

# Импульсные полупроводниковые лазеры с повышенной оптической прочностью выходных зеркал резонатора

© А.Н. Петрунов<sup>+</sup>, А.А. Подоскин<sup>+</sup>, И.С. Шашкин<sup>+</sup>, С.О. Слипченко<sup>+,\*</sup>, Н.А. Пихтин<sup>+,\*,†</sup>,  
Т.А. Налет<sup>+,\*</sup>, Н.В. Фетисова<sup>+,\*</sup>, Л.С. Вавилова<sup>+,\*</sup>, А.В. Лютецкий<sup>+,\*</sup>,  
П.А. Алексеев<sup>\*</sup>, А.Н. Титков<sup>\*</sup>, И.С. Тарасов<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> ООО „Эльфолюм“,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 14 октября 2009 г. Принята к печати 19 октября 2009 г.)

Разработаны и созданы методом МОС-гидридной эпитаксии асимметричные гетероструктуры со сверхтонким волноводом на основе системы твердых растворов AlGaAs/GaAs, позволяющие получать излучение на длине волны 905 нм. Внутренние оптические потери и внутренний квантовый выход полупроводниковых лазеров, изготовленных на основе таких структур, составили  $0.7 \text{ см}^{-1}$  и 97% соответственно. Показано, что в импульсном режиме для лазерных диодов с просветляющими, SiO<sub>2</sub>, и отражающими, Si/SiO<sub>2</sub>, покрытиями, нанесенными на необработанные грани резонатора Фабри–Перо, полученные сколом в атмосфере кислорода, максимальная выходная оптическая мощность достигала 67 Вт и ограничивалась разрушением зеркал. Обработка граней резонатора Фабри–Перо путем травления в плазме аргона и формирование покрытий с пассивирующими и блокирующими кислород слоями GaN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> позволили увеличить максимальную выходную оптическую мощность до 120 Вт. При достигнутом уровне выходной оптической мощности разрушение зеркал отсутствовало.

## 1. Введение

Интерес к мощным импульсным полупроводниковым лазерам обусловлен возможностью их практического использования в лазерных комплексах для гравировки, резки, сварки. Кроме этого, развивающимся и перспективным направлением использования мощных импульсных полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 900–915 нм, является создание систем навигации — атмосферных лидаров в современных аэропортах [1]. Исследования показали, что серьезным ограничением при использовании в таких приборах мощных полупроводниковых лазеров является низкая надежность диэлектрических зеркал резонатора. Неоднородность и шероховатость необработанных граней резонатора, полученных путем скальвания гетероструктуры на воздухе, и возникновение на них оксидных пленок являются причинами появления поверхностных центров безызлучательной рекомбинации, ведущих к перегреву и деградации зеркал резонатора за счет поглощения высокоинтенсивного лазерного излучения [2]. Результаты наших экспериментальных работ по созданию лазерных излучателей [3–5] показали, что низкая надежность обусловлена необратимым разрушением выходного зеркала лазерного диода. Таким образом, критическим фактором, определяющим надежность работы мощных импульсных полупроводниковых лазеров, является обработка поверхности их зеркал, подвергающихся воздействию высокоинтенсивного оптического излучения.

Существует ряд публикаций, в которых авторы представляют результаты использования разработанных ими методик формирования зеркал лазерных диодов с повышенной оптической прочностью. В работе [6] показана возможность восстановления окисленной поверхности в среде водорода при температуре  $\sim 400^\circ\text{C}$ , с дальнейшим напылением ZnSe. Здесь ограничивающим фактором является высокая температура, которая несовместима с условиями формирования качественных омических контактов, также определяющих КПД и надежность полупроводникового лазера. В работе [7] для снижения оптического поглощения предложено увеличивать ширину запрещенной зоны активной области приповерхностных слоев. Это возможно за счет взаимной диффузии атомов кристаллической решетки активной области и волноводного слоя. Однако данный метод не работает в присутствии оксидной пленки и без использования пассивирующих и блокирующих кислород слоев.

Вместе с тем наши работы [5,8] показали, что фактором, определяющим оптическую прочность непрерывных полупроводниковых лазеров, является обработка поверхности зеркал с целью удаления кислорода и защиты их от воздействия окружающей атмосферы. Так, при использовании для защиты поверхности зеркал лазерных диодов слоев Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> удалось повысить плотность выходной оптической мощности до  $30 \text{ МВт/см}^2$ , что сравнимо с данными для лучших известных мировых аналогов.

В данной работе предлагается методика формирования отражающих и просветляющих покрытий с повышенной оптической прочностью на гранях резонатора Фабри–Перо мощных импульсных полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 900–915 нм.

<sup>†</sup> E-mail: nike@hpld.ioffe.ru

Технологические параметры исследуемой структуры

Номер слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -подложка	GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	100
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
3	<i>n</i> -эмиттер	Al <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As:Si	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
4	волновод	Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As	Не легирован	0.87
5	барьер	GaAs	Не легирован	0.007
6	активная область (КЯ)	InGaAs	Не легирован	0.011
7	барьер	GaAs	Не легирован	0.007
8	волновод	Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As	Не легирован	0.47
9	<i>p</i> -эмиттер	Al <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As:Zn	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
10	контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Zn	$7 \cdot 10^{19}$	0.5

## 2. Экспериментальные образцы

Экспериментальные образцы лазерных диодов изготавливались на основе асимметричных гетероструктур AlGaAs/GaAs со сверхтолстым волноводом, включающим напряженную активную область InGaAs толщиной 11 нм. В работах [8–10] было показано, что при использовании такого типа гетероструктур внутренние оптические потери составляют величины  $< 1 \text{ см}^{-1}$  при внутреннем квантовом выходе, близком к 100%. В таблице представлены составы и толщины слоев разработанной гетероструктуры. Описанная гетероструктура выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлорганических соединений) на установке EMCORE GS/3100. Используя последовательность стандартных постростовых операций, в выращенных гетероструктурах формировали омические контакты шириной 100 мкм с *p*-стороны и сплошные с *n*-стороны, после чего структура раскалывалась по плоскости (110) на кристаллы лазерных диодов с длиной резонатора 2–5 мм. Кристаллы лазерных диодов напаивались *p*-стороной вниз на медные теплоотводы с помощью индиевого припоя. Приготовленные образцы лазерных диодов разделялись на две группы. Для первой напыление просветляющих и отражающих покрытий осуществлялось на грани, полученной сколом на воздухе и не подвергшейся специальной обработке. Вторая группа отличалась тем, что перед напылением интерференционных покрытий грани резонатора обрабатывались с целью повышения оптической прочности. Отражающие и просветляющие покрытия включали пленки Si/SiO<sub>2</sub>, нанесенные методом магнетронного распыления, с толщинами, оптимизированными для достижения коэффициентов отражения 95 и 5% соответственно [11].

## 3. Экспериментальные результаты

Для оценки характеристик разработанной гетероструктуры проводились измерения ватт-амперных характеристик в непрерывном режиме генерации напаянных

полупроводниковых лазеров без просветляющих и отражающих покрытий. На основании экспериментальных зависимостей определялись внешняя дифференциальная квантовая эффективность ( $\eta_d$ ) (рис. 1) и пороговый ток ( $I_{th}$ ). С использованием полученных данных были найдены значения внутренних оптических потерь ( $\alpha_i$ ) и внутреннего квантового выхода ( $\eta_i$ ). Достигнутые значения составили  $\alpha_i = 0.7 \text{ см}^{-1}$  и  $\eta_i = 97\%$ , что сравнимо с лучшими параметрами полупроводниковых лазерных гетероструктур [8–10,12].

Известно, что максимальная выходная оптическая мощность полупроводникового лазера, работающего в непрерывном режиме генерации при постоянной температуре теплоотвода, ограничена тепловым разогревом кристалла [13]. В работе [14] показано, что использование накачки импульсами длительностью 100 нс позволяет подавить перегрев кристалла при токах более 100 А. Поэтому в данном исследовании для достижения максимальной пиковой выходной оптической мощности длительность и частота импульсов тока накачки были выбраны 100 нс и 10 кГц соответственно.

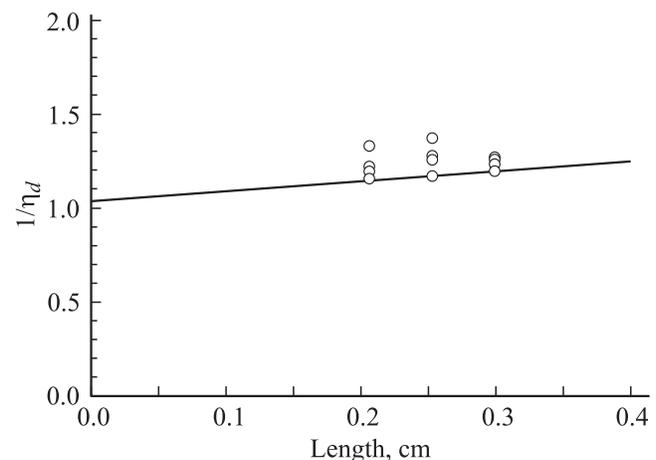
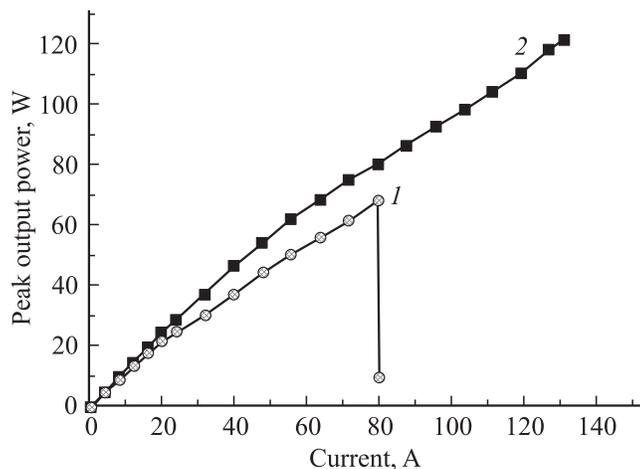
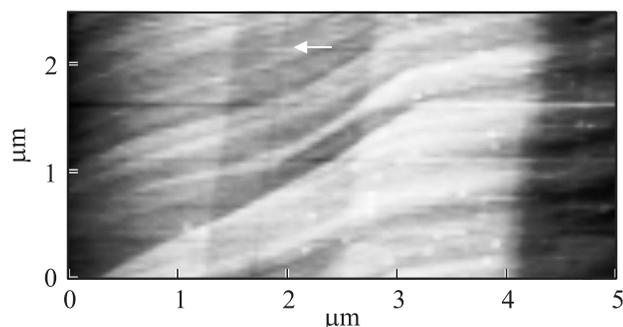


Рис. 1. Зависимость обратной внешней дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора лазерных диодов на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с длиной волны излучения 905 нм.



**Рис. 2.** Зависимость пиковой выходной оптической мощности от тока накачки лазерных диодов с просветляющими и отражающими диэлектрическими покрытиями, нанесенными на естественно сколотые (1) и обработанные  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (2) грани резонатора.

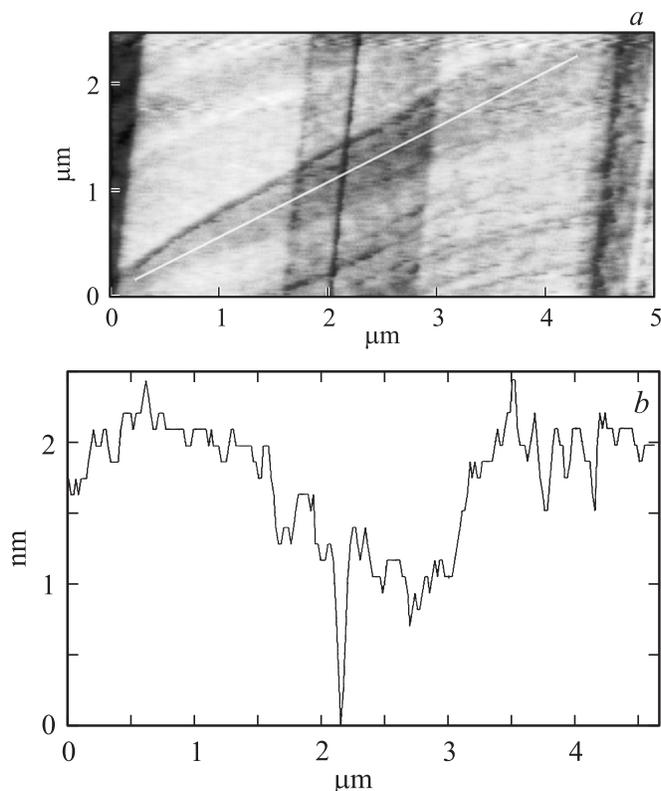


**Рис. 3.** Топографическое АСМ-изображение поверхности (110) гетероструктуры AlGaAs/GaAs, полученной скалыванием на воздухе.

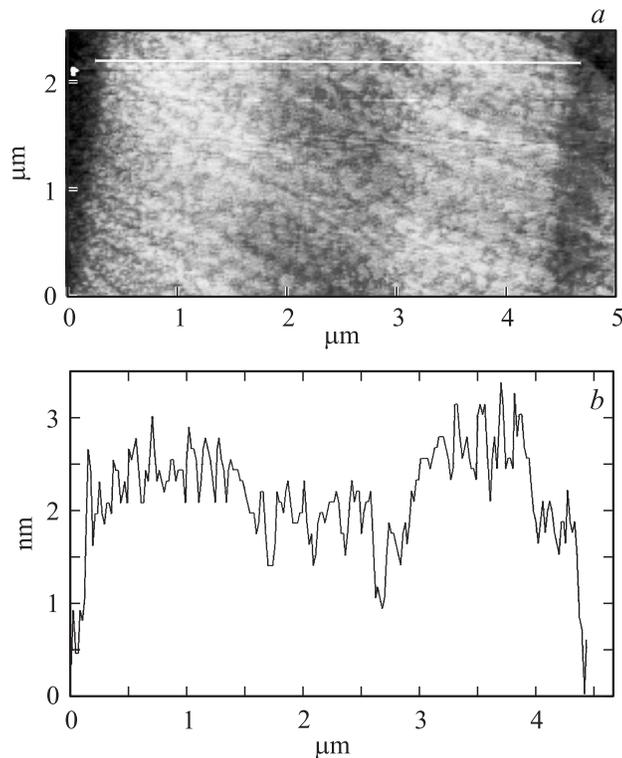
На рис. 2 показана импульсная ватт-амперная характеристика полупроводникового лазера с просветляющими и отражающими диэлектрическими покрытиями, нанесенными на необработанные грани резонатора. Максимальная выходная оптическая мощность достигала 67 Вт и ограничивалась необратимым разрушением зеркала с просветляющим покрытием. Причиной разрушения выходного зеркала являлся разогрев, обусловленный интенсивной безызлучательной рекомбинацией на поверхности.

С целью исследования состояния поверхности после скола в атмосфере воздуха, были получены топографические изображения сколотой грани методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [15]. Из рис. 3 видно, что на поверхности скола исследуемой гетероструктуры AlGaAs/GaAs образуется рельеф, полностью повторяющий толщины слоев (таблица). Перепад высот на границах эмиттер-волновод примерно составляет 0.5 нм (в тоновом представлении рисунка более светлый тон

означает большую высоту). Образование такого рельефа можно считать результатом формирования поверхностного слоя естественного окисла, имеющего меньшую толщину на волноводе из-за меньшего содержания Al [15]. На рис. 3 проявляется также и активная область нанометровой толщины в виде темной полоски, отмеченной на рисунке стрелкой. Из рис. 3 также видно, что поверхность зеркала пересекают ступеньки скола субнанометровой высоты. Поверхности ступенек характеризуются шероховатостью, определяемой величиной среднеквадратичного отклонения  $\text{RMS} = 0.44 \text{ нм}$  [17]. Из работ [2,16] известно, что присутствие окисной пленки на поверхности твердых растворов является одной из причин высокой скорости поверхностной безызлучательной рекомбинации. С целью повышения оптической прочности зеркал резонатора была разработана следующая методика формирования просветляющих и отражающих покрытий. На первом этапе зеркала, полученные сколом в атмосфере воздуха, проходили обработку плазмой аргона, что позволило удалить поверхностные окислы. После травления зеркала поверхность сохранила свой вид (рис. 4). Можно только отметить, что перепад высоты слоев на границе волновод-эмиттер несколько возрос — до 1.0 нм. Увеличение перепада по сравнению с необработанным образцом можно связать с различной скоростью травления слоев различного состава. Важно



**Рис. 4.** *a* — топографическое АСМ-изображение поверхности скола гетероструктуры AlGaAs/GaAs после обработки плазмой аргона. *b* — профиль поверхности скола гетероструктуры AlGaAs/GaAs вдоль линии на изображении *a*.



**Рис. 5.** *a* — топографическое АСМ-изображение зеркала лазерного кристалла, обработанного по второму режиму. *b* — профиль поверхности скола вдоль линии на изображении *a*.

отметить, что травление в плазме аргона не оказало существенного влияния на рельеф поверхности зеркала. Более того, шероховатость поверхности ступенек после травления в плазме аргона даже уменьшилась до значения  $RMS = 0.2$  нм [17].

С целью пассивации очищенной поверхности и защиты от кислорода атмосферы на втором этапе на сколах формировались покрытия с пассивирующими и блокирующими кислород слоями GaN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. При этом пассивирующие и блокирующие кислород покрытия на поверхности подготовленных образцов формировались без промежуточного контакта с внешней атмосферой. Только в этом случае подготовленная поверхность будет эффективно защищена. Разработанная методика включает две стадии: нитридизацию поверхности и формирование блокирующего кислород слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Нитридизация проводится с целью создания подслоя нитридов и осуществляется путем бомбардировки поверхности скола ионами плазмы азота. АСМ-изображение поверхности, прошедшей обработку плазмой азота, показано на рис. 5.

Видно, что обработка плазмой азота не дает изменения общего рельефа на границах волновод-эмиттер (изменение высоты на границах по-прежнему  $\sim 1$  нм), но вместе с этим появляется наноструктурирование поверхности всех слоев лазерной структуры, характеризующееся возросшей величиной среднеквадратичного

отклонения  $RMS = 0.77$  нм [17]. Возникшее наноструктурирование поверхности следует связать с формированием на ней нитридных соединений. Напыленная пленка Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> является стоп-слоем между пленкой интерференционного покрытия SiO<sub>2</sub> и поверхностью кристалла. Процессы очистки поверхности плазмой аргона, обработки плазмой азота и напыления пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> проводились в одной установке ионно-плазменного распыления в рамках одной загрузки, что предотвращало контакт образцов с кислородом атмосферы.

На рис. 2 показана характерная зависимость пиковой выходной оптической мощности от тока накачки лазерных диодов, для которых перед напылением просветляющих и отражающих покрытий грани резонатора были подготовлены по описанной выше методике. Видно, что использование предложенной методики обработки поверхности позволило увеличить значение выходной оптической мощности до 120 Вт. Важно отметить, что при достигнутых мощностях излучения на гранях резонатора отсутствовали следы необратимых изменений, что свидетельствует об эффективности используемой методики защиты поверхности граней резонатора.

## 4. Заключение

Таким образом, разработана и создана асимметричная гетероструктура со сверхтолстым волноводом на основе системы твердых растворов AlGaAs/GaAs, позволяющая получать излучение на длине волны 905 нм. Внутренние оптические потери и внутренний квантовый выход для такой структуры составили  $0.7 \text{ см}^{-1}$  и 97% соответственно. Показано, что в импульсном режиме для лазерных диодов с просветляющими и отражающими покрытиями, нанесенными на необработанные грани резонатора Фабри-Перо, полученные сколом в атмосфере кислорода, максимальная выходная оптическая мощность достигала 67 Вт и ограничивалась разрушением зеркал. Обработка граней резонатора Фабри-Перо, полученных сколом в атмосфере кислорода, путем травления в плазме аргона и формирование покрытия с пассивирующими и блокирующими кислород слоями GaN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> позволили увеличить максимальную выходную оптическую мощность до 120 Вт. При достигнутом уровне выходной оптической мощности разрушение зеркал отсутствовало.

Работа была выполнена при поддержке Государственного контракта № 02.513.11.3461, программы президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“. П.А. Алексеев выражает благодарность за финансовую поддержку по гранту президента РФ НШ-2951.2008.2.

## Список литературы

- [1] С. Сысоева. Компоненты и технологии, № 4, 19 (2007).
- [2] M. Ettenberg, H. Kressel. IEEE J. Quant. Electron., **16** (2), 186 (1980).

- [3] 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** (5), 628 (2006).
- [4] В.В. Безотосный, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.Н. Крохин, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Ю.М. Попов, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **42** (3), 357 (2008).
- [5] S.O. Slipchenko, A.D. Bondarev, V.A. Kapitonov, A.V. Lyutetskiy, A.A. Maramlyuk, T.A. Nalet, A.A. Panin, N.A. Pikhtin, D.R. Sabitov, K.Yu. Telegin, S.A. Zorina, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *Tech. Digest XIII Conf. on Laser Optics (LO'2008)* (Russia, St. Petersburg, 2008) ThR3-p18.
- [6] P. Ressel, G. Erbert, U. Zeimer, K. Hausler, G. Beister, B. Sumpf, A. Klehr, G. Trankle. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **17** (5), 962 (2005).
- [7] C.L. Walker, A.C. Bryce, J.H. Marsh. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **14** (10), 1394 (2002).
- [8] А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, К.Ю. Телегин, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **43** (4), 543 (2009).
- [9] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **38** (12), 1477 (2004).
- [10] 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** (6), 764 (2006).
- [11] Ж.И. Алфёров, М.А. Иванов, Ю.В. Ильин, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов. *Письма ЖТФ*, **21** (3), 64 (1995).
- [12] G. Erbert, F. Bugge, J. Fricke, P. Ressel, R. Staske, B. Sumpf, H. Wenzel, M. Weyers, G. Trankle. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **11** (5), 1217 (2005).
- [13] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (John Wiley & Sons, Inc., 1995).
- [14] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщёв, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. *ФТП*, **40** (8), 1017 (2006).
- [15] А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев, В.Е. Токранов, В.П. Улин, А.Н. Титков. *ФТП*, **33** (5), 594 (1999).
- [16] C.H. Henry, P.M. Petroff, R.A. Logan, F.R. Merritt. *J. Appl. Phys.*, **50** (5), 3721 (1979).
- [17] V.L. Berkovits, L. Masson, I.V. Makarenko, V.P. Ulin. *Appl. Surf. Sci.*, **254**, 8023 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Pulsed semiconductor lasers with high optical resistibility of output mirror facets

A.N. Petrunov<sup>+</sup>, A.A. Podoskin<sup>+</sup>, I.S. Shashkin<sup>+</sup>, S.O. Slipchenko<sup>+,\*</sup>, N.A. Pikhtin<sup>+,\*</sup>, T.A. Nalet<sup>+,\*</sup>, N.V. Fetisova<sup>+,\*</sup>, L.S. Vavilova<sup>+,\*</sup>, A.V. Lyutetskiy<sup>+,\*</sup>, P.A. Alekseev<sup>\*</sup>, A.N. Titkov<sup>\*</sup>, I.S. Tarasov<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> „Elfolium Ltd.“,  
194021 St. Petersburg, Russia  
<sup>\*</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Asymmetric heterostructures with ultrathick waveguide based on AlGaAs/GaAs solid solution system which allow to achieve lasing at 905 nm wavelength have been developed and grown by the metalorganic chemical vapor deposition method. Internal optical loss and internal quantum efficiency of stimulated emission of semiconductor lasers manufactured from such heterostructures were  $0.7 \text{ cm}^{-1}$  and 97%, respectively. It has been shown, that for diode lasers with antireflecting SiO<sub>2</sub> and high reflecting Si/SiO<sub>2</sub> coatings deposited on untreated Fabry–Perot mirror facets cleaved in oxygen atmosphere maximum pulsed output optical power reached 67 W and was limited by catastrophic mirror damage. Fabry–Perot mirror facets treatment by etching in argon plasma and coating formation with passivating and blocking oxygen GaN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layers allow to increase maximum pulsed output optical power up to 120 W. Mirror damage has not been observed at the attained level of optical output power.