

Дискретно перестраиваемый одночастотный диодный лазер с волоконными брэгговскими решетками

В.П.Дураев, Г.Б.Лутц, Е.Т.Неделин, М.А.Сумароков, О.И.Медведков, С.А.Васильев

Представлены результаты работ по созданию одночастотных дискретно перестраиваемых по длине волны полупроводниковых лазеров с внешним резонатором на основе волоконных брэгговских решеток, записанных в одномодовом волоконном световоде. Показано, в частности, что при использовании полупроводниковых лазеров с внешним резонатором, выходным зеркалом которого является суперпозиция нескольких решеток с различными резонансными длинами волн, возможна лазерная генерация как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн за счет изменения тока инжекции и/или температуры активной области лазерного диода.

Ключевые слова: волоконная решетка, одночастотный лазер.

Использование внешнего резонатора в схемах полупроводниковых лазеров позволяет значительно расширить круг их применений в системах измерения физических величин, для передачи информации, в спектроскопии и т. д. С развитием технологии изготовления волоконных брэгговских решеток показателя преломления такие решетки стали активно применяться в качестве зеркал, формирующих внешний резонатор. Некоторые варианты стабилизации длины волны полупроводниковых лазеров, получения одночастотной генерации и режима синхронизации мод рассмотрены в обзоре [1] и цитируемой в нем литературе.

Ранее в работах [2–4] нами были описаны конструкции и характеристики одночастотных полупроводниковых лазеров с длинами волн генерации $\lambda = 1060, 1300$ и $1530–1560$ нм, в которых использовались гибридные резонаторы с одной волоконной брэгговской решеткой. В [3] была продемонстрирована возможность плавной перестройки длины волны генерации в пределах пика отражения решетки за счет изменения тока инжекции.

В ряде работ было показано, что с использованием специальных решеточных структур, имеющих набор пиков в спектре отражения, возможна дискретная перестройка длины волны генерации полупроводникового лазера в относительно широком спектральном диапазоне (~ 20 нм), что дает возможность применять эти лазеры в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов [5, 6]. Авторы этих работ формировали внешний резонатор с помощью серии идентичных волоконных брэгговских решеток, записанных с определенным пространственным периодом (sampled Bragg grating).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования дискретной перестройки дли-

ны волны полупроводникового лазера с внешним резонатором, одним из зеркал которого является брэгговская решетка, сформированная путем последовательной записи нескольких решеток с различными периодами в одном и том же месте волоконного световода (superimposed Bragg grating [7, 8]). Такой вариант формирования внешнего резонатора позволяет минимизировать общую длину лазера и, следовательно, сделать его максимально компактным.

Принцип дискретной перестройки длины волны лазерной генерации основан на эффекте Вернье. Область свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо, образованного торцами полупроводникового кристалла (чипа), несколько отличается от частотного интервала между максимумами отражения брэгговской решетки. Лазерная генерация осуществляется на длине волны, на которой происходит совпадение пика отражения решетки с одной из мод собственного резонатора кристалла. При изменении температуры активной области кристалла под действием тока накачки или с помощью элемента Пельтье указанное совпадение происходит на другой длине волны [5].

Волоконные брэгговские решетки, использовавшиеся в настоящей работе, были записаны излучением второй гармоники аргонового лазера (длина волны $\lambda = 244$ нм) в схеме с интерферометром Ллойда [9]. Длина участков световодов, на которых записана каждая решетка, составляла 5–6 мм.

На рис.1,а показана конструкция реализованного нами дискретно перестраиваемого лазерного диода ЛД1 с двумя пространственно разнесенными решетками, имеющими максимумы отражения на длинах волн $\lambda_{Br}^{(1)} = 1063.3$ нм и $\lambda_{Br}^{(2)} = 1064.2$ нм. В конструкции использовался лазерный чип длиной 1000 мкм с максимумом усиления на $\lambda = 1064$ нм. Задняя грань кристалла имела отражающее покрытие с коэффициентом отражения $\sim 80\%$. На переднюю грань было нанесено просветляющее покрытие, что обеспечивало коэффициент отражения от передней грани $\sim 0.5\%$. Две брэгговские решетки были записаны в сердцевине одномодового световода с диаметром сердцевины 5.6 мкм и диаметром оболочки

В.П.Дураев, Г.Б.Лутц, Е.Т.Неделин, М.А.Сумароков. НПП «Нолатех», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

О.И.Медведков, С.А.Васильев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sav@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 29 января 2007 г., после доработки – 21 августа 2007 г.

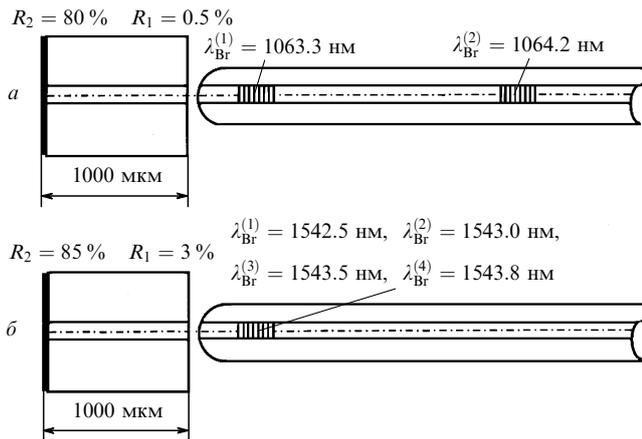


Рис.1. Конструкция перестраиваемых лазерных диодов ЛД1 (а) и ЛД2 (б) с двумя и четырьмя волоконными брэгговскими решетками соответственно; $R_{1,2}$ – коэффициенты отражения от граней кристалла.

125 мкм. Расстояние между ними составляло ~ 0.5 м. Для увеличения коэффициента ввода излучения на торце световода была сформирована микролинза с радиусом кривизны ~ 10 мкм. Одна из брэгговских решеток располагалась в непосредственной близости (3–5 мм) от передней просветленной грани лазерного диода. Обе решетки имели коэффициент отражения в максимумах $\sim 30\%$ и спектральную ширину пиков отражения ~ 0.35 нм. Лазерная генерация происходила на длине волны пика отражения той решетки, для которой добротность резонатора при данных температуре и токе больше (резонансная длина волны решетки лучше совпадает с линией собственного резонатора лазерного чипа).

На рис.1,б представлена схема лазерного диода ЛД2 с внешним резонатором, образованным четырьмя брэгговскими решетками, имеющими различные резонансные длины волн, причем решетки были записаны путем последовательного УФ облучения одного и того же участка волоконного световода. Как и в работе [7], при записи новой структуры для уже записанных решеток наблюдались уменьшение коэффициента отражения и сдвиг резонансной длины волны в длинноволновую часть спектра. Спектр пропускания записанной с учетом этого обстоятельства системы решеток представлен на рис.2. Видно, что коэффициент отражения в каждом из четырех

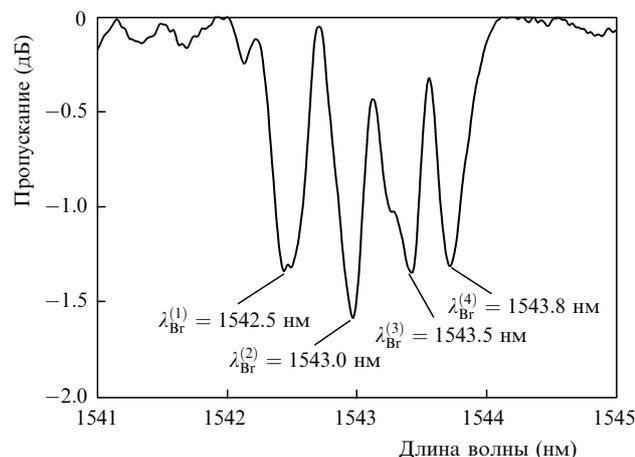


Рис.2. Спектр пропускания суперпозиции четырех волоконных брэгговских решеток.

пиков составил $25\% - 30\%$. Спектральная ширина пиков отражения была равна ~ 0.3 нм, а расстояние между ними составляло ~ 0.4 нм.

В данном случае был использован лазерный чип длиной 1000 мкм, имеющий коэффициенты отражения от его граней 3% и 85% . Как и в первом случае, световод с записанными решетками был состыкован с лазерным чипом с помощью микролинзы, сформированной на конце световода, причем решетки располагались на расстоянии 3–5 мм от торца диода.

На рис.3 показана токовая перестройка длины волны излучения лазера ЛД1. Пороговое значение тока накачки I_{th} составило 64 мА. При температуре металлического основания, на которое припаяны чип и датчик температуры, 25°C и токе накачки $I_p = 80$ мА длина волны излучения такого лазера составляла 1063.35 нм (рис.3,а), что хорошо соответствует длине волны пика отражения коротковолновой решетки $\lambda_{Br}^{(1)}$. Мощность излучения на выходе из световода с решетками при этом была равна 2 мВт.

При токе $I_p = 100$ мА (рис.3,б) в спектре излучения присутствуют одновременно две длины волны, соответствующие пикам отражения обеих решеток, а суммарная мощность излучения на выходе из световода составила 3 мВт. При токе $I_p = 125$ мА (рис.3,в) лазер генерировал излучение мощностью 5 мВт на $\lambda = 1064.22$ нм.

Таким образом, при изменении тока I_p происходит токовая перестройка длины волны лазера ЛД1 ($\lambda = 1064$ нм) с внешним резонатором с двумя брэгговскими решетками в одном волоконном световоде. На обеих длинах волн генерации ширина линии излучения была меньше ширины аппаратной функции использовавшегося нами спектроанализатора (0.08 нм), что подтверждает одночастотность выходного излучения [4]. Под одночастотным в данном случае подразумевается излучение лазера в одной продольной моде собственного резонатора кристалла. Подавление боковых мод в спектре генерации лазера составляло примерно -40 дБ.

На рис.4 показана токовая перестройка длины волны лазера ЛД2 ($\lambda = 1542$ нм), для которого пороговый ток $I_{th} = 54$ мА. Как следует из рис.2 и 4,а, все резонансы со-

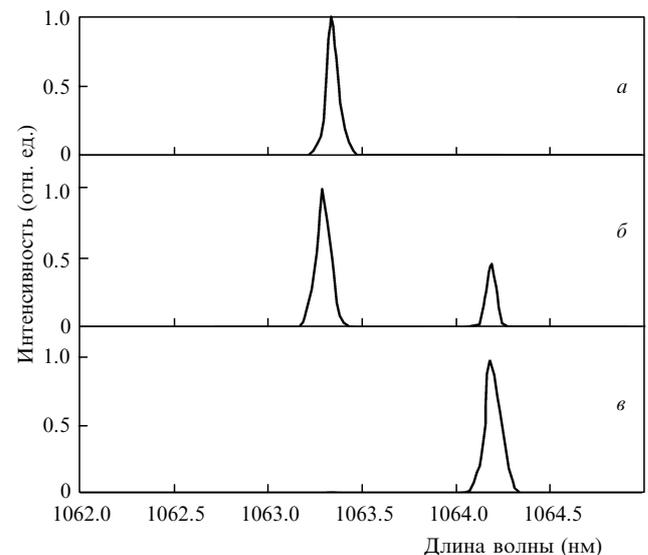


Рис.3. Токовая перестройка длины волны излучения лазера ЛД1 с двумя волоконными брэгговскими решетками при токах инжекции $I_p = 80$ (а), 100 (б) и 125 мА (в).

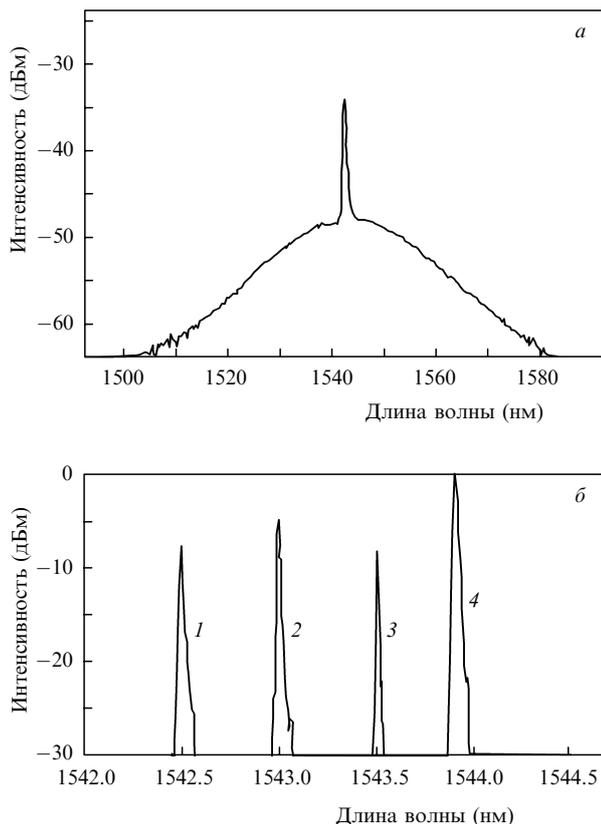


Рис.4. Спектр люминесценции лазера ЛД2 при пороговом токе $I_{th} = 54$ мА (а) и спектры излучения лазера (б) при токах инжекции $I_p = 73$ (1), 100 (2), 56 (3) и 153 мА (4).

ставной решетки находятся близко к максимуму полосы усиления лазера. При температуре основания чипа 25°C и определенных значениях тока накачки диода можно было получить лазерную генерацию в одной из продольных мод кристалла, совпадающей с соответствующим максимумом отражения брэгговской решетки (рис.4, б), со следующими параметрами:

- 1) $\lambda = 1542.5$ нм при $I_p = 73$ мА, $P_{out} = 1.2$ мВт,
- 2) $\lambda = 1543.0$ нм при $I_p = 100$ мА, $P_{out} = 3.2$ мВт,
- 3) $\lambda = 1543.5$ нм при $I_p = 56$ мА, $P_{out} = 0.5$ мВт,
- 4) $\lambda = 1543.8$ нм при $I_p = 153$ мА, $P_{out} = 6.4$ мВт.

Таким образом, продемонстрирована токовая дискретная перестройка длины волны генерации гибридного лазера ЛД2 ($\lambda = 1542$ нм) с четырьмя решетками, записанными на одном участке одномодового волоконного световода.

Отметим в заключение, что аналогичная описанной перестройка длины волны генерации лазеров происходит и в том случае, если с помощью элемента Пельтье изменить температуру лазерного кристалла, оставляя ток накачки неизменным.

Итак, в настоящей работе рассмотрены конструкции и приведены результаты исследований, а также основные характеристики дискретной перестройки длины волны генерации одночастотных полупроводниковых лазеров с внешними резонаторами, образованными несколькими брэгговскими решетками, в том числе (впервые) решетками, записанными на одном и том же участке волоконного световода.

1. Archambault J.-L., Grubb S.G. *J. Lightwave Technol.*, **15** (8), 1378 (1997).
2. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Шишков В.В. *Квантовая электроника*, **25** (4), 301 (1998).
3. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Климов К.И. *Квантовая электроника*, **31** (6), 529 (2001).
4. Беловолов М.И., Дианов Е.М., Дураев В.П., Гладышев А.В., Неделин Е.Т., Сумароков М.А. *Препринт ИОФАН №6* (М., 2002).
5. Bergonzo A. et al. *Proc. Conf. ECOC/IOOC'2003* (Rimini, 2003, Vol. 4, pp 888, 889).
6. Bergonzo A., Jacquet J., De Gaudemaris D., Landreau J., Plais A., Vuong A., Sillard H., Fillion T., Durand O., Krol H., Accard A., Riant I. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (8), 1144 (2003).
7. Othonos A., Lee X., Measures R.M. *Electron. Lett.*, **30**, 1972 (1994).
8. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Norwood, Mass.: Artech House, 1999).
9. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. *Препринт НЦВО ИОФ РАН №6* (М., 2004).