

## Полупроводниковый лазер с кольцевым волоконным резонатором

В.П.Дураев, С.В.Медведев

*Представлены результаты исследований полупроводниковых лазеров с кольцевым резонатором на основе волоконного световода с сохранением поляризации. Рассмотрены принципы работы и приведены основные характеристики полупроводникового кольцевого лазера, в частности в одночастотном и многочастотном режимах генерации, а также рассмотрены области его применения.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый оптический усилитель, одномодовый световод, кольцевой резонатор.

Полупроводниковый кольцевой лазер (ПКЛ) представляет собой полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ), замкнутый кольцом оптического волокна, которое выступает в роли резонатора. Интерес к ПКЛ обусловлен разнообразием оптических явлений в полупроводниках, возможностью управления излучением таких лазеров простыми методами, а также относительной дешевизной изготовления. ПКЛ могут быть использованы в оптических линиях связи, в составе различных устройств полностью оптической обработки информации [1–5], в навигационных системах, в составе лазерного гироскопа [6–11], в качестве задающего генератора в ВЧ и СВЧ генераторах [12–14] и т. д.

Одним из важных отличий ПКЛ с волоконным резонатором от других лазеров является возможность встраивания в резонатор ПКЛ широкого набора оптических компонентов, что позволяет легко разрабатывать и создавать различные устройства на его основе. Такими компонентами могут быть волоконный ответвитель, оптический модулятор, волоконная брэгговская решетка, оптический изолятор, оптический циркулятор, эталон Фабри – Перо и многие другие. Благодаря наличию коммерческих компонентов с волоконными выходами оперативная установка в резонатор данных устройств не вызывает трудностей.

Волоконный резонатор ПКЛ может быть произвольной длины – от нескольких сантиметров до десятков и даже сотен километров. Последнее, в частности, позволяет создавать ПКЛ со сверхдлинными резонаторами, свойства которых заслуживают отдельного исследования. Типичная же длина резонатора ПКЛ составляет несколько метров, а межмодовый интервал – десятки мегагерц, что позволяет использовать ПКЛ в генераторах СВЧ излучения.

В отличие от линейных лазеров, в резонаторе которых генерируется стоячая волна, в ПКЛ может осуществляться режим бегущей волны. Причем одновременно могут

существовать две волны, распространяющиеся навстречу друг другу в резонаторе. Это свойство, в частности, позволяет использовать ПКЛ как основу для создания лазерного гироскопа с использованием эффекта Саньяка [6–11]. В случае двух встречно распространяющихся волн ПКЛ оказывается принципиально чувствительным к вращениям в плоскости резонатора. Это выражается в возникновении различных условий распространения для встречных волн в резонаторе и появлении фазового сдвига между ними, что может вызывать расщепление частот встречных волн, пропорциональное угловой скорости вращения.

Важной особенностью ПКЛ с волоконным резонатором является чувствительность лазера к изменениям поляризации излучения в процессе распространения по световоду, что обусловлено, в частности, поляризационной чувствительностью ПОУ. Благодаря этому свойству ПКЛ может быть использован в качестве сенсора поворота поляризации [15]. Также ПКЛ может широко применяться в качестве датчика благодаря большой чувствительности волоконного световода к различным возмущениям – температурным, механическим, магнитным и т. п. [16].

ПКЛ обладает широким набором режимов генерации. Это однонаправленный режим, который возникает при наличии невязности в резонаторе [17, 18], двунаправленный режим, а также режим генерации хаоса. Однонаправленный режим генерации в ПКЛ может быть бистабильным, что позволяет с помощью внешнего воздействия переключать направление генерации и управлять ее спектром [19, 20].

Очевидной и естественной особенностью ПКЛ, следующей из его конструкции, является волоконный вывод излучения через ответвитель. ПКЛ в зависимости от типа используемого волокна резонатора может работать как в многочастотном, так и в одночастотном режиме. Если в качестве резонатора применяется обычное одномодовое волокно, то ПКЛ работает в многочастотном режиме, а при использовании волокна с сохранением поляризации можно добиться одночастотной генерации лазера.

Целью настоящей работы являлось изучение характеристик ПКЛ с волоконным резонатором с сохранением поляризации.

В.П.Дураев, С.В.Медведев. ЗАО «Нолатех», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: smdvdv@gmail.com, nolatech@mail.ru

Поступила в редакцию 10 июня 2013 г.



Рис.1. Принципиальная схема ПКЛ.

Полупроводниковый кольцевой лазер и элементы его конструкции показаны на рис.1. ПКЛ состоит из полупроводникового оптического усилителя [21], сохраняющего поляризацию одномодового волокна, которое образует кольцо с активным элементом, оптического изолятора и ответвителя. Соединения между элементами выполнены с помощью оптических коннекторов FC/APC и розеток. Оптический изолятор обеспечивает однонаправленный режим генерации. Излучение ПКЛ выводится из резонатора через волоконный ответвитель с коэффициентом ответвления 50%.

Используемое волокно способно сохранять линейную поляризацию излучения, направленную вдоль одной из его осей (быстрой или медленной) с экстинкцией более 40 дБ. Сохранение поляризации в таком волокне обусловлено механическими напряжениями, вызванными наличием специальных стержней, которые приводят к возникновению двулучепреломления вдоль сердцевинки световода.

При размещении на концах световода коннекторов FC/APC необходимо совместить ключ коннектора с медленной осью волокна. Нами использовался пассивный метод ориентации волокна, использующий визуальный контроль позиции напрягающих элементов в его поперечном разрезе.

На рис.2 показана ватт-амперная характеристика ПКЛ. Пороговый ток генерации составил 70 мА. Мощность излучения достигала 12 мВт при токе накачки 190 мА. Поскольку кольцевой резонатор состоит из волокна с сохранением поляризации, то оно совместно с ПОУ образует интерференционно-поляризационный гребенчатый фильтр (фильтр Лию). Принцип его действия основан на

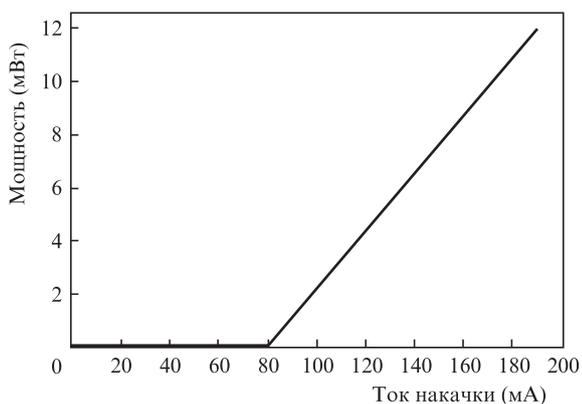


Рис.2. Ватт-амперная характеристика ПКЛ.

том, что свет, попав в такое волокно, распадается на две волны – обыкновенную и необыкновенную, плоскополяризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обе волны распространяются по световоду сонаправленно, но с разными фазовыми скоростями, поэтому после прохождения по волокну колебания в этих двух волнах приобретают разность фаз (а следовательно, и разность хода)

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)L,$$

где  $n_o$  и  $n_e$  – показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн, а  $L$  – длина волокна.

Вследствие взаимной перпендикулярности колебаний обыкновенная и необыкновенная волны не могут интерферировать между собой, поэтому получается свет, поляризованный эллиптически, и если такой свет направить через поляризатор, то он из каждой волны пропустит лишь те компоненты, которые поляризованы в одной плоскости, т.е. выделит из обеих когерентных волн колебания одного направления. Эти волны уже интерферируют между собой в зависимости от разности хода, полученной в волокне. Следовательно, интенсивность света будет зависеть от разности фаз, приобретенных в волокне обеими волнами. Роль поляризатора играет активный элемент ПОУ, усиливающий, в основном, только одну поляризацию.

Свободный спектральный интервал равен расстоянию между соседними максимумами пропускания фильтра:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L(n_e - n_o)}.$$

На рис.3 показан оптический спектр ПКЛ с длиной волоконного резонатора 1 м. При этом  $\Delta\lambda = 4.8$  нм и необходимое для генерации усиление обеспечивается только для одного максимума пропускания фильтра. Ширина линии излучения составляет 0.012 нм, что близко к разрешающей способности анализатора спектра.

При увеличении температуры ПОУ происходит смещение усиления в длинноволновую область. При температуре 35°C на спектре можно наблюдать две линии излучения, соответствующие двум соседним максимумам пропускания фильтра (рис.4,а). При дальнейшем увеличении температуры необходимое усиление достигается только для второго максимума (рис.4,б).

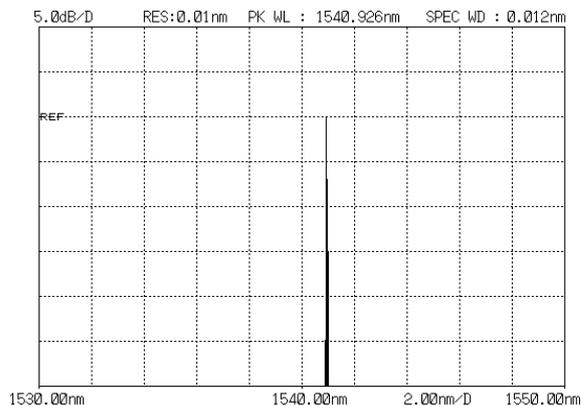


Рис.3. Оптический спектр ПКЛ при длине волокна с сохранением поляризации 1 м.

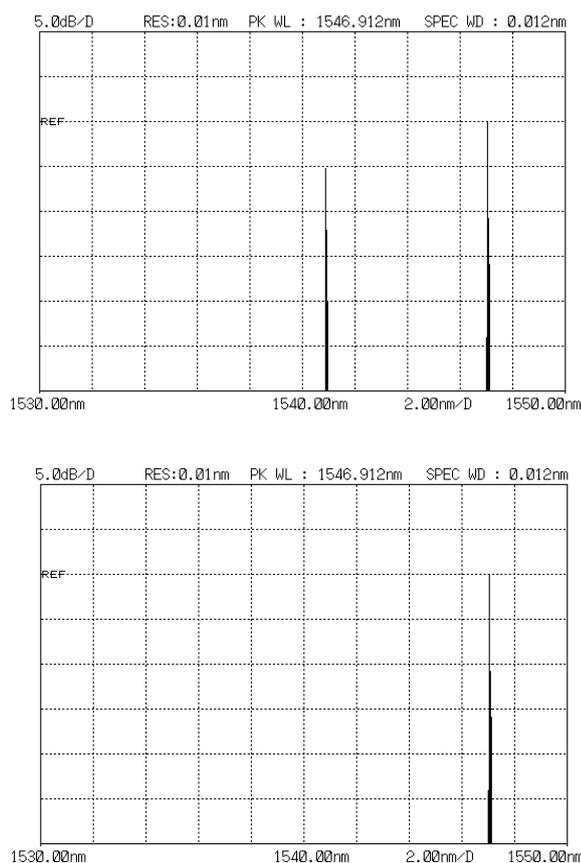


Рис.4. Оптический спектр ПКЛ при длине волокна 1 м и температуре активного элемента 35°C (а) и 40°C (б).

При увеличении длины волокна с сохранением поляризации свободный спектральный интервал уменьшается и одновременно могут генерироваться две и более линии, соответствующие максимумам пропускания фильтра. Оптический спектр ПКЛ при длине волокна 10 м показан на рис.5. При такой длине  $\Delta\lambda = 0.5$  нм и генерация осуществляется одновременно на 9 линиях (при равномерности 3 дБ).

Изготавливаемые в настоящее время ПКЛ имеют волоконный резонатор длиной от нескольких миллиметров до сотен метров. Это позволяет находить им все новые и новые применения, в том числе в качестве одночастотных и многочастотных лазерных генераторов.

1. Chow K.K., Shu C., Mak M.W.K., Tsang H.K. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (10), 1445 (2002).

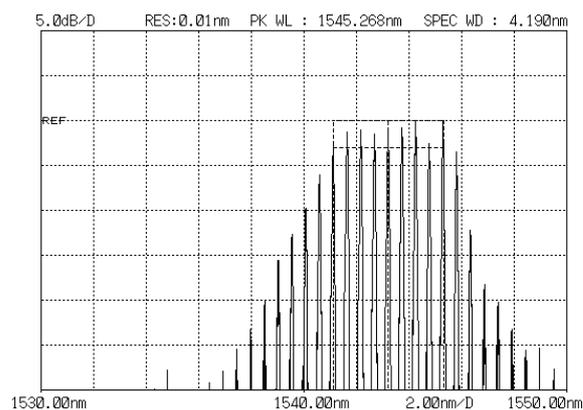


Рис.5. Оптический спектр ПКЛ при длине волокна с сохранением поляризации 10 м.

2. Hu Z., Li F., Pan Z., Tan W. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (8), 977 (2000).

3. Pleros N., Bintjas C., Kalyvas M., Theophilopoulos G., et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (5), 693 (2002).

4. Vlachos K., Bintjas C., Pleros N., Avramopoulos H. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10** (1), 147 (2004).

5. Papakyriakopoulos T., Vlachos K., Hatziefremidis A., Avramopoulos H. *Opt. Lett.*, **24** (11), 717 (1999).

6. Акпаров В.В., Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А. *Квантовая электроника*, **40** (10), 851 (2010).

7. Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А., Неделин Е.Т. *Фотоника*, № 4, 18 (2008).

8. Sunada S., Tamura S., Inagaki K., Harayama T. *Phys. Rev. A*, **78**, 053822 (2008).

9. Tamura S., Inagaki K., Noto H., Harayama T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6770**, 677014 (2007).

10. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. *Opt. Quantum Electron.*, **31**, 1219 (1999).

11. Ishida T., Tamura S., Sunada S., Inagaki K., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7004**, 700450 (2008).

12. Акпаров В.В., Дураев В.П., Логгинов А.С., Неделин Е.Т. *Фотон-Экспресс*, **46** (6), 23 (2005).

13. Yao X.S., Maleki L. *Opt. Lett.*, **22** (24), 1867 (1997).

14. Дураев В.П., Дмитриев В.Г., Казаков А.А. *Обзорные прикладной и промышленной математики*, **16** (4), 647 (2009).

15. Ulrich R., Jonson M. *Opt. Lett.*, **4** (5), 152 (1979).

16. Takahashi Y., Niida R., Otani H. *Rev. Laser Engng*, **36**, 1287 (2008).

17. Sorel M., Giuliani G., Scire A., Miglierina R., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39** (10), 1187 (2003).

18. Sorel M., Laybourn P.J.R., Scire A., Balle S., et al. *Opt. Lett.*, **27** (22), 1992 (2002).

19. Wang B.C., Xu L., Baby V., Glesk I., Prucnal P.R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (7), 989 (2002).

20. Xu L., Wang B.C., Baby V., Glesk I., Prucnal P.R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (2), 149 (2002).

21. Дураев В.П., Медведев С.В. *Научное приборостроение*, **22** (3), 53 (2012).