

УДК 621.373.826

## СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИМ ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ

© 2014 А.М. Уденеев, В.Д. Паранин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

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. Показана возможность применения эффекта двухмодовой генерации в оптических системах связи со сверхплотным спектральным уплотнением.

*Электрооптические системы связи, полупроводниковый лазер, внешний резонатор, двулучепреломляющий кристалл, электрооптика.*

### Введение

Спектральная (частотная) модуляция оптического излучения используется для создания волоконно-оптических систем, устойчивых к амплитудным помехам. Модуляция может быть внутренней, например, за счёт изменения тока накачки лазера, или внешней, реализуемой на основе управляемых спектральных фильтров. Среди внешних элементов модуляции наиболее распространены решётки Брэгга в объёмном [1], волоконно-оптическом [2] или интегрально-оптическом исполнении [3], дифракционные решётки и интерференционные фильтры [4, 5]. Спектр отражения / пропускания таких элементов может изменяться различными способами: механическим растяжением, поворотом, изменением температуры, приложением электрического поля. Их известными недостатками являются невысокая энергетическая эффективность, обусловленная спектральной фильтрацией широкополосного излучения, низкое быстродействие механического и температурного воздействия.

Большинство используемых внешних резонаторов (ВР) являются оптически однородными и не обладают выраженными поляризационными свойствами. Однако использование эффекта двулучепреломления ВР позволяет перестроить спектр источника излучения, используя резонанс обыкновенной или необыкновенной волны. При соответствующем подборе оптической толщины ре-

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

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

### Экспериментальное исследование

В качестве внешнего резонатора использовались плоскопараллельные кристаллы  $x$ -среза и  $z$ -среза конгруэнтного ниобата лития толщиной 0,21 мм. На одну поверхность кристаллов наносилось глухое зеркало из алюминия, на вторую – 19-слойное интерференционное зеркало  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$  с расчётным коэффициентом отражения 98,5% в диапазоне 635...640 нм. Диаметры зеркал были равны 3 мм при размерах поверхности кристалла 5x5 мм. Ис-

точником излучения служил красный коллимированный полупроводниковый лазер KLM-A635-2-5 с расходимостью луча не более 0,1...0,2 мрад и диаметром пучка 8 мм. Исследование спектров производилась на

измерителе длины волны - узкополосном спектрометре SHR с разрешением 6...7 пм и регистрируемой полосой 4...5 нм в диапазоне 630...650 нм. Схема стенда приведена на рис. 1.

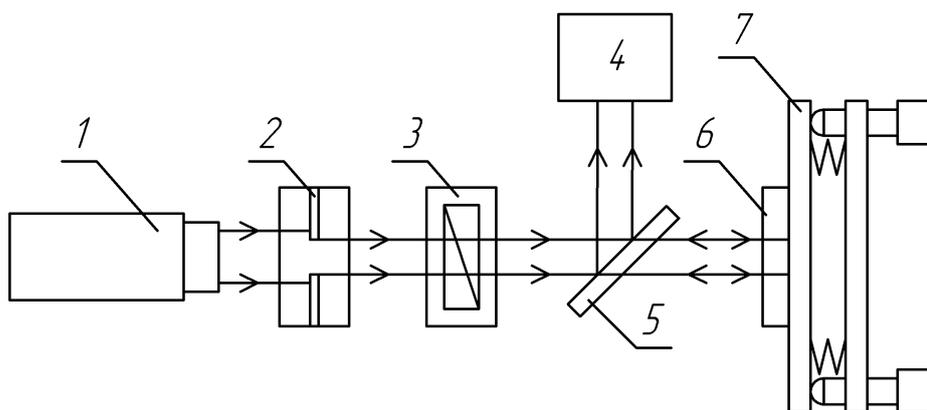


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – диафрагма, 3 – поляризатор в поворотной оправе, 4 – спектрометр, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – внешний резонатор, 7 – угловая оправа

Настройка схемы включала установку нормального падения излучения на резонатор и установку угла поворота поляризатора. Настройка нормали производилась грубо по совпадению отражённого излучения с коллимирующей линзой полупроводникового лазера, точно – по сдвигу спектра в коротковолновую область. Угол поворота поляризатора контролировался поворотной оправой с ценой деления  $2^\circ$ , внешнего резонатора – двумерной угловой оправой с чувствительностью  $0,001^\circ$ .

В первом эксперименте исследовался характер изменения спектра излучения при изменении оптической толщины внешнего резонатора. Резонатором служила плоскопараллельная пластина z-среза конгруэнтного ниобата лития толщиной 0,21 мм. 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.

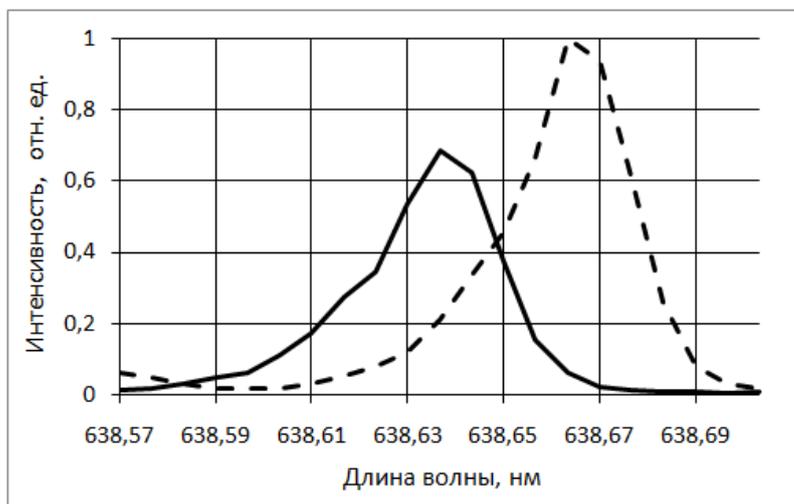


Рис. 2. Сдвиг генерируемой моды при повороте внешнего резонатора: сплошная линия – нормальное падение, штриховая линия – падение под углом  $0,02^\circ$

Генерируемые моды лазера на рис. 2 частично перекрываются, что свидетельствует о непрерывном характере смещения спектра излучения. При повороте внешнего резонатора от  $0^\circ$  до  $0,02^\circ$  основная мода смещается от  $\lambda_1=638,636$  нм до  $\lambda_2=638,664$  нм. Для всех промежуточных углов наблюдались непрерывно изменяемые положения генерируемой моды. При увеличении угла поворота резонатора более  $0,02^\circ$  связь резонаторов нарушалась, а спектр излучения оставался в крайнем правом положении

$$\lambda_2=638,664 \text{ нм.}$$

Во втором эксперименте исследовались резонансы обыкновенной и необыкновенной волн, возбуждаемых последовательно. В качестве резонатора использовался двулучепреломляющий  $x$ -срез конгруэнтного ниобата лития с показателями преломления  $n_o=2,286$  и  $n_e=2,2$  [6]. Возбуждение обыкновенной или необыкновенной волны осуществлялось установкой поляризатора в положение  $0^\circ$  или  $90^\circ$ , соответственно. Результаты измерений приведены на рис. 3.

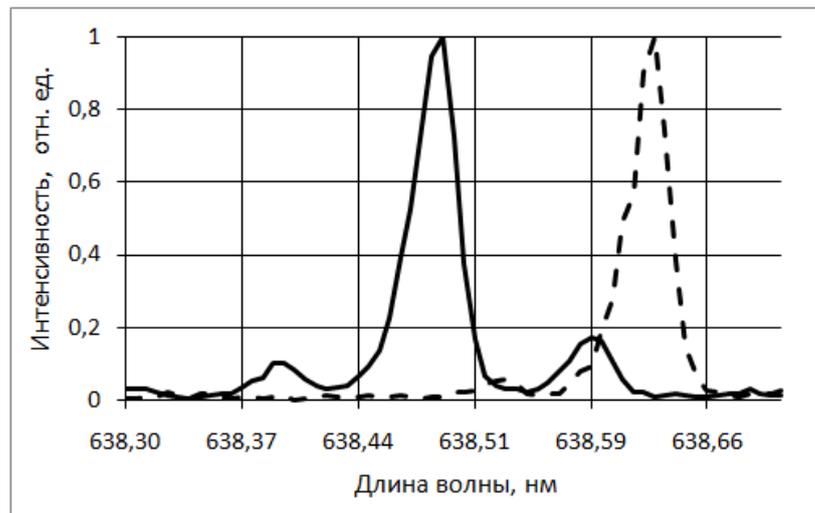


Рис. 3. Спектр излучения полупроводникового лазера с двулучепреломляющим внешним резонатором: сплошная линия – резонанс необыкновенной волны, штриховая линия – резонанс обыкновенной волны

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  $0^\circ$  (параллельно обыкновенной оси) до  $90^\circ$  (параллельно необыкновенной оси). Соответственно этим положениям поляризатора наблюдается генерация на длине волны  $\lambda_{\text{макс}}=638,489$  нм или  $\lambda_{\text{макс}}=638,621$  нм. Полученные экспериментальные данные качественно совпадают с результатами работы [3], где использовался двулучепреломляющий каналный волновод в ниобате лития с резонатором – решёткой Брэгга.

Для быстрого, в единицы наносекунд, поворота плоскости поляризации в системах передачи информации может использоваться электрооптическая полуволновая пластинка.

Если излучение лазера поляризовано, то 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  $x$ -среза конгруэнтного ниобата лития, а поляризатор устанавливался под углом  $45^\circ$  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. По-видимому, это обусловлено сильной 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 отличаться.

Однако расстояние  $\Delta\lambda_{осн}$  между основными модами, обусловленными двулучепреломлением внешнего резонатора, не превосходит:

$$\Delta\lambda_{осн} \leq FSR + \Delta\lambda_{мод} / 2, \quad (1)$$

где FSR – свободный спектральный диапазон внешнего резонатора, равный 0,43 и 0,44 нм для обыкновенной и необыкновенной волн

соответственно;  $\Delta\lambda_{мод}$  – расстояние между соседними модами резонатора лазера, равное 0,095...0,098 нм для лазера KLM-A635-2-5.

Возможный сдвиг основной моды  $\pm\Delta\lambda_{мод}/2$  связан с расположением собственных мод внутреннего резонатора полупроводникового лазера. Для использования формулы (1) ширина спектра отражения внешнего резонатора должна быть сравнима с межмодовым расстоянием внутреннего резонатора. Из данных рис. 4 следует, что  $\Delta\lambda_{осн}=0,47$  нм. Это согласуется с оценкой 0,39..0,48 нм по выражению (1) при среднем FSR=0,435 нм. Сделанная оценка справедлива и для данных на рис.3.

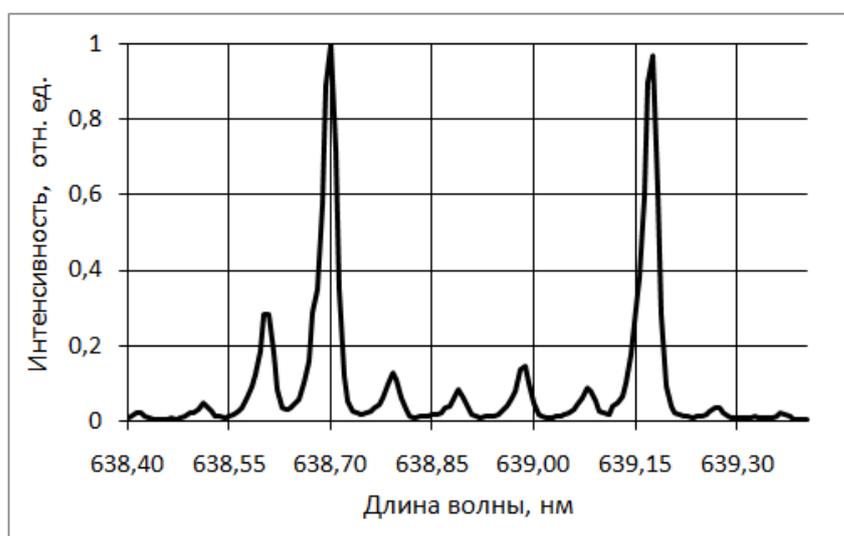


Рис. 4. Генерация двух основных мод полупроводниковым лазером с внешним двулучепреломляющим резонатором и возбуждением обыкновенной и необыкновенной волн

Влияние внешнего резонатора на спектр излучения подтверждается низкой интенсивностью центральных мод, расположенных между основными на рис. 4. Следует отметить, что для чёткого наблюдения спектральных пиков внешнего резонатора они должны быть достаточно узкими, не более  $(1...2) \cdot \Delta\lambda_{мод}$ . В ином случае будет 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 в 0,1-0,2 мрад и клиновидности ниобата лития не более 10 ширина пика (FWHM) не превосходит 0,15 нм, что удовлетворяет условиям наблюдения.

Для однозначного выбора генерирующей моды для передачи информации необходимо, чтобы расстояние между спектральными пиками внешнего резонатора (FSR) превосходило ширину спектра излучения лазера:  $FSR > (1,5...2) \Delta\lambda_{лаз}$ . Для красного лазера типа KLM-A635-2-5 измеренная ширина спектра составила  $\Delta\lambda_{лаз}=0,7...0,8$  нм при межмодовом расстоянии  $\Delta\lambda_{мод}=0,095...0,098$  нм. Для инфракрасного лазера с центральной длиной волны 840...850 нм ширина спектра составляет  $\Delta\lambda_{лаз}=1,5...2$  нм. Это означает, что толщина внешнего резонатора на основе ниобата лития не должна превосходить 60...80 мкм для красного лазера и 40...50 мкм для ближнего инфракрасного.

### Выводы

Экспериментально доказано, что использование двулучепреломляющего внешнего резонатора, оптически связанного с резонатором полупроводникового лазера, позволяет осуществить генерацию на двух основных модах. Спектральное положение этих мод определяется резонансом обыкновенной и необыкновенной волны 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 применить лазеры с двулучепре-

ломляющим резонатором для решения следующих задач:

- сверхплотное спектральное уплотнение на основе существующей техники с автоматической стабилизацией излучения внешним резонатором за счёт 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.

### Библиографический список

1. Petrov M.P., Petrov V.M., Chamrai A.V., Denz C., Tshudi T. Proc. 27<sup>th</sup> 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: Willey Interscience Publication, 1999.
3. Шамрай А.В., Козлов А.С., Ильичев И.В., Петров М.П. Квантовая электроника. 35. 734с. 2005.
4. Шереметьев, А.Г. Когерентная волоконно-оптическая связь. М.: Радио и связь, 1991, 192 с.
5. Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарфутдинов Р.М. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справочник. М.: Радио и связь, 1993, 264 с.
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах: пер. с англ. М.: Мир, 1987, 616 с.

### Информация об авторах

**Уденев Андрей Михайлович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, промышленная автоматизация, технология микроэлектроники.

**Паранин Вячеслав Дмитриевич**, ассистент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, промышленная автоматизация, технология микроэлектроники.

### SPECTRUM OF SEMICONDUCTOR LASER WITH AN EXTERNAL BIREFRINGENT RESONATOR

© 2014 A.M. Udeneev, V.D. Paranin

Samara State Aerospace University

The semiconductor laser radiation with the external birefringent resonator is investigated. Existence of two main generated spectral lines corresponding to resonances of ordinary and extraordinary waves is established. Effective control of radiation, without loss on a spectral filtration is shown. It is specified possibility of application of two-mode generation in optical communication systems with WDM.

*Communication systems, semiconductor laser, external resonator, birefringent crystal, electro-optics.*

## References

1. Petrov M.P., Petrov V.M., Chamrai A.V., Denz C., Tshudi T. Proc. 27<sup>th</sup> 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: Willey Interscience Publication, 1999.
3. Shamrai AV, Kozlov A.S, Il'ichev I.V, Petrov M.P. Quantum Electronics. 35. 734p. 2005.
4. Sheremet'ev A.G. Coherent fiber-optic communications /Radio and Communication, 1991, 192 p.
5. Grodno I.I., Mouradian A.G., Sharafutdinov R.M. Fiber-optic transmission systems and cables: Reference. M.: Radio and communication, 1993, 264 p.
6. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals: translate from English./New York: Wiley, 1987, 616 p.

## About the authors

**Udeneev Andrew Mikhaylovich**, student. E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: fiber-optic sensors, industry automation, technology of microelectronics.

**Paranin Vyacheslav Dmitrievich**, as-

sistant lecturer, Department of Design and Technology of Radio-Electronics Systems and Devices. E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru). Area of research: fiber-optic sensors, industry automation, technology of microelectronics.