

УДК 535.417.2

## МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Е. А. Воцинский, В. С. Горелик

*Представлены результаты по созданию одночастотного полупроводникового лазера с внешним резонатором на основе волоконной брэгговской решетки (одномерного фотонного кристалла), сформированной в одномодовом волоконном световоде. Получена стабильная одночастотная генерация на длине волны 977 нм с полушириной спектра 0.2 нм. При этом достигнута выходная мощность полупроводникового лазера 350 мВт. Исследована температурная зависимость параметров генерации.*

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, волоконная брэгговская решетка, лазер, резонатор.

Одномерные фотонные кристаллы – материалы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном из пространственных направлений. Период такого изменения обычно сравним с длиной волны видимого излучения. Одномерные фотонные кристаллы также называют распределёнными брэгговскими отражателями (РБО).

РБО характеризуется узкой полосой отражения. Это обуславливает широкое применение таких отражателей в оптической технике (фильтры, встроенные в оптические волокна отражатели [2], сенсоры [3, 4] и т. д.) и использование РБО в качестве зеркал резонатора полупроводниковых лазеров [5, 6]. При этом коэффициент отражения превышает коэффициент отражения зеркал, полученных путём скола торцов полупроводникового лазера. Ранее в лазерах с РБО был реализован одночастотный режим работы и получена высокая выходная мощность в широком диапазоне температур [7]. Цель данной работы состояла в исследовании возможности повышения монохроматичности полупроводникового лазерного диода с волоконным выходом за счет введения в состав его резонатора волоконной брэгговской решетки.

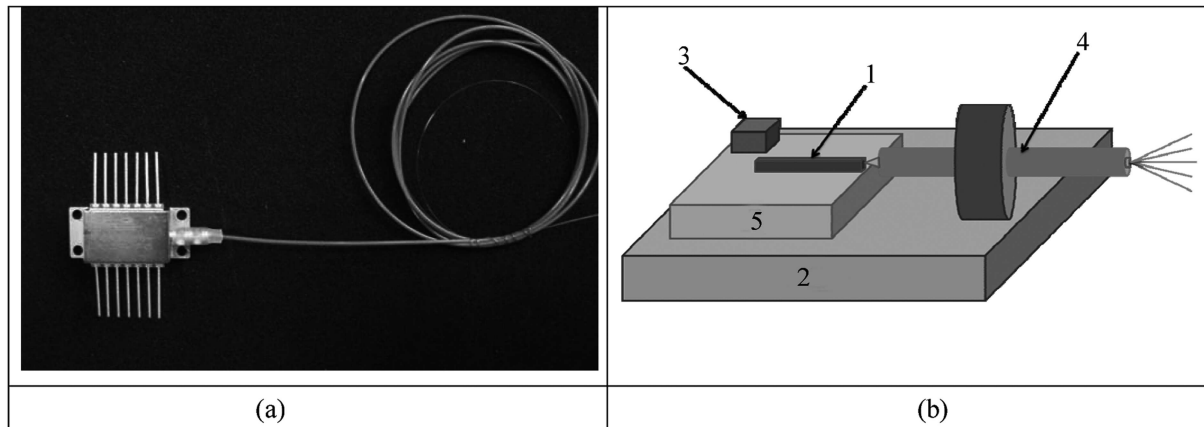


Рис. 1: Полупроводниковый лазерный диод PLD-970 с волоконным выходом в корпусе "Butterfly"; (a) фотография модуля; (b) общий вид устройства: 1 – полупроводниковая гетероструктура, 2 – элемент Пельтье, 3 – измеритель температуры, 4 – одномодовое волокно, 5 – подложка.

*Методика эксперимента.* Объектом исследований являлся лазерный диод PLD-970 (см. рис. 1(a)), расчетная длина волны генерации которого при комнатной температуре составляет 970 нм. Такие диоды применяются для накачки волоконных эрбиевых усилителей в телекоммуникациях.

В корпусе диода присутствовали несколько элементов: лазерный диод 1, модуль Пельтье 2 и термистор 3 (рис. 1(b)). Элемент Пельтье был необходим для регулировки и стабилизации температуры полупроводниковой гетероструктуры.

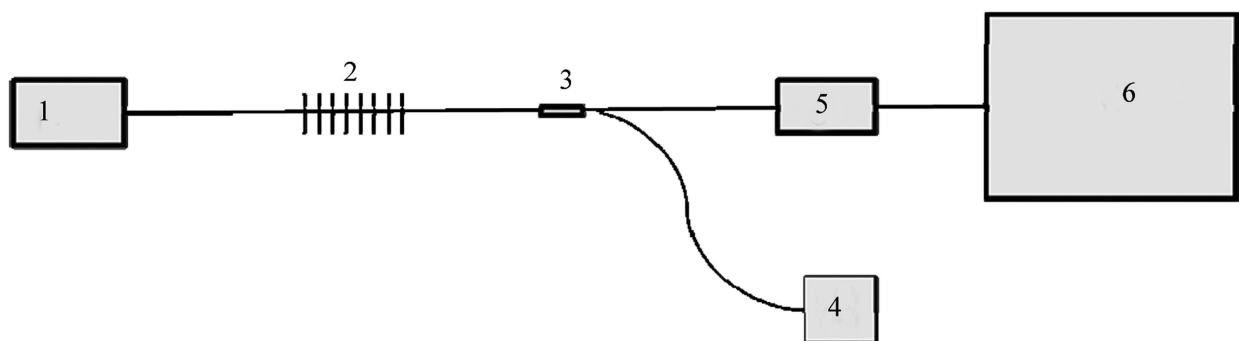


Рис. 2: Схема измерений: 1 – лазерный диод, 2 – волоконная брэгговская решетка, 3 – волоконный ответвитель 1%, 4 – фотоприемник, 5 – аттенюатор мощности, 6 – оптический спектроанализатор.

Для исследования характеристик диода были созданы печатная плата с микроконтроллером и волоконный блок для укладки оптической волоконной части измерительного стенда. Микроконтроллер использовался для управления параметрами диода и измерения мощности на фотоприемнике. Схема измерений показана на рис. 2.

К выходному волокну лазерного диода 1 на расстоянии около метра, приваривалась волоконная брэгговская решетка (ВБР) 2. Излучение с лазерного диода делилось волоконным ответвителем 3. При этом 1% мощности излучения полупроводникового лазерного диода подавался на фотодиод 4, а остальной сигнал через перестраиваемый аттенюатор 5 заводился на оптический спектроанализатор 6 для снятия спектральных характеристик. Аттенюатор был необходим для снижения мощности излучения ( $\sim 100$  мВт) до 10 мВт, так как максимально возможная входная мощность в спектроанализатор Anritsu MS9710C не более 20 мВт. Разрешение спектроанализатора составляло 0.05 нм.

Данные с фотоприемника обрабатывались микроконтроллером. Для снятия ваттамперной характеристики лазерного диода была создана программа, в соответствии с которой микроконтроллер увеличивал ток лазерного диода с заданным шагом и измерял оптическую мощность, приходящую на фотодиод. Обработанные данные выводились в виде графика на монитор и сохранялись в цифровом виде.

*Экспериментальные результаты.* Регулировка температуры гетероструктуры позволяла изменять положение максимума интенсивности люминесценции полупроводникового диода. При увеличении температуры максимум люминесценции сдвигался в сторону больших длин волн. Мы зафиксировали температуру на уровне 40 °С, чтобы максимум интенсивности люминесценции был ближе к пику поглощения  $\text{Er}^{3+}$  в области 980 нм.

На рис. 3 представлены спектры лазерного диода, полученные при нескольких значениях тока, протекающего через диод. Как видно из этого рисунка, в спектре излучения диода наблюдалось несколько полос. Такой эффект возникал вследствие наличия “положительной” обратной связи при отражении излучения на сварках волокна и оптических разъемах. Максимумы интенсивности находились в области 975–977 нм. С ростом тока через диод общая ширина спектра возрастала, а положение максимумов незначительно изменялось. Использование диода с изменяющимся спектром излучения для накачки эрбиевого усилителя является неэффективным, вследствие довольно узкого пика поглощения ионов эрбия в кварцевом световоде и достаточно сильной зависимости спектра усиления от длины волны накачки. Для реализации одномодового режима работы

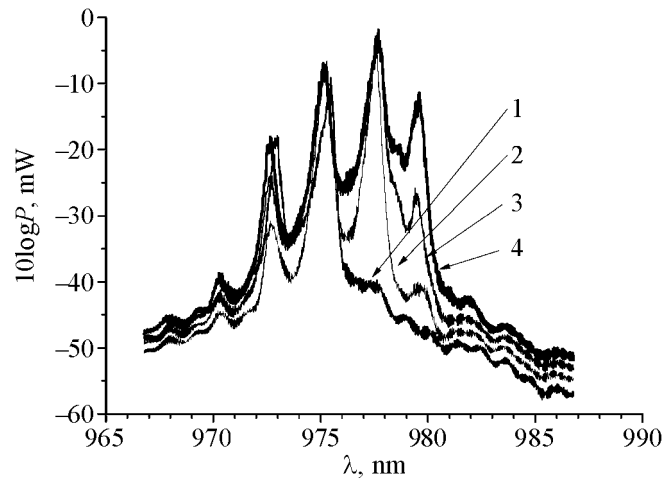


Рис. 3: Спектральные характеристики диода PLD-970 в зависимости от тока через лазерный диод: 1 – 200 мА, 2 – 500 мА, 3 – 800 мА, 4 – 1100 мА.

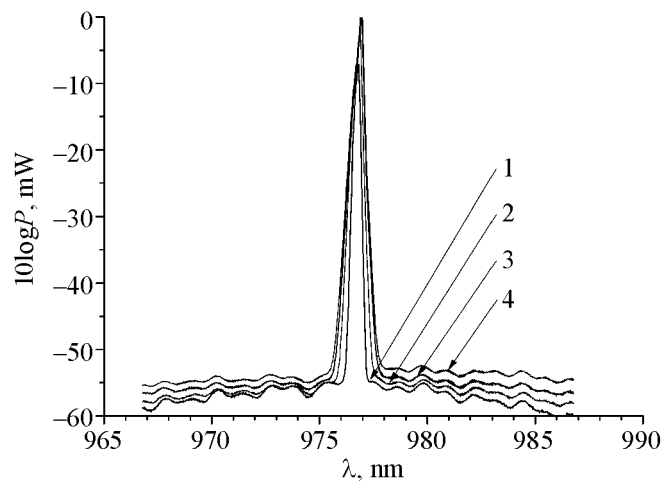


Рис. 4: Спектральные характеристики диода PLD-970 с внешней брэгговской решеткой, в зависимости от тока, протекающего через диод: 1 – 200 мА, 2 – 500 мА, 3 – 800 мА, 4 – 1100 мА.

лазерного диода было необходимо монохроматизировать и заставить излучение лазерного диода. Для решения такой задачи в состав лазерного резонатора был введен спектральный селектор – одномерный фотонный кристалл (ВБР). В качестве ВБР нами была использована решетка с параметрами:  $\lambda_c = 976.8$  нм,  $\Delta\lambda = 0.67$  нм,  $T = -0.53$  дБ. Здесь  $\lambda_c$  – центральная длина волны,  $\Delta\lambda$  – спектральная ширина спектра отражения (пропускания) решетки,  $T$  – коэффициент пропускания.

На рис. 4 представлены спектральные характеристики диода с ВБР при различных значениях тока. Как видно из этого рисунка, при использовании ВБР наблюдается резкое сужение спектра генерации, излучение диода сосредоточено в одном пике с полушириной 0.2 нм. Отметим, что точное измерение ширины линии возможно только прибором с высоким разрешением. Разрешение нашего спектроанализатора составляло 0.05 нм, что позволяло измерять спектральные линии с полушириной не менее 0.1–0.2 нм. Поэтому ширина линии лазера измерялась на более низком уровне –20 дБ.

В таблице 1 приведены параметры линии генерации: спектральное положение пика  $\lambda_c$  и ширина линии  $\Delta\lambda$  по уровню –20 дБ при различных токах через лазерный диод. С ростом тока накачки линия уширяется от 0.5 до 0.8 нм и сдвигается на 0.2 нм в сторону больших длин волн.

Т а б л и ц а 1

*Спектральное положение  $\lambda_c$  и ширина линии генерации  $\Delta\lambda$   
при различных токах через полупроводниковый диод*

Ток через диод, мА	$\lambda_c$ , нм	$\Delta\lambda$ по уровню –20 дБ, нм
200	976.78	0.5
500	976.88	0.66
800	976.92	0.74
1100	976.94	0.78

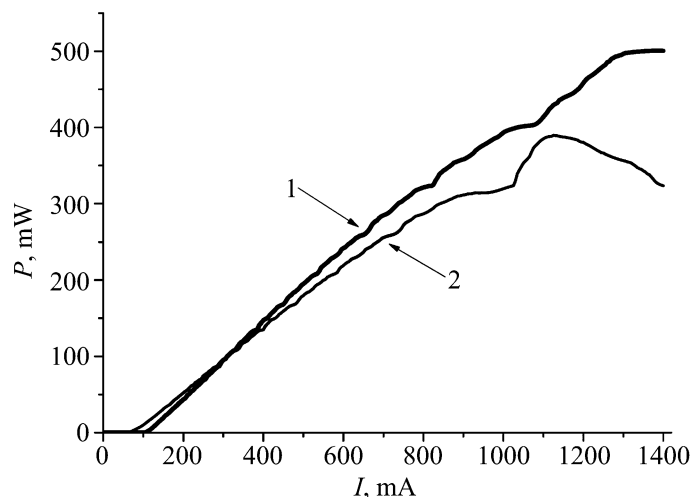


Рис. 5: Ватт-амперная характеристика диода (1) и диода с брэгговской решеткой (2).

На рис. 5 приведены ватт-амперные характеристики диода в начальном состоянии и диода с брэгговской решеткой. Из графиков видно, что порог лазерной генерации с брэгговской решеткой равен 70 мА, а без неё – около 110 мА. При использовании ВБР изменился наклон ватт-амперной характеристики: она стала более пологой. Судя по ватт-амперной характеристике, линейный режим работы лазерного диода с решеткой соответствует диапазону 70–800 мА. При любых токах через диод в эксперименте наблюдалась только одна линия генерации, соответствующая установленной брэгговской решетке.

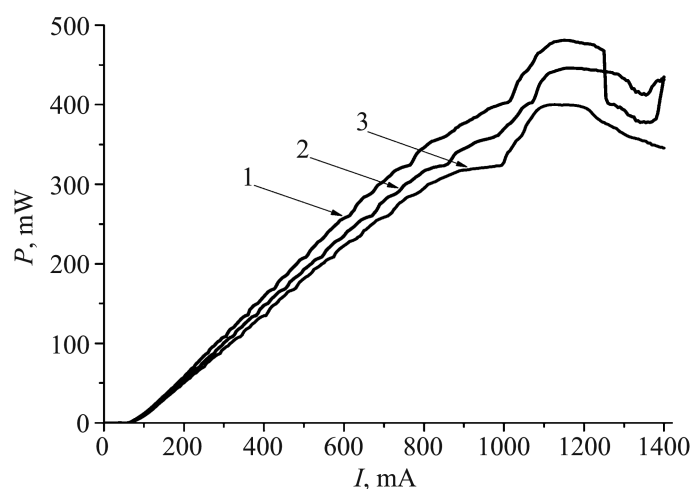


Рис. 6: Ватт-амперная характеристика диода с брэгговской решеткой для температур: 1 – при 20 °C, 2 – при 30 °C, 3 – при 40 °C.

На рис. 6 представлены три ватт-амперные характеристики для диода с брэгговской решеткой при температурах гетероструктуры 20, 30 и 40 °C. Из графиков видно, что с ростом температуры мощность диода снижается. Разница по мощности при температурах 20 °C и 40 °C доходит до 50 мВт. Таким образом, для получения более высокой мощности необходимы низкие температуры.

На рис. 7 приведены спектральные характеристики диода накачки при фиксированном токе  $I = 400$  мА и различных температурах. Из графиков видно, что наилучшая спектральная характеристика получается при температуре 40 °C. При температуре 20 °C слева от линии генерации присутствует спектр спонтанной люминесценции. Судя по положению пика люминесценции при 20 °C, используемая полупроводниковая гетероструктура оптимально подходит для генерации на длине волны 970 нм, что соответствует названию диода PLD-970. Для монохроматизации лазера на этой длине

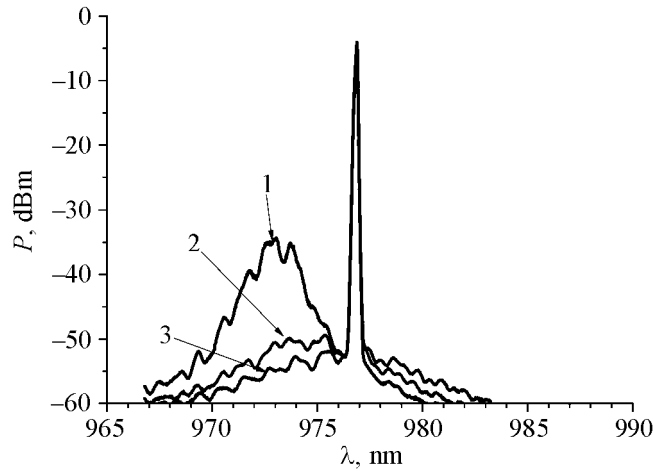


Рис. 7: Спектральные характеристики диода PLD-970 с внешней решеткой в зависимости от температуры структуры: 1 – при 20 °C, 2 – при 30 °C, 3 – при 40 °C.

волны необходимо использовать брэгговскую решетку с максимумом отражения в области 970 нм.

*Теоретическое обоснование.* Условие Брэгга первого порядка для волоконной брэгговской синусоидальной решетки имеет вид [8]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (1)$$

Здесь  $\Lambda$  – период решетки,  $\lambda_B$  – брэгговская длина волны решетки, а  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления сердцевинки волокна. В нашем случае:  $\lambda_B = 976.8$  нм и  $n_{\text{eff}} = 1.544$ , тогда  $\Lambda = 316$  нм.

ВБР связывает основную моду световода с той же модой, распространяющейся в противоположном направлении. Для однородной решетки длины  $L$  коэффициент отражения  $R$  на резонансной длине волны  $\lambda_B$  выражается как [9]:

$$R = \text{th}^2(kL). \quad (2)$$

Здесь  $k = \pi\Delta n_{\text{mod}}\eta/\lambda_B$  – коэффициент связи,  $\Delta n_{\text{mod}}$  – амплитуда синусоидальной модуляции показателя преломления,  $\eta$  – часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине световода.

Спектральная ширина резонанса однородной решетки на полувысоте может быть выражена следующим приближенным соотношением [9]:

$$\Delta\lambda_B \approx 2\lambda_B a \sqrt{\left(\frac{\eta\Delta n_{\text{mod}}}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $a$  – параметр порядка единицы для глубоких решеток с коэффициентом отражения  $R \sim 1$  и около 0.5 для решеток небольшой глубины. Как видно из (4), спектральная ширина зависит не только от длины решетки и ее периода, но также и от амплитуды модуляции показателя преломления  $\Delta n_{\text{mod}}$ . Для однородной ВБР длиной  $L = 5$  мм и амплитудой модуляции наведенного показателя преломления  $\Delta n_{\text{mod}} = 5 \cdot 10^{-5}$  спектральная ширина составляет 0.2 нм.

Резонансная длина волны брэгговских решеток  $\lambda_B$  зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений. Эта зависимость описывается следующим уравнением [9]:

$$\Delta\lambda_{BG} \approx 2n\lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n^2}{2} \right) \cdot [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[ \alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right). \quad (4)$$

Здесь  $\Delta T$  – изменение температуры,  $\varepsilon$  – приложенное механическое напряжение,  $P_{ij}$  – коэффициенты Поккельса упругооптического тензора,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла,  $n$  – эффективный показатель преломления основной моды. Это соотношение дает типичные значения сдвига  $\lambda_B$  в зависимости от температуры  $\sim 0.01$  нм/К и от относительного удлинения световода  $\sim 10^3 \times \Delta L/L$ .

*Заключение.* Таким образом, в работе развита методика монохроматизации лазерного диода PLD-970 с помощью одномерного фотонного кристалла в виде ВБР, позволяющая сузить линию генерации до 0.2 нм. К выходному волокну лазерного диода приваривалась полупрозрачная ВБР, что позволило получить стабильную одномодовую генерацию на длине волны, соответствующей максимуму отражения решетки (977 нм). Применение ВБР в качестве зеркала резонатора в десятки раз сужает линию генерации и позволяет избавиться от второстепенных пиков генерации. При этом все излучение полупроводникового лазерного диода сосредоточено в одной линии генерации. Потери мощности из-за ВБР составляют 10%.

Обнаружено, что ватт-амперная характеристика лазерного диода с решеткой линейна до тока 800 мА. При этом выходная мощность излучения достигает 300 мВт. Установлено, что для генерации на длине волны 977 нм оптимальная температура гетероструктуры составляет 40 °С. При температуре 20 °С можно получить более мощный диод (выигрыш до 50 мВт), при этом необходимо использовать брэгговскую решетку с максимумом отражения в области 970 нм.



Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (гос. Контракт № 16.513.11.3116), а также РФФИ (гранты № 10-02-00293, 10-02-90042, 10-02-90404, 11-02-00164 и 11-02-12092).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. П. Дураев, *Фотоника* **3**, 24 (2007).
- [2] H. J. Lee, *Appl. Opt.* **27**(6), 1199 (1988).
- [3] G. J. Veldhuis, J. H. Berends, R. G. Heideman, and P. V. Lambeck, *Pure Appl. Opt.* № 7, 23 (1998).
- [4] D. R. Hjelme, L. Bjerkan, S. Neegard, J. S. Rambech, and J. V. Aarsnes, *Appl. Opt.* **36**(1), 328 (1997).
- [5] О. Е. Наний, *Lightwave Russian Edition*, No. 2, 48 (2003).
- [6] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, et al., *IEEE Quantum Electronics* **39**(10), 1314 (2003).
- [7] В. П. Дураев, Е. Т. Неделин, Т. П. Недобывайло и др., *Квантовая электроника* **31**(6), 529 (2001).
- [8] А. Ярив, П. Юх, *Оптические волны в кристаллах* (Мир, Москва, 1987).
- [9] Н. В. Никоноров, А. И. Сидоров, *Материалы и технологии волоконной оптики* (ИТМО, Санкт-Петербург, 2009).

Поступила в редакцию 20 марта 2012 г.