

Пикосекундный гольмиевый волоконный лазер с накачкой на длине волны 1125 нм

В.А.Камынин, С.А.Филатова, И.В.Жлуктова, В.Б.Цветков

Реализована полностью волоконная схема гольмиевого лазера, излучающего в режиме пассивной синхронизации мод, основанном на эффекте нелинейного вращения поляризации. В качестве источника накачки использовался волоконный иттербиевый лазер с длиной волны генерации 1125 нм. Частота следования импульсов гольмиевого лазера составила 7.5 МГц, а их длительность не превышала 52 пс на длинах волн 2065 и 2080 нм. Средняя выходная мощность лазера достигала 5 мВт.

Ключевые слова: волоконные лазеры, гольмиевый волоконный световод, пассивная синхронизация мод, нелинейное вращение поляризации, генерация коротких импульсов.

1. Введение

Гольмиевые волоконные лазеры позволяют получать генерацию излучения с наибольшими длинами волн в волокнах на кварцевой основе по сравнению с волоконными лазерами на других редкоземельных элементах. В настоящий момент достигнуты длины волн генерации от 2030 до 2210 нм [1–4]. Лазерные источники, работающие в данном спектральном диапазоне, могут использоваться в лазерной хирургии [5], атмосферной связи, лазерной локации [6], а также в перспективных системах связи на основе волокон с полой сердцевиной [7–9]. Таким образом, разработка и реализация различных схем волоконных лазеров на базе гольмиевых световодов является актуальной задачей. Одно из таких перспективных направлений – генерация коротких импульсов. Известны работы, в которых реализован режим синхронизации мод и получены, соответственно, короткие лазерные импульсы. Так, в работах [4, 10] описаны гольмиевые волоконные лазеры с использованием полупроводникового самонасыщающегося поглотителя или одностенных нанотрубок, позволившие получить импульсы длительностью около 890 фс на длине волны от 2030 до 2120 нм, однако

данные схемы являлись линейными и содержали объемные дихроичные зеркала. В работе [11] для реализации режима синхронизации мод на основе гольмиевых волокон использовался эффект нелинейного вращения поляризации. В результате были получены импульсы в спектральном диапазоне 2040–2070 нм с энергией до 800 пДж и длительностью 920 фс. К сожалению, эта схема также не лишена объемных элементов. Как правило, для повышения стабильности и упрощения конструкции выгоднее всего использовать полностью волоконную схему. В настоящей работе представлена полностью волоконная схема гольмиевого лазера, работающего в режиме синхронизации мод.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника излучения накачки использовался иттербиевый волоконный лазер, работающий на длине волны 1125 нм. Дiodная накачка иттербиевого лазера позволяла получать непрерывное излучение мощностью от 1 до 10 Вт. Резонатор исследуемого лазера состоял из обрезков оптического активного волокна, легированного ионами гольмия, и отрезка стандартного световода SM332. Накачка активного световода осуществлялась через волоконный мультиплексор, работающий в диапазоне 1125/2100 нм. Для реализации режима син-

В.А.Камынин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Россия, 614990 Пермь, ул. Ленина, 13 А; e-mail: kamyninva@gmail.com

С.А.Филатова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42

И.В.Жлуктова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский технологический университет (МГУПИ), Россия, 107996 Москва, ул. Стромынка, 20

В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 17 октября 2016 г.

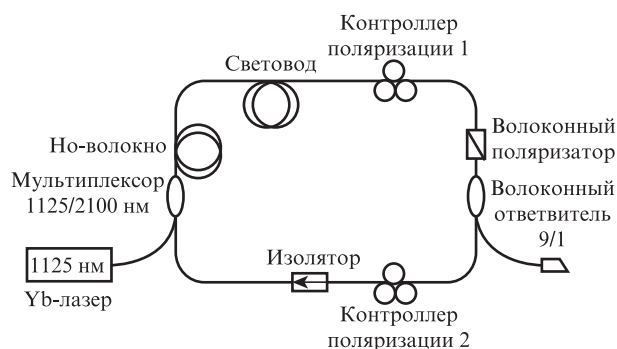


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

хронизации мод за счет нелинейного вращения поляризации в резонатор были введены два контроллера поляризации и волоконный поляризатор. Для выделения одного направления распространения генерируемого излучения использовался волоконный изолятор, работающий в области 2 мкм; потери излучения в прямом направлении составляли 0.6 дБ, а в обратном – более 30 дБ. Лазерное излучение выводилось из резонатора при помощи ответвителя с коэффициентом деления 9/1, который обеспечивал выведение 90% мощности. Активное волокно, легированное ионами гольмия, было изготовлено по MCVD-технологии и имело разность показателей преломления сердцевины и оболочки 0.007; диаметр сердцевины был 10 мкм, а длина волны отсечки – 2 мкм. Длина активного волокна в резонаторе варьировалась от 4 до 6.3 м, дисперсия резонатора оценивалась как -2.5 пс^2 .

При измерении выходной мощности излучения лазера непоглощенная часть мощности накачки отсекалась оптическим фильтром с подавлением излучения в спектральном диапазоне до 1.5 мкм более 30 дБ. Для точного измерения длительности импульсов излучение лазера преобразовывалось во вторую оптическую гармонику в кристалле ниобата лития с тем, чтобы попасть в рабочий спектральный диапазон фотоприемника с полосой 10 ГГц.

3. Экспериментальные результаты.

В режиме синхронизации мод была получена последовательность импульсов, осциллограмма которой представлена на рис.2. Период следования импульсов составил 132 нс, что соответствовало времени обхода резонатора. Спектр выходного излучения с центральной длиной волны 2065 нм (рис.3) имеет ширину на полувысоте 2.5 нм, что для спектрально-ограниченного импульса может соответствовать длительности $\sim 2 \text{ пс}$. Наличие характерных пиков в спектре выходного излучения [12] и аномальной дисперсии резонатора позволяет предположить, что гольмиевый лазер работает в солитонном режиме. Выходная мощность лазера составила 4 мВт, а частота следования импульсов – 7.5 МГц. Длительность импульса излучения измерялась в схеме с удвоением частоты, так как использовался фотодиод (10 ГГц), работающий в диапазоне 0.9–1.7 мкм. Полученные осциллограммы (рис.4) позволяют заключить, что длительность импульсов не превышала 52 пс. Отрицательный выброс сигнала на осциллограмме обусловлен переходной характеристикой электрического тракта от фотодиода до осциллографа.

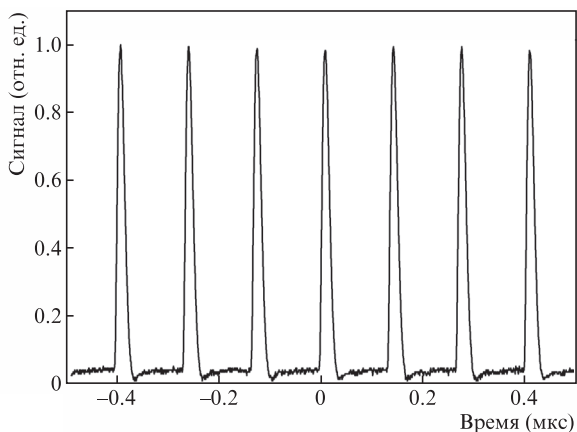


Рис.2. Осциллограмма импульсов выходного излучения.

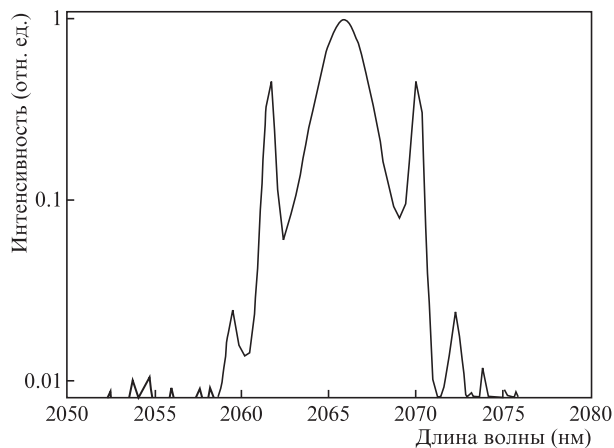


Рис.3. Спектр выходного излучения при длине активного волокна 4 м.

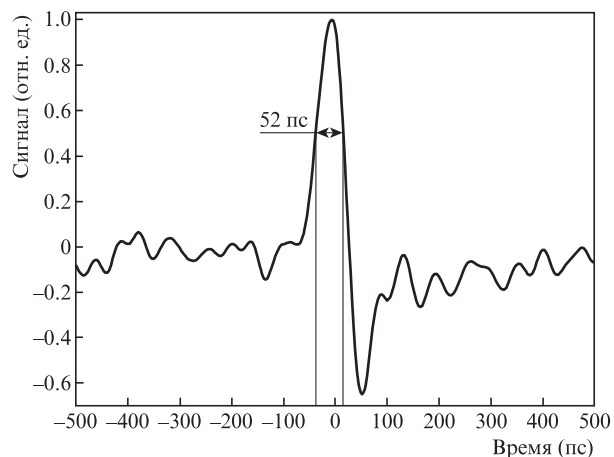


Рис.4. Осциллограмма сигнала с фотоприемника при фиксации одиночного импульса.

При увеличении длины активного волокна на 2 м нами получены та же длительность импульса и незначительное увеличение периода следования. Спектр при этом был сдвинут на 15 нм в длинноволновую область, в результате центральная длина волны составила 2080 нм (рис.5). Выходная мощность излучения была 2 мВт. Смещение в длинноволновую область и уменьшение средней

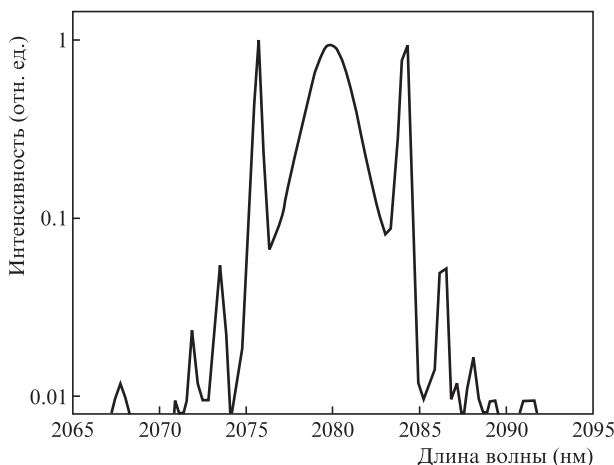


Рис.5. Спектр выходного излучения при длине активного волокна 6.3 м.

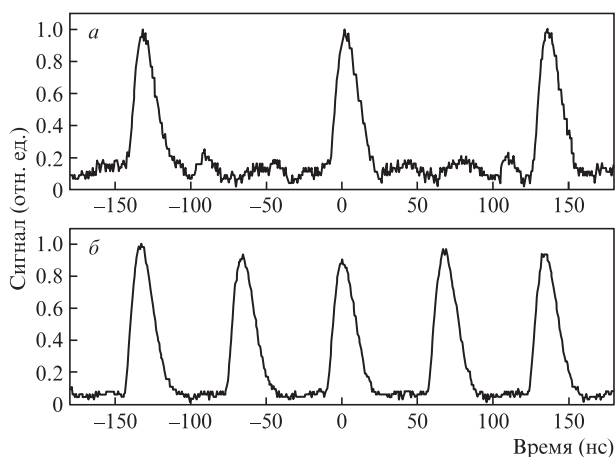


Рис.6. Осциллограммы последовательностей импульсов с частотой следования 7.5 (а) и 15 МГц (б).

выходной мощности может быть объяснено перепоглощением в волокне, легированном ионами гольмия на длине волны излучения.

При незначительном увеличении мощности накачки лазера наблюдалось удвоение частоты следования импульсов с 7.5 до 15 МГц (рис.6). Таким образом, можно сказать, что на гольмиевом волоконном лазере получена гармоническая синхронизация мод, подобная реализованной в работах [13, 14].

Итак, создан полностью волоконный гольмиевый лазер, излучающий в режиме пассивной синхронизации мод. Модуляция осуществлена за счет эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации. Полученная частота следования импульсов составила 7.5 МГц, длительность – не более 52 пс, а средняя выходная мощность – 2–4 мВт. При увеличении длины активного волокна продемонстрирована возможность изменения центральной

длины волны генерации лазера с 2065 до 2080 нм. Реализован режим гармонической синхронизации мод с удвоением частоты с 7.5 до 15 МГц.

Авторы выражают благодарность А.И.Тришкеву, Ю.Н.Пырккову и Т.В.Долматову за помощь в экспериментальной оценке длительности импульсов. Работа выполнена при поддержке РАН в рамках программы фундаментальных исследований «Основные и прикладные проблемы фотоники и науки о новых оптических материалах» и Минобрнауки РФ (проект № 14.Z50.31.0015).

1. Jackson S.D., Sabella A., Hemming A., Bennetts S., Lancaster D.J. *Opt. Lett.*, **32**, 241 (2007).
2. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009).
3. Антипов С.О., Камынин В.А., Медведков О.И., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Курков А.С., Бараников А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 603 (2013).
4. Chamorovskiy A.Yu., Marakulin A.V., Kurkov A.S., Leinonen T., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. J.*, **4** (3), 679 (2012).
5. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0013053>
6. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, (InTech, 2010, pp 471–500).
7. Liu Z., Chen Y., Li Z., Kelly B., Phelan R., O'Carroll J., Richter T. *J. Lightwave Technol.*, **33** (7), 1373 (2015).
8. Poletti F., Wheeler N.V., Petrovich M.N., Baddela N., Fokoua E.N., Hayes J.R., Richardson D.J. *Nature Photon.*, **7** (4), 279 (2013).
9. Simakov N., Li Z., Jung Y., Daniel J.M., Barua P., Shardlow P.C., Alam S.U. *Opt. Express*, **24** (13), 13946 (2016).
10. Chamorovskiy A.Y., Marakulin A.V., Kurkov A.S., Okhotnikov O.G. *Laser Phys. Lett.*, **9** (8), 602 (2012).
11. Li P., Ruehl A., Bransley C., Hartl I. *Laser Phys. Lett.*, **13** (6), 065104 (2016).
12. Kelly S.M. *J. Electron. Lett.*, **28** (8), 806 (1992).
13. Grudinin A.B., Gray S. *JOSA B*, **14** (1), 144 (1997).
14. Zhou S., Ouzounov D.G., Wise F.W. *Opt. Lett.*, **31** (8), 1041 (2006).