

Полупроводниковый лазер с двулучепреломляющим внешним резонатором для информационных систем со спектральным уплотнением

В.Д.Паранин, С.А.Матюнин, К.Н.Тукмаков

Исследован спектр излучения полупроводникового лазера с внешним двулучепреломляющим резонатором Жира–Турнуа. Установлено наличие двух основных генерируемых мод, соответствующих резонансам обыкновенной и необыкновенной волн. Показана высокая энергетическая эффективность управления спектром излучения без потерь на спектральную фильтрацию. Указано на возможность применения эффекта двухмодовой генерации в оптических системах связи со спектральным уплотнением.

Ключевые слова: оптические системы связи, полупроводниковый лазер, внешний резонатор, двулучепреломляющий кристалл, электрооптика.

1. Введение

Спектральная (частотная) модуляция оптического излучения используется для создания волоконно-оптических систем, устойчивых к амплитудным помехам. Модуляция может быть внутренней, например за счет изменения тока накачки лазера, или внешней, реализуемой на основе управляемых спектральных фильтров. Среди внешних элементов модуляции наиболее распространены решетки Брэгга в объемном [1], волоконно-оптическом [2] или интегрально-оптическом [3] исполнении, а также дифракционные решетки и интерференционные фильтры [4, 5]. Спектр отражения/пропускания таких элементов может изменяться различными способами – путем механического растяжения, поворота, изменения температуры, приложения электрического поля. Известными недостатками элементов являются невысокая энергетическая эффективность, обусловленная спектральной фильтрацией широкополосного излучения, низкое быстродействие при механическом или температурном воздействии.

Большинство используемых внешних резонаторов (ВР) являются оптически однородными и не обладают выраженными поляризационными свойствами. Однако с помощью эффекта двулучепреломления ВР можно перестроить спектр источника излучения, используя резонанс обыкновенной или необыкновенной волны. При соответствующем подборе оптической толщины резонатора становится возможным спектральное кодирование информации соседними модами полупроводникового лазера (межмодовое расстояние около 0.1 нм) или в пределах спектра излучения (0.5–2 нм). Для реализации такого спектрально-модового кодирования резонатор лазера и внешний резонатор должны быть оптически связаны. При этом дости-

гается автоматическая стабилизация спектра излучения за счет положительной обратной связи. Одновременно сохраняется высокая энергетическая эффективность генерации лазера, а потери, связанные со спектральной фильтрацией, практически исключаются.

Целью настоящей работы являлось исследование возможностей управления спектром излучения полупроводникового лазера с использованием внешнего двулучепреломляющего резонатора Жира–Турнуа.

2. Экспериментальное исследование

Внешним резонатором служили плоскопараллельные кристаллы х- и z-срезов конгруэнтного ниобата лития толщиной 0.21 мм. На одну поверхность кристаллических образцов наносилось глухое зеркало из алюминия, на вторую – 19-слойное интерференционное зеркало $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ с расчетным коэффициентом отражения 98.5% в диапазоне 635–640 нм. Диаметры зеркал составляли 3 мм при размерах поверхностей образцов 5×5 мм. Источником излучения служил красный коллимированный полупроводниковый лазер KLM-A635-2-5 (расходимость пучка не более 0.1–0.2 мрад, диаметр пучка 8 мм). Исследование спектров производилось с помощью узкополосного спектрометра SHR с разрешением 6–7 пм и регистрируемой полосой 4–5 нм в диапазоне 630–650 нм. Схема стенда приведена на рис. 1.

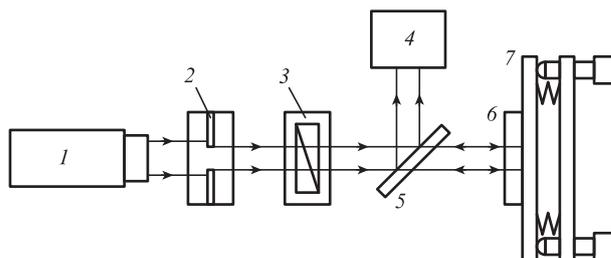


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – диафрагма; 3 – поляризатор в поворотной оправе; 4 – спектрометр; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – внешний резонатор; 7 – угловая оправа.

В.Д.Паранин, С.А.Матюнин, К.Н.Тукмаков. Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П.Королева (национальный исследовательский университет), Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34, корп. За; e-mail: vparanin@mail.ru, s.a.matyunin@yandex.ru, tukmakov.k@gmail.com

Поступила в редакцию 6 мая 2013 г.

Настройка схемы осуществлялась установлением угла нормального падения излучения на резонатор и угла поворота поляризатора. Грубо настройка нормального падения производилась по совпадению отраженного излучения с коллимирующей линзой полупроводникового лазера, точно – по сдвигу спектра лазера в коротковолновую область. Угол поворота поляризатора регулировался поворотной оправой с ценой деления 2° , а положение внешнего резонатора – двумерной угловой оправой с чувствительностью 0.001° .

В первом эксперименте исследовался характер изменения спектра излучения при вариации оптической толщины внешнего резонатора. Резонатором служила плоскопараллельная пластина толщиной 0.21 мм конгруэнтного ниобата лития z-среза. Изменение угла падения на внешний резонатор приводило только к увеличению оптической толщины без заметного изменения коэффициента отражения интерференционного зеркала. Результаты измерений приведены на рис.2.

На рис.2 генерируемые моды лазера частично перекрываются, что свидетельствует о непрерывном характере смещения спектра излучения. При изменении угла падения на внешний резонатор от 0 до 0.02° основная мода непрерывно смещается от $\lambda_1 = 638.636$ нм до $\lambda_2 = 638.664$ нм. Если угол падения превышал 0.02° , связь резонаторов нарушалась, а спектр излучения оставался в крайнем правом положении с $\lambda_2 = 638.664$ нм.

Во втором эксперименте исследовались резонансы обыкновенной и необыкновенной волн, возбуждаемых последовательно. В качестве резонатора использовалась двулучепреломляющая пластина конгруэнтного ниобата лития x-среза с показателями преломления $n_o = 2.286$ и $n_e = 2.2$ [6]. Возбуждение обыкновенной или необыкновенной волны осуществлялось установкой поляризатора в положение 0 или 90° соответственно. Результаты измерений приведены на рис.3.

Моды излучения на рис.3 частично перекрываются, что подтверждает непрерывный характер изменения спектра, в наибольшей степени определяемый свойствами внешнего резонатора. Двулучепреломление внешнего резонатора делает возможным смещение основной генерируемой моды при повороте поляризатора от 0 (параллельно обыкновенной оси) до 90° (параллельно необыкновенной оси). Соответственно этим положениям поляризатора наблюдается генерация на длине волны $\lambda_{\max} = 638.489$ нм или $\lambda_{\max} = 638.621$ нм. Полученные экспериментальные данные качественно совпадают с результатами работы [3], где ис-

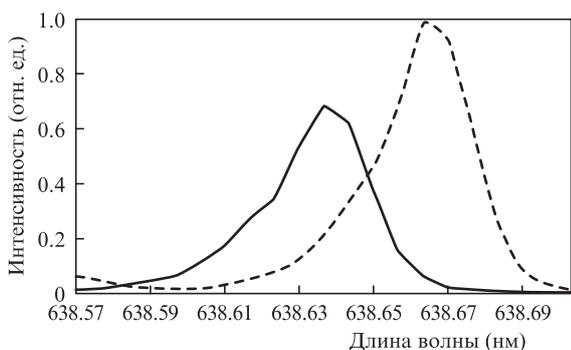


Рис.2. Сдвиг генерируемой моды при повороте внешнего резонатора: сплошная кривая – нормальное падение, штриховая кривая – падение под углом 0.02° .

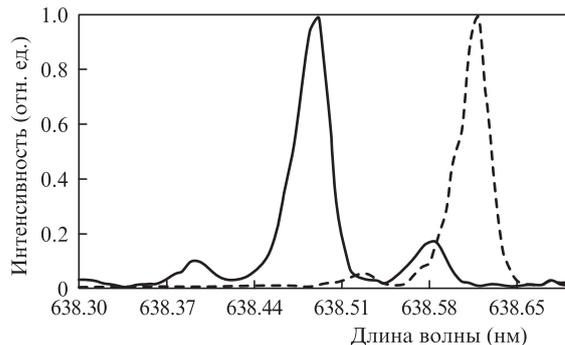


Рис.3. Спектр излучения полупроводникового лазера с двулучепреломляющим внешним резонатором: сплошная кривая – резонанс необыкновенной волны, штриховая кривая – резонанс обыкновенной волны.

пользовался двулучепреломляющий каналный волновод в ниобате лития с резонатором – решеткой Брэгга.

Для быстрого, единицы наносекунд, поворота плоскости поляризации в системах передачи информации может использоваться электрооптическая полуволновая пластинка. Если излучение лазера поляризовано, такой пластиной может являться внешний резонатор, изготовленный из электрооптического материала.

В третьем эксперименте исследовался резонанс обыкновенной и необыкновенной волн, возбуждаемых одновременно. Для этого использовался внешний резонатор из конгруэнтного ниобата лития x-среза, а поляризатор устанавливался под углом 45° к необыкновенной оси. Результаты исследования представлены на рис.4.

Одновременное возбуждение обыкновенной и необыкновенной волн приводит к генерации двух основных мод, сравнимых по интенсивности. При этом число неосновных мод увеличивается с $6-7$ до $12-13$, что, по-видимому, обусловлено положительной обратной связью, создаваемой внешним резонатором в нескольких участках спектра. Это делает возможным проявление резонансной структуры внешнего резонатора, наложенной на спектр излучения полупроводникового лазера. В зависимости от толщины внешнего резонатора взаимное расположение спектральных максимумов обыкновенной и необыкновенной волн может различаться. Однако расстояние между основными модами, обусловленными двулучепреломлением внешнего резонатора, подчиняется соотношению

$$\Delta\lambda_{\text{main}} \leq \text{FSR} + \Delta\lambda_{\text{mod}}/2, \quad (1)$$

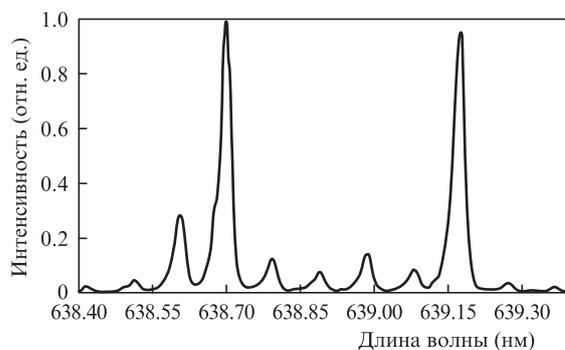


Рис.4. Генерация двух основных мод полупроводниковым лазером с внешним двулучепреломляющим резонатором и одновременным возбуждением обыкновенной и необыкновенной волн.

где FSR – свободный спектральный диапазон внешнего резонатора, равный 0.43 и 0.44 нм для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно; $\Delta\lambda_{\text{mod}}$ – расстояние между соседними модами резонатора лазера, равное 0.095–0.098 нм для лазера KLM-A635-2-5. Возможный сдвиг основной моды $\Delta\lambda_{\text{mod}}/2$ связан с расположением собственных мод внутреннего резонатора полупроводникового лазера. Для выполнения соотношения (1) необходимо, чтобы ширина спектра отражения внешнего резонатора была сравнима с межмодовым расстоянием внутреннего резонатора. Как следует из данных рис.4, $\Delta\lambda_{\text{main}} = 0.47$ нм, что согласуется с оценкой 0.39–0.48 нм, следующей из (1) при среднем FSR = 0.435 нм. Сделанная оценка справедлива и для данных рис.3. Влияние внешнего резонатора на спектр излучения подтверждается низкой интенсивностью центральных мод, расположенных на рис.4 между основными. Следует отметить, что для четкого наблюдения спектральных пиков внешнего резонатора они должны быть достаточно узкими, не более $(1-2)\Delta\lambda_{\text{mod}}$. В ином случае будут одновременно возбуждаться несколько мод вблизи резонансного пика или будет наблюдаться случайная генерация одной моды из числа нескольких в окрестности резонанса. Для коэффициента отражения 98.5%, расходимости излучения 0.1–0.2 мрад и клиновидности ниобата лития не более 10'' ширина пика на полувывоте не превышает 0.15 нм, что удовлетворяет условиям наблюдения.

Для однозначного выбора генерирующей моды при передаче информации необходимо, чтобы величина FSR внешнего резонатора была больше ширины спектра излучения лазера: $\text{FSR} > (1.5-2)\Delta\lambda_{\text{las}}$. Для красного лазера типа KLM-A635-2-5 измеренная ширина спектра $\Delta\lambda_{\text{las}} = 0.7-0.8$ нм при $\Delta\lambda_{\text{mod}} = 0.095-0.098$ нм. Для ИК лазера с центральной длиной волны в диапазоне 840–850 нм ширина спектра $\Delta\lambda_{\text{las}} = 1.5-2$ нм. Это означает, что толщина внешнего резонатора на основе ниобата лития не должна превышать 60–80 мкм для красного лазера и 40–50 мкм для ближнего инфракрасного.

3. Заключение

Экспериментально доказано, что использование двухлучепреломляющего внешнего резонатора, оптически связанного с резонатором полупроводникового лазера, позволяет осуществить генерацию на двух основных модах. Спектральное положение этих мод определяется резонансом обыкновенной и необыкновенной волн во внешнем резонаторе. Генерируемые моды находятся в пределах спектра излучения лазера и являются преобладающими и стабильными во времени. Это обеспечивает высокую эффективность спектрального кодирования и позволяет применять лазеры с двухлучепреломляющим резонатором для решения следующих задач:

- спектральное уплотнение на основе существующей техники со спектральной стабилизацией излучения внешним резонатором за счет положительной обратной связи;
- спектральное кодирование и скрытая передача информации на соседних модах или в пределах спектра излучения полупроводникового лазера;
- создание аналоговых высокочувствительных оптических датчиков химического состава жидких и газовых смесей с чувствительным элементом в виде внешнего резонатора.

1. Petrov M.P., Petrov V.M., Chamrai A.V., Denz C., Tshudi T. *Proc. 27th Europ. Conf. Opt. Commun., ECOC'01* (Amsterdam, 2001, Th.F.3.4, p. 628.).
2. Madsen C.K., Zhao J.H. *Optical Filter Design and Analysis: a Signal Processing Approach* (New York: Wiley Intersci. Publ., 1999).
3. Шамрай А.В., Козлов А.С., Ильичев И.В., Петров М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 734 (2005).
4. Шереметьев А.Г. *Когерентная волоконно-оптическая связь* (М.: Радио и связь, 1991).
5. Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. *Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справочник* (М.: Радио и связь, 1993).
6. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах* (М.: Мир, 1987).