

УДК 528.72:004.93

ОДНОЧАСТОТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ТУЛИЕВЫЙ ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

© А. Д. Владимирская^{1,2}, М. И. Скворцов², А. А. Вольф²,
И. А. Лобач², С. И. Каблуков²

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Коптюга, 1
E-mail: anastasiavladimirskaya97@gmail.com

Представлен одночастотный цельноволокнистый тулиевый лазер с распределённой обратной связью. Волоконная брэгговская решётка с фазовым сдвигом, являющаяся резонатором лазера, записана в высоколегированном отрезке тулиевого волокна длиной 36 мм. Максимальная мощность одночастотной генерации на длине волны 1919 нм достигает 80 мВт при мощности накачивающего излучения 1,1 Вт. Ширина линии генерации составила 70 кГц. Относительные шумы оптического излучения не превышали уровень 70 дБ/Гц с максимумом на частоте 1,2 МГц.

Ключевые слова: волоконные лазеры, одночастотное излучение, ВБР.

DOI: 10.15372/AUT20200412

Введение. Излучение спектрального диапазона от 1,9 до 2,1 мкм находит своё применение во многих областях науки и техники, а именно: в лазерной абсорбционной спектроскопии, химическом анализе, биомедицине и т. д. В первую очередь это связано с сильными линиями поглощения в этой спектральной области для ряда распространённых молекул (воды и диоксида углерода). Источники излучения с генерацией около 2 мкм хорошо подходят для дистанционного инфракрасного мониторинга экологического состояния планеты, анализа погоды, влажности и парникового эффекта [1]. Также подобные источники могут быть применены для проведения ¹³C-уреазного дыхательного теста при неинвазивной диагностике человека на заражение *Helicobacter pylori*. Для решения вышеуказанных задач спектроскопии высокого разрешения требуется применение узкополосных (в пределе одночастотных) источников излучения.

Среди всех типов лазеров, в которых можно получать узкополосное высококогерентное излучение, особое внимание в последнее время уделяется волоконным схемам, что связано с их высокой надёжностью, качеством излучения и относительно небольшими габаритами. Этот тип твердотельных лазеров позволяет получить лазерную генерацию в спектральном диапазоне от 1 до 2 мкм в зависимости от используемой активной среды [2]. При характерной длине лазера в десятки сантиметров и более в генерацию одновременно выходит большое число продольных мод резонатора. Спектральный интервал генерации ограничен шириной спектра отражения зеркал (доли нанометра для волоконных брэгговских решёток (ВБР)), поскольку характерная ширина линии усиления волоконных лазеров составляет десятки нанометров. Например, тулиевая активная среда способна усиливать излучение в диапазоне от 1,7 до 2 мкм. При уменьшении длины резонатора происходит возрастание межмодового интервала, что сокращает количество продольных мод, попадающих в полосу отражения ВБР резонатора лазера. Как следствие, для достижения одночастотного режима лазерной генерации необходимо использование наиболее коротких

резонаторов с селективными элементами, которые дают возможность генерации лазерного излучения только на одной продольной моде. В настоящее время существуют различные способы достижения одночастотного режима работы лазера в зависимости от его типа. Различают два основных типа коротких резонаторов: с распределёнными брэгговскими отражателями (РБО), когда короткая активная среда располагается между парой волоконных брэгговских решёток, и с распределённой обратной связью (РОС), когда ВБР сформирована непосредственно в короткой активной среде. В последнем случае важным фактором является наличие фазового сдвига (обычно π -сдвига) в структуре однородной ВБР. Решётку с π -сдвигом можно представить в виде двух ВБР, записанных практически вплотную друг к другу, ближние края которых отстоят друг от друга на половину периода брэгговской структуры. Для таких решёток характерен дополнительный провал с малой шириной в спектре отражения на резонансной длине волны, соответствующий одной продольной моде. При этом положение провала зависит от величины фазового сдвига. Одним из основных преимуществ волоконных РОС-лазеров является высокая добротность резонатора. В отличие от РБО-лазеров в РОС-лазерах нет сварок между активной средой и ВБР, в которых возникают потери мощности. Также в связи с особенностями конструкции РБО-лазера при изменении температуры на несколько градусов или растяжении волокна на доли микрометра происходит изменение длины оптического пути между ВБР, что вызывает нестабильность генерации. В отличие от РБО-лазера РОС-лазер имеет непрерывную решётку, что делает величину её фазового сдвига более стабильной.

Для получения одночастотной генерации в области 2 мкм наиболее перспективной является активная среда на базе оптического волокна, легированного ионами тулия. В направлении получения одночастотного излучения в тулиевых волоконных лазерах представлено достаточно много публикаций [3–7]. Однако стоит отметить, что ряд работ ограничивался только поверхностными исследованиями характеристик выходного излучения. Результаты разных работ сравнивались как по реализации схемы (тип и длина резонатора, цельноволокноное исполнение, излучение накачки), так и по характеристикам выходного излучения (мощность, поляризация, ширина лазерной линии, уровень шумов). Результаты сравнения представлены в табл. 1.

В значительной части работ, посвящённых получению одночастотной генерации, применяется схема с РБО. Этот факт можно связать с более простой реализацией по сравнению со схемами на основе РОС. Наиболее важной характеристикой одночастотного излучения является ширина лазерной линии. Наименьшая ширина линии (менее 10 кГц) была зафиксирована в [3]. Это было достигнуто в резонаторе типа РБО. Стоит отметить, что РОС-лазеры более предпочтительны для получения одночастотной генерации, так как они более устойчивы к внешним воздействиям по сравнению с РБО-лазерами. Если же рассматривать только РОС-лазеры, то продемонстрированные ширины спектров генерации значительно уступают характеристикам РБО-лазеров. Однако в гибридной схеме задающего РОС-лазера с несколькими каскадами усиления, в которой использовались как волоконные, так и объёмные элементы, была продемонстрирована наибольшая выходная мощность генерации (100 Вт) [5]. Наличие объёмных элементов увеличивает размер лазерной схемы и накладывает определённые условия на его юстировку. Также следует заметить, что в работе не было приведено значение ширины линии лазера. В остальных же цельноволокноных РОС-схемах выходные мощности существенно меньше (от единиц до нескольких сотен мВт), что связано с более плотным резонатором, а также короткой длиной усиливающей среды. Только в нескольких работах обсуждаются поляризационные и шумовые свойства излучения, которые очень важны для практических применений. Наиболее полная характеристика выходного излучения РБО-лазера была проведена в работе [4], где зафиксирован уровень шумов -95 дБ/Гц на частоте 0,6 МГц.

Из табл. 1 можно отметить, что уже достигнуты значительные успехи в разработке

Таблица 1

Сравнение различных реализаций тулиевых волоконных одночастотных лазеров

Тип	Выходная мощность, мВт	Поляризация	Ширина линии, кГц	Схема*	Относительный уровень шумов, дБ/Гц	Длина волны генерации, нм / длина волны накачки, нм	Публикация
РБО	50	—	3	ЦВ	—	1740–2017 / 805	[3]
РБО	15	Линейная	10	ЦВ	–95	1950 / 793	[4]
РОС	100 000 с усилителем	Линейная	—	Г	—	1943 / 1565 и 795	[5]
РОС	1	—	—	Г	—	1735 / 790	[6]
РОС	875	Линейная	—	Г	—	1943 / 1565	[7]
РОС	80	Линейная	70	ЦВ	–70	1919 / 1530–1563	Данная работа

* Примечание: ЦВ — цельноволокonnая, Г — гибридная.

одночастотных источников с генерацией в области 2 мкм. Однако во многих работах не произведена подробная характеристика выходного излучения (оптический спектр, относительная интенсивность шумов, поляризация и т. д.), что не позволяет в полной мере понять область применимости источников. Исходя из этого целью предлагаемой работы является как реализация одночастотного цельноволокonnого тулиевого лазера с распределённой обратной связью и оптимизация его основных элементов, так и комплексный анализ его выходных характеристик.

Экспериментальная часть. Выбор активной среды лазера в первую очередь обусловлен длиной волны генерации, которую необходимо получить. В настоящее время существует два типа активных волокон, которые позволяют получить генерацию в области 2 мкм. Такие волокна легируются ионами редкоземельных металлов тулия и гольмия. Для данной работы было использовано активное высоколегированное тулиево волокно с двойной оболочкой (Nufern PM-TDF-10P/130-HE), так как его область люминесценции соответствует нашей задаче и такие волокна коммерчески более доступны, чем гольмиевые. Высокая концентрация ионов тулия позволяет получить генерацию с небольшим отрезком волокна, что необходимо для лазера с распределённой обратной связью. Для используемого волокна коэффициент поглощения при накачке в сердцевину составил 7,5 дБ/см на длине волны 1550 нм. Длина лазера выбиралась из принципа получения достаточного для лазерной генерации коэффициента усиления при имеющемся уровне мощности накачки. Тестовые эксперименты показали, что генерацию можно получить при уменьшении длины активного волокна в лазере на брэгговских решётках вплоть до 36 мм, что является следствием высокой концентрации тулия в сердцевине. Дальнейшее уменьшение длины (менее 36 мм) существенно затрудняет последующую с ним работу, например приваривание волоконно-оптических компонентов для создания цельноволокonnой схемы. Как результат, в качестве рабочей длины активной среды было выбрано значение 36 мм.

В данной работе в лазере использовался резонатор с распределённой обратной связью. В РОС-лазере резонатор изготовлен в сердцевине активного волокна. В нашем случае он представляет собой две ВБР, имеющие одинаковые период и амплитуду, записанные вплотную друг к другу. Расстояние между ближайшими штрихами двух соседних ВБР

может быть наполовину меньше или больше, чем период модуляции показателя преломления в каждой из этих ВБР. Составные ВБР с такими относительными сдвигами называются ВБР с π -сдвигом. В рамках данной работы ВБР была записана с помощью технологии фемтосекундной лазерной модификации показателя преломления в одномодовом активном тулиевом волокне с сохранением поляризации. Поточечная запись ВБР осуществлялась на установке прецизионной фемтосекундной модификации материалов [8]. Импульсно-периодическое излучение лазера, сфокусированное объективом в сердцевину движущегося волоконного световода, периодически модифицирует показатель преломления. Общая длина решётки и период модуляции составили 36 мм и 0,659 мкм соответственно.

Ввод накачивающего излучения в РОС-лазер осуществлялся через спектрально-селективный разветвитель (ССР) с каналами 1600/1920 нм. Он также позволял использовать излучение генерации, распространяющееся в противоположном относительно накачки направлении (направление назад). Ещё один ССР, установленный с противоположной стороны РОС-лазера, применялся для разделения излучения генерации, сонаправленной с направлением накачки (направление вперёд), и непоглощённой накачки.

Выбор лазера накачки в первую очередь определяется используемой активной средой. Наиболее оптимальным решением является создание накачки, генерирующей вблизи длины волны 1600 нм, которое можно получить в широко распространённом эрбиевом лазере. Однако, как показали эксперименты, непрерывный эрбиевый лазер имеет высокий уровень шумов, связанных с релаксационными осцилляциями, которые переносятся в генерацию одночастотного источника [2]. По этой причине было решено в качестве накачивающего излучения использовать маломощный полупроводниковый одномодовый лазер с возможностью перестройки его длины волны генерации в области 1531–1563 нм. Для увеличения мощности полупроводникового лазера в работе использовался волоконный эрбиевый усилитель со встречной накачкой (рис. 1). В качестве активной среды усилителя используется 10 м эрбиевого волокна (Nufern, PM-EDF-6/125-HE). Также в схему был установлен волоконный изолятор, чтобы избежать воздействия лазерной генерации на перестраиваемый диод. Выходная мощность лазерного источника накачки превышала 1 Вт.

В РОС-лазере (см. рис. 1) на основе ВБР длиной 36 мм и при указанном источнике

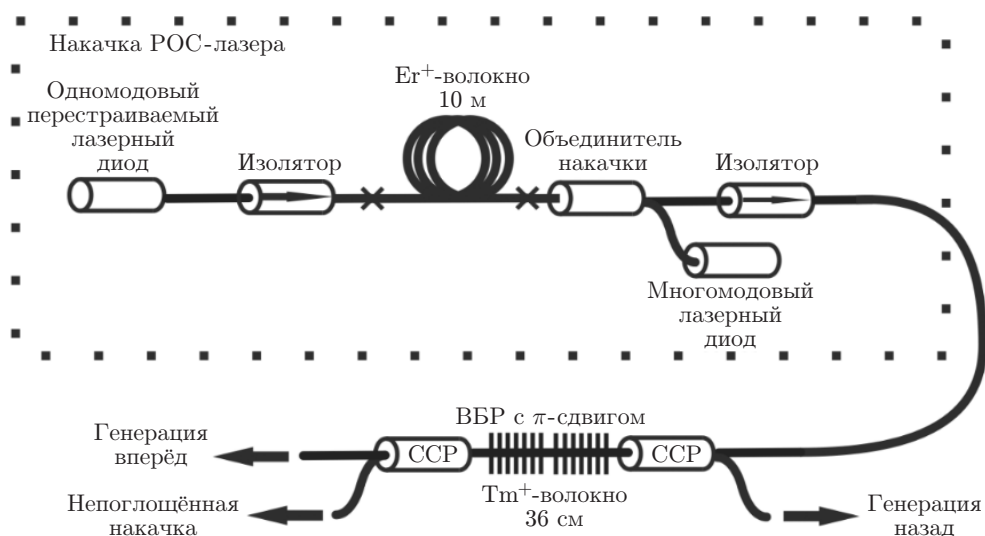


Рис. 1. Схема тулиевого РОС-лазера с лазером накачки (в пунктирном прямоугольнике)

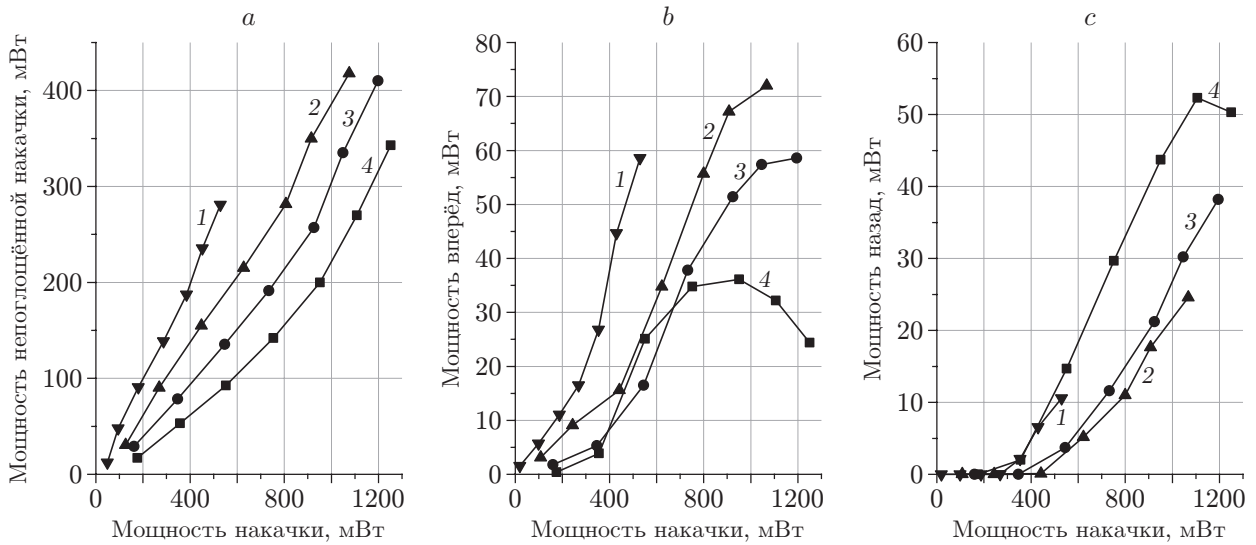


Рис. 2. Зависимости выходных мощностей от мощности накачки при разных длинах волн (1 — 1531 нм; 2 — 1539 нм; 3 — 1547 нм; 4 — 1563 нм): непоглощённой накачки (a), мощности генерации вперёд (b) и назад (c)

накачивающего излучения получена лазерная генерация на длине волны 1919 нм. Факт лазерной генерации фиксировался с помощью спектроанализатора Фурье Thorlabs OSA 203B. На первом этапе было изучено влияние длины волны накачки (1531, 1539, 1547 и 1563 нм). В частности, установлено, что при увеличении длины волны накачки наблюдается уменьшение прошедшей непоглощённой мощности (рис. 2, a). Этот факт связан с увеличением коэффициента поглощения тулия при приближении к максимуму поглощения, который находится вблизи 1600 нм.

На рис. 2, b, c представлены серии зависимостей выходной мощности в прямом и обратном направлениях соответственно от мощности накачки для нескольких длин волн. На рисунке видно, что мощность вперёд немного превышает мощность в обратном направлении. Последний факт можно связать со смещением положения фазового сдвига относительно центра ВБР. Также можно заметить, что зависимость мощности генерации от мощности накачки имеет нелинейный характер. Данное явление обусловлено тем, что в используемом высоколегированном волокне излучение накачки в значительной степени (>60 %) поглощается и часть этой мощности приводит к нагреву сердцевины активного волокна, в котором записана ВБР. Однако в начале отрезка активного волокна излучения накачки поглощается больше, чем в конце, и соответственно нагрев активного волокна происходит неравномерно. Температурный градиент, возникающий в результате неравномерного нагрева активного волокна и соответственно ВБР, приводит к рассогласованию периода модуляции показателя преломления ВБР и нарушению работы РОС-лазера: генерация пропадает или полностью переходит в импульсный режим. Для стабилизации режима генерации ВБР была помещена в алюминиевый радиатор. На ВБР наносился оптический иммерсионный гель для улучшения теплового контакта с радиатором. Также на рис. 2, c видно, что при длине волны генерации лазерного диода 1531 нм выходная мощность генерации РОС-лазера максимальна при средних мощностях накачки. Этот эффект связан с недостаточной фильтрацией излучения накачки с помощью ССР, в результате чего излучение непоглощённой накачки попадает в порт генерации и тем самым увеличивает мощность в данном канале. В излучении генерации назад отсутствует излучение накачки, что позволяет более точно определить мощностные характеристики лазера и использовать

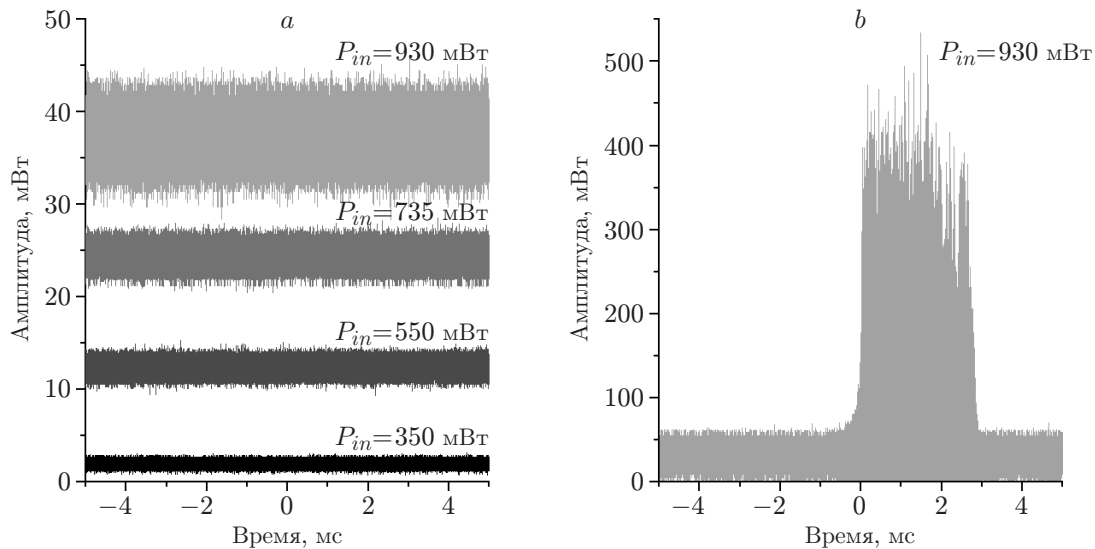


Рис. 3. Динамика интенсивности выходного излучения РОС-лазера при разных мощностях накачки при длине волны накачки 1563 нм: квазинепрерывный (а) и импульсный (b) режимы

порт ССР для дальнейших измерений. Таким образом, согласно рис. 2 оптимальная длина волны накачки равна 1563 нм. Дальнейшие измерения характеристик лазера проводились при такой длине волны накачки.

Динамика интенсивности выходного излучения представляет собой квазинепрерывный режим (рис. 3, а). Измерение осуществлялось с помощью осциллографа LeCroy WavePro 725Zi-A и фотодетектора Thorlabs DET10D/M. Также при проведении измерений было зафиксировано, что на больших мощностях накачки (~ 930 мВт) иногда наблюдается переход из квазинепрерывного режима в импульсный (рис. 3, б). Причиной перехода в импульсный режим является неравномерный разогрев сердцевинки активного волокна, который обсуждался выше. Максимум частот шумовой составляющей в случае квазинепрерывного режима лежит в области порядка 1 МГц и определяется частотой релаксационных колебаний в лазере. Для количественного описания шумовых характеристик лазера принято регистрировать интенсивность относительных шумов (Relatively Intensity Noise) [2]. В данной работе относительный шум измерялся с помощью анализатора электрического спектра Agilent Technologies N9010A в полосе частот 1 Гц. В результате величина интенсивности шумов излучения РОС-лазера составила менее -70 дБ/Гц с максимумом на частоте 1,2 МГц.

Также определялись оптические спектры генерируемого излучения. Оптический спектр, измеренный с помощью спектроанализатора Фурье, представлен на рис. 4, а. Спектр состоит из одной линии вблизи 1919 нм при отношении сигнал/шум более 40 дБ. Ширина линии, найденная по спектроанализатору, составила 50 пм, что определяется аппаратной функцией прибора. Для более точного измерения ширины линии был использован сканирующий волоконный кольцевой интерферометр [9] с межмодовым расстоянием 830 кГц. Сканирование оптического пути с частотой 1 кГц осуществлялось с помощью пьезоэлемента, на который был намотан отрезок одномодового волокна. Сигнал, отражённый от волоконного интерферометра, представлен на рис. 4, б. Согласно измерениям ширина линии генерации составляет приблизительно 70 кГц.

Все элементы лазера были выполнены на основе волокна с сохранением поляризации, поэтому ожидалось, что выходное излучение имеет линейное состояние поляризации. Этот

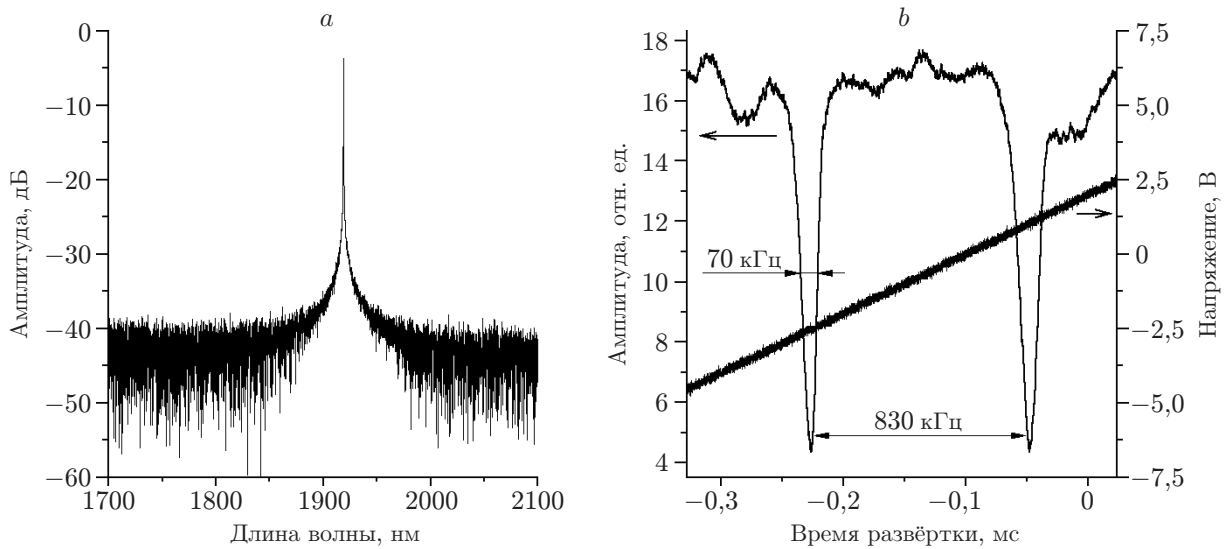


Рис. 4. Оптический спектр РОС-лазера при мощности накачки 930 мВт, измеренный с помощью: анализатора оптических спектров (а), сканирующего волоконного кольцевого интерферометра (прямой линией показано изменение напряжения на пьезоэлементе) (b)

факт был проверен пропусканием выходного излучения через поляризующий изолятор. Отсутствие прошедшей мощности при определённой ориентации поляризационных осей изолятора свидетельствует о линейности поляризации выходного излучения.

Заключение. В результате исследования был разработан и охарактеризован полностью волоконный тулиевый одночастотный лазер с длиной волны генерации 1,92 мкм. В качестве активной среды использовалось высоколегированное тулиевое волокно. Это позволило уменьшить длину всего лазера до единиц сантиметров и реализовать высокодобротный резонатор на основе ВБР с фазовым сдвигом. Резонатор был сформирован с помощью технологии фемтосекундной лазерной модификации показателя преломления, которая позволяет записывать решётки с произвольной резонансной длиной волны. В частности, можно ожидать, что аналогичные результаты могут быть получены для других длин волн генерации в области люминесценции ионов тулия (1,7–2,05 мкм). Однако высокая концентрация приводит к неоднородности поглощения накачки, возникновению градиента температуры и, как следствие, к срыву одночастотной генерации. Эта проблема может быть решена с помощью улучшения теплоотвода и/или реализации схемы накачки с двух сторон. Полная (вперёд и назад) выходная мощность лазерной генерации составила 80 мВт при мощности накачки 1,1 Вт с длиной волны 1563 нм. Ширина линии, измеренная с помощью сканирующего интерферометра, составила порядка 70 кГц при времени измерения 1 мс. Отметим, что разработанный лазер был применён в качестве опорного источника для анализа спектральной динамики волоконного тулиевого лазера со сканированием длины волны [10]. Измеренный относительный уровень шума оптического излучения (менее –70 дБ/Гц на частоте 1,2 МГц) является достаточно большим для одночастотных источников. Однако необходимо отметить, что в лазере полностью отсутствовали системы стабилизации (частоты, температуры). Можно предположить, что основной вклад в уровень шумов вносит температурный градиент. Температурная нестабильность приводит к изменению добротности резонатора, выходной мощности и флуктуациям интенсивности.

Благодарности. В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» Института

автоматики и электрометрии СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А19-119112990054-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Werle P. W.** Near- and mid-infrared laser-sensors for atmospheric gas analysis // Proc. SPIE. 2002. **4817**. P. 34–42.
2. **Yang Zh., Li C., Xu Sh., Yang Ch.** Single-Frequency Fiber Lasers. Singapore: Springer, 2019. 170 p.
3. **Geng J., Wu J., Jiang S. et al.** Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm . // Opt. Lett. 2007. **32**, N 4. P. 355–357.
4. **Yang C., Chen D., Xu S. et al.** Short all Tm-doped germanate glass fiber MOPA single-frequency laser at 1950 μm // Opt. Express. 2016. **24**, N 10. P. 10956.
5. **Pearson L., Kim J. W., Zhang Z. et al.** High-power linearly-polarized single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier // Opt. Express. 2010. **18**, N 2. P. 1607.
6. **Agger S., Povlsen J. H., Varming P.** Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser // Opt. Lett. 2004. **29**, N 13. P. 1503.
7. **Zhang Z., Shen D., Boyland A. J. et al.** High-power Tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm // Opt. Lett. 2008. **33**, N 18. P. 2059–2061.
8. **Wolf A., Dostovalov A., Skvortsov M. et al.** Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure // Opt. & Laser Technol. 2018. **101**. P. 202–207.
9. **Трикшев А. И., Курков А. С.** Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра // Квантовая электроника. 2011. **41**, № 7. С. 656–658.
10. **Budarnykh A. E., Vladimirskaya A. D., Lobach I. A., Kablukov S. I.** High-resolution analysis of the wavelength stopping effect in a self-sweeping fiber laser // Laser Phys. Lett. 2019. **16**, N 8. 085104.

Поступила в редакцию 18.05.2020

После доработки 28.05.2020

Принята к публикации 01.06.2020
