

Узкополосный линейно-кольцевой эрбиевый волоконный лазер

А.А.Колегов, Г.С.Софиенко, Л.А.Минашина, А.В.Бочков

Разработан узкополосный линейно-кольцевой волоконный лазер мощностью 15 мВт с длиной волны генерации 1.55 мкм и шириной спектра менее 5 кГц. Частота генерации лазера стабилизирована с помощью ненакачиваемого участка активного волокна и волоконной брэгговской решетки. Волоконный лазер работает в режиме бегущей волны, что позволяет избежать эффекта пространственного выжигания дырок инверсии. Показано, что при достижении определенного уровня мощности накачки разработанный лазер переходит из непрерывного режима в импульсно-периодический, соответствующий релаксационным колебаниям.

Ключевые слова: узкополосный волоконный лазер, линейно-кольцевая схема, активное волокно, волоконная брэгговская решетка, релаксационные колебания.

1. Введение

Узкополосные волоконные лазеры являются востребованными источниками излучения для таких приложений, как когерентные оптические датчики, спектрометры высокого разрешения, источники излучения в прецизионных физических экспериментах, лидары и др. В частности, для интерферометрических комплексов PDV (Photonic Doppler Velocimetry) привлекательны лазеры непрерывного действия с длиной волны 1.55 мкм и шириной спектра менее 20 кГц.

Один из способов реализации узкополосных волоконных лазеров – использование кольцевой однонаправленной схемы резонатора [1–6]. Такой способ из-за отсутствия эффекта пространственного выжигания дырок инверсии обеспечивает узкополосную лазерную генерацию. Для получения спектра шириной порядка единиц кГц и менее, как правило, применяются внутррезонаторные фильтры (например, узкополосные фильтры Фабри–Перо [7] и волоконные брэгговские решетки с фазовым сдвигом [6]). Эффективным и наиболее простым способом сужения спектра и повышения стабильности излучения является использование участка ненакачиваемого активного волокна, которое в сочетании с брэгговской решеткой образует динамический узкополосный фильтр с шириной полосы пропускания порядка нескольких десятков мегагерц [2, 4, 5]. Таким образом, узкополосный лазер может быть построен по линейно-кольцевой схеме, которая часто применяется для управления параметрами излучения при разработке импульсных [8, 9] и непрерывных [2–5] лазеров.

А.А.Колегов, Г.С.Софиенко, Л.А.Минашина, А.В.Бочков. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13; email: albatrosing@yandex.ru, bavsanz@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 июля 2013 г., после доработки – 23 ноября 2013 г.

В настоящей работе представлены результаты разработки узкополосного линейно-кольцевого волоконного лазера непрерывного действия с длиной волны $\lambda = 1.55$ мкм для интерферометрических комплексов PDV (MPDV). Частота генерации лазера стабилизирована с помощью волоконной брэгговской решетки и ненакачиваемого активного волокна.

2. Схема лазера

Схема кольцевого лазера представлена на рис.1. Активная часть резонатора выполнена из эрбиевого волокна длиной 0.6 м (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»). Диаметр поля моды активного волокна равен 9.0 ± 0.5 мкм (на $\lambda = 1.31$ мкм), числовая апертура $NA = 0.13 \pm 0.01$. Оболочка волокна выполнена из двух полимерных покрытий – внутреннего (СИЭЛ 159-305) ($NA = 0.42$) и защитно-упрочняющего (DeSolite® DS-2015). Поглощение активного волокна составляет 61 дБ/м для $\lambda = 0.98$ мкм и 148 дБ/м для $\lambda = 1.53$ мкм. Средняя кон-

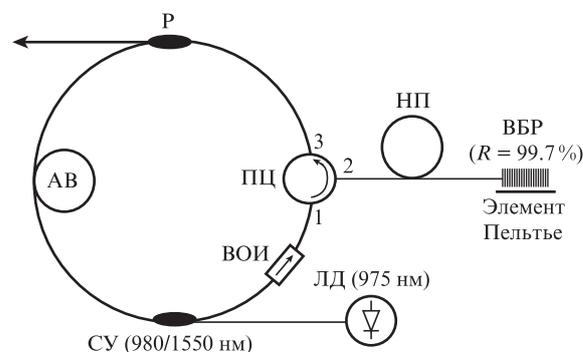


Рис.1. Схема кольцевого волоконного лазера: АВ – активное волокно, легированное эрбием; НП – насыщающийся поглотитель (ненакачиваемое эрбиевое волокно); ЛД – лазерный диод накачки; ВОИ – волоконно-оптический изолятор; СУ – спектральный уплотнитель; ПЦ – поляризационный циркулятор; ВБР – волоконная брэгговская решетка с коэффициентом отражения $R = 99.7\%$; Р – разветвитель.

центрация ионов эрбия, алюминия и германия – 0.63 вес.%, 1.66 вес.% и 0.07 вес.% соответственно. Определение концентрации ионов проводилось с помощью рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализатора SX100 (Сameca) в Институте геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН. Накачка активного волокна осуществлялась через спектральный уплотнитель WD202A (Thorlabs) излучением одномодового стабилизированного диода PL980P330J (Thorlabs) с длиной волны 975 нм и выходной мощностью до 330 мВт. Однонаправленность схемы и снижение взаимодействия поляризационных мод достигались с помощью поляризационного циркулятора (Opto-Link). Линейная часть резонатора выполнена в виде ненакачиваемого активного волокна и глухой волоконной брэгговской решетки (ВБР), которая сформирована в волокне SMF-28, согласованном по апертуре и диаметру сердцевин с активным волокном. Ненакачиваемое волокно используется как насыщающийся поглотитель, в котором две встречные волны образуют узкополосную динамическую решетку коэффициента поглощения, позволяющую эффективно выделять и фильтровать продольные моды [10–12].

Полоса пропускания такого фильтра обычно составляет несколько десятков мегагерц и зависит от длины волокна, определяемой степенью легирования, а резонансная частота соответствует длине волны лазерной генерации. Кроме того, такой поглотитель обеспечивает кратковременную стабилизацию длины волны лазерной генерации. В разработанном лазере использовался насыщающийся поглотитель длиной 6 см с концентрацией ионов эрбия 0.63 вес.%, обеспечившей хорошее соотношение уровня выходной мощности и стабильности. Вывод излучения осуществлялся с помощью разветвителя излучения 1×2 с коэффициентом деления 50:50. Для перестройки длины волны лазерной генерации и термостабилизации брэгговской решетки использовался элемент Пельтье. Общая длина резонатора составила примерно 6 м при длине активной части 0.6 м.

3. Параметры лазера и его элементов

Зависимость мощности непрерывной лазерной генерации от мощности накачки представлена на рис.2. Видно, что мощность генерации в области порога ведет себя по-разному при увеличении и уменьшении мощности накачки.

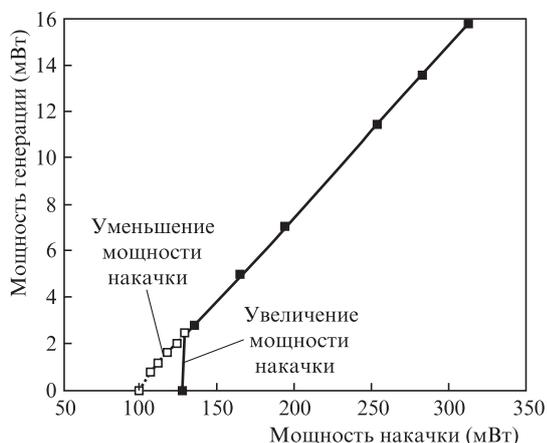


Рис.2. Зависимость мощности лазерной генерации от мощности накачки.

качки. С ростом мощности накачки пороговая мощность составляет примерно 130 мВт, а при убывании – 105 мВт. Такое гистерезисное поведение связано с влиянием насыщающегося поглотителя [5]. Дифференциальная эффективность лазера составила около 5%; столь малая эффективность может быть обусловлена кластеризацией ионов, которая, как показано в [13], приводит к существенному снижению усилительных свойств волокна с высокой концентрацией ионов эрбия. Максимальная мощность лазерной генерации равна ~ 16 мВт при мощности накачки $P_p \approx 315$ мВт, но уже при $P_p = 320$ мВт лазер начинает переходить в импульсно-периодический режим. Осциллограмма мощности сигнала в этом режиме, измеренная фотодиодом PD-24-03, представлена на рис.3.

Длина кольцевой части резонатора составляет 6 м, а линейной – 1 м, что соответствует фундаментальной частоте следования импульсов 25 МГц (период следования 40 нс), но, как видно из рис.3, частота следования импульсов составляет около 50 кГц (период следования ~ 20 мкс). Характер и форма сигналов, показанных на рис.3, соответствуют релаксационным колебаниям [14–17]. Анализ работ, посвященных исследованию динамики волоконных лазеров, показал, что механизм появления таких колебаний может быть связан с низкочастотной модуляцией излучения накачки [14–16], либо с инжекцией в лазер сигнала, длина волны которого попадает в область усиления активного волокна. В работе [17] описывается синхронизация релаксационных колебаний кольцевого волоконного лазера на длине волны 1.55 мкм при инжекции внешнего импульсно-периодического излучения полупроводникового лазера, длина волны которого попадала в область усиления Yb–Er-волокна. В работе [18] предполагается, что релаксационные колебания могут возникать из-за эффекта кластеризации активных ионов. Авторы работы [19] приводят теоретическое описание релаксационных колебаний, основываясь на анализе люминесценции.

Одно из предположений о механизме, вызывающем релаксационные колебания в представленном лазере, связано с отражением излучения (люминесценции), выходящей из активного участка волокна на участках сварки с большими потерями, либо сварки волокон с несогласованными параметрами. Один из таких участков возникает при сварке стандартного одномодового волокна SMF-28 с поддерживающим поляризацию волокном циркулятора. Из-за несоответствия геометрий обоих воло-

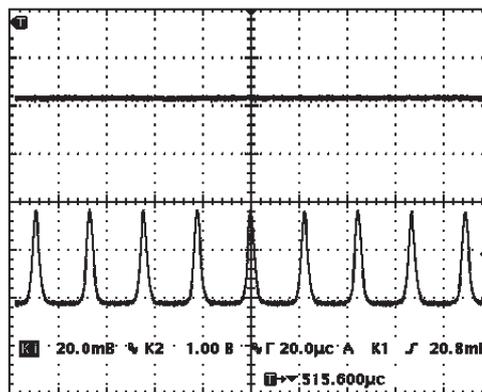


Рис.3. Осциллограмма импульсно-периодического режима работы кольцевого лазера.

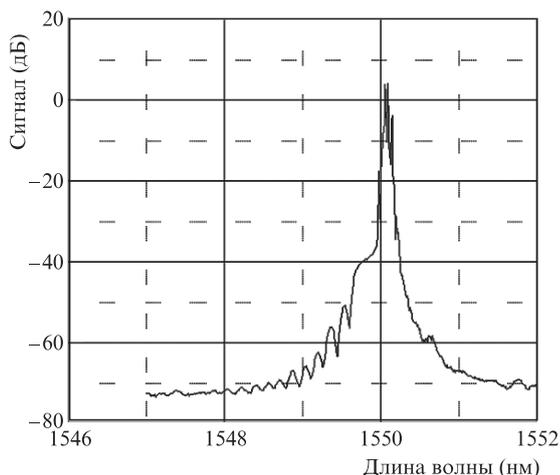


Рис.4. Спектр выходного излучения лазера.

кон возможно отражение части излучения. По оценке доля мощности, отраженной в такой геометрии [20],

$$k = 0.04 \left(1 - \frac{P_0}{P_i}\right) = 0.04 \left[1 - \frac{4r_0^2 \rho_s^2}{(r_0^2 + \rho_s^2)^2}\right] \approx 0.003.$$

Здесь P_0 – мощность излучения основной моды; P_i – прошедшая мощность; r_0 – радиус сердцевины волокна; ρ_s – радиус модового пятна.

При милливаттном уровне лазерного сигнала отраженная мощность составляет несколько микроватт, что достаточно для возбуждения релаксационных колебаний [16]. Для проверки этого предположения на участке между спектральным уплотнителем и поляризационным циркулятором был вварен волоконно-оптический изолятор (см. рис.1), вносящий потери на возможное отражение от участка сварки волокон SMF-28 и циркулятора. Это позволило получить в рассматриваемой схеме одномодовую стационарную генерацию мощностью 15 мВт при мощности накачки 300 мВт. В отсутствие изолятора мощность генерации (без релаксационных колебаний) достигала 8 мВт.

На рис.4 представлен спектр генерации лазера, который измерялся анализатором спектра Yokogawa AQ6370C с разрешающей способностью 0.02 нм. Центральная длина волны генерации равна 1550.1 нм, ширина спектра излучения определяется разрешающей способностью анализатора спектра.

Для перестройки и стабилизации центральной длины волны разработанного лазера ВБР располагалась на элементе Пельтье. Зависимость длины волны генерации лазера от температуры решетки представлена на рис.5. Видно, что температурное смещение длины волны составляет приблизительно 0.01 нм/К. Возможность перестройки длины волны делает разработанный лазер привлекательным для использования в интерферометрических комплексах MPDV, где необходимы многоканальные лазеры с разностью частот между каналами 3 ГГц, что составляет примерно 0.02 нм.

Для измерения спектра узкополосного лазера была использована методика, представленная в работе [21], где лазерный спектр измерялся кольцевым волоконным интерферометром. Такой интерферометр достаточно прост в исполнении и допускает применение недлинных (менее 2 км) линий задержки для измерения килогерцевой шири-

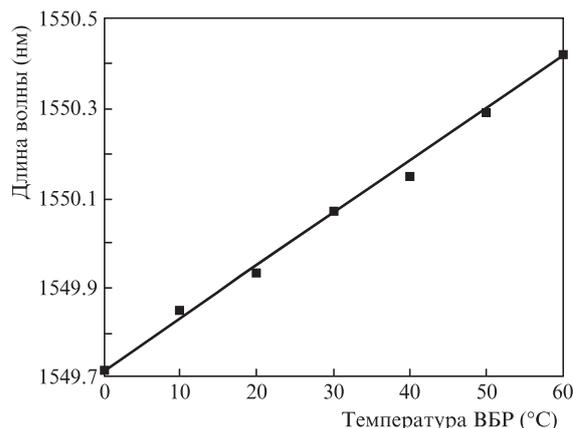
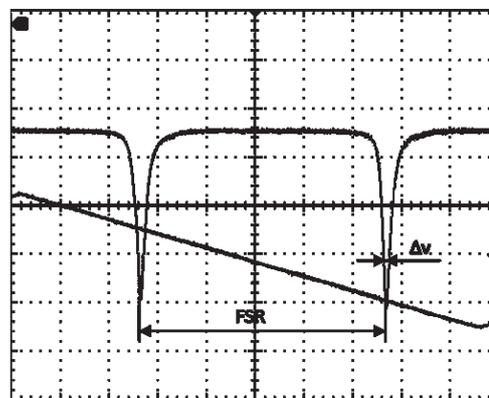


Рис.5. Зависимость длины волны лазерного излучения от температуры волоконной брэгговской решетки.

Рис.6. Интерференционный сигнал кольцевого интерферометра с областью свободной дисперсии FSR = 235 кГц; $\Delta\nu$ – ширина спектра.

ны спектра лазера. Интерференционный сигнал кольцевого интерферометра с областью свободной дисперсии 235 кГц и аппаратной функцией 5 кГц показан на рис.6.

Полученная ширина спектра составила примерно 5 кГц, что соответствует аппаратной функции интерферометра. Таким образом, можно сказать, что ширина спектра лазерной генерации разработанного лазера не превышает 5 кГц.

4. Заключение

Разработан узкополосный кольцевой лазер с длиной волны 1550.1 нм и шириной спектра менее 5 кГц. Выходная мощность лазера в одночастотном стабильном режиме составила ~15 мВт при мощности накачки 300 мВт. При средней концентрации ионов эрбия 0.63 вес. % активные части лазера оказались достаточно короткими: усиливающая среда – 0.6 м, насыщающийся поглотитель – 0.06 м. Центральная длина волны представленного лазера может управляться температурой волоконной брэгговской решетки, при этом изменение длины волны составляет примерно 0.01 нм/К.

Проведенные исследования показали, что характеристики лазера позволяют использовать его как источник узкополосного излучения в интерферометрических комплексах PDV (MPDV) и других приложения, где необходима большая длина когерентности.

1. Cowle G.J., Payne D.N., Reid D. *Electron. Lett.*, **3**, 229 (1991).
2. Cheng Y., Kringlebotn J.T., Loh W.H., Laming R.I., Payne D.N. *Opt. Lett.*, **8**, 875 (1995).
3. Young J., Myong-Wook K., Bong K., Jyung L., Sang K., Sang C. *CLEO Pacific Rim'99*, **TuB4**, 23 (1999).
4. Song Y.W., Havstad S.A., Starodubov D., Xie Y., Willner A.E., Feinberg J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 1167 (2001).
5. Pan O., Yudong J., Bin C., Chunxi Z., Shuling H., Di F. *Ch. Opt. Lett.*, **11**, 845 (2008).
6. Cheng X.P., Tse C.H., Shum P., Wu R.F., Tang M., Tan W.C., Zhang J. *J. Lightwave Technol.*, **8**, 945 (2008).
7. Park N., Dawson J.W., Vahala K.J., Miller C. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2369 (1991).
8. Nyushkov B.N., Denisov V.I., Kobtsev S.M., Pivtsov V.S., Kolyada N.A., Ivanenko A.V., Turitsyn S.K. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 661 (2010).
9. Денисов В.И., Иваненко А.В., Нюшков Б.Н., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **38**, 801 (2008).
10. Chen H.X., Babin F., Leblanc M., Schinn G.W. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 185 (2003).
11. Liu J., Yao J.P., Yao J., Yeap T.H. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 1020 (2004).
12. Paschotta R., Nilsson J., Reekie L., Tropper A.C., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **22**, 40 (1997).
13. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005).
14. Okhotnikov O.G., Salsedo J.R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 367 (1994).
15. Lacot E., Stoeckel F., Chenevier M. *Phys. Rev. A*, **49**, 3997 (1994).
16. Ionov S.I., Barnes W.L., Jedrzejewski K.P. *Electron. Lett.*, **21**, 1958 (1991).
17. Болотский В.И., Петров М.П. *Письма в ЖТФ*, **2**, 24 (1999).
18. Samson V.N., Loh W.H., de Sandro J.P. *Opt. Lett.*, **23**, 1763 (1997).
19. Ma L., Hu Z., Liang X., Meng Z., Hu Y. *Appl. Opt.*, **10**, 1979 (2010).
20. Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волноводов* (М.: Радио и связь, 1987, с. 587).
21. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.Н. *Квантовая электроника*, **41**, 656, (2011).