

# Мощные лазеры ( $\lambda = 940\text{--}980\text{ нм}$ ) на основе асимметричной GaInAs / GaInAsP / AlGaAs-гетероструктуры раздельного ограничения

© Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов<sup>¶</sup>

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

(Получена 7 ноября 2005 г. Принята к печати 21 ноября 2005 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены асимметричные GaInAs/GaInAsP/AlGaAs-гетероструктуры, излучающие на длинах волн 940 и 980 нм. Состав твердого раствора волноводного слоя  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$  был выбран на основе расчета энергии выброса электронов из квантовой ямы активной области в волновод. Полученные гетероструктуры использовались для изготовления полупроводниковых лазеров с апертурой излучения 100 мкм. В непрерывном режиме генерации лазеров при комнатной температуре была достигнута максимальная выходная оптическая мощность 12 Вт. Внутренние оптические потери составляли 0.6 и  $0.3\text{ см}^{-1}$  соответственно на длинах волн 940 и 980 нм.

PACS: 42.55.Px; 85.60.Jb; 78.67.-n

## 1. Введение

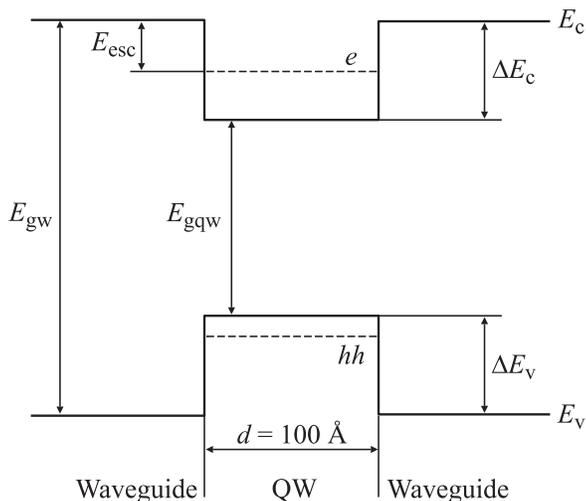
Статья продолжает цикл работ, посвященных созданию и исследованию мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных раздельного ограничения (АРО) квантово-размерных гетероструктур [1–5]. В предыдущих статьях использовалась система твердых растворов GaInAs/GaAs/AlGaAs, идеально подходящая для создания мощных полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 1030–1090 нм. Применение арсенида галлия в качестве волноводного слоя позволяет расширять волновод до нескольких микрон без технологических затруднений и получать в полупроводниковых лазерах рекордные на сегодняшний день выходные характеристики [1].

В настоящей статье исследуются полупроводниковые лазеры, излучающие на длинах волн 940 и 980 нм, которые широко применяются для накачки легированных эрбием оптоволоконных усилителей и твердотельных лазеров на основе иттрий-алюминиевых гранатов, легированных иттербием [6,7]. Для создания мощных лазеров, излучающих на длинах волн 940 и 980 нм, применение системы твердых растворов GaInAs/GaAs/AlGaAs (с волноводом из GaAs) не дает положительных результатов. Поэтому в данной работе представлены расчеты АРО гетероструктур в системе твердых растворов GaInAs/GaInAsP/AlGaAs (с волноводом из GaInAsP), излучающих на указанных длинах волн. Далее исследованы электрические и оптические характеристики гетероструктур в системе твердых растворов GaInAs/GaInAsP/AlGaAs, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии.

## 2. Моделирование лазерной гетероструктуры

В полупроводниковых лазерах с волноводом из арсенида галлия длина волны излучения 930–980 нм может быть получена за счет изменения состава и толщины напряженной активной области GaInAs. Однако при этом происходит резкое возрастание пороговой плотности тока и падение дифференциальной квантовой эффективности. По нашему мнению, это связано с усилением интенсивности процессов термического выброса носителей заряда из активной области в волновод вследствие уменьшения глубины квантовой ямы (КЯ) в активной области относительно волновода GaAs. Этот эффект был отмечен еще в работах, посвященных лазерам на основе двойных (не квантово-размерных) гетероструктур [8]. Для создания АРО гетероструктур, не содержащих алюминия в активной области и в волноводе („безалюминиевых“ гетероструктур), излучающих на длинах волн 940–980 нм, необходимо использовать в качестве волновода систему твердых растворов GaInAsP с большей шириной запрещенной зоны, чем у GaAs. Для определения допустимых составов четверного твердого раствора GaInAsP была промоделирована лазерная структура, излучающая на длине волны 1080 нм, которая имела рекордные оптические характеристики [1]. На рис. 1 приведена схематическая зонная диаграмма волновода, GaInAs КЯ активной области толщиной 100 Å и приведены обозначения, используемые нами при расчетах величины энергии выброса и длины волны излучения. В расчетах нами рассматривается только энергия выброса электронов, поскольку в исследуемых структурах активная область из твердого раствора GaInAs является сжато-напряженной, и тяжелые

<sup>¶</sup> E-mail: Tarasov@hpld.ioffe.ru

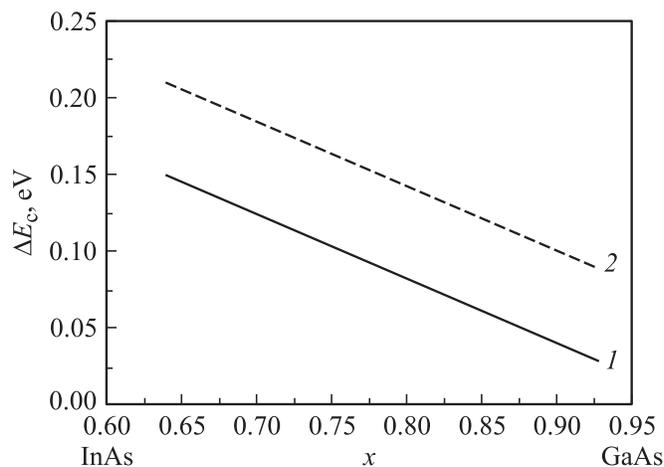


**Рис. 1.** Схематическая зонная диаграмма волновода и активной области лазерной гетероструктуры.  $E_{gw}$ ,  $E_{gqw}$  — ширина запрещенной зоны соответственно твердого раствора волновода и активной области (с учетом напряжений);  $E_v$ ,  $E_c$  — положение потолка валентной зоны (ВЗ) и дна зоны проводимости (ЗП) соответственно;  $\Delta E_v$ ,  $\Delta E_c$  — разрывы зон в ВЗ и ЗП между твердыми растворами, образующими волновод и активную область;  $hh$ ,  $e$  — положение первого уровня размерного квантования для тяжелых дырок и электронов соответственно;  $E_{esc}$  — энергия выброса электронов из квантовой ямы активной области в волновод.

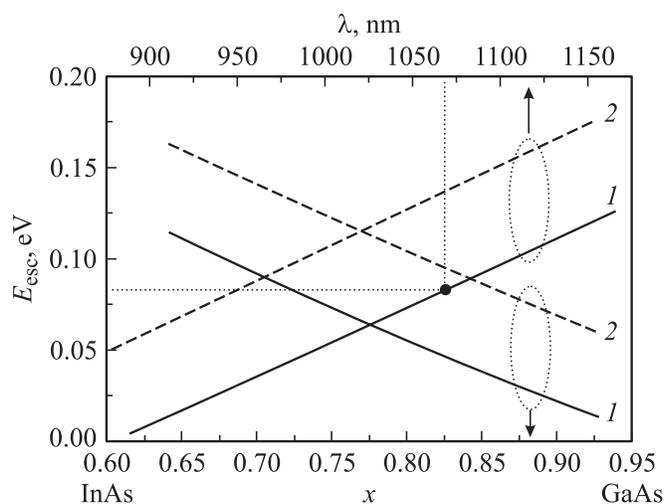
дырки имеют большую по сравнению с электронами эффективную массу и глубину залегания относительно волновода из GaAs, что позволяет исключить выброс дырок в GaAs-волновод. На рис. 2 (кривая 1) приведена зависимость изменения величины разрыва зон в зоне проводимости ( $\Delta E_c$ ) относительно GaAs-волновода от состава активной области  $Ga_xIn_{1-x}As$ . При этом для определения величины разрыва зон в ненапряженных материалах использовались данные из работы [9]. Вклад напряжений, возникающих в активной области, был рассчитан по методике, приведенной в работе [10].

На рис. 3 (кривые 1) приведены зависимости энергии выброса электронов  $E_{esc}$  из активной области в GaAs-волновод от состава активной области  $Ga_xIn_{1-x}As$  и длины волны излучения. Энергия выброса была вычислена с учетом эффектов размерного квантования для КЯ толщиной 100 Å по модели эффективных масс [11]. Из данного графика следует, что для длины волны излучения активной области 1060 нм  $E_{esc} \approx 80\text{ мэВ}$  ( $\sim 3kT$ ). Эта энергия выброса была использована нами в качестве критерия для подбора состава ( $x$ ,  $y$ ) волноводного слоя  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ . Оптимальными с точки зрения увеличения  $E_{esc}$  были бы составы с малыми значениями величин  $x$  и  $y$ . Однако использование твердых растворов таких составов сопряжено с технологическими трудностями получения качественных гетерограниц между

активной областью и волноводом. Отсутствие качественных гетерограниц приводит к уширению спектра излучения и ухудшению выходных оптических характеристик лазерной гетероструктуры. Проведенные расчеты позволили выбрать максимальный состав (по  $x$  и  $y$ ) четверного твердого раствора, отвечающий заданному критерию ( $E_{esc} \approx 80\text{ мэВ}$ ) для длины волны излучения 940 нм —  $Ga_{0.74}In_{0.26}As_{0.47}P_{0.53}$ . На рис. 2 и 3 для выбранного  $Ga_{0.74}In_{0.26}As_{0.47}P_{0.53}$ -волновода представлены зависимости разрыва зоны проводимости ( $\Delta E_c$ ) от состава активной области (рис. 2, кривая 2) и зависимость энергии выброса электронов ( $E_{esc}$ ) от состава активной области и длины волны излучения (рис. 3, кривые 2).



**Рис. 2.** Расчетные зависимости изменения разрыва зон в зоне проводимости ( $\Delta E_c$ ) от состава активной области  $Ga_xIn_{1-x}As$  относительно волновода из: 1 — GaAs, 2 —  $Ga_{0.74}In_{0.26}As_{0.47}P_{0.53}$ .



**Рис. 3.** Расчетные зависимости изменения энергии выброса электрона из активной области ( $E_{esc}$ ) относительно волновода (1 — GaAs, 2 —  $Ga_{0.74}In_{0.26}As_{0.47}P_{0.53}$ ) от состава активной области  $Ga_xIn_{1-x}As$  и длины волны излучения активной области.

### 3. Экспериментальная установка и образцы

Экспериментальные образцы лазерных АРО гетероструктур со сверхтолстым волноводом, излучающие на длинах волн 940 и 980 нм, были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии на установке пониженного давления Emcoге GS3100 с вертикальным типом реактора. Гетероструктуры GaInAs/GaInAsP/AlGaAs выращивались при температуре 700°C и давлении в реакторе 77 Торр. Триметилалюминий, триметилгаллий, триметилиндий, арсин и фосфин использовались в качестве источников элементов третьей и пятой группы. Силан (0.05% в водороде) и бисциклопентаденилмагний использовались в качестве лигатуры *n*- и *p*-типа соответственно. В качестве газа-носителя использовался водород с точкой росы не хуже –100°C. Рост осуществлялся на подложках *n*-GaAs (100).

Эмиттерные слои лазерной гетероструктуры состояли из твердого раствора  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  *n*- и *p*-типа ( $N = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $P = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Волноводные слои общей толщиной 1.7 мкм преднамеренно не легировались и имели состав твердого раствора  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$  с концентрацией фоновой примеси  $n \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В асимметричных структурах активная область была смещена от центра волновода к эмиттеру *p*-типа на 0.2 мкм. Применялись два состава твердого раствора активной области:  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{As}$ , обеспечивающий генерацию на длине волны 940 нм, и  $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{As}$  для генерации на длине волны 980 нм. Во всех структурах толщина активной области составляла  $\sim 100$  А.

С применением известных постростовых технологий [12,13] из выращенных структур были изготовлены полупроводниковые лазеры с апертурой излучения 100 мкм. Из каждой структуры изготавливались партии лазеров с различной длиной резонатора от 0.5 до 4.0 мм и исследовались их электрические и оптические характеристики.

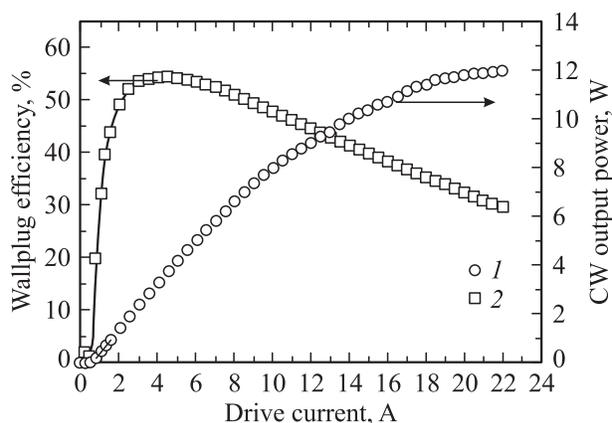
### 4. Экспериментальные исследования

Мощностные характеристики полупроводниковых лазеров, смонтированных на медный теплоотвод, исследовались для образцов с различной длиной резонатора. На основании проведенных измерений были определены пороговые плотности тока, дифференциальные квантовые эффективности, кпд исследуемых образцов. Пороговые плотности тока в асимметричных лазерных структурах с составом твердого раствора  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$  волноводного слоя составляли величину порядка 100 А/см<sup>2</sup>. Эта величина в лазерах аналогичной конструкции с волноводом из арсенида галлия [1] составляла 80 А/см<sup>2</sup>, что позволяет утверждать об отсутствии дополнительных токовых утечек в АРО гетероструктурах с волноводным слоем из твердого раствора  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$  толщиной 1.7 мкм. Необходимо отметить, что дополнительные токи утечки не

возникали в структурах, излучающих как на длине волны 980 нм, так и на длине волны 940 нм. Это обеспечивалось разработкой технологии МОС-гидридной эпитаксии толстых (более одного микрона) бездислокационных слоев четверных твердых растворов GaInAsP. Одновременно с этим для обеспечения близкого к 100% внутреннего квантового выхода обрабатывались технологические режимы переключения газовых потоков при росте тонких эпитаксиальных слоев активной области, состоящей из твердого раствора GaInAs.

Зависимость дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора Фабри–Перо позволяет оценить величину внутреннего квантового выхода стимулированного излучения. Для структур, излучающих на длинах волн 940 и 980 нм, величина стимулированного квантового выхода превышала 90%, что исключает наличие дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации за порогом генерации в АРО гетероструктурах с расширенным до 1.7 мкм InGaAsP-волноводом. Из этих же зависимостей были определены величины внутренних оптических потерь вблизи порога генерации, которые составляли 0.3 и 0.6 см<sup>-1</sup> соответственно для длин волн излучения 980 и 940 нм. Таким образом, переход от волновода из GaAs к волноводу из четверного твердого раствора InGaAsP в АРО гетероструктурах не ухудшает основные лазерные характеристики, такие как пороговая плотность тока, дифференциальный квантовый выход стимулированного излучения и внутренние оптические потери.

На рис. 4 приведена ватт-амперная характеристика, типичная для лазеров, излучающих на длинах волн 940 и 980 нм. В непрерывном режиме генерации максимальная мощность составляла 12 Вт. Такие высокие значения оптической мощности излучения подтверждают состоятельность концепции создания мощных полупроводниковых лазеров, базирующейся на снижении внутренних



**Рис. 4.** Типичная ватт-амперная характеристика (1) и зависимость кпд (2) от тока накачки для лазерного диода с длиной резонатора 3 мм и шириной полоска 100 мкм с высокоотражающим (95%) и просветляющим (5%) покрытием на гранях резонатора в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре (20°C) ( $\lambda = 940$  и 980 нм.)

оптических потерь, увеличении длины полупроводникового лазера и предельного тока накачки [1–3].

Применение в качестве эмиттеров твердого раствора  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  не повлияло на величину расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной эпитаксиальным слоям. Расходимость составляла 25–27 градусов в лазерах, излучающих на обеих длинах волн (940 и 980 нм) во всем диапазоне токов накачки. Необходимо отметить, что толщина волноводного слоя при этом составляла 1.7 мкм аналогично лазерам с волноводом из GaAs.

Спектры излучения исследуемых полупроводниковых лазеров имеют характерный для мощных лазеров вид [1]. При увеличении тока накачки до 15–20 А происходит расширение спектра генерации до 10–15 нм. В спектрах наблюдается характерное смещение полосы излучения на 10–15 нм в длинноволновую область [1], что позволяет определить температуру разогрева активной области полупроводникового лазера. В лазерах с длиной резонатора 2–3 мм перегрев активной области составил приблизительно 30–40 °С.

## 5. Заключение

В работе приведены результаты численного моделирования лазерных гетероструктур GaInAs/GaInAsP/AlGaAs, излучающих в диапазоне длин волн 930–1080 нм и не содержащих алюминия в активной области и в волноводе. Определен критерий выбора состава твердого раствора волновода, обеспечивающий хорошие выходные оптические характеристики лазера. Состав твердого раствора волновода определяется энергией выброса электронов из активной области в волновод ( $E_{\text{esc}}$ ), которая должна составлять величину не менее 3 кТ. На основании данного критерия был выбран состав четверного твердого раствора в волноводе  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$ .

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены асимметричные раздельного ограничения квантово-размерные лазерные гетероструктуры в системе твердых растворов GaInAs/GaInAsP/AlGaAs с толщиной волновода 1.7 мкм, излучающие на длинах волн 940 и 980 нм.

В лазерах на основе асимметричных гетероструктур GaInAs/GaInAsP/AlGaAs была получена максимальная выходная мощность 12 Вт в непрерывном режиме генерации при внутренних оптических потерях 0.6 и 0.3  $\text{см}^{-1}$  для длин волн 940 и 980 нм соответственно.

Работа частично поддержана грантом Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности.

## Список литературы

- [1] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипенченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **39**, 388 (2005).

- [2] Н.А. Пихтин, С.О. Слипенченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **38**, 374 (2004).
- [3] С.О. Слипенченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38**, 1477 (2004).
- [4] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипенченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. ФТП, **36**, 1393 (2002).
- [5] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **40**, 1413 (2004).
- [6] G. Beister, G. Erbert, A. Knauer, J. Maege, P. Ressel, J. Sebastian, R. Staske, H. Wenzel. Electron. Lett., **35**, 1641 (1999).
- [7] M. Ohkubo, S. Namiki, T. Ijichi, A. Iketani, T. Kikuta. IEEE J. Quant. Electron., **QE-29**, 1932 (1993).
- [8] Д.З. Гарбузов, А.В. Овчинников, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов, З.Н. Соколова, В.Б. Халфин. ФТП, **25**, 928 (1991).
- [9] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89**, 5815 (2001).
- [10] M.P.C.M. Krijn. Semicond. Sci. Technol., **6**, 27 (1991).
- [11] S. Adachi. *Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds* (John Wiley & Sons Inc., 1992).
- [12] Е.Г. Голикова, В.А. Горбылев, Ю.В. Ильин, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, В.А. Симаков, И.С. Тарасов, Е.А. Третьякова, Н.В. Фетисова. Письма ЖТФ. **26** (7), 57 (2000).
- [13] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипенченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. ФТП, **36**, 1393 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

## High power laser diodes ( $\lambda = 940\text{--}980\text{ nm}$ ) based on asymmetric separate confinement GaInAs/GaInAsP/AlGaAs heterostructure

D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov,  
V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskiy,  
D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, N.A. Rudova,  
Z.N. Sokolova, S.O. Slipchenko, M.A. Khomylev,  
I.S. Tarasov

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

**Abstract** Asymmetric GaInAs/GaInAsP/AlGaAs laser heterostructures (940 and 980 nm emitting wavelengths) have been grown by metal organic chemical vapour deposition epitaxy.  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$  solid solution composition of the waveguide was selected as a result of a calculation of the escape energy of electrons from the quantum well of an active region to the waveguide. 100  $\mu\text{m}$  aperture semiconductor lasers were fabricated from the obtained heterostructures. 12 W continuous-wave room temperature maximum output optical power was attained. Internal optical loss are 0.6  $\text{cm}^{-1}$  and 0.3  $\text{cm}^{-1}$  for 940 nm and 980 nm wavelengths, respectively.