

# Пространственно-одномодовый полупроводниковый лазер на InAs/InGaAs-квантовых точках с дифракционным фильтром оптических мод

© Н.Ю. Гордеев\*<sup>†</sup>, И.И. Новиков\*<sup>†</sup>, А.М. Кузнецов<sup>†</sup>, Ю.М. Шерняков\*<sup>†</sup>,  
М.В. Максимов\*<sup>†</sup>, А.Е. Жуков\*<sup>†</sup>, А.В. Чунарева\*<sup>†</sup>, А.С. Паюсов<sup>†</sup>,  
Д.А. Лившиц<sup>×</sup>, А.Р. Ковш<sup>×</sup>

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

<sup>†</sup> Санкт-Петербургский академический университет — Научно-образовательный центр  
нанотехнологий Российской академии наук,  
195220 Санкт-Петербург, Россия

<sup>×</sup> Innolume GmbH,  
44263 Dortmund, Deutschland

(Получена 23 марта 2010 г. Принята к печати 30 марта 2010 г.)

Представлены результаты применения концепции дифракционного оптического фильтра для подавления генерации мод высокого порядка в полосковых лазерных диодах с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, выращенных на подложке GaAs и излучающих в диапазоне длин волн 1.3 мкм. Использование фильтра позволило увеличить ширину полоска лазера и привело к увеличению выходной оптической мощности до 700 мВт при сохранении пространственно-одномодового режима излучения.

## 1. Введение

Важной особенностью лазеров с активной областью на основе квантовых точек является возможность получения лазерной генерации в широком диапазоне длин волн при использовании подложек GaAs. В настоящее время продемонстрирована лазерная генерация в важном для телекоммуникационных применений диапазоне длин волн 1.3–1.5 мкм [1], а также возможность достижения высокой мощности излучения [2]. В то же время актуальной задачей является сочетание высокой мощности с угловой расходимостью светового пучка, максимально близкой к дифракционному пределу. Расходимость пучка в свою очередь определяется модовым составом излучения, формирующимся в оптическом волноводе полупроводникового лазера. При многомодовом режиме излучения каждая мода имеет свою характерную диаграмму направленности и свое фокусное расстояние, что сильно затрудняет сведение лазерного пучка. Наилучшее качество светового пучка достигается при работе лазера на фундаментальной оптической моде. Такой режим излучения позволяет существенно увеличить эффективность ввода световой мощности в оптическое волокно, а значит, существенно упростить и удешевить системы передачи информации.

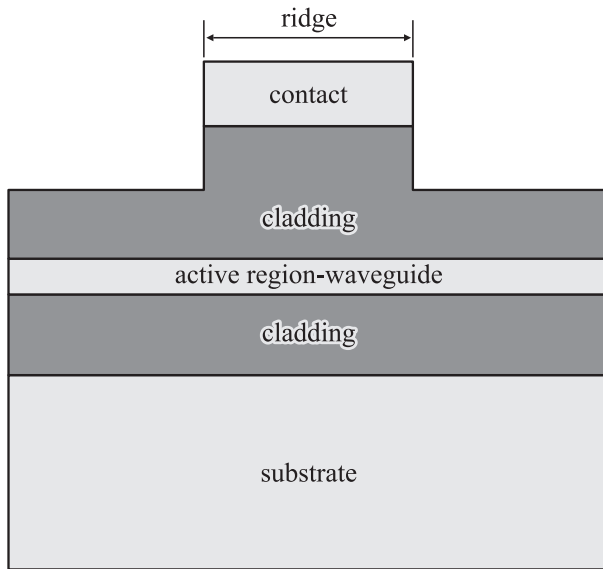
В данной статье рассмотрены полупроводниковые лазеры с активной областью на квантовых точках InAs/InGaAs, излучающие в диапазоне длин волн 1.3 мкм, в которых за счет использования простого в изготовлении дифракционного оптического фильтра удается увеличить выходную мощность излучения при сохранении лазерной генерации на фундаментальной моде.

## 2. Пространственно-одномодовый режим лазерной генерации и выходная оптическая мощность

Наиболее привлекательным с точки зрения практического применения является получение максимальной световой мощности при устойчивом режиме работы лазера в фундаментальной поперечной моде. Такой одномодовый режим лазерной генерации должен поддерживаться как в вертикальном направлении (перпендикулярно  $p-n$ -переходу), так и в горизонтальном направлении (параллельно  $p-n$ -переходу). В вертикальном направлении необходимый для формирования волновода скачок показателя преломления обеспечивается за счет использования разных по составу слоев полупроводника. В горизонтальном направлении оптический волновод может быть сформирован разными способами. В данной работе используется так называемая гребневая (ridge) конструкция полоскового волновода (рис. 1), широко применяемая в торцевых лазерах с эмиттерными слоями AlGaAs. Полосок в таком волноводе формируется в процессе травления верхних эпитаксиальных слоев, а волноводный эффект в горизонтальном направлении существует благодаря усилению и большему эффективному показателю преломления в области, расположенной непосредственно под полоском. Скачок эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff}}$  обычно лежит в диапазоне  $10^{-2} - 10^{-3}$ . Технология изготовления такого типа волновода и принципы его функционирования изложены в работе [3].

Максимальная мощность излучения торцевого лазера, ограниченная тепловым загибом ватт-амперной характеристики либо катастрофическим разрушением выходного зеркала, возрастает при увеличении ширины его

<sup>†</sup> E-mail: gordeev@switch.ioffe.ru



**Рис. 1.** Гребневая конструкция волновода торцевого полупроводникового лазера.

полоска. В то же время увеличение ширины полоска лазера с гребневым волноводом приводит к возможности возгорания мод более высоких порядков и тем самым ограничивает максимальную мощность лазера в пространственно-одномодовом режиме. Таким образом, расширение полоска с целью увеличения оптической мощности должно сопровождаться мерами по подавлению возгорания мод высоких порядков, что невозможно в лазере с гребневым волноводом традиционной конструкции, имеющим одинаковую ширину по всей длине резонатора. Для решения этой задачи было предложено несколько различных подходов.

Одномодовый характер излучения может задаваться лазером с узким полоском, свет которого затем усиливается с помощью внешнего [4,5] оптического усилителя. Недостатком такой системы является ее сложность и дороговизна, а также весьма невысокий кпд. Более перспективным является применение интегрированного оптического усилителя. Например, в работе [6] исследовался лазер с расширяющимся полоском, в котором узкая часть полоска задавала одномодовый характер излучения, а расширение полоска обеспечивало увеличение оптической мощности.

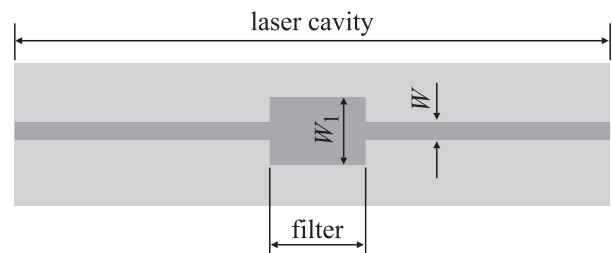
К дальнейшему увеличению мощности может привести применение достаточно широкого лазерного волновода, в котором одномодовый характер излучения обеспечивается введением различными методами дополнительных оптических потерь для мод более высоких порядков. В работе [7], такая модовая селекция обеспечивалась за счет использования разрезного полоска.

Альтернативной является развиваемая в настоящей работе конструкция встроенного фильтра мод высокого

порядка, которая экспериментально была продемонстрирована в работе [8] для лазера с квантовыми ямами InAlGaAs/InP, излучающего на длине волны 1.55 мкм. Фильтр представлял собой часть волновода, которая была сделана пассивной (непрокачиваемой) с шириной, в несколько раз превышающей ширину полоска в активной части (рис. 2). В широкой фильтрующей части моды могли свободно дифрагировать в горизонтальном направлении. Фундаментальная мода имеет минимальную расходимость по сравнению с модами высоких порядков, поэтому она имеет наименьшие дифракционные потери при прохождении фильтрующей секции.

Существенным недостатком рассмотренной технологии применительно к лазерам на основе квантовых точек является использование индуцированного перемешивания (intermixing) активной области [9–11] с целью обеспечения малого собственного поглощения света в непрокачиваемой фильтрующей секции. Индуцированное перемешивание включает в себя этап высокотемпературного отжига, что в материалах с квантовыми точками приводит к существенному коротковолновому сдвигу длины волны излучения [12].

По нашему мнению, конструкция дифракционного фильтра может быть эффективно реализована без создания пассивной секции волновода. В этом случае возможно избежать высокотемпературного отжига лазерной структуры с квантовыми точками и, как будет показано, достичь высоких значений мощности в одномодовом режиме в спектральном диапазоне 1.3 мкм. Дифракционные потери  $\alpha_{\text{dif}}$  для оптических мод в фильтрующей секции не зависят от наличия или отсутствия усиления в ней, а определяются только ее геометрией, в частности шириной. Для эффективной дискриминации оптических мод важно, чтобы пороги их генерации отличались как можно больше, поэтому разница в дифракционных потерях  $\Delta\alpha_{\text{dif}}$  должна быть большой, а суммарные недифракционные оптические потери в резонаторе должны быть малы. Таким образом, простейший дифракционный фильтр по сути представляет собой уширение полоска. Низкие недифракционные потери в фильтрующей секции в предложенной конструкции могут быть достигнуты за счет ее прокачки током.



**Рис. 2.** Схема полоскового лазера (вид сверху) с интегрированным фильтром оптических мод высокого порядка ( $W$  — ширина полоска,  $W_1$  — ширина фильтра).

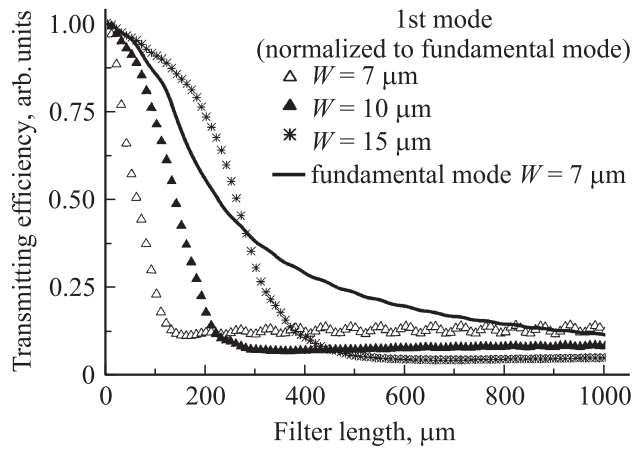


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи от длины дифракционного фильтра для фундаментальной моды и моды 1-го порядка.

### 3. Численное моделирование дифракционного фильтра

Увеличение площади полоскового контакта приводит естественным образом к увеличению порогового тока в лазере, поэтому размеры дифракционного фильтра вдоль оси резонатора должны быть минимально возможными. Для моделирования и расчета параметров модового фильтра использовался оригинальный компьютерный пакет, основанный на методе распространяющегося оптического пучка (beam propagation method) [13] и обладающий высокой точностью и скоростью вычислений. При расчетах не учитывалось, что лазерный резонатор представляет собой многопроходную оптическую систему. Расчет велся для одного прохода каждой конкретной моды излучения через „холодный“ волновод, имеющий слоистую структуру. При проведении расчетов предполагалось, что длина фильтрующей секции существенно меньше длины всего резонатора и профиль оптических мод целиком определяется узким полоском, а фильтрующая секция вносит дополнительные дифракционные потери для той или иной моды. В расчетах скачок показателя преломления на границе гребня предполагался равным 0.005. Был произведен расчет для ширины основной части полоска, равной 7, 10 и 15 мкм. Ширина фильтра выбиралась много больше ширины полоска. В качестве критерия эффективности фильтра использовался коэффициент передачи, т.е. доля интенсивности моды, попавшая обратно в полосковый волновод после прохождения фильтрующей секции.

На рис. 3 сплошной линией представлена зависимость от длины фильтра коэффициента передачи для фундаментальной моды при ширине полоска 7 мкм. На том же графике символами представлен коэффициент передачи для моды 1-го порядка, нормированный на коэффициент передач фундаментальной моды. Видно, что чем уже

полосок, тем больше вносимые дифракционные потери для моды 1-го порядка за счет большей угловой расходимости света. Из графика видно, что длина фильтра в диапазоне 100–200 мкм позволяет достичь заметного различия в коэффициентах передачи для фундаментальной и первой возбужденной мод, тогда как большая длина вносит заметные дифракционные потери и для фундаментальной моды.

### 4. Экспериментальные результаты и обсуждение

Для экспериментального подтверждения концепции дифракционного фильтра методом молекулярно-пучковой эпитаксии была выращена лазерная гетроструктура на подложке  $n^+$ -GaAs (100). В качестве активной области лазера были использованы 10 слоев квантовых точек InAs, полученных по методу Странски–Крастанова. Каждый слой квантовых точек (КТ) зарастивался слоем  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y \approx 15\%$ ) толщиной 35 нм. Массив квантовых точек был помещен в центр GaAs-волновода толщиной 400 нм. Эмиттеры представляли собой слой AlGaAs с содержанием алюминия  $\sim 35\%$ . Из выращенной гетроструктуры стандартными построительными методами, включающими в себя фотолитографию и ионно-плазменное травление, были изготовлены лазеры с шириной полоска 7, 10 и 15 мкм и с длиной дифракционного фильтра 100 либо 200 мкм. Для практической реализации была выбрана фильтрующая секция шириной 100 мкм, что существенно больше ширины полоска. Для исследований образцы лазерных диодов припаивались на медный теплоотвод, покрытый тонким слоем индия. Приборные характеристики изготовленных лазеров исследовались при импульсной (длительность импульса 300 нс, частота повторения 1 кГц) или непрерывной накачке.

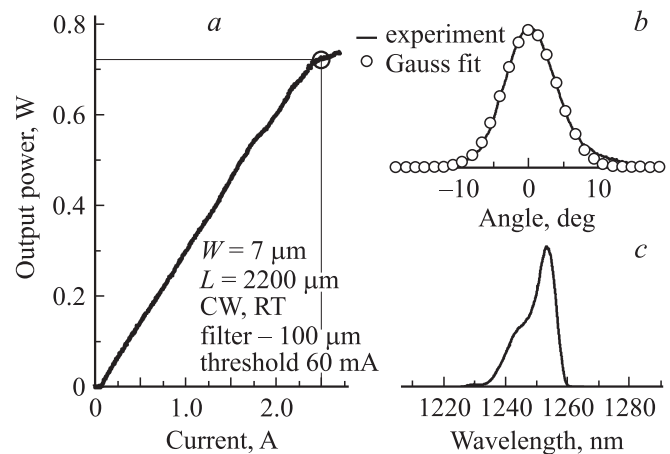
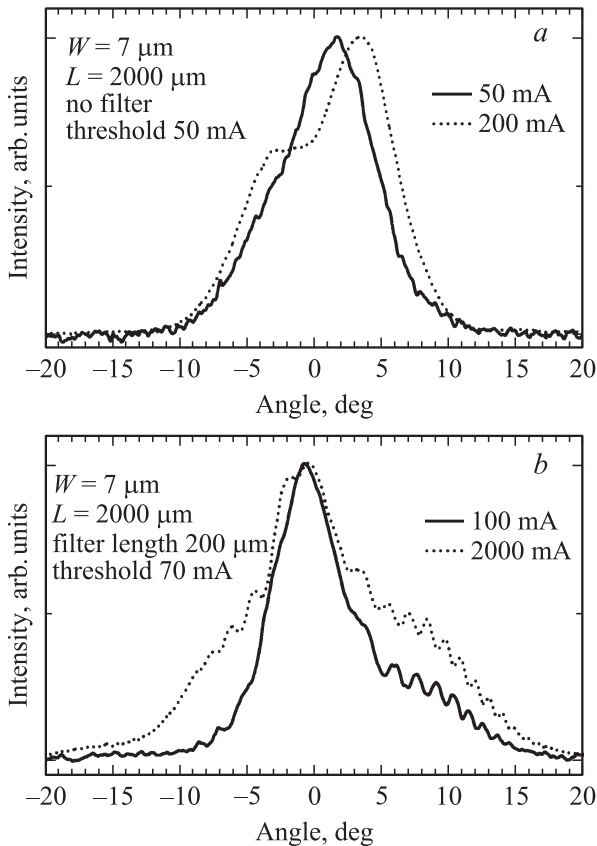


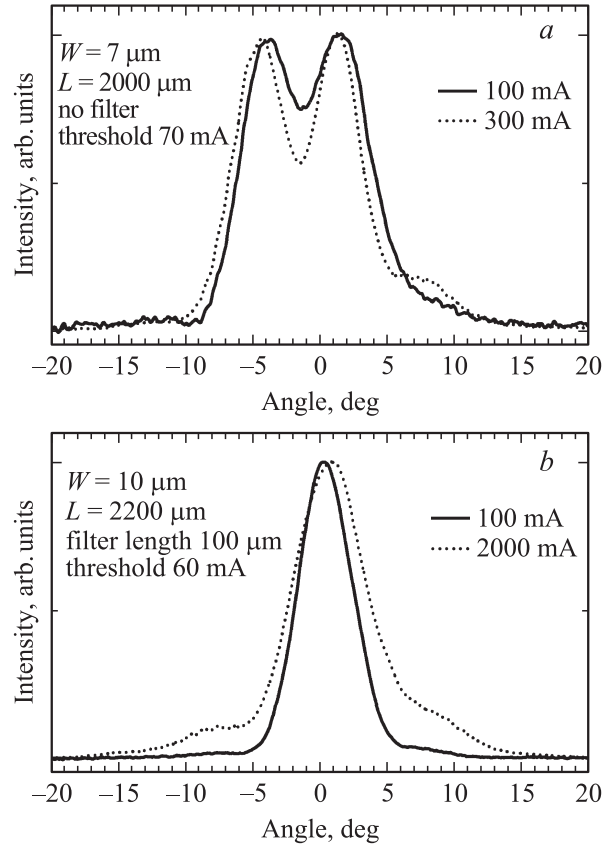
Рис. 4. Ватт-амперная характеристика лазера с фильтром длиной 100 мкм (а). Ширина полоска 7 мкм. Представлены спектр (b) и дальнее поле излучения (c) при токе накачки 2.5 А.

На рис. 4 представлена ватт-амперная характеристика, дальнее поле излучения и спектр генерации лазера с длиной резонатора 2.2 мм, содержащего одну фильтрующую секцию длиной 100 мкм, работающего при непрерывной накачке. Из картины дальнего поля видно, что даже при близком к максимальному току накачки 2.5 А излучение имеет одномодовый характер. Распределение интенсивности излучения в дальнем поле с высокой точностью описывается функцией Гаусса. Максимальная мощность излучения в пространственно-одномодовом режиме составила величину более 0.7 Вт.

Для сравнения был изготовлен лазер аналогичной конструкции, но не содержащий фильтрующего элемента. Исследование ватт-амперной характеристики для этого лазерного диода показало, что применение дифракционного фильтра длиной 100 мкм привело лишь к незначительному увеличению порогового тока (от 50 до 60 мА). В то же время излучение лазера без фильтрующей секции носит существенно неодномодовый характер уже при малых токах накачки, как следует из картины дальнего поля излучения этого лазера, представленной на рис. 5, *a*. Максимальная мощность излучения такого лазерного диода в одномодовом режиме не превысила 40 мВт.



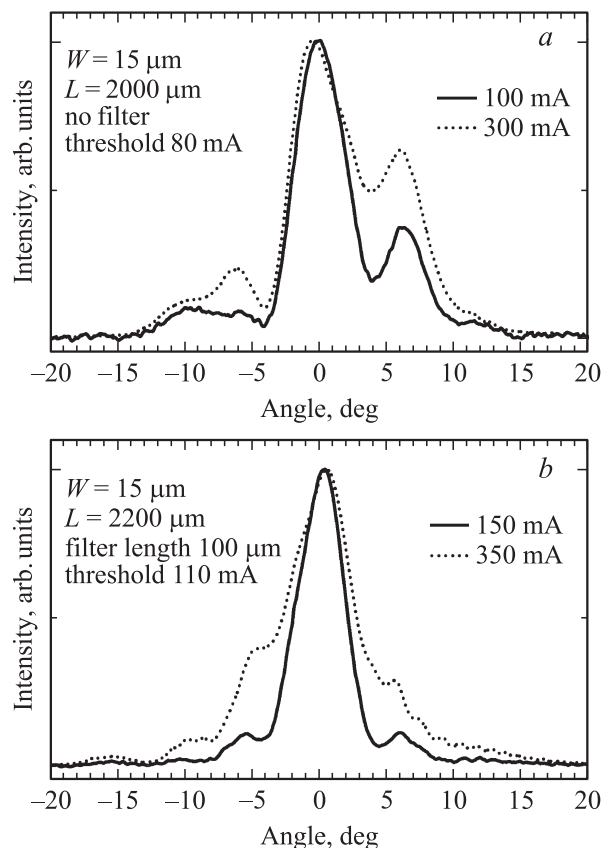
**Рис. 5.** Дальнее поле излучения лазера стандартной геометрии (*a*) и лазера с фильтрующей секцией длиной 200 мкм (*b*). Ширина лазерного полоска 7 мкм.



**Рис. 6.** Дальнее поле излучения лазера стандартной геометрии (*a*) и лазера с фильтрующей секцией длиной 100 мкм (*b*). Ширина лазерного полоска 10 мкм.

Следует также отметить, что использование фильтрующей секции длиной 200 мкм приводит к заметному ухудшению картины дальнего поля (рис. 5, *b*) даже по сравнению с лазером без фильтрующей секции. Видно, что излучение становится неодномодовым, кроме того, возникают „биения“. Такую картину дальнего поля мы связываем с возникновением переотражения в относительно длинной фильтрующей секции. Заметим, что анализ подобного рода процессов требует двумерного моделирования, учитывающего влияния лазерного резонатора и усиливающей (поглощающей) среды.

Были исследованы картины дальнего поля для образцов с шириной лазерного полоска 10 мкм и фильтрующей секцией длиной 100 мкм. При отсутствии фильтрующей секции излучение уже вблизи порога носит многомодовый характер (рис. 6, *a*). Использование фильтрующей секции существенно изменяет модовый состав излучения. Наблюдаемая картина дальнего поля характерна для фундаментальной моды (рис. 6, *b*) с небольшими „крыльями“ моды высокого порядка при высоких токах накачки. Аналогичное сравнительное исследование было сделано и для лазера с шириной полоска 15 мкм (рис. 7, *a*). Лазер с фильтрующей секцией продемонстрировал улучшение картины дальнего



**Рис. 7.** Дальнее поле излучения лазера стандартной геометрии (а) и лазера с фильтрующей секцией длиной 100 мкм (б). Ширина лазерного полоска 15 мкм.

поля (рис. 7, б) вблизи порога лазерной генерации, но излучение носило явно многомодовый характер, что качественно соответствует результатам численного моделирования.

## 5. Заключение

Таким образом, использование интегрированного дифракционного фильтра оптических мод в полосковых лазерных диодах с активной областью на квантовых точках InAs/InGaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1.3 мкм, позволяет получить пространственно-одномодовую генерацию при ширине полоска 7 мкм. При этом выходная оптическая мощность излучения в фундаментальной моде составляет 700 мВт. При использовании этой концепции в лазерах с полоском шириной 10 мкм удастся существенно улучшить картину дальнего поля излучения, которое становится близким к пространственно-одномодовому. При дальнейшем увеличении ширины полоска до 15 мкм эффективность дифракционного фильтра снижается и улучшения дальнего поля излучения заметны только в токах накачки, близких к пороговому. Обнаружено, что при определенной длине фильтрующей секции в ней происходят

переотражения световой волны, ухудшающие угловое распределение лазерного пучка. Простота конструкции модового фильтра позволяет говорить о его возможном использовании в полосковых лазерах любого типа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-02-12441-офи\_м и проекта целевой программы Федерального агентства по образованию „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (проект № 02.740.11.0383).

## Список литературы

- [1] N.N. Ledentsov. IEEE. J. Select. Topics Quant. Electron., **8**, 1015 (2002).
- [2] N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, V.A. Shchukin, S.S. Mikhrin, I.L. Krestnikov, A.V. Kozhukhov, L.Ya. Karachinsky, M.V. Maximov, I.I. Novikov, Yu.M. Shenyakov, I.P. Soshnikov, A.E. Zhukov, E.L. Portnoi, V.M. Ustinov, D. Gerthsen, P.K. Bhattacharya, N.F. Zakharov, P. Werner, F. Hopfer, M. Kuntz, D. Bimberg. *Proc. Conf. Quantum Dot Lasers: Physics and Application*, SPIE Asia-Pacific Optical Communications APOC 04 (Beijing, China, 2004), (Proceedings of SPIE, 2005) v. 5624, p. 335.
- [3] В.В. Поповичев, Е.И. Давыдова, А.А. Мармалюк, А.В. Симаков, М.Б. Успенский, А.А. Чельный, А.П. Богатов, А.Е. Дракин, С.А. Плисюк, А.А. Стратоников. Квант. электрон., **32** (12), 1099 (2002).
- [4] J.P. Donnelly, J.N. Walpole, S.H. Groves, R.J. Bailey, L.J. Missaggia, A. Napoleone, R.E. Reeder, C.C. Cook. IEEE Phot. Technol. Lett., **10**, 1377 (1998).
- [5] S.R. Selmic, G.A. Evans, T.M. Chou, J.B. Kirk, J.N. Walpole, J.P. Donnelly, C.T. Harris, L.J. Missaggia. IEEE Phot. Technol. Lett., **14** (8), 890 (2002).
- [6] A.E. Huber et al. IEEE Phot. Technol. Lett., **13** (10), 1064 (2001).
- [7] Jing-Kaung Chen, Si-Chen Lee. IEEE J. Quant. Electron., **23** (8), 1283 (1987).
- [8] O.P. Kowalski, M. Silver, S. McMaster, D.A. Yanson, B.C. Qui, S.D. McDougall, J.H. Marsh. *Proc. 1st EMRS DTC Technical Conf.* (Edinburgh, 2004).
- [9] J.H. Marsh. J. Cryst. Growth, **288** (1), 2 (2006).
- [10] D. Bhattacharya, A.S. Helmy, A.C. Bryce, E.A. Avrutin, J.H. Marsh. J. Appl. Phys., **88** (8), 461 (2000).
- [11] N.Yu. Gordeev, W.K. Tan, A.S.C. Bryce, I.I. Novikov, N.V. Kryzhanovskaya, S.M. Kuznetsov, A.G. Gladyshev, M.V. Maximov, S.S. Mikhrin, J.H. Marsh. Electron. Lett., **43** (1), 29 (2007).
- [12] Е.В. Никитина, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов. Письма ЖТФ, **30** (15), 55 (2004).
- [13] R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, S. Helfert. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **6** (1), 150 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

## Single-mode semiconductor laser based on InAs/InGaAs quantum dots with diffraction filter of optical modes

*N.Yu. Gordeev\*<sup>†</sup>, I.I. Novikov\*<sup>†</sup>, A.M. Kuznetsov<sup>†</sup>,  
Yu.M. Shernyakov\*<sup>†</sup>, M.V. Maximov\*<sup>†</sup>, A.E. Zhukov\*<sup>†</sup>,  
A.V. Chunareva\*<sup>†</sup>, A.S. Payusov<sup>†</sup>, D.A. Livshits<sup>×</sup>,  
A.R. Kovsh<sup>×</sup>*

\* Ioffe Physicotechnical Institute

Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>†</sup> St. Petersburg Academic University —

Nanotechnology Research and Education Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
195220 St. Petersburg, Russia

<sup>×</sup> Innolume GmbH, 44263 Dortmund, Deutschland

**Abstract** The concept of diffraction optical filter suppressing high-order mode lasing has been used in edge-emitting lasers based on InAs/InGaAs quantum dots emitting at the wavelength close to  $1.3\mu\text{m}$ . The filter allowed broadening stripe of single-mode laser, which has increased its output power up to the value of 700 mW.