

1.8 мкм лазерные диоды на основе квантово-размерных AlInGaAs/InP-гетероструктур

© А.В. Лютецкий, К.С. Борщев*, А.Д. Бондарев, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, А.А. Мармалюк[†], Ю.Л. Рябоштан[†], В.А. Симаков[†], И.С. Тарасов[†]

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

* Воронежский государственный университет,
394006 Воронеж, Россия

[†] Сигм Плюс,
117342 Москва, Россия

(Получена 30 октября 2006 г. Принята к печати 7 ноября 2006 г.)

В системе твердых растворов AlInGaAs/InP применена концепция мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения. Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений изготовлены лазерные гетероструктуры, излучающие на длине волны 1.75–1.8 мкм. На базе выращенных гетероструктур созданы мощные многомодовые лазерные диоды меза-полосковой конструкции с максимальной мощностью излучения при комнатной температуре в непрерывном режиме 2.0 и 20 Вт в импульсном режиме генерации. Внутренние оптические потери в лазерах были снижены до 2.2 см^{-1} .

PACS: 42.55.Px, 78.67.Pt, 78.60.Fi, 85.60.Jb

1. Введение

Проблема увеличения мощности излучения полупроводниковых лазеров актуальна во всем освоенном диапазоне длин волн. Применение концепции мощных полупроводниковых лазеров привело к успешным результатам по изготовлению излучателей во многих системах твердых растворов [1–4]. Для изготовления лазеров, излучающих в области длин волн 1.75–1.8 мкм, асимметричные гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом не использовались.

Изготовление мощных полупроводниковых лазеров в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне представляет большой практический интерес, но осложнено по ряду причин: оже-рекомбинация [5,6], поглощение в спин-орбитально отщепленную подзону [7], большие сечения рассеяния на свободных носителях, особенно для дырок [8], и низкие коэффициенты диффузии носителей заряда [9]. Существует несколько технологических подходов, основанных на использовании различных систем твердых растворов для получения лазеров, излучающих в средней инфракрасной области спектра. Первый — это изготовление лазерных диодов в системе твердых растворов AlGaAsSb/GaSb [10,11]. Второй — это использование системы твердых растворов InGaAsP/InP [12–14]. Третий — применение системы твердых растворов AlInGaAs/InP [15]. Последний подход наиболее технологичен для изготовления лазерных диодов с длиной волны генерации 1.75–1.8 мкм [16]. В работе [16] показано, что переход из системы твердых растворов InGaAsP/InP в систему твердых растворов AlInGaAs/InP возможен и обеспечивает серьезные преимущества по температурной чувствительности пороговой плотности тока.

Одновременно с этим, теоретически, замена фосфора на алюминий расширяет возможности системы твердых растворов по смещению границы диапазона генерации в длинноволновую область.

Данная работа посвящена разработке и исследованию характеристик мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии в системе твердых растворов AlInGaAs/InP, имеющих длины волн излучения 1.75–1.8 мкм.

2. Экспериментальные образцы

Лазерные гетероструктуры раздельного ограничения изготавливались методом МОС-гидридной газофазной эпитаксии в системе твердых растворов AlInGaAs/InP. Подробное описание технологии дано в предыдущих наших работах [16]. Для сравнения были изготовлены два типа лазерных гетероструктур: с тонким волноводом и асимметричная с расширенным волноводом. Схематическая энергетическая зонная диаграмма для обеих структур приведена на рис. 1. Смещение активной области от центра волновода и толщина волновода были рассчитаны согласно положениям концепции мощных полупроводниковых лазеров [17]. На лазерных гетероструктурах в нанесенном изолирующем слое SiO₂ с помощью фотолитографических операций формировались меза-полоски шириной $W = 100 \text{ мкм}$. Затем структуры снабжались омическими контактами Au/Te и Au/Zn. Структура разделялась на лазерные диоды с длиной резонатора $L = 500\text{--}4000 \text{ мкм}$. На торцы резонатора методом магнетронного напыления наносились зеркала Si/SiO₂ с коэффициентом отражения $R > 0.95$ и просветляющие покрытия с $R < 0.05$. Образцы лазерных диодов

[†] E-mail: tarasov@hpld.ioffe.ru

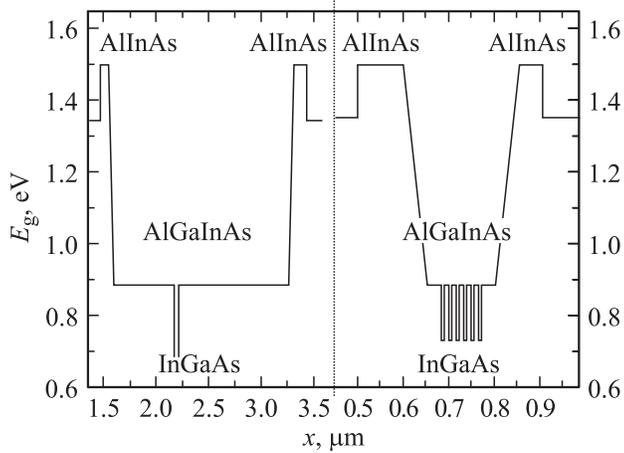


Рис. 1. Схематичное изображение зонной структуры образцов серии V-897 (слева) и V-673 (справа).

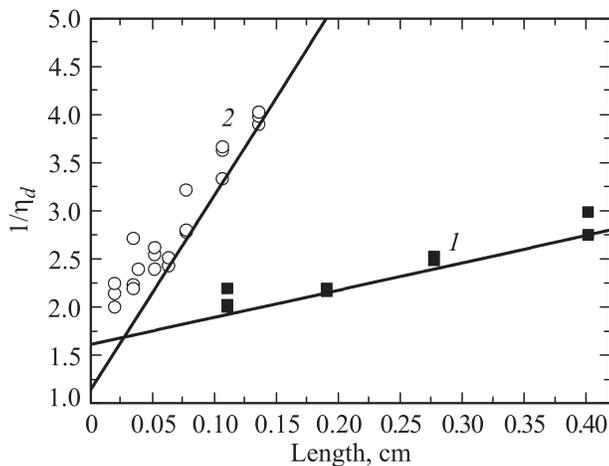


Рис. 2. Экспериментальные зависимости обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности ($1/\eta_d$) от длины резонатора лазерного диода: 1 — серия V-897, 2 — серия V-763.

монтировались на медные теплоотводы с использованием индиевого припоя.

Исследовались ватт-амперные характеристики, спектры и расходимость излучения лазерных диодов в непрерывном и импульсном режимах генерации при температуре теплоотвода $T = 20^\circ\text{C}$.

3. Внутренние оптические потери и пороговая плотность тока

В серии лазеров с различной длиной резонатора, изготовленных из гетероструктур обоих типов, исследовались ватт-амперные зависимости. С использованием полученных экспериментальных данных определялись внутренние оптические потери (α_i) и квантовый выход стимулированного излучения (η_i) (рис. 2). В таблице приведены основные характеристики лазеров. Увели-

чение толщины волновода привело к значительному снижению внутренних оптических потерь. Однако эта величина значительно превышает величину внутренних оптических потерь в лазерах на подложках арсенида галлия, изготовленных согласно концепции мощных полупроводниковых лазеров. Результат достаточно очевиден, поскольку твердые растворы AlInGaAs/InP обладают рядом особенностей. В четверных твердых растворах сечение рассеяния на свободных носителях в несколько раз превышает эту величину в материалах, используемых для создания лазеров на подложке арсенида галлия. Одновременно с этим в полупроводниковых материалах, применяемых для получения излучения в ближнем и среднем ИК-диапазоне, внутренние оптические потери состоят из потерь на рассеяние свободными носителями заряда и на поглощение в спин-орбитально отщепленную подзону [7]. Последние, по-видимому, определяют внутренние оптические потери в лазерах с максимально расширенным волноводом, когда потери на рассеяние на свободных носителях сведены к минимуму. Как следствие, в лазерах на основе твердых растворов AlInGaAs/InP дифференциальная эффективность не превышает 60–65% за порогом генерации даже в коротких лазерных диодах.

Наиболее непонятным является снижение стимулированного квантового выхода в AlInGaAs/InP-лазерах с расширенным волноводом, поскольку в AlInGaAs/GaAs-лазерах с толщиной волновода до 4 мкм этого не наблюдалось [3]. Снижение стимулированного квантового выхода свидетельствует о возникновении достаточно эффективного канала токовых утечек из активной области. Мы показали, что при больших уровнях накачки такой канал возникает вследствие возникновения генерации в волноводных слоях гетероструктуры [18]. Однако в AlInGaAs/InP-лазерах с расширенным волноводом наблюдается снижение квантового выхода стимулированной рекомбинации сразу же за порогом генерации.

При использовании набора образцов с различной длиной резонатора Фабри–Перо была получена зависимость пороговой плотности тока от обратной длины резонатора. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости для лазеров серии V-897 и серии V-763. Различие пороговой плотности тока при бесконечной длине резонатора для лазеров с тонким и толстым волноводом обусловлено разницей в величине внутренних оптических потерь. В лазерах, выполненных согласно концепции мощных излучателей, внутренние оптические потери на порядок ниже, чем в лазерах со стандартной

Parameter	Series number				
	V-897	V-675	V-763	V-386	EM-474
$D_w, \mu\text{m}$	1.7	0.6	0.2	0.3	1.7
α_i, cm^{-1}	2.2	5.3	21.5	8	0.34
$J_{\text{th}}, \text{A/cm}^2$	154	220	490	400	60
$\lambda, \mu\text{m}$	1.8	1.55	1.8	1.35	1.08
$\eta_i, \%$	62	76	87	83	99

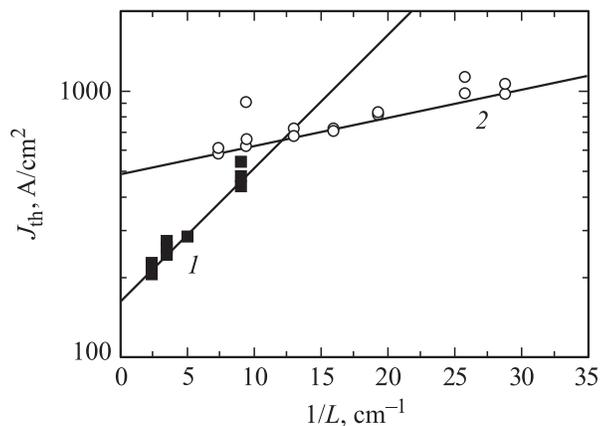


Рис. 3. Экспериментальная зависимость пороговой плотности тока от обратной длины резонатора лазерного диода: 1 — серия V-897, 2 — серия V-763.

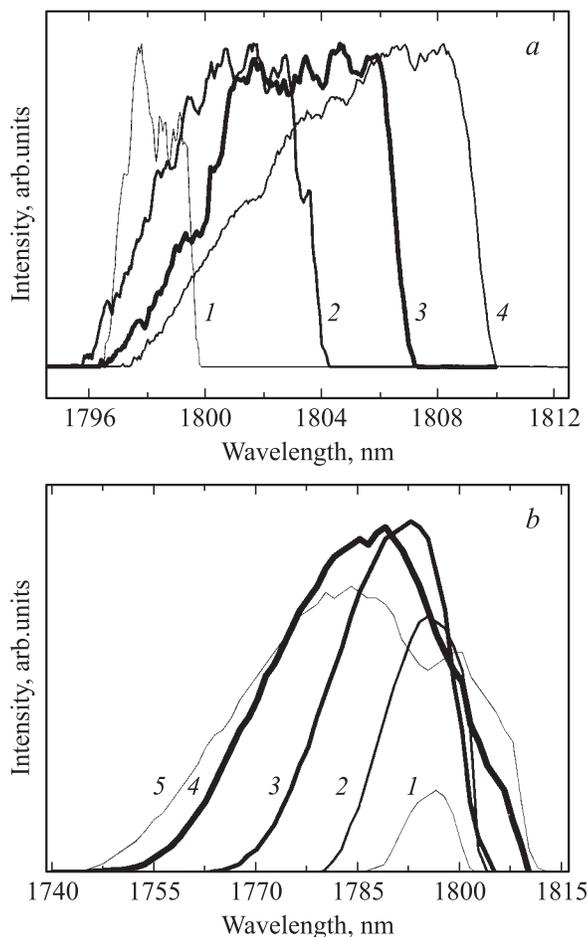


Рис. 4. Спектры излучения лазерного диода, изготовленного на базе структуры V-897, при различных токах накачки, kA/cm^2 : *a* — в непрерывном режиме генерации: 1 — 0.42, 2 — 0.72, 3 — 1, 4 — 1.35; *b* — в импульсном режиме генерации: 1 — 2.1, 2 — 5.3, 3 — 10.5, 4 — 21.1, 5 — 26.3.

конструкцией гетероструктуры. В лазерах на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом плотность тока при бесконечной длине резонатора составляет 150 A/cm^2 , что в два-три раза больше, чем для лазеров на основе системы твердых растворов AlInGaAs/GaAs [1], и является результатом токовых утечек безызлучательной оже-рекомбинации.

4. Спектральные характеристики

Применение системы твердых растворов AlInGaAs/InP для создания длинноволновых лазеров ближнего ИК-диапазона позволило создать лазеры, излучающие в диапазоне длин волн $1.75\text{--}1.8 \text{ мкм}$ (рис. 4, *a*). Лазеры с толстым волноводом имеют практически сплошной спектр, поскольку длина их резонаторов выбиралась максимально большой и моды Фабри–Перо прописать не удавалось. Спектр лазеров с тонким волноводом имел стандартный вид, характерный для коротких резонаторов Фабри–Перо, которые выбирались из-за высоких внутренних оптических потерь в таких гетероструктурах. Спектр имеет несколько особенностей, характерных для мощных полупроводниковых лазеров и высоких уровней возбуждения [18]. С увеличением тока накачки наблюдается расширение спектра в длинноволновую и коротковолновую область. В непрерывном режиме весь спектр смещается в длинноволновую область, что связано с сильным тепловым разогревом активной области. Расширение спектра в коротковолновую область в основном связано с ростом пороговой концентрации за порогом генерации. Этот эффект подробно рассмотрен в мощных лазерах, излучающих на длинах волн 1.06 мкм [18].

5. Ватт-амперные характеристики

Изготовленные лазерные диоды исследовались в непрерывном и импульсном режиме генерации с целью достижения максимальной мощности излучения. Для экспериментов были выбраны лазеры с максимальной (серии V-897) и минимальной (серии V-763) толщиной волноводных слоев. На рис. 5 приведены ватт-амперные зависимости этих лазеров. В первую очередь необходимо заметить, что применение концепции мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения в системе твердых растворов AlInGaAs/InP позволило достичь в непрерывном режиме генерации 2 ватта выходной оптической мощности на длине волны генерации 1800 нм . Использование тонкого волновода, как и ожидалось, позволило достичь максимальной мощности в 0.85 ватта в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре. Это связано с тем, что, несмотря на высокое значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения в структурах с тонким

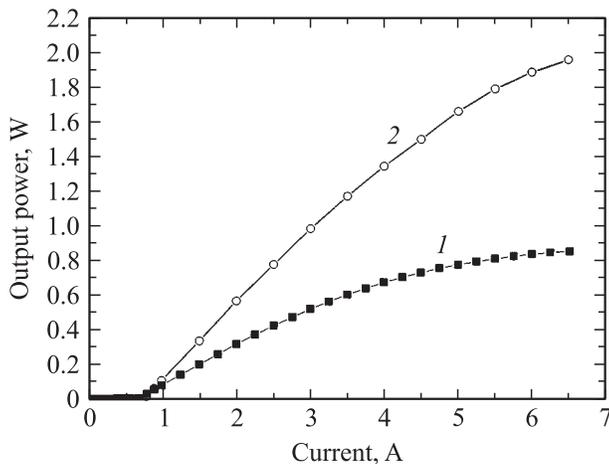


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°C лазерного диода с шириной полоска $W = 100$ мкм, диэлектрическими покрытиями AR(5%)/HR(95%), изготовленного на базе структуры V-897 с длиной резонатора $L = 4$ мм (1) и на базе структуры V-763 с длиной резонатора $L = 0.99$ мм (2).

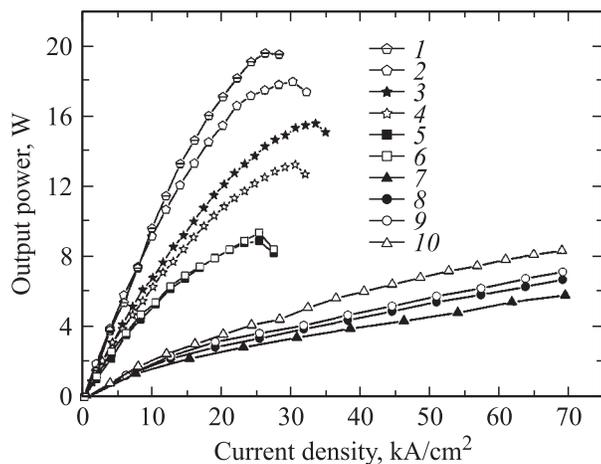


Рис. 6. Ватт-амперные характеристики в импульсном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°C лазерных диодов с шириной полоска $W = 100$ мкм и диэлектрическими покрытиями AR(5%)/HR(95%), изготовленных на базе структуры V-897 с различными длинами резонатора L , мм (1, 2 — 4; 3, 4 — 2.76; 5, 6 — 1.9), и на базе структуры V-763 с различными длинами резонатора L , мм (7 — 0.58; 8, 9 — 0.63; 10 — 0.99).

волноводом, сильно возрастают внутренние оптические потери и дифференциальная эффективность снижается даже в коротких лазерных диодах. Поэтому, согласно концепции мощных полупроводниковых лазеров, для достижения максимальных значений выходной оптической мощности в AlInGaAs/InP-лазерах необходимо максимально возможно расширять волновод в асимметричной гетероструктуре.

В импульсном режиме генерации при использовании генератора с длительностью импульса тока накач-

ки 100 нс удавалось значительно уменьшить тепловой разогрев активной области. Это позволило значительно повысить максимально достижимые мощности оптического излучения. Однако насыщение ватт-амперных характеристик наблюдалось как в лазерах с тонким, так и с толстым волноводом (рис. 6). При этом в большей степени насыщение ватт-амперной характеристики проявлялось в лазерах с тонким волноводом. Наибольшую мощность оптического излучения удавалось получать из лазеров с максимальной длиной резонатора (рис. 6), что хорошо коррелирует с зависимостью пороговой плотности от длины резонатора Фабри–Перо.

В изготовленных лазерах исследовалась диаграмма направленности излучения в параллельной и перпендикулярной $p-n$ -переходу плоскостях. Расходимость излучения в плоскости, параллельной $p-n$ -переходу, не зависела от толщины волновода. Полуширина диаграммы составляла $10-12$ градусов, что определялось шириной мезаполоскового контакта. Расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, составляла $38-43$ градусов, притом что толщина волновода различалась на порядок.

6. Заключение

В системе твердых растворов AlInGaAs/InP применена концепция мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом. Методом МОС-гидридной эпитаксии созданы гетероструктуры в системе AlInGaAs/InP с сильно напряженными квантово-размерными активными областями из твердых растворов InGaAs, излучающими в диапазоне длин волн $1.75-1.8$ мкм. Расширение волновода до 1.7 мкм позволяет снизить внутренние оптические потери до 2.2 см^{-1} . Эта величина практически на порядок меньше аналогичного параметра в лазерах на основе системы твердых растворов AlInGaAs/GaAs, что связано с особенностями твердых растворов AlInGaAs, изопериодических подложке фосфида индия. В лазерах на основе AlInGaAs/InP-гетероструктур стандартной конструкции внутренние потери составляют величину 21.5 см^{-1} .

На основе разработанных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом созданы многомодовые лазеры, излучающие на длине волны 1.8 мкм с максимальной мощностью при комнатной температуре 2.0 и 20 Вт в непрерывном и импульсном режиме генерации соответственно.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“ и Программы президиума РАН „Квантовые наноструктуры“. С.О. Слипченко благодарит за финансовую поддержку „Фонд содействия отечественной науке“ и грант президента РФ по поддержке молодых ученых (МК-7502.2006.9).

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. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **39**, 388 (2005).
- [2] 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. ФТП, **40**, 764 (2006).
- [3] 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**, 26 (2003).
- [4] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП, **40**, 628 (2006).
- [5] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова, И.Н. Ясиевич. ФТП, **16**, 592 (1982).
- [6] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова. ФТП, **16**, 1670 (1982).
- [7] N.A. Gun'ko, V.V. Khalfin, Z.N. Sokolova, G.G. Zegrya. J. Appl. Phys., **84**, 547 (1998).
- [8] S. Adachi. *Physical properties of III-V Semiconductor Compounds* (John Wiley & Sons Inc., 1992).
- [9] *Физические величины*. Справочник, под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова (М., Энергоатомиздат, 1991).
- [10] H.K. Choi, G.W. Turner, S.I. Eglash. IEEE Phot. Techn. Lett., **6**, 7 (1994).
- [11] D.Z. Garbuzov, H. Lee, V. Khalfin, R. Martinelli, J.C. Connolly, G.L. Belenky. IEEE Phot. Techn. Lett., **11**, 794 (1999).
- [12] J. Dong, A. Ubukata, K. Matsumoto. Jap. J. Appl. Phys., **36**, 5468 (1997).
- [13] R.U. Martinelli, T.J. Zamerowski, P.A. Longeway. Appl. Phys. Lett., **54**, 277 (1989).
- [14] R.U. Martinelli, R.U. Menna, A. Triano, M.G. Harvey, G.H. Olsen. Electron. Lett., **30**, 324 (1994).
- [15] С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Г. Голикова, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29**, 65 (2003).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Боршев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. ФТП, **40**, 1017 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

1.8 μm lasers based on AlInGaAs/InP asymmetrical heterostructures

A.V. Lyutetskiy, K.S. Borschev*, A.D. Bondarev, T.A. Nalyot, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, N.V. Fetisova, M.A. Khomylev, A.A. Marmalyuk⁺, Yu.A. Ryabostan⁺, V.A. Simakov⁺, I.S. Tarasov

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

* Voronezh State University,
394006 Voronezh, Russia

⁺ Sigm Plus,
117342 Moscow, Russia

Abstract The concept of high power semiconductor lasers based on asymmetric separate confinement heterostructures has been applied to AlInGaAs/InP solid solutions material system. Laser heterostructures emitting in 1.7–1.8 μm wavelength range have been grown by metal organic chemical vapor deposition epitaxy. High power multimode laser diodes of mesastripe construction with maximum room temperature output optical powers of 2 W and 20 W at continuous wave and pulse regimes have been manufactured on the base of grown heterostructures. Internal optical loss have been reduced to 2.2 cm^{-1} .