

Одночастотный волоконный лазер с линейной поляризацией выходного излучения со спектрально-несимметричными зеркалами на волоконных брэгговских решетках

М.И.Беловолов, В.М.Парамонов, О.И.Медведков, М.М.Беловолов

Разработана и исследована новая конструкция одночастотного волоконного лазера на длине волны 1.55 мкм с линейной поляризацией выходного излучения, в котором одним зеркалом служит однородная брэгговская решетка, записанная в волокне SMF-28, а другим – решетка, записанная в волокне типа Панда с небольшим перекрытием спектральных полос отражения зеркал и возможностью тонкой перестройки спектральной линии генерации. Длина активной части резонатора лазера на волокне, легированном ионами эрбия Er^{3+} небольшой концентрации, составила 10 см. Мощность генерации достигала 100 мВт при мощности накачки 60 мВт на длине волны 1.48 мкм, ширина спектральной линии была меньше 100 кГц.

Ключевые слова: эрбий, одномодовый волоконный световод, одночастотный лазер, волоконная брэгговская решетка, кольцевой резонатор.

1. Введение

Разработка волоконных лазеров с высококачественным одночастотным излучением является актуальной задачей для создания многообразных точечных и распределенных волоконных датчиков, а также когерентных систем связи и обработки информации [1, 2]. Под качественным одночастотным лазерным излучением имеется в виду излучение с предельно малыми амплитудными и фазовыми шумами, линейной поляризацией и выходной мощностью примерно от 0.1 до 1 мВт, достаточной для работы фотоприемных устройств с приемлемым динамическим диапазоном допустимых оптических потерь сигналов в волоконных системах.

Многие научные коллективы, а также фирмы-производители (см., напр., [1–6]) изготавливают и исследуют одночастотные волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС) по технологиям, подобным применяемым при изготовлении полупроводниковых РОС-лазеров, основанных на записи в высоколегированной активатором одномодовой сердцевине волоконных брэгговских решеток (ВБР) со сдвигом по фазе периода решетки на π на середине резонатора небольшой (~ 10 мм) длины. Малая длина резонатора позволяет легко получать одночастотный режим генерации, а для генерации на одной поляризационной моде активное высоколегированное волокно берется со световедущей сердцевиной типа Панда (PM-волокно).

Качество получаемого одночастотного излучения зависит от параметров одномодового высоколегированно-

го волокна и отлаженной технологии записи ВБР. Достоинство технологии производства таких одночастотных волоконных лазеров заключается в воспроизводимости их свойств и серийности процесса изготовления. Как правило, это одночастотные лазеры на одномодовом PM-волокне с большой концентрацией легирующей примеси ионов Er^{3+} и коротким резонатором. Для практического применения невысокую выходную мощность таких лазеров усиливают до 1–10 мВт (для датчиков) и до 1–2 Вт (для когерентных импульсных рефлектометров – распределенных датчиков). Необходимость применять выходные оптические усилители мощности сводит на нет потенциальную дешевизну выпускаемых одночастотных волоконных лазеров; их стоимость слишком высока для применений в системах волоконно-оптических датчиков, для которых достаточным является уровень выходной мощности 0.1–1 мВт.

Следует отметить, что существует ряд работ, где были реализованы эрбиевые волоконные лазеры с повышенной выходной мощностью в конфигурации с РОС и классической схемой резонатора (типа резонатора Фабри–Перо) на одномодовом волокне с высокой концентрацией ионов Er^{3+} и длиной резонатора до 50 мм [3]. Однако эффекты кластеризации приводят к ап-конверсионным процессам и, как правило, к импульсному режиму генерации, поэтому получение стабильного непрерывного одночастотного режима становится проблемой. Ряд вопросов конструирования с целью получения непрерывного одночастотного режима генерации изучены на иттербиевых одночастотных РОС-лазерах, где концентрации активной примеси ионов Yb^{3+} велики, а эффекты кластеризации отсутствуют. Так, в работе [4] была подобрана матрица фосфорсилкатного стекла в качестве материала сердцевины одномодового волокна с германием для повышения фоточувствительности, был изготовлен и исследован одночастотный иттербиевый волоконный РОС-лазер на сдвинутых на π ВБР, записанных в резонаторе длиной 16 мм,

М.И.Беловолов, В.М.Парамонов, О.И.Медведков, М.М.Беловолов.
Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва,
ул. Вавилова, 38; e-mail: bmi@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 19 сентября 2019 г., после доработки – 10 октября 2019 г.

и на рабочей длине волны 1030 нм получена ширина линии генерации менее 8 кГц в непрерывном высокостабильном режиме при выходной мощности ~ 10 мВт.

Краткий обзор достижений и технических приемов получения стабильного одночастотного режима генерации, опробованных на высоколегированных эрбиевых и иттербиевых волокнах и лазерах [3–6], позволил нам использовать в настоящей работе следующие ключевые приемы для достижения непрерывного одночастотного режима в волоконном лазере на эрбиевом световоде:

1) выбор одномодового волоконного световода, легированного при пониженной концентрации ионов Er^{3+} (~ 500 ppm) без эффектов кластеризации, с активной частью резонатора длиной 10 см;

2) для генерации на одной поляризационной моде, как и в работе [5], выходное зеркало на ВБР записано в РМ-волокне, пристыкованном (приваренном) к активной части резонатора;

3) для тонкой настройки на режим одночастотной генерации использована температурная регулировка смещения спектрального края пропускания второго ВБР-зеркала резонатора, впервые опробованная в работе [5] для получения одночастотной генерации иттербиевого волоконного лазера.

Наиболее близкой к использованной нами схеме построения лазера с тонкой настройкой на одночастотный режим генерации и механизмом выделения одной продольной моды составного резонатора на распределенных брэгговских зеркалах является схема, описанная в работе [6]. Однако там в качестве активной высококонцентрированной среды применялось иттербиевое одномодовое волокно, и полученная одночастотная генерация на длине волны 1030 нм менее востребована на практике, чем генерация эрбиевых волоконных лазеров на длине волны около 1550 нм, которая попадает в широкий диапазон длин волн для телекоммуникационных и сенсорных применений.

Цель настоящей работы – разработка и исследование комбинированной конструкции одночастотных эрбиевых волоконных лазеров на рабочую длину волны около 1550 нм с использованием указанных выше приемов для получения одночастотного малошумящего выходного излучения с линейной поляризацией и выходной мощностью в диапазоне 0.1–1 мВт. Важно, что при этом сохраняется привычная «ручная» технология изготовления и настройки лазеров, применяемая в научных лабораториях, при снижении практически на порядок концентрации легирующей примеси ионов эрбия Er^{3+} в сердцевине обычного одномодового волокна. За счет увеличения длины волоконного резонатора лазера и высоких коэффициентов отражения ВБР-зеркал достигаются узкие линии

генерации с полушириной $\Delta\nu_{1/2}$ в диапазоне 10–100 кГц, достаточном для применения разработанных лазеров в том числе и в когерентной рефлектометрии.

2. Конструкция и особенности работы одночастотного волоконного лазера

Схема одночастотного эрбиевого волоконного лазера приведена на рис.1. Активная часть резонатора лазера длиной 10 см образована одномодовым волокном с круглой сердцевинной диаметром 4 мкм, активированной ионами эрбия Er^{3+} с концентрацией ~ 500 ppm без эффектов кластеризации, что исключало образование высоколежащих энергетических уровней вследствие взаимодействия ионов эрбия и переход в режим радиочастотных пульсаций оптической мощности при накачке. К торцам активной части резонатора были приварены зеркала на ВБР (места сварки на рис.1 обозначены буквой F). Решетки были записаны в одномодовых волоконных световодах (ОВС) CORNING SMF-28e+ и световодах, сохраняющих поляризацию, РМ 1550. Решетки на ОВС с круглой сердцевинной длиной 15 мм имели коэффициент отражения более 99% и являлись «глухими» (HR). Полная спектральная ширина полосы отражения решеток по полувысоте $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}(\text{ОВС}) = 0.15$ нм. Решетки на РМ-волокне изготовлялись частично пропускающими и при длине 20 мм имели коэффициенты отражения 96%–98% при спектральной ширине $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}(\text{РМ}) = 0.10$ нм. Пики отражения ВБР в двулучепреломляющем РМ-волокне разнесены на 0.35 нм, что соответствует двулучепреломлению $\Delta n_{\text{BF}} = 3.2 \times 10^{-4}$. Резонансная длина волны решетки в ОВС соответствует пику отражения быстрой оси решетки в РМ-волокне и сдвинута при записи примерно на 0.1 нм в коротковолновую сторону. В дальнейшем она подстраивалась температурой для получения оптимальных режимов лазерной генерации как по выходной оптической мощности, так и по точной длине волны генерации.

Накачка осуществлялась излучением лазерного диода на длине волны $\lambda_p = 1.48$ мкм через оптический мультиплексор (ОМ) и вводилась в резонатор со стороны ВБР-зеркала на РМ-волокне, обеспечивающем режим генерации с линейной поляризацией. Другим дополнительным фактором обеспечения линейной поляризации выходного лазерного излучения являлось то, что конструктивно активная часть резонатора с приваренными ВБР-зеркалами была расположена в распрямленном состоянии на плоской термостабилизированной (T_{stab}) опорной поверхности. При ее длине 10 см пространственная конфигурация генерируемого излучения оставалась стабильной, а выходное излучение было линейно поляризованным.

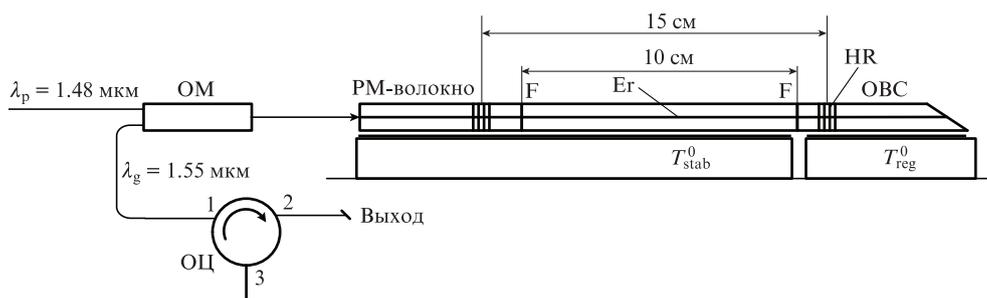


Рис.1. Конструкция одночастотного волоконного лазера.

Тонкая подстройка длины волны генерации осуществлялась изменением температуры $T_{\text{рег}}^0$ ВБР-зеркала на ОВС. От температуры $T_{\text{рег}}^0$ этого зеркала зависело не только расстояние между максимумами пиков отражения зеркал на ВБР, но и величина пика пропускания составного резонатора и его оптическая добротность, влияющая на время жизни фотонов в резонаторе и ширину спектральной линии генерации. Температурная чувствительность решетки $\Delta\lambda/\Delta T$ на длине волны $\lambda_g = 1.55$ мкм составила примерно 0.012 нм/°С.

Оптический циркулятор (ОЦ) на выходе мультиплексора служил для вывода излучения генерации на длине волны около 1.55 мкм и оптической развязки от схем анализатора спектра и измерителя ширины линии генерации.

В исследованной нами конструкции одночастотного волоконного лазера, как и в работе [6], дополнительно использована важная возможность изменения температуры $T_{\text{рег}}^0$ зеркала одной из пространственно разнесенных ВБР, в данном случае на ОВС. Это расширяет возможности по настройке мощности и ширины линии генерации волоконного лазера данной конструкции при сохранении линейной поляризации выходного излучения.

3. Результаты и их обсуждение

При длине собственного резонатора волоконного лазера $L \approx 15$ см для выделения одной генерируемой продольной моды по частоте необходимо обеспечить существенный дефицит коэффициента усиления на интервале длин волн $\Delta\lambda \sim 0.005$ нм, чему способствуют достаточно острые спектральные пики пропускания составного резонатора в режиме с усилением излучения. Результирующий спектр пропускания двух спектрально рассогласованных ВБР-зеркал подобен спектру пропускания однородной решетки со сдвигом периодов по фазе на π на середине длины [1–3]. Дополнительным фактором выделения одной спектральной линии и подавления других соседних линий является то, что при усилении в активной части резонатора происходит сужение спектральной линии усиленной спонтанной люминесценции (суперлюминесценции) в максимуме.

Спектры узкополосной генерации исследовались с помощью анализатора спектра (ANDO AQ6317) с разрешением 0.01 нм. На рис.2 приведен спектр при мощности накачки 60 мВт, мощность генерации в максимуме составила около 100 мкВт (-10 дБм). Видно, что при изменении

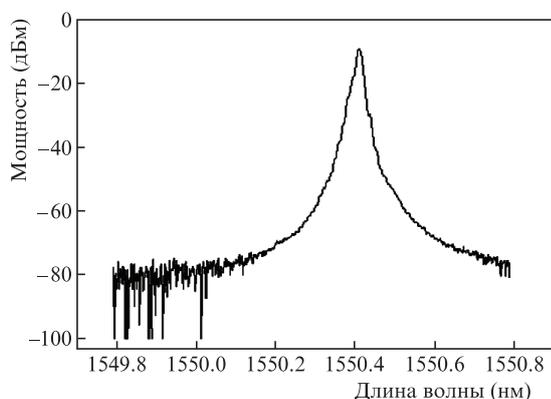


Рис.2. Спектр узкополосной генерации волоконного лазера, записанный в широком динамическом диапазоне мощностей спектрометром с разрешением 0.01 нм.

мощности от -80 до -10 дБм спектр излучения имеет регулярный вид без видимых побочных пиков — резонансов в диапазоне 1549.8 – 1550.8 нм около центральной длины волны генерации. Это может косвенно свидетельствовать о развитом режиме одночастотной генерации. Для подтверждения того, что спектр генерации является одночастотным, необходим анализатор с высоким спектральным разрешением. Мы исследовали спектр генерации волоконного лазера с помощью кольцевого волоконного резонатора с высокой резкостью ($F \approx 200$) и спектральным разрешением $\Delta\nu \approx 160$ кГц (аппаратная функция). Длина контура циркуляции кольцевого резонатора $L_{\text{гр}}$ на одномодовом волокне типа SMF-28 составляла 10 м. Для образования кольцевого резонатора с высокой резкостью использовался направленный одномодовый разветвитель X-типа с коэффициентами деления $1:200$.

На рис.3 показан один период пропускания кольцевого резонатора, используемого в качестве сканирующего анализатора спектра излучения одночастотного волоконного лазера. Линейное сканирование длины кольцевого резонатора осуществлялось подачей линейно изменяющегося напряжения на пьезоэлектрический цилиндр с намотанным на него волокном резонатора (~ 20 витков диаметром 80 мм). Траектория линейного изменения напряжения наложена на спектр сканирования для того, чтобы четко обозначить во времени участок с линейным режимом сканирования и его концы. Расстояние между двумя спектральными пиками соответствует области свободной дисперсии кольцевого резонатора $\text{FSR} = (c/n)L_{\text{гр}}$ и составляет 20 МГц, что указывает на частотный масштаб на горизонтальной оси развертки. Из рис.3 также следует, что на периоде линейной развертки отсутствуют другие резонансы, которые могли бы свидетельствовать об одновременной генерации на других частотах составного резонатора. В данном случае спектр с одной спектральной линией указывает на одночастотный режим генерации волоконного лазера. Более растянутая развертка по частоте (времени) одного спектрального пика исследуемого излучения волоконного лазера приведена на рис.4. Видно, что контур спектральной линии генерации лазера не имеет явно выделенных частот или других резонансов. Спектральные кривые на рис.3 и 4 доказывают факт генерации волоконного лазера в одночастотном режиме на одной продольной моде собственного резонатора. Этот режим генерации уверенно воспроизводится с помощью тонкой

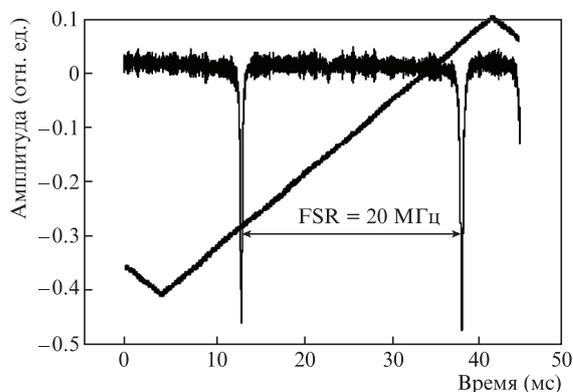


Рис.3. Один период сканирования спектра излучения волоконного лазера кольцевым волоконным резонатором-анализатором с областью свободной дисперсии $\text{FSR} = 20$ МГц, демонстрирующий одночастотный режим генерации с подавлением боковых мод-частот больше 20 дБ.

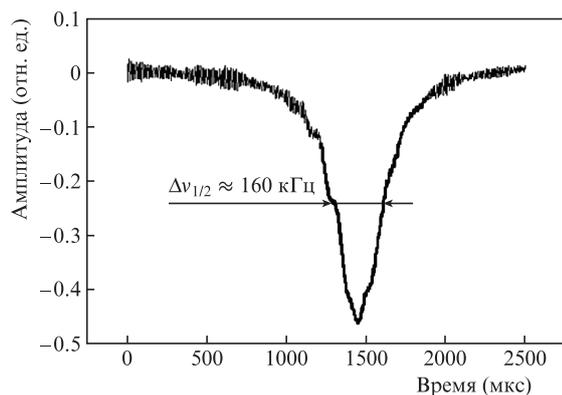


Рис.4. Тонкая структура и подробная развертка по частоте одиночной линии генерации шириной $\Delta\nu_{1/2} \approx 160$ кГц (аппаратная функция кольцевого резонатора) одночастотного волоконного лазера при выходной мощности 100 мкВт.

настройки температуры $T_{\text{рег}}^0$ ВБР-зеркала на ОВС с высоким коэффициентом отражения (при фиксированной температуре T_{stab}^0 второй решетки).

Полученное непрерывное одночастотное излучение разработанного волоконного лазера было стабильным по спектральному положению частоты генерации – свипирование частоты не превышало 10 МГц и определялось свойствами электронного термостата. В конструкции волоконного лазера применялся один из типовых стабилизаторов-регуляторов температуры Temperature Controller (Wavelength Electronics). Отметим, что разработанный одночастотный волоконный лазер имеет малый уровень собственных амплитудных шумов (в особенности на частотах меньше 1 кГц), что является следствием отсутствия шума типа $1/f$, обычно характерного для одночастотных инжекционных полупроводниковых РОС-лазеров (см., напр., [7], рис.13).

Выходная характеристика мощности генерации волоконного лазера показана на рис.5. В настоящей работе исследовался один из возможных (см., напр., [1]) принципов получения спектрально-одночастотного лазерного излучения. Главной целью работы были достижение и доказательство одночастотной генерации на одной продольной моде собственного резонатора, получение стабильной линейной поляризации выходящего излучения и достижение приемлемой для практического применения выходной оптической мощности – не менее 100 мкВт. Использование разнородных оптических элементов лазера привело к тому, что оптические потери и согласование мод при стыковках элементов не были оптимальными. В результате не вся мощность излучения накачки, как следует из рис.5, эффективно поглощалась активной частью резонатора. Мы полагаем, что в дальнейшем при подборе элементов лазера эффективность накачки может быть увеличена, и вполне реально получение одночастотной генерации с выходной мощностью порядка 1 мВт. Достигнутый уровень выходной мощности 100 мкВт одночастотного линейно поляризованного излучения на длине волны около 1.55 мкм является достаточным для построения волоконных схем датчиков с небольшими (~ 10 дБ) допустимыми потерями в волоконной системе. Оптическая мощность на фотоприемнике в диапазоне 10–20 мкВт является достаточной для их нормальной работы при отношении сигнал/шум ~ 1000 . Мощность насыщения у фотоприемников типа ПРОМ составляет около 200 мкВт, и

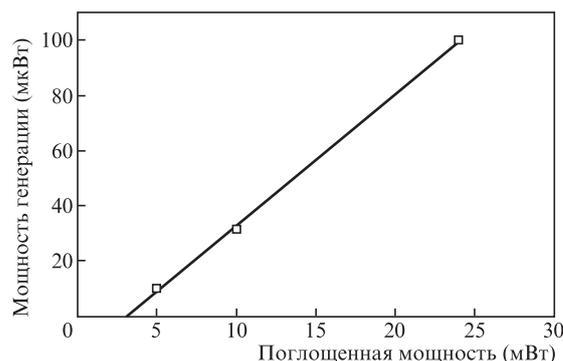


Рис.5. Зависимость выходной мощности генерации одночастотного волоконного лазера от поглощенной мощности накачки на длине волны 1.48 мкм.

полученные выше мощности генерации одночастотного волоконного лазера пригодны для практики даже без применения дополнительных волоконно-оптических усилителей.

4. Заключение

Разработана и исследована комбинированная конструкция одночастотных волоконных лазеров с резонатором длиной 15 см на одномодовом волокне, легированном ионами Er^{3+} умеренной концентрации (~ 500 ppm), с пространственно и спектрально разнесенными зеркалами на ВБР небольшой длины (10–20 мм). Эти решетки записаны в обычном волокне SMF-28e⁺ и в сохраняющем поляризацию РМ-волокне и приварены к резонатору. Вывод линейно поляризованного излучения из лазера осуществлялся со стороны ВБР на РМ-волокне с коэффициентом отражения $\sim 98\%$. Тонкая настройка на режим одночастотной генерации осуществлялась путем изменения температуры «глухого» зеркала на ВБР из SMF-волокна, которая работала как сдвинутая на π решетка в типовом РОС-лазере. Показано, что спектральное рассогласование ВБР-зеркал в конструкции лазера позволяет легко получать одночастотный режим и достигать максимальной мощности генерации. Измерения с помощью кольцевого резонатора с высокой добротностью показали, что ширина спектральной линии $\Delta\nu_{1/2}$ одночастотного волоконного лазера определяется аппаратной функцией сканирующего интерферометра и не превышает ~ 100 кГц при мощности генерации 100 мкВт.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО Инновационное предприятие «НЦВО-Фотоника», на установках которого была произведена запись ВБР с требуемыми спектральными свойствами.

1. Yang Z. et al. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6080-0_10.
2. Mizrahi V., DiGiovanni D.J., Atkins R.M., Grubb S.G., Park Y.-K., Delavaux J.-M. *J. Lightwave Technol.*, **11** (12), 2021 (1993).
3. Smirnov A.M., Bazakutsa A.P., Chamorovskiy Yu.K., Nechepurenko I.A., et al. *ACS Photonics*, **5** (12), 5038 (2018).
4. Butov O.V., Rybaltovskiy A.A., Bazakutsa A.P., Golant K.M., Vyatkin M.Yu., Popov S.M., Chamorovskiy Yu.K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **34** (3), A43 (2017).
5. Paramonov V.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Tsvetkov V.B. *Laser Phys. Lett.*, **4** (10), 740 (2007).
6. Sun B., Zhang X., Jia J. *Laser Phys. Lett.*, **16** (6), 065101 (2019).
7. Kirkendall C.K., Dandridge A. *J. Appl. Phys. D*, **37**, R197 (2004).