

# Сужение спектральной полосы излучения мощного лазерного диода объемной брэгговской решеткой на фото-термо-рефрактивном стекле

© С.А. Иванов\*, Н.В. Никоноров\*, А.И. Игнатьев\*, В.В. Золотарев+,  
Я.В. Лубянский+, Н.А. Пихтин+‡, И.С. Тарасов+

\* Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

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

‡ Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zolotarev.bazil@mail.ioffe.ru

(Получена 1 декабря 2015 г. Принята к печати 7 декабря 2015 г.)

Работа посвящена исследованию спектральных свойств мощного полупроводникового лазера с внешним резонатором, в котором осуществляется селекция продольных мод с помощью голографической объемной брэгговской решетки на фото-термо-рефрактивном стекле. В результате селекции исходный спектр лазерного диода шириной в 6 нм был сужен до 5 Å. В полученном спектре разрешился набор собственных мод, соответствующих длине лазерного чипа, количество которых ограничивалось шириной контура спектральной селективности решетки. Было показано, что установка голограммы внутрь резонатора увеличивает ее селективную способность в несколько раз. Исследования показали, что данная конструкция внешнего резонатора позволяет плавно перестраивать длину волны генерации лазера в пределах 10 нм.

## 1. Введение

Широкое распространение полупроводниковых лазеров связано с рядом преимуществ: высокий КПД (75–80%) [1–3], малые габаритные размеры, простота эксплуатации и относительно низкая стоимость. Важным преимуществом полупроводниковых лазеров является возможность создания излучателей, работающих на различных длинах волн в широком спектральном диапазоне: видимый диапазон, ближний и средний инфракрасный (ИК). Вышеперечисленные достоинства являются основным фактором применения данного типа лазеров в прикладных и исследовательских областях, таких как системы накачки твердотельных и волоконных лазеров, системы передачи информации, газоанализ, лидарные системы, дальнометрия, системы контроля качества поверхности, обработка материалов, медицина, системы двойного или специального назначения.

Наряду с вышеописанными преимуществами полупроводниковых лазеров имеются проблемы — излучение является квазимонохроматическим и спектрально нестабильным. Наличие данной особенности обусловлено рядом причин. Уширение спектра генерации при увеличении тока инжекции происходит в связи с фундаментальными аспектами транспорта и захвата носителей в квантово-размерной активной области, а также обусловлено многомодовой конструкцией резонатора лазера. Причиной смещения спектра является разогрев активной области при увеличении тока инжекции, что приводит к уменьшению ее ширины запрещенной зоны и, как следствие, к смещению спектра генерации в длинноволновую область.

Перспективным способом решения данных проблем является использование объемной брэгговской решетки на фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле [4,5]. Запись фазовых голограмм на ФТР стекле является двухстадийным процессом. Вначале производится экспонирование стекла в ультрафиолетовом излучении (325 нм), а затем термическая обработка, в результате которой в облученных областях стекла происходит изменение показателя преломления, наблюдаемое в широком спектральном диапазоне, охватывающем всю видимую и ближнюю ИК область спектра. До недавних пор в качестве среды для записи голограмм использовались преимущественно тонкие среды, эффективная толщина голограммы в которых была существенно меньше 1 мм. Такие ограничения накладывались прежде всего из-за неоднородности используемых сред и невозможности получения фоточувствительных слоев большой толщины. Для создания высокоселективных элементов необходимы материалы, в которых возможна запись голограмм на большую глубину. Селективность голографической решетки, помимо угла Брэгга между интерферирующими при записи пучками, зависит от эффективной толщины голограммы. Эта зависимость, в отличие от угловой, является линейной. Например, голографическая решетка толщиной в 500 мкм обеспечивает угловое разрешение в  $0.2^\circ$ , а записанная под тем же углом решетка толщиной 1000 мкм — уже  $0.1^\circ$ . ФТР стекло позволяет получать объемные брэгговские решетки толщиной  $> 5$  мм, а высокое значение изменения показателя преломления ( $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ ) позволяет достичь дифракционной эффективности (ДЭ)  $> 99.9\%$ .

## 2. Объекты исследования

В работе использовались полупроводниковые лазеры, изготовленные из асимметричной двойной гетероструктуры раздельного ограничения, полученной методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений в системе твердых растворов GaAs/AlGaAs/InGaAs. Гетероструктура состояла из напряженной квантовой ямы InGaAs толщиной 100 Å, заключенной в волноводные слои Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>As, которые находились между *n*- и *p*-эмиттерами Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As [6]. Генерация лазерного излучения происходила на длине волны ~ 1060 нм. Длина лазерного чипа (резонатора) составила ~ 3 мм, излучающая апертура — 100 × 2 мкм. На торцевые грани чипа методом магнетронного распыления наносились диэлектрические пленки, обеспечивающие коэффициент отражения 1% на выходном зеркале и 95% на заднем зеркале.

Объемная брэгговская решетка была записана с помощью He–Cd-лазера Kimmon (Япония), рабочая длина волны 325 нм, мощность 50 мВт, качество пучка TEM<sub>00</sub>, диаметр пучка 12 нм, расходимость 0.5 мрад. Так как процесс записи голограмм очень чувствителен к колебаниям схемы и турбулентностям воздуха, экспериментальная установка для записи брэгговских решеток располагалась в отдельной комнате, в которой поддерживается стабильный температурный режим. Для записи решетки излучение лазера расширялось микрообъективом и фильтровалось от высоких пространственных частот микродиафрагмой. После микрообъектива излучение падало на коллимирующую линзу, за которой располагалась диафрагма диаметром 16 мм, и с помощью этой диафрагмы вырезалась область пучка с максимально равномерной интенсивностью. Затем излучение направлялось на светоделительный неполяризующий кубик 1:1, таким образом создавались предметный и опорный пучки. Оба пучка сводились на образце с помощью зеркал, установленных на поворотных столиках SmarAct Sr-7012-S со встроенным оптическим сенсором и разрешением в 15 мкград. Для термопроявления голограммы записанный образец выдерживался в муфельной печи при температуре вблизи  $T_g$  в течение 10 ч с последующим инерциальным охлаждением до комнатной температуры. Толщина стекла составила 1.3 мм, угол дифракции на длине волны 1055 нм — 30.7°, дифракционная эффективность — 76%. Поверхности стекла не были просветлены, и отражение составляло ~ 4% на каждой грани.

Оптическая схема (рис. 1) состояла из полупроводникового лазера с системой термостабилизации, коллимирующей оптики, состоящей из нескольких линз, объемной брэгговской дифракционной решетки, зеркала и детекторов 1 и 2. Излучение лазера параллельным пучком направлялось на решетку под углом Брэгга. Зеркало обеспечивает обратную связь для дифрагированного излучения, селективного по длине волны. Направление на детектор 2, который представлял собой измеритель оптической мощности, является выходным

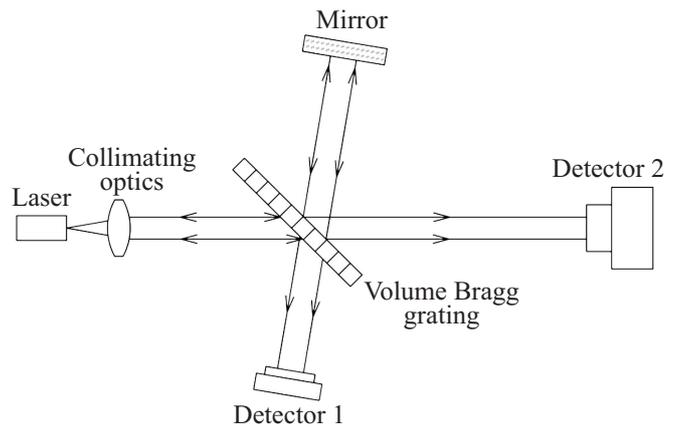


Рис. 1. Используемая оптическая схема.

каналом резонатора. Детектор 1 служил для контроля спектра излучения и качества юстировки резонатора. Излучение, падающее на детектор 1, в общем случае представляет собой оптические потери, что снижает выходную оптическую мощность лазерного излучения. Использование зеркала вместо детектора 1 увеличивает эффективность лазера, однако в данной работе с целью одновременного контроля спектральных и мощностных характеристик мы сознательно пошли на снижение добротности резонатора.

## 3. Схема эксперимента

Система из зеркала и решетки характеризуется пропусканьем, отражением и потерями, которые зависят от параметров оптических элементов. Зависимость данных величин от дифракционной эффективности ( $\eta$ ) объемной брэгговской решетки определяется соотношениями:

$$I_{\text{out}} = (1 - \eta)T + \eta MRT,$$

$$I_{\text{bck}} = \eta^2 MT^2,$$

$$D_1 = (1 - \eta)\eta MT^2 + R,$$

где  $I_{\text{out}}$  — доля излучения, вышедшего из резонатора на детектор 2,  $I_{\text{bck}}$  — доля излучения, вернувшегося в резонатор,  $D_1$  — доля излучения, падающая на детектор 1,  $T$  — пропускание ФТР стекла с брэгговской решеткой,  $R$  — френелевское отражение с поверхности стекла,  $M$  — коэффициент отражения зеркала.

На рис. 2 представлены данные зависимости. С увеличением дифракционной эффективности уменьшаются оптические потери на выход в резонаторе, что приводит к уменьшению порога генерации лазера. При этом доля мощности, уходящей из резонатора через детектор 1, возрастает, откуда следует, что наличие второго зеркала начинает играть более важную роль. В нашей конструкции резонатора (отсутствует второе зеркало) ~ 44% от общей выходной мощности попадает на детектор 1.

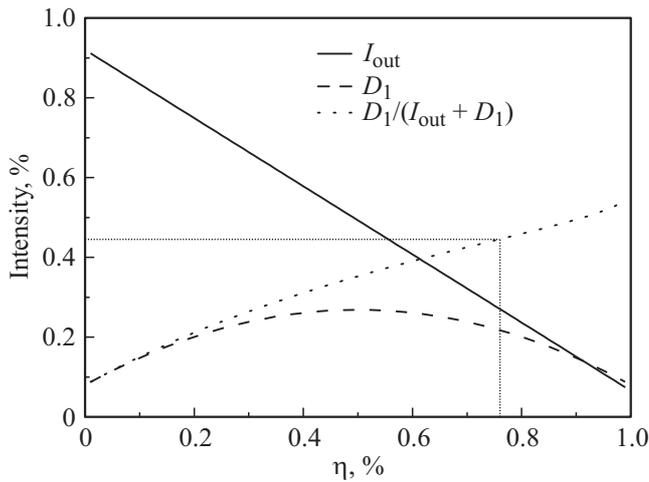


Рис. 2. Зависимость внешних оптических потерь резонатора от ДЭ голограммы.

Так как голограмма, используемая в работе, является объемной, то для описания ее свойств необходимо воспользоваться теорией связанных волн. Согласно данной теории, амплитуда дифрагированной волны определяется как

$$A = -i \frac{\exp(-i\xi) \sin(\xi^2 + \nu^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2/\nu^2)^{1/2}},$$

где  $\nu$  — совокупность параметров решетки,  $\xi$  — параметр расфазировки.

Параметр расфазировки определяет отличие угла и длины волны считывания от расчетных центральных значений, соответствующих данной решетке согласно условию Брэгга. С учетом того что в нашей схеме угол падения считывающего голограмму излучения фиксирован оптической схемой, параметр расфазировки есть

$$\xi = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{Br}} \operatorname{tg} \theta \left( \frac{2\pi n}{\lambda_{Br}} \right) t \sin \theta,$$

где  $\Delta\lambda$  — отклонение от центральной длины волны считывания,  $\lambda_{Br}$  — длина волны считывания,  $\theta$  — угол Брэгга,  $t$  — эффективная толщина голограммы,  $n$  — показатель преломления.

Очевидно, что с увеличением  $\xi$  значение амплитуды дифрагированной волны будет падать, т. е. такая решетка обладает спектральной селективностью. При установке решетки в резонатор мы получаем селекцию продольных мод, так как дифрагировать и соответственно оставаться в резонаторе будет лишь излучение определенных длин волн, отвечающих условию Брэгга. В нашем случае селективность решетки работает дважды, тем самым усиливая эффект. При первой дифракции на пути к зеркалу через решетку проходит излучение с шириной  $\Delta\lambda$  в диапазоне углов  $\delta$ . На обратном проходе данный набор длин волн уже не будет удовлетворять условию Брэгга, так как после отражения на зеркале угол падения на решетку изменится на  $2\delta$ . Таким образом, повышается

селекционирующая способность брэгговской решетки, что наблюдается в эксперименте.

#### 4. Результаты

Юстировка оптической схемы, представленной на рис. 1, осуществлялась по спектру генерации, измеряемому на детекторе 1. Получаемые спектральные характеристики лазера сопоставлялись с контуром спектральной селективности объемной брэгговской решетки и собственным спектром Фабри–Перо полупроводникового лазера. На рис. 3 представлены характерные спектры полупроводниковых лазеров с различными конструкциями резонатора, полученные в непрерывном режиме работы при токе инжекции, в 10 раз превышающем пороговый. Видно, что ширина спектра уменьшилась с 6 до 0.5 нм. На рис. 4 представлен расчетный контур

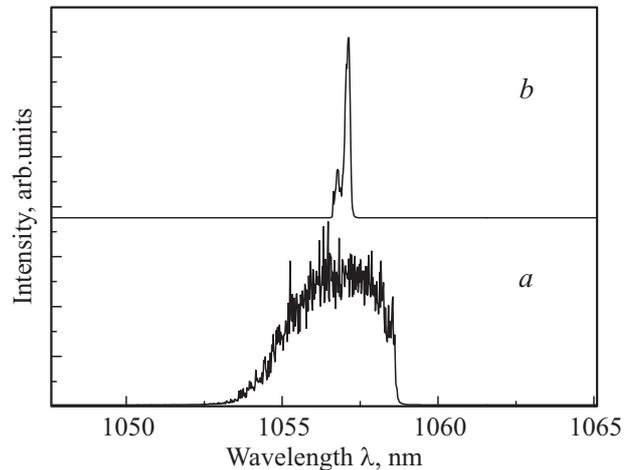


Рис. 3. Спектры генерации полупроводникового лазера с резонатором Фабри–Перо (а), с внешним резонатором с объемной брэгговской решеткой (б).

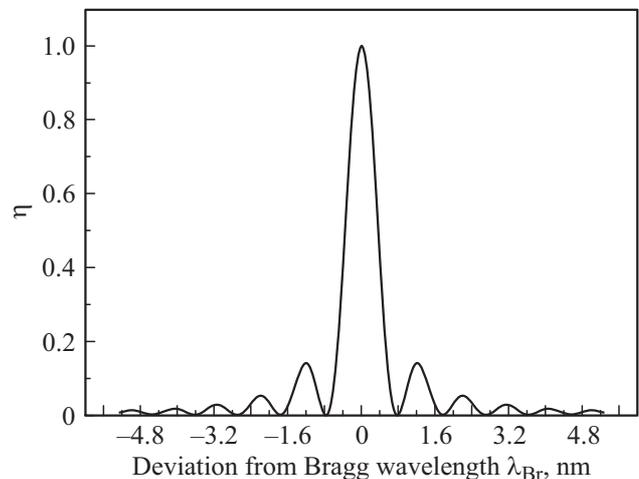


Рис. 4. Контур спектральной селективности используемой голограммы.

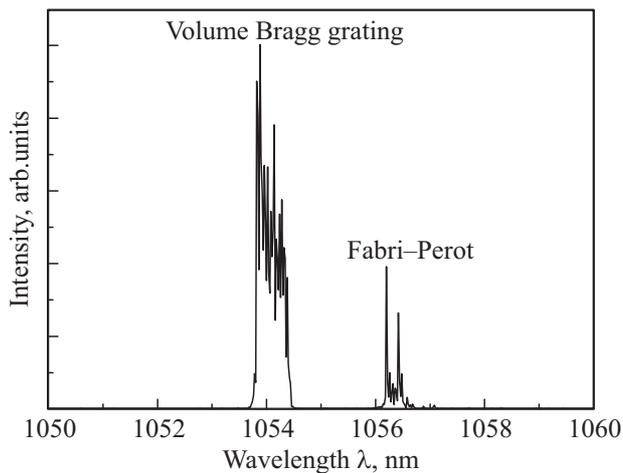


Рис. 5. Конкурирующие модовые структуры собственного резонатора и внешнего резонатора лазера.

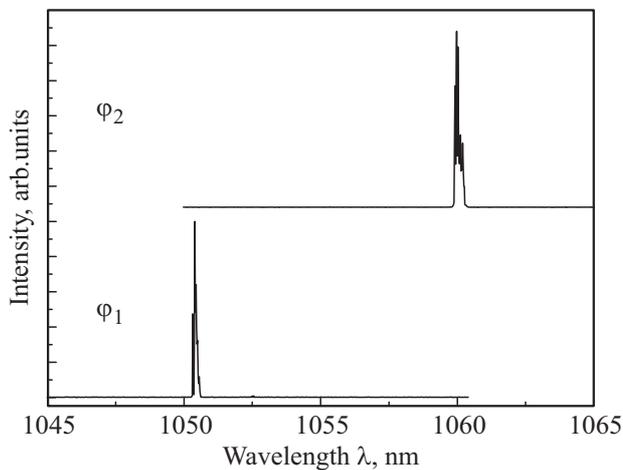


Рис. 6. Спектры лазера с внешним резонатором при различных углах падения излучения на объемную брэгговскую решетку  $\varphi_1 = 30.2^\circ$ ,  $\varphi_2 = 31.2^\circ$ .

спектральной селективности решетки. Он показывает, как убывает дифракционная эффективность решетки при отклонении длины волны падающего излучения от  $\lambda_{\text{Бр}}$ . Как видно из рис. 4, его ширина составляет 1.3 нм. Таким образом, расположение объемной брэгговской решетки внутри резонатора повышает ее спектральную селективность более чем в 2 раза.

Выходная оптическая мощность лазера с внешним резонатором, измеряемая детектором 2, составила  $P = 2$  Вт. Основной причиной ограничения выходной мощности является рассогласование спектра усиления активной области полупроводникового лазера и контура спектральной селективности брэгговской решетки. Увеличение тока инжекции ведет к разогреву лазерной гетероструктуры, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны квантово-размерной активной области лазера, что в свою очередь ведет к смещению спектра усиления в длинноволновую область. Данная особен-

ность проявляется в снижении модального усиления в лазере на длине волны  $\lambda_{\text{Бр}}$ , соответствующей условию Брэгга. Таким образом, при высоких уровнях инжекции тока происходит выравнивание пороговых условий для мод резонаторов Фабри–Перо и внешнего, что проявляется в спектре в виде двух полос генерации (рис. 5).

Также экспериментально наблюдалось, что спектр генерации лазера с внешним резонатором обладает тонкой структурой. Расстояния между пиками в спектре соответствуют длине лазерного чипа, что говорит о наличии суперпозиции от действия двух резонаторов. Для снижения данного паразитного эффекта необходимо достичь более высокой степени просветления выходной грани лазерного чипа ( $R < 10^{-3}$ ). Просветление всех оптических элементов и передней грани лазерного чипа увеличит плотность порогового тока для мод резонатора Фабри–Перо, что позволит увеличить рабочий диапазон токов инжекции для режима работы лазера на длине волны Брэгга.

Большая ширина спектра усиления активной области позволяет перестраивать спектр генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором путем изменения угла падения излучения на решетку. Поворот решетки обуславливает изменение условия Брэгга. В наших образцах был получен диапазон перестройки  $\sim 10$  нм (рис. 6) при углах поворота решетки в пределах  $1^\circ$  от центрального значения. При дальнейшем повороте объемной брэгговской решетки снижение модального усиления на длине волны Брэгга приводило к появлению конкурентных мод Фабри–Перо аналогично случаю, представленному на рис. 5. Перестройка длины волны генерации лазера приводила к снижению выходной оптической мощности, детектируемой в канале 2, не более чем на 30%. Данные результаты говорят о том, что дифракционная эффективность решетки остается стабильной в диапазоне перестройки. Таким образом, применение во внешнем резонаторе объемной брэгговской решетки на ФТР стекле позволяет получить лазер с плавно перестраиваемой в широких пределах длиной волны.

## 5. Заключение

В результате работы получена генерация с использованием внешнего резонатора, в котором селекция продольных мод лазерного диода осуществлялась с помощью голографической объемной брэгговской решетки на фото-термо-рефрактивном стекле. В результате селекции мод исходный спектр лазерного диода шириной в 6 нм был сужен до  $5 \text{ \AA}$ . Полученные спектры обладали тонкой структурой, соответствующей продольным модам лазерного чипа. Показано, что установка голограммы внутрь резонатора увеличивает селектирующую способность в несколько раз. Данная конструкция резонатора позволила плавно перестраивать длину волны генерации в диапазоне 10 нм без существенной потери мощности. Выходная оптическая мощность составила

2 Вт при условии наличия канала внешних оптических потерь на детекторе 1. Ограничение мощностных характеристик лазера обусловлено рассогласованием спектра усиления активной области лазерного диода с контуром спектральной селективности объемной брэгговской решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 11.1227.2014/К.

## Список литературы

- [1] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Z.I. Alferov. *Electron. Lett.* **40** (22), 1413 (2004).
- [2] И.С. Тарасов. *Квант. электрон.*, **40**, 661 (2010).
- [3] P. Crump, G. Erbert, H. Wenzel, C. Frevert, C.M. Schultz, K.-H. Hasler, R. Staske, B. Sumpf, A. Maaßdorf, F. Bugge, S. Knigge, G. Tränkle. *IEEE J. Select. Topics. Quant. Electron.*, **19** (4), 1 501 211 (2013).
- [4] O.M. Efimov, L.B. Glebov, L.N. Glebova, K.A. Richardson, V.I. Smirnov. *Appl. Optics*, **38** (4), 619 (1999).
- [5] G.B. Venus, A. Sevian, V.I. Smirnov, L.B. Glebov. *Proc. SPIE*, **5711**, 166 (2005).
- [6] 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).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Spectra narrowing of high-power laser diode by a volume Bragg grating in photo-thermo-refractive glass

S.A. Ivanov\*, N.V. Nikonorov\*, A.I. Ignat'ev\*,  
V.V. Zolotarev<sup>+</sup>, Ya.V. Lubyanskiy<sup>+</sup>,  
N.A. Pikhtin<sup>†‡</sup>, I.S. Tarasov<sup>+</sup>

\* ITMO University,  
197101 St. Petersburg, Russia

<sup>+</sup> Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>†‡</sup> Saint-Petersburg State University,  
199034 St. Petersburg, Russia

**Abstract** In this work we represent study of spectral properties of a high-power laser diode with external cavity. External cavity provides longitudinal mode selection by mean of holographic volume Bragg grating on photo-thermo-refractive glass. As a result, narrowing of initial spectra with width of 6 nm up to 5 Å was achieved. Observations show fine structure of obtained emission spectra. This fine structure corresponds to the chip natural frequencies. Their quantity falls within the width of spectral selectivity of the grating. It was shown that application of the grating inside the cavity increase its selectivity up to 2–3 times of magnitude. Also the tunability of such system in 10 nm range was demonstrated.