

Мощные полупроводниковые лазеры на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения

© 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. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов

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

(Получена 14 июля 2004 г. Принята к печати 9 августа 2004 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены асимметричные лазерные гетероструктуры раздельного ограничения со сверхшироким волноводом в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs (длина волны излучения ~ 1080 нм). Исследованы оптические и электрические свойства лазеров с полосковым контактом шириной ~ 100 мкм. Показано, что в лазерах на основе асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом (более 1 мкм) удастся достичь генерации на основной поперечной моде и снизить внутренние оптические потери до 0.34 см^{-1} . В лазерных диодах с длиной резонатора более 3 мм достигнуто снижение теплового сопротивления до $2^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и получена характеристическая температура $T_0 = 110^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 100°C . В изготовленных лазерах достигнуты рекордные значения коэффициента полезного действия 74% и мощности оптического излучения 16 Вт в непрерывном режиме генерации. Нарботка лазеров на отказ при 65°C , рабочей мощности 3–4 Вт в течение 1000 ч привела к падению мощности на 3–7%.

1. Введение

В последнее время достигнуты рекордные результаты по увеличению оптической мощности излучения полупроводниковых лазеров [1–7]. В их основе лежит концепция, базирующаяся на снижении внутренних оптических потерь в лазерных гетероструктурах раздельного ограничения. Вопросы снижения внутренних оптических потерь в квантово-размерных гетероструктурах раздельного ограничения подробно рассмотрены в нашей работе [8]. Основным приемом для снижения внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах раздельного ограничения является увеличение ширины волновода лазерной гетероструктуры [1,3,4,9]. Естественным ограничением увеличения толщины волновода в симметричной лазерной гетероструктуре раздельного ограничения является условие возникновения мод высших порядков [4]. Есть несколько подходов подавления мод высших порядков в широком волноводе [4,10,11]. Однако все они, хотя и позволяют провести селекцию мод высшего порядка и сузить диаграмму направленности, приводят к увеличению оптических потерь, что снижает оптическую мощность излучения полупроводникового лазера.

Для подавления мод высших порядков нами была предложена асимметричная гетероструктура, в которой активная область смещена из центра волновода [7,12]. В асимметричной гетероструктуре со сверхшироким волноводом удастся подавить генерацию мод высших порядков за счет различия их факторов оптического ограничения и одновременно снизить внутренние оптические потери и расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной эпитаксиальным слоям [7]. В работе [12] нами впервые была применена асимметричная

гетероструктура со сверхшироким волноводом с целью одновременного снижения внутренних оптических потерь и расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости p – n -перехода. Увеличение ширины волновода до 4 мкм позволило снизить внутренние оптические потери до 0.7 см^{-1} и расходимость излучения до 16 – 18° без существенного снижения максимальной мощности излучения, которая составила 8.6 Вт [12].

В настоящей работе исследованы свойства полупроводниковых лазеров на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения со сверхшироким волноводом в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs. Проведено сравнение свойств полупроводниковых лазеров на основе асимметричных и аналогичных симметричных структур с широким волноводом.

2. Экспериментальные лазерные гетероструктуры и полупроводниковые лазеры

Экспериментальные лазерные гетероструктуры на базе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs изготавливались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) на установке Emcore GS-3100. Лазерные структуры представляли собой квантово-размерные гетероструктуры раздельного ограничения с асимметричным положением активной области в сверхшироком волноводе. Структуры, схематическая зонная диаграмма которых представлена на рис. 1, состояли из двух широкозонных эмиттеров $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, волноводного слоя, выполненного из GaAs, и напряженной квантовой ямы из InGaAs толщиной $\sim 90 \text{ \AA}$.

[¶] E-mail: nike@hpld.ioffe.ru

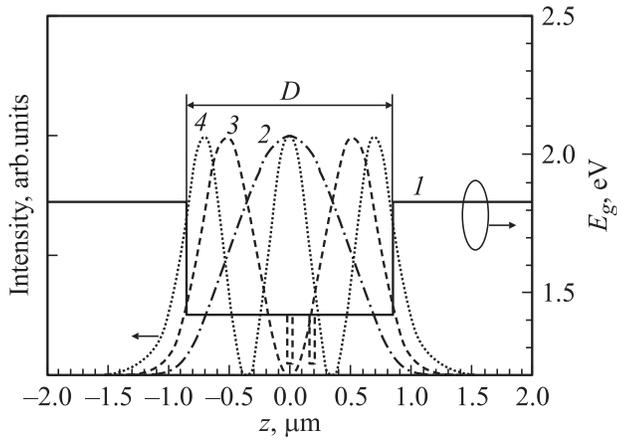


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма симметричной и асимметричной лазерных гетероструктур раздельного ограничения с шириной волновода $D = 1.7 \mu\text{м}$ (1) и распределение интенсивности электромагнитного поля для нулевой (2), первой (3) и второй моды (4). Направление z перпендикулярно слоям структуры.

Смещение активной области относительно симметричного положения проводилось на основе выбора минимального значения фактора оптического ограничения в активной области для мод высших порядков и максимального для фундаментальной моды (рис. 1). В этом случае генерация фундаментальной моды будет предпочтительнее, чем мод высших порядков, согласно выражению, характеризующему пороговые условия в полупроводниковом лазере:

$$\Gamma_{\text{QW}} \cdot g(n_{\text{QW}}, p_{\text{QW}}) = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{ext}}, \quad (1)$$

где $g(n_{\text{QW}}, p_{\text{QW}})$ — материальное усиление активной среды, $n_{\text{QW}}, p_{\text{QW}}$ — концентрации свободных носителей заряда (электронов, дырок) в активной области, α_{int} — внутренние и α_{ext} — внешние оптические потери, Γ_{QW} — фактор оптического ограничения активной области. Как показывают наши расчеты [7], в асимметричной структуре удастся достичь превышения пороговой концентрации на 10–20% для мод высших порядков над пороговым значением для фундаментальной моды в лазерных гетероструктурах с толщиной волновода $D = 1.7 \mu\text{м}$.

Из полученных лазерных гетероструктур изготавливались многомодовые лазеры с шириной контакта 100 мкм и различной длиной резонатора. Лазерные диоды монтировались на медные теплоотводы полоском вниз. Исследования свойств полупроводниковых лазеров проводились при постоянной температуре теплоотвода 20°C.

Лучшие результаты, достигнутые нами в аналогичных симметричных лазерных гетероструктурах раздельного ограничения, представлены в работах [1,3]. С этими результатами мы проведем сравнение свойств полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур.

3. Исследования свойств полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур

Исследования проводились на серии лазеров с различной длиной резонатора от 1 до 5 мм. Выходное зеркало резонатора Фабри–Перо просветлялось до величины коэффициента отражения 5–6%; на противоположную грань наносилось диэлектрическое многослойное зеркало SiO_2/Si с коэффициентом отражения более 95%. На рис. 2 приведены зависимости пороговой плотности тока J_{th} от обратной длины резонатора $1/L$ для симметричной [1,3] и асимметричной (EM-474) структур. Внесение асимметрии в конструкцию лазерной гетероструктуры не привело к росту пороговой плотности тока для резонаторов длиной $\gtrsim 2 \text{мм}$, хотя фактор оптического ограничения активной области в асимметричной структуре был несколько меньше, чем в симметричной

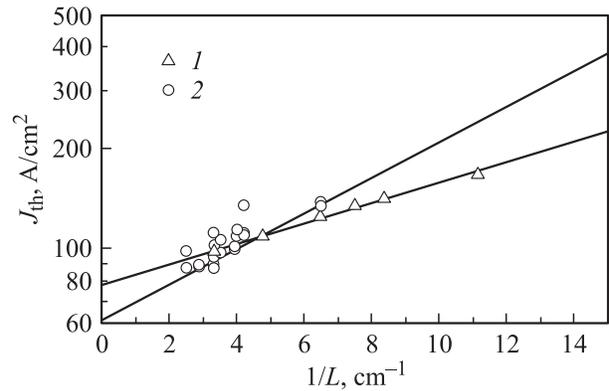


Рис. 2. Зависимости пороговой плотности тока (J_{th}) от обратной длины резонатора ($1/L$) в лазерах на основе симметричной гетероструктуры с $D = 0.4 \mu\text{м}$ (1) и асимметричной гетероструктуры с $D = 1.7 \mu\text{м}$ (2).

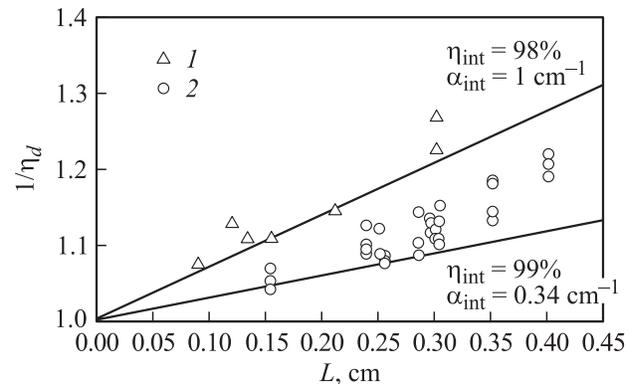


Рис. 3. Экспериментальная зависимость обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности ($1/\eta_d$) от длины резонатора (L) в лазерах на основе симметричной гетероструктуры с $D = 0.4 \mu\text{м}$ (1) и асимметричной гетероструктуры с $D = 1.7 \mu\text{м}$ (2).

структуре. В лазерах с длиной резонатора более 2 мм наблюдалось уменьшение пороговой плотности тока, что согласуется с фактом снижения пороговой концентрации и, следовательно, с уменьшением внутренних оптических потерь при увеличении длины резонатора [13]. На рис. 3 приведены зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности $1/\eta_d$ от длины резонатора лазера. Из анализа этих зависимостей определяются величина внутренних оптических потерь (α_{int}), характерная для рассматриваемых гетеролазеров, и величина стимулированного квантового выхода (η_{int}). В лазерных гетероструктурах есть два неблагоприятных фактора, которые могут влиять на величину стимулированного квантового выхода и внутренних оптических потерь: малая глубина квантовой ямы для электронов, приводящая к выбросу электронов [14,15], и большая ширина волноводных слоев, способствующая утечке электронов в p -эмиттер [16]. В симметричной структуре [1,3] с шириной волновода 0.4 мкм величина стимулированного квантового выхода достигала 98%, что указывает на отсутствие токовых утечек за порог генерации. В асимметричной структуре величина стимулированного квантового выхода достигает 99%, что, по нашему мнению, свидетельствует о высокой степени локализации дырок в активной области, не позволяющей выброшенным электронам диффундировать к p -эмиттеру. В то же время увеличение ширины волновода до 1.7 мкм обеспечило снижение внутренних оптических потерь в асимметричной структуре в 3 раза по сравнению с симметричной структурой (рис. 3).

Низкие внутренние оптические потери ($\alpha_{int} = 0.34 \text{ см}^{-1}$) позволили увеличить длину полупроводниковых лазеров до 3–5 мм без снижения дифференциальной квантовой эффективности (рис. 3). Возможность увеличения длины резонатора благоприятно сказывается на целом ряде параметров полупроводниковых лазеров. В первую очередь, снижается последовательное сопротивление. В нашем случае при длине резонатора Фабри–Перо 3–5 мм и ширине полоскового контакта 100 мкм последовательное сопротивление достигало 20–40 мОм.

Тепловое сопротивление полупроводниковых лазеров имело резкую зависимость от длины резонатора и при длине 5 мм составляло величину 2–2.5°С/Вт. Величина теплового сопротивления в лазерах определялась следующим образом. Для лазеров с разной длиной резонатора Фабри–Перо исследовались спектры излучения. Во всех лазерах с увеличением тока накачки наблюдалось смещение в длинноволновую область спектра (рис. 4), обусловленное разогревом активной области. С использованием значения коэффициента температурной зависимости ширины запрещенной зоны $\sim 4 \text{ Å/град}$ были определены величины теплового сопротивления для лазеров с различной длиной резонатора.

Благодаря низкому тепловому сопротивлению при рабочем токе накачки перегрев активной области относительно теплоотвода составлял всего 7–10°С, что

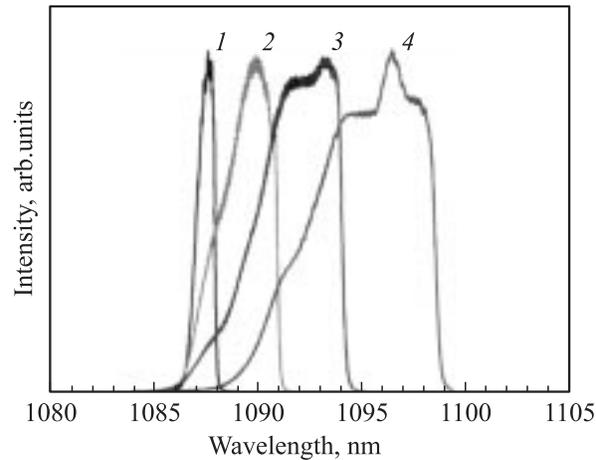


Рис. 4. Сдвиг спектра излучения лазера с асимметричной гетероструктурой и шириной волновода 1.7 мкм при различных значениях тока накачки, А: 1 — 0.45, 2 — 3, 3 — 6, 4 — 9.

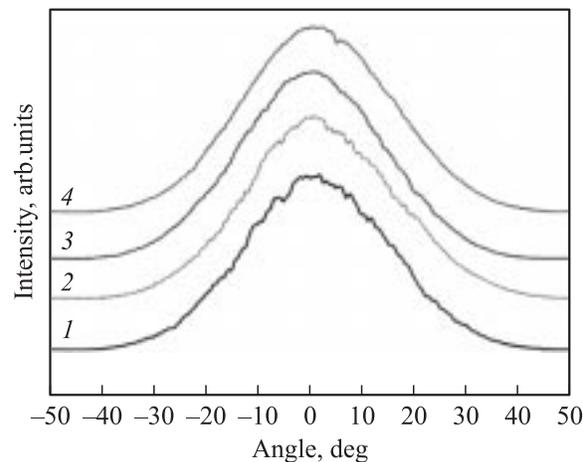


Рис. 5. Интенсивность излучения в дальней зоне в плоскости, перпендикулярной плоскости p - n -перехода, от угла при различных значениях тока накачки, А: 1 — 0.5, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 15. Значения ширины поля на половине интенсивности, град: 1 — 30, 2 — 33, 3 — 31, 4 — 33.

благоприятным образом сказывается на сроке службы полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур.

На рис. 5 показаны зависимости интенсивности излучения от угла в плоскости, перпендикулярной эпитаксиальным слоям, при различных токах накачки. При всех токах накачки форма, полуширина и положение максимума диаграммы направленности оставались постоянными, что свидетельствует о генерации на основной поперечной моде во всем диапазоне токов накачки.

Внесение асимметрии в лазерную гетероструктуру позволило увеличить ширину волновода до 1.7 мкм при сохранении генерации на фундаментальной поперечной моде. Зависимость интенсивности излучения от угла в плоскости, параллельной эпитаксиальным слоям, имела

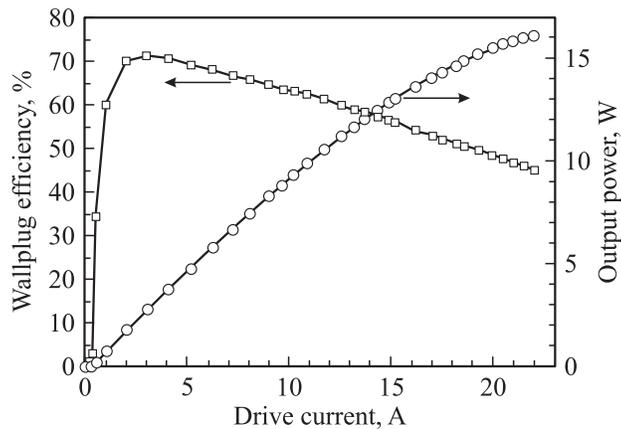


Рис. 6. Ватт-амперная характеристика и зависимость КПД от тока накачки для лазерного диода с длиной резонатора $L = 3040$ мкм и шириной полоска 100 мкм с высокоотражающим (отражение 95%) и просветляющим (отражение 5%) покрытием на гранях резонатора в непрерывном режиме генерации при температуре 20°C .

изрезанный характер, свидетельствующий о наличии неоднородной пятнистой генерации в полоске шириной 100 мкм, к сожалению, характерной для гетероструктур с толщиной активной области менее 100 Å. Однако на рабочих токах полуширина диаграммы направленности не превышала 12° , что является хорошим параметром для применения лазеров в оптических и волоконных системах.

Исследования температурных зависимостей пороговой плотности тока в диапазоне температур 0 – 100°C не выявили отличий по сравнению с лазерами на основе симметричных гетероструктур. Средние характеристические температуры составили $\sim 110^\circ\text{C}$, что соответствует значениям этого параметра в лазерах с симметричной структурой волновода [1,3].

На рис. 6 приведены зависимости выходной мощности в непрерывном режиме генерации и коэффициента полезного действия от тока накачки полупроводникового лазера. Вследствие оптимизации параметров полупроводникового лазера, таких как внутренние оптические потери, последовательное и тепловое сопротивление, а также вследствие снижения плотности энергии на зеркалах резонатора Фабри–Перо максимальная мощность излучения и КПД лазера с асимметричной структурой высоки и достигают рекордных значений — 16 Вт при ширине полоска 100 мкм и 72% при длине резонатора ~ 3 мм. Наибольший интерес представляет высокое значение КПД для рабочих мощностей излучения 4–6 Вт. В полупроводниковых лазерах с асимметричной гетероструктурой при длинах резонатора от 2 до 4 мм максимальное значение КПД превышает уровень 70%, достигая величины 74%.

Проводились деградационные испытания изготовленных лазеров при повышенной температуре и токе накачки. Лазеры предварительно отбирались по результатам

измерений как электрических, так и оптических характеристик. Лазеры устанавливались в чистом замкнутом объеме на рабочую мощность (3–4 Вт) при температуре теплоотвода 65°C на время не менее 1000 ч непрерывной наработки. Все лазеры имели снижение мощности не более 3–5%.

4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены лазерные квантово-размерные асимметричные гетероструктуры раздельного ограничения со сверхшироким волноводом в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs.

Изготовлены меза-полосковые полупроводниковые лазеры с апертурой 100 мкм и исследованы их ватт-амперные и вольт-амперные характеристики. В полученных лазерах достигнуты рекордные мощность оптического излучения 16 Вт и коэффициент полезного действия 74% на длине волны 1080 нм. Получены пороговые плотности тока 80 – 100 А/см², внутренние оптические потери 0.34 см⁻¹ и внутренний квантовый выход стимулированного излучения 99%.

В лазерах с асимметричной гетероструктурой и волноводом шириной 1.7 мкм достигнута генерация на основной поперечной моде во всем диапазоне токов накачки. Расходимость излучения в плоскости, параллельной плоскости p – n -перехода, составляла 8 – 12° , а в перпендикулярной плоскости 30 – 32° .

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 04-02-17641) и программой „Технология наноразмерных объектов и систем“.

Список литературы

- [1] Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. ФТП, **35**, 380 (2001).
- [2] F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, S. Gramlich, R. Staske, H. Wenzel, U. Zeimer, M. Weyers. Appl. Phys. Lett., **79**, 1965 (2001).
- [3] D.A. Livshits, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, N.N. Ledentsov, T.A. Nalyot, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **36**, 1848 (2000).
- [4] A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. Appl. Phys. Lett., **73**, 1182 (1998).
- [5] А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, В.В. Шамахов, А.Ю. Андреев, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. ФТП, **37**, 1394 (2003).
- [6] Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, Д.А. Лившиц, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов, Н.В. Фетисова. Письма ЖТФ, **26** (20), 40 (2000).

- [7] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38**, 1477 (2004).
- [8] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **38**, 374 (2004).
- [9] M.R. Gokhale, J.C. Dries, P.V. Studenkov, S.R. Forrest, D.Z. Garbuzov. IEEE J. Quant. Electron., **QE-33**, 2266 (1997).
- [10] И.А. Костко, В.П. Евтихийев, Е.Ю. Котельников, Г.Г. Зегря. ФТП, **33**, 752 (1999).
- [11] В.И. Швейкин, В.А. Геловани. Квантовая электрон., **32**, 683 (2002).
- [12] С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, А.А. Мармалюк, Д.Б. Никитин, А.А. Падалица, П.В. Булаев, И.Д. Залевский, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** (23), 26 (2003).
- [13] В.П. Евтихийев, Д.З. Гарбузов, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин, В.П. Чалый, А.В. Чудинов. ФТП, **19**, 1420 (1985).
- [14] L.V. Asryan, N.A. Gunko, A.S. Polkovnikov, G.G. Zegrya, R.A. Suris, P.K. Lau, T. Makino. Semicond. Sci. Technol., **15**, 1131 (2000).
- [15] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **36**, 364 (2002).
- [16] Д.З. Гарбузов, А.В. Овчинников, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов, З.Н. Соколова, В.Б. Халфин. ФТП, **25**, 928 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

High power laser diodes based on asymmetric separate confinement heterostructure

D.A. Vinokurov, S.A. Zorina, V.A. Kapitonov, A.V. Murashova, D.N. Nikolaev, A.L. Stankevich, M.A. Khomylev, V.V. Shamakhov, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskiy, T.A. Nalyot, N.A. Pikhitin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, N.V. Fetisova, I.S. Tarasov

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

Abstract Asymmetric separate confinement laser heterostructures with ultra wide waveguide based on AlGaAs/GaAs/InGaAs solid solution system (1080 nm emitting wavelength) have been grown by metal organic chemical vapour deposition epitaxy.

Optical and electrical properties of 100 μm -stripe lasers have been investigated. It has been shown that in lasers based on asymmetric heterostructures with ultra wide waveguide (more than 1 μm) it is possible to reach fundamental lateral mode generation and reduce internal optical loss to 0.34 cm^{-1} . The reduction of thermal resistance to 2 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ has been demonstrated in laser diodes with cavity lengths more than 3 mm. Characteristic temperature $T_0 = 110 \text{ K}$ in 0–100 $^{\circ}\text{C}$ range has been reached in such lasers.

Record values of power conversion efficiency 74% and optical output power 16 W in continuous wave regime have been reached in fabricated lasers. Lifetime tests at 65 $^{\circ}\text{C}$ on 3–4 W operating power during 1000 hours resulted in the power decrease by 3–7%.