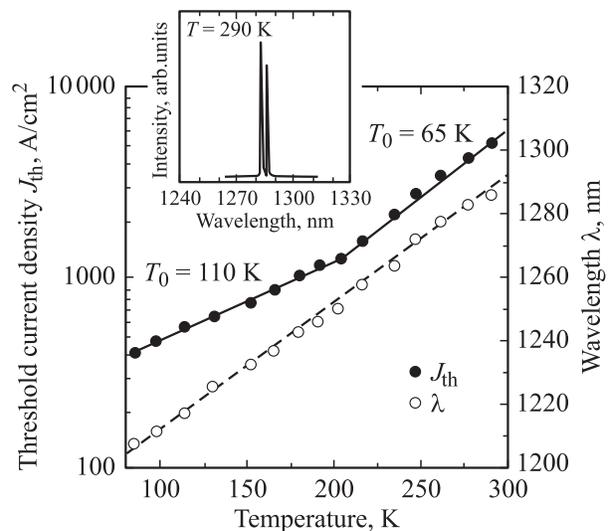


Рис. 4. Зависимости пороговой плотности тока  $J_{th}$  и длины волны генерации  $\lambda$  от температуры в лазере полосковой конструкции длиной 1 мм. На вставке — спектр лазерной генерации при 290 К.

В лазерах полосковой конструкции длиной 1.5 и 0.75 мм лазерная генерация при комнатной температуре достигается при пороговой плотности тока 3.3 и 6 кА/см<sup>2</sup> соответственно на длине волны 1294 и 1279 нм. Спектральное положение линии свидетельствует о том, что во всем исследованном диапазоне длин резонатора генерация происходит на оптическом переходе основного состояния квантовой ямы на гетерогранице  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .

На рис. 4 представлены температурные зависимости пороговой плотности тока и длины волны генерации, измеренные в лазере длиной 1 мм. Спектр лазерной генерации, записанный при 290 К, приведен на вставке к рисунку. Пороговая плотность тока составила  $5.2 \text{ кА/см}^2$ , а длина волны генерации — 1286 нм при 290 К, при 85 К — 420 нм и 1209 нм соответственно. Длинноволновый температурный сдвиг линии генерации составляет 0.4 нм/К, что близко к значению, обычно наблюдаемому в лазерах диапазона 1.3 мкм на основе квантовых точек (0.45 нм/К). Температурная зависимость пороговой плотности тока описывается характеристической температурой  $T_0 = 110 \text{ К}$  в диапазоне 85–200 К и  $T_0 = 65 \text{ К}$  в диапазоне 200–290 К. Для объяснения причин наблюдаемого вблизи 200 К излома температурной зависимости требуются дальнейшие исследования. Возможно, его появление обусловлено термическим заселением матрицы, что проявляется в спектрах ФЛ при комнатной температуре в виде дополнительного пика при энергии около 1.12 эВ (см. рис. 3).

Слои  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  и  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ , использованные в качестве волновода и эмиттеров в исследованной лазерной структуре, имеют при комнатной температуре ширину запрещенной зоны приблизительно 1.1 и 1.55 эВ соответственно. Их сочетание позволяет достигать разрыва ширины запрещенной зоны на границе волновод–эмиттер достаточно большого для предотвращения утечки инжектированных носителей в эмиттерные слои. Скачок показателя преломления в этой системе материалов близок к достигаемому в структурах  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Наши результаты исследований лазеров спектрального диапазона 0.94–0.98 мкм [10] показывают, что приемлемое оптическое ограничение достигается и при меньшем контрасте между волноводом и эмиттерами (например,  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ). Таким образом, в качестве волновода метаморфного лазера в будущем могут быть использованы более широкозонные слои четверного соединения, например,  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ . Это позволит повысить энергию локализации основного состояния в квантовых ямах по отношению к волноводу для улучшения температурной стабильности пороговой плотности тока. Снижение значения пороговой плотности тока при комнатной температуре ожидается также при дальнейшем улучшении структурного совершенства метаморфных гетероструктур.

#### 4. Заключение

Продемонстрировано, что использование концепции метаморфного роста позволяет в структурах на подложках GaAs, не использующих массивы самоорганизующихся квантовых точек или азотсодержащие квантовые ямы, реализовать при комнатной температуре лазерную генерацию в спектральном диапазоне 1.3 мкм. Предложенный подход потенциально применим для продвижения в большие длины волн. В частности, для

достижения длины волны 1.55 мкм необходимо увеличение содержания индия как в квантовых ямах, так и в матрице примерно на 15%. В этом случае, вероятно, требуется применение многоступенчатой конструкции переходного буферного слоя, аналогичной применяемой в метаморфных транзисторных структурах на GaAs.

Авторы благодарны В.М. Бусову за исследования структурных свойств методом сканирующей электронной микроскопии и М.М. Кулагиной за изготовление полосковых лазеров.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и NSC, Германия.

#### Список литературы

- [1] G. Park, O.B. Shchekin, D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13** (3), 230 (2000).
- [2] G.T. Liu, A. Stinz, H. Li, T.C. Newell, A.L. Gray, P.M. Varangis, K.J. Malloy, L.F. Lester. *IEEE J. Quant. Electron.*, **36** (11), 1272 (2000).
- [3] A.R. Kovsh, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **38** (19), 1104 (2002).
- [4] A.Yu. Egorov, D. Bernklay, B. Borchert, S. Illek, D. Livshits, A. Rucki, M. Schuster, A. Kaschner, A. Hoffmann, Ch. Dumitras, M.C. Amann, H. Riechert. *J. Cryst. Growth*, **227–228**, 545 (2001).
- [5] N. Tansu, N.J. Kirsh, L.J. Mawst. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (14), 2523 (2002).
- [6] M. Beher, K. van der Zanden, G. Gorghs, A. Behres. *Appl. Phys. Lett.*, **73** (19), 2760 (1998).
- [7] M. Zaknourne, Y. Cordier, S. Bollaert, D. Ferre, D. Theron, Y. Crosnier. *Sol. St. Electron.*, **44**, 1685 (2000).
- [8] Y. Zeng, X. Cao, L. Cui, M. Kong, L. Pan, B. Wang, Zh. Zhu. *J. Cryst. Growth*, **227–228**, 210 (2001).
- [9] Y. Cordier, D. Ferre. *J. Cryst. Growth*, **201–202**, 263 (1999).
- [10] S.S. Mikhrin, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, D.A. Livshits, N.A. Maleev, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, N.A. Pihtin, I.S. Tarasov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Proc. 26th Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, July 29–Aug. 2, (Edinburgh, UK, 2002) paper L2.3.

Редактор Т.А. Полянская

## Metamorphic lasers of the 1.3 $\mu\text{m}$ spectral range grown by molecular-beam epitaxy on GaAs substrates

A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, E.S. Semenova,  
N.A. Maleev, A.P. Vasil'ev, E.V. Nikitina,  
N.V. Kryzhanovskaya, A.G. Gladyshev,  
Yu.M. Shernyakov, Yu.G. Musikhin, M.V. Maximov,  
N.N. Ledentsov, M.V. Ustinov, Zh.I. Alferov

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** We report on a method of epitaxial formation of 1.3  $\mu\text{m}$  injection lasers on GaAs substrates. The method exploits a metamorphic heterostructure with indium content of about 20% deposited on transient buffer layer intended for strain relaxation. The active region is based on quantum wells with a higher (about 40%) indium content. Diode lasers with 100  $\mu\text{m}$ -wide stripes demonstrate room-temperature lasing at 1.29  $\mu\text{m}$  with the minimum threshold current density of 3.3  $\text{kA}/\text{cm}^2$  (0.4  $\text{kA}/\text{cm}^2$  at 85 K).