

Полупроводниковые лазеры с внутренней селекцией излучения

© В.В. Золотарев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова[†], В.В. Шамахов, И.Н. Арсентьев, Л.С. Вавилова, К.В. Бахвалов, И.С. Тарасов

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

(Получена 10 мая 2012 г. Принята к печати 21 мая 2012 г.)

На основе гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs созданы лазерные диоды с встроенной глубокой дифракционной решеткой трапецевидной формы с большим периодом. Исследованы спектры электролюминесценции и стимулированного излучения, а также ватт-амперные характеристики лазерных диодов с дифракционной решеткой. Благодаря спектральной селективности дифракционной решетки достигнуто значительное сужение спектров и люминесценции, и стимулированного излучения. Максимальная выходная оптическая мощность составила 1 Вт при токе накачки 4 А. При максимальной мощности спектр генерации имел полуширину, равную ~ 2 Å. Продемонстрировано сужение в десятки раз спектра генерации лазера с дифракционной решеткой по сравнению с спектром генерации лазера с резонатором Фабри–Перо.

1. Введение

За последние годы сформировалось направление создания мощных полупроводниковых лазеров на базе концепции асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с малыми внутренними оптическими потерями [1]. Успехи, достигнутые в развитии мощных полупроводниковых лазеров, трудно переоценить: мощность оптического излучения из одиночного источника превышает 16 Вт, а КПД достигает 75% в непрерывном режиме генерации [2–4]. Достигнутые характеристики ставят вне конкуренции мощные полупроводниковые лазеры в системах оптической накачки волоконных и твердотельных квантовых генераторов и в технологических применениях по обработке материалов.

Непрерывное развитие лазерных систем требует постоянного совершенствования и улучшения характеристик полупроводниковых источников излучения. Одним из существенных недостатков мощных полупроводниковых лазеров является значительное расширение спектров излучения при увеличении выходной оптической мощности. Для селекции узкой полосы частот из широкого спектрального диапазона излучения полупроводникового лазера используются различные диспергирующие элементы.

В данной работе в качестве селектирующего элемента предложено использовать внутреннюю дифракционную решетку (ДР) с большим периодом $\Lambda = 2$ мкм, расположенную в одном из эмиттеров лазерной гетероструктуры. Преимущество ДР с большим периодом заключается в том, что она может быть получена с помощью хорошо разработанных методов фотолитографии и технологии ионно-плазменного травления.

В нашей работе [5] были проведены расчеты спектров отражения дифракционной решетки в зависимости от ее геометрических параметров. Расчеты показали, что для получения максимального коэффициента отражения волноводной моды в лазерной структуре следует исполь-

зовать глубокие ДР (глубиной порядка 3 мкм) трапецевидной или прямоугольной формы с максимальным или минимальным фактором заполнения.

В данной работе получены лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/AlGaAs, в эмиттере AlGaAs которых созданы глубокие ДР трапецевидной формы (рис. 1). Исследованы спектральные и ватт-амперные характеристики лазерных диодов, сформированных из указанных гетероструктур.

2. Экспериментальные образцы

Экспериментальные образцы лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Структуры состояли из одной напряженной квантовой ямы InGaAs толщиной 85 Å, волновода из GaAs шириной 0.5 мкм и эмиттеров из AlGaAs. На части эмиттера из *p*-AlGaAs методом фотолитографии и последующего реактивного ионного травления были созданы глубокие ДР трапецевидной формы (рис. 2). Параметры ДР подбирались так, чтобы спектральная линия коэффициента отражения имела наименьшую ширину, а коэффициент отражения — наибольшее значение в максимуме (рис. 3). Дифракционная решетка с таким спектром отражения обеспечивает спектрально-селективную обратную связь на длине волны, удовлетворяющей условию Брэгга:

$$\Lambda = m \frac{\lambda}{2n(T)}, \quad (1)$$

где Λ — период дифракционной решетки, m — порядок дифракции (целое число), λ — длина волны в вакууме, n — показатель преломления среды, T — температура.

Полученные ДР имели период $\Lambda = 2$ мкм (рис. 2). При использовании ДР с таким большим периодом отражение происходит в 12-м порядке дифракции. Возможности лазеров с дифракционными решетками, отражающими в 6 и 25 порядках дифракции, были продемонстрированы в работах [6,7]. В наших исследованиях дифракционная

[†] E-mail: zina.sokolova@mail.ioffe.ru

решетка находилась в p -эмиттере структуры (рис. 1). На область структуры с ДР для электрической изоляции наносился слой диэлектрика. Таким образом, лазерный чип состоял из двух секций: области полоска с нанесенным металлическим контактом и непрокачиваемой током области ДР (рис. 1).

Из вышеописанной структуры были получены лазерные чипы полосковой конструкции с шириной металли-

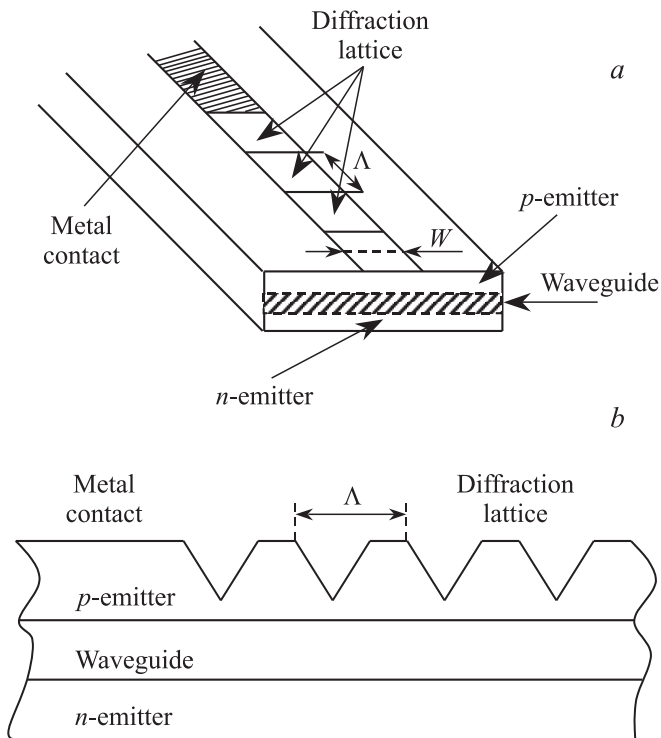


Рис. 1. Схематическое изображение полупроводниковой лазерной структуры с внутренней дифракционной решеткой: a — общий вид, b — в разрезе по оси роста. Лазерная структура состоит из двух областей: металлического контакта и непрокачиваемой током области дифракционной решетки с периодом $\Lambda = 2$ мкм. Ширина полоска (апертура излучения) $W = 100$ мкм.

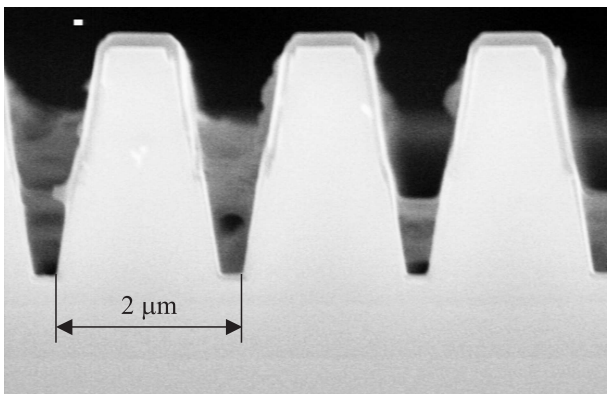


Рис. 2. Изображение дифракционной решетки в лазерной структуре, полученное с помощью ТЕМ.

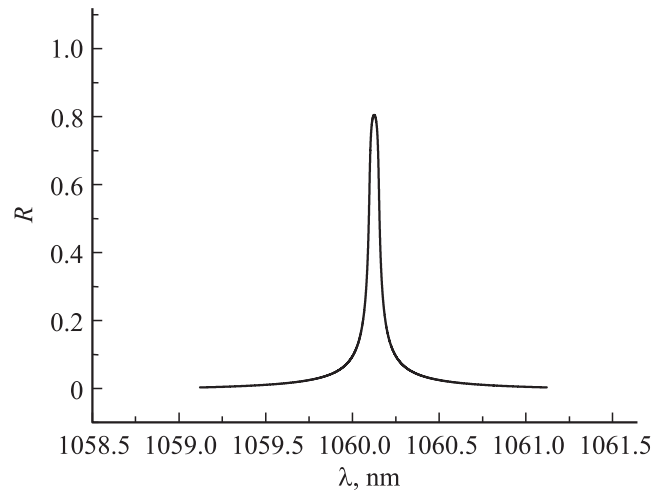


Рис. 3. Расчетный спектр отражения R в 12-м порядке дифракции глубокой трапецевидной дифракционной решетки.

ческого контакта $W = 100$ мкм. Длина контакта (прокачиваемой током области) варьировалась от 1 до 4 мм, длина решетки (непрокачиваемой области) составляла 0,1–1 мм.

Кроме того, для характеристики структуры были получены образцы лазерных диодов без дифракционной решетки, у которых внутренний квантовый выход излучения был равен 98%, а внутренние оптические потери составили $4,6 \text{ см}^{-1}$. Большие внутренние оптические потери вызваны значительным проникновением лазерных мод в сильно легированные эмиттеры вследствие использования в лазерной структуре узкого волновода (шириной 0,5 мкм).

3. Спектры электролюминесценции

Для анализа спектральных характеристик лазерных структур проводились измерения излучения с торцевых зеркал, полученных естественным сколом. На рис. 4 представлены спектры электролюминесценции лазера без ДР (a), лазера с ДР: измеренные со стороны металлического контакта (b) и со стороны непрокачиваемой области (дифракционной решетки) (c). Ток накачки во всех трех случаях был одинаков и составлял 100 мА. Из сравнения рис. 4, a и b видно, что в структуре с ДР наблюдается появление небольшого пика на длине волны, удовлетворяющей условию Брэгга (1). Спектр излучения, выходящего со стороны ДР (рис. 4, c), принципиально отличается от спектров, приведенных на рис. 4, a, b . На рис. 4, c коротковолновая часть спектра преобразуется в пик на брэгговской длине волны (1), обусловленный дифракцией на брэгговском зеркале, обусловленном дифракционной решеткой. Интенсивность коротковолнового пика недостаточно высока из-за неоптимальности экспериментальной лазерной структуры. Из-за несовпадения длины волны в максимуме усиления и

брегговской длины волны коротковолновый пик находится в области высоких оптических потерь и слабого усиления.

Длинноволновое излучение, выходящее со стороны ДР, не поглощается ДР, а преобразуется в достаточно широкий пик (рис. 4, *c*), образованный модами резона-

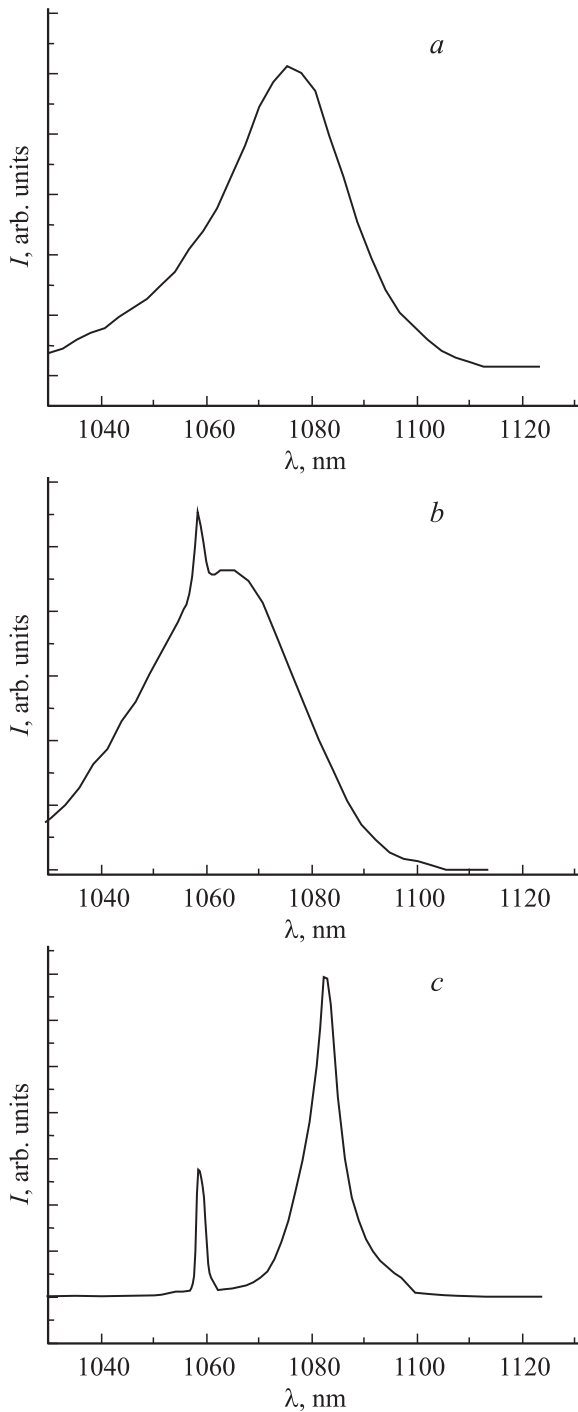


Рис. 4. Спектры электролюминесценции лазерного диода без дифракционной решетки (*a*), лазера с дифракционной решеткой: измеренные со стороны металлического контакта (*b*) и со стороны непрокачиваемой области (дифракционной решетки) (*c*). На всех графиках ток накачки $I = 100$ мА.

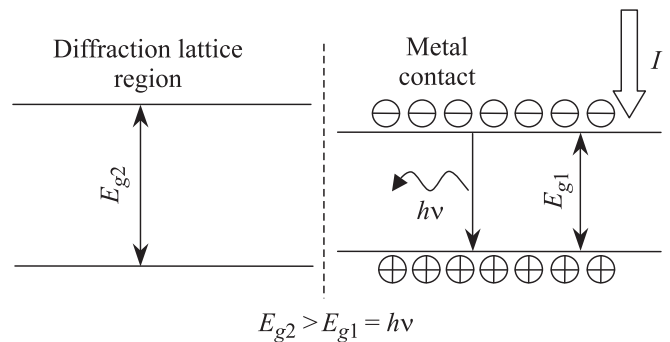


Рис. 5. Схематичное изображение изменения ширины запрещенной зоны в области сильной инжекции носителей заряда (металлического контакта). I — ток накачки.

тора Фабри–Перо. Прохождение длинноволнового излучения без поглощения через область ДР связано с различием ширины запрещенной зоны квантовой ямы InGaAs в прокачиваемой (металлический контакт) и непрокачиваемой (ДР) током областях лазерной структуры. Известно, что большая инверсная заселенность зон в полупроводнике приводит к сужению запрещенной зоны [8,9]. В прокачиваемой области концентрация инжектированных носителей велика, и поэтому ширина запрещенной зоны несколько меньше, чем в непрокачиваемой током области ДР (рис. 5).

Два люминесцентных пика на рис. 4, *c* наглядно демонстрируют возможности спектральной селекции дифракционной решеткой и резонатором Фабри–Перо.

4. Лазеры с дифракционной решеткой и с просветляющим покрытием на торцевых гранях

Для дальнейших исследований в целях подавления мод резонатора Фабри–Перо на оба зеркала лазерного диода, полученных естественным сколом, напылялись просветляющие покрытия. Покрытия обеспечивали коэффициент отражения на торцевых гранях менее 5%. Излучающее зеркало находилось со стороны прокачиваемой током области (металлического контакта), поэтому ДР служила спектрально-селективным глухим зеркалом.

Проводились исследования ватт-амперных характеристик и спектров генерации этих лазерных диодов. На рис. 6 представлена характерная ватт-амперная характеристика лазерного диода с ДР. Максимальная выходная оптическая мощность со стороны металлического контакта достигает 1 Вт при токе накачки 4 А.

На рис. 7 приведены спектры лазерной генерации для структуры с ДР (излучение выходит со стороны металлического контакта): на пороге генерации (ток накачки $I = 450$ мА) (*a*) и при большом токе накачки $I = 4$ А, соответствующем максимальной выходной оптической мощности ~ 1 Вт (*b*). При большом токе полуширина спектра составляет ~ 2 Å (рис. 7, *b*), что

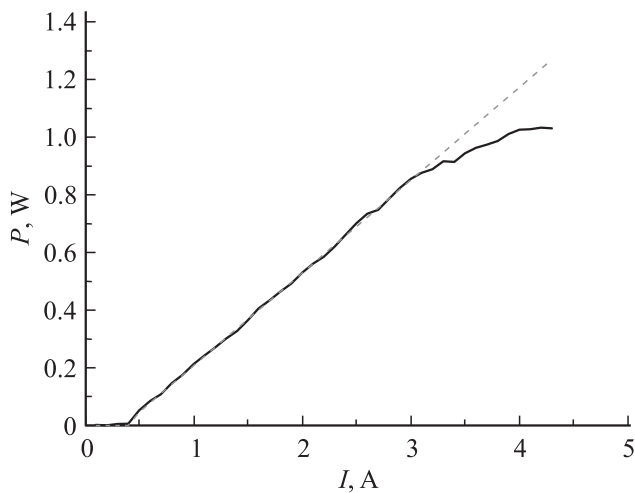


Рис. 6. Ватт-амперная характеристика лазерного диода с дифракционной решеткой.

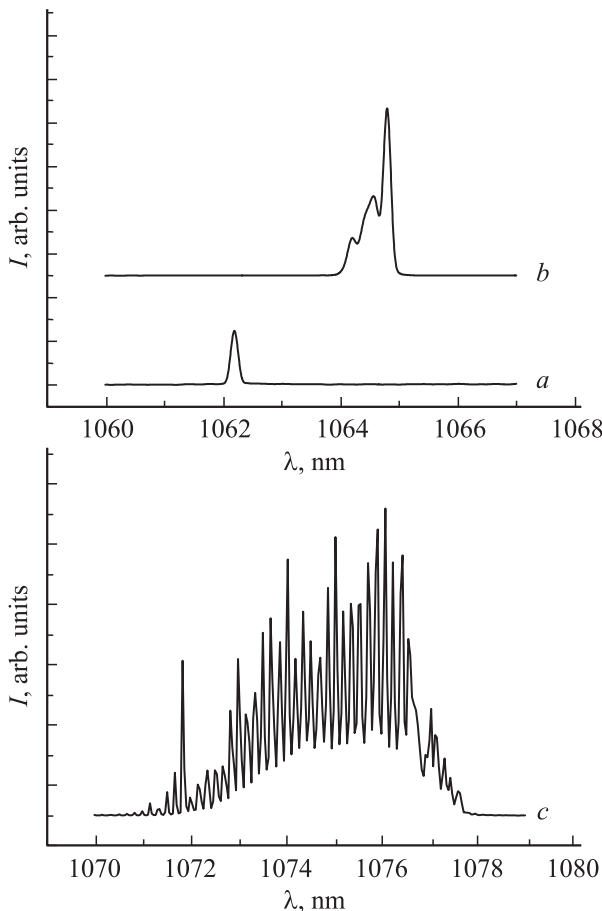


Рис. 7. Спектры стимулированного излучения лазерного диода с дифракционной решеткой (*a, b*) и без дифракционной решетки (*c*). Токи накачки I, A : *a* — 0.45; *b, c* — 4.

близко к расчетному значению (рис. 3). Линия генерации на рис. 7, *b* сдвигается в длинноволновую область по сравнению со спектром на рис. 7, *a*. При увеличении тока

накачки происходит разогрев структуры, что приводит к возрастанию показателя преломления материала дифракционной решетки [10]. При этом, согласно выражению (1), длина волны излучения также возрастает, что и объясняет сдвиг линии генерации в длинноволновую область с ростом тока накачки. Тонкая структура спектра генерации на брэгговской моде (рис. 7, *b*) обусловлена наличием нескольких мод в плоскости, параллельной $p-n$ -переходу, так как лазерная структура имеет полосковый контакт шириной 100 мкм.

На рис. 7, *c* приведен для сравнения спектр генерации идентичного лазерного диода без ДР также при большом токе накачки $I = 4 A$. Полуширина этого спектра составляет $\sim 50 \text{ \AA}$, т.е. в десятки раз превосходит полуширину спектра на рис. 7, *b*.

5. Заключение

В эмиттере AlGaAs лазерной структуры InGaAs/GaAs/AlGaAs созданы глубокие ДР (глубиной $\sim 3 \text{ мкм}$) трапецевидной формы с большим периодом (2 мкм). Продемонстрировано сужение линии люминесценции такого лазера благодаря спектральной селективности дифракционной решетки. При выходной оптической мощности 1 Вт получены спектры стимулированного излучения лазера с полушириной $\sim 2 \text{ \AA}$. Обнаружено сужение спектра стимулированного излучения лазера в десятки раз.

Для улучшения оптических и мощностных характеристик лазерных диодов с дифракционной решеткой следует провести оптимизацию их параметров. Необходимо совместить брэгговскую длину волны, задаваемую дифракционной решеткой, с максимумом спектра усиления мод резонатора Фабри–Перо. Для этого необходимо либо изменить период дифракционной решетки, либо варьировать параметры InGaAs квантовой ямы: ее толщину или глубину (т.е. долю In). Совпадение этих длин волн приведет к значительному уменьшению внутренних оптических потерь для моды, удовлетворяющей условию Брэгга, что позволит увеличить максимальную выходную оптическую мощность на брэгговской частоте. Для подавления мод резонатора Фабри–Перо на зеркалах лазерного диода должно быть нанесено просветляющее покрытие.

Работа поддержана федеральной целевой программой „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (госконтракт 14.740.11.0807).

Список литературы

- [1] 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).
- [2] И.С. Тарасов. Квант. электрон., **40** (8), 661 (2010).
- [3] N.A. Pikhin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. lett., **40** (22), 1413 (2004).

- [4] P. Crump, G. Blume, K. Paschke, R. Staske, A. Pietrzak, U. Zeimer, S. Einfeldt, A. Ginolas, F. Bugge, K. Häusler, P. Ressel, H. Wenzel, G. Erbert. Proc. SPIE, **7198**, 719 814 (2009).
- [5] В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.В. Золотарёв, А.Ю. Лешко, А.Н. Петрунов, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, З.Н. Соколова, И.С. Шашкин, И.С. Тарасов. ФТП, **46**, 252 (2012).
- [6] J. Fricke, F. Bugge, A. Ginolas, W. John, A. Klehr, M. Matalla, P. Ressel, H. Wenzel, G. Erbert. Photon. Technol. Lett., **22**, 284 (2010).
- [7] J. Fricke, W. John, A. Klehr, P. Ressel, L. Weixelbaum, H. Wenzel, G. Erbert. Semicond. Sci. Technol. **27** (5), 055 009 (2012).
- [8] P. Blood, S. Colak, A.I. Kucharka. IEEE J. Quant. Electron., **QE-24**, 1593 (1988).
- [9] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, Н.А. Рудова, А.Ю. Лешко, И.С. Тарасов. ФТП, **46**, 682 (2011).
- [10] *Semiconductors Group IV Elements and III-V Compounds*, ed. Madelung, (Berlin etc. Springer-Verlag, 1991).

Редактор Т.А. Полянская

Semiconductor lasers with internal selection of radiation

V.V. Zolotarev, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskii,
D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, A.A. Podoskin,
S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, V.V. Shamakhov,
I.N. Arsent'ev, L.S. Vavilova, K.V. Bakhvalov,
I.S. Tarasov

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

Abstract Diode lasers with internal deep trapeziform grating with big period were fabricated in InGaAs/GaAs/AlGaAs heterostructures. Electroluminescent and stimulated emission spectra as well as power–current characteristics of diode lasers with grating were investigated. A significant narrowing of electroluminescent and stimulated emission spectra were achieved as a result of grating spectral selectivity. 1 W output optical power at 4 A injection current were obtained. A halfwidth of stimulated emission spectrum was equal 2 Å at the largest output power. It was shown dozens of times narrowing of stimulated emission spectra in laser with grating in comparison with Fabry–Perot laser without grating.