

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

И.С. Куделин¹

Д.А. Дворецкий¹

С.Г. Сазонкин¹

И.О. Орехов¹

А.А. Крылов²

А.Б. Пнёв¹

В.Е. Карасик¹

Л.К. Денисов¹

ddvoretzkiy@gmail.com

¹ НОЦ «Фотоника и ИК-Техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,

Российская Федерация

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обобщены результаты исследований волоконных эрбиевых лазеров УК-импульсов. Представлены основные параметры разработанных полностью волоконных эрбиевых лазеров УК-импульсов с длительностями ~100 фс и средней выходной мощностью до 30 мВт без использования усилителей, рассмотрены области их применения. Проведен сравнительный анализ разработанных лазеров с коммерчески доступными лазерами «Авеста-Проект». Разработанные волоконные лазеры могут составить конкуренцию уже присутствующим на рынке лазерам УК-импульсов по основным характеристикам. Полученные параметры разработанных лазеров позволяют использовать их в областях, где предъявляются особые требования к стабильности частоты повторения импульсов, стабильности выходной мощности и низким шумам источников излучения

Ключевые слова

Волоконный лазер, УК-импульсы, нелинейная эволюция поляризации, гибридная синхронизация мод, пассивная синхронизация мод

Поступила в редакцию 28.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-38-60102 мол_а_дк) и фонда Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых — кандидатов наук (грант № МК-7724.2016.8)

Введение. В настоящее время волоконные лазеры УК-импульсов (УКИ) с пассивной синхронизацией мод привлекают к себе все большее внимание благодаря перспективным применениям в промышленности, науке и медицине. К таким лазерным источникам предъявляются требования по стабильности частоты повторения, низким относительным шумам интенсивности, стабильности длительности импульсов.

Лазеры УКИ используются для повышения точностных и эксплуатационных характеристик аппаратуры частотно-временного сегмента в метрологии оптических частот и в оптических стандартах частоты (с нестабильностью частоты 10^{-14}), для задач синхронизации в системах связи путем создания сетки эталонных частот DWDM-систем [1, 2]. Отметим, что для генерации терагерцевого излучения требуется стабилизированный по длительности импульсов лазер УКИ [3]. Также УКИ-лазеры нашли применение в оптической когерентной томографии, в когерентной спектроскопии комбинационного антистоксового рассеяния света (КАРС) и двойной комб-спектроскопии (Coherent anti-Stokes Raman Scattering croscopy, Adaptive real-time dual-comb spectroscopy) [1]. Медицинские применения в основном связаны с офтальмологией и стоматологией. В промышленности УКИ-лазеры используются в металлообработке, а также в микрообработке материалов и маркировке. С помощью лазеров УКИ появилась возможность проследить ход химических реакций в химии и биологии и влиять на них.

Цель настоящей работы — обобщение результатов проведенных исследований основных характеристик различных режимов синхронизации мод, анализ полученных выходных параметров излучения и их стабильности для обеспечения требуемых условий в промышленных применениях.

Физический механизм работы и основные параметры насыщаемых поглотителей, применяемых для генерации УКИ. Важную роль в формировании устойчивого режима генерации УКИ играет устройство синхронизации мод. Такое устройство является фильтром излучения с высокой интенсивностью и малой длительностью. Важным параметром насыщаемого поглотителя является глубина модуляции, определяемая разностью максимального и минимального коэффициентов нелинейного пропускания. Глубина модуляции определяет надежность запуска режима синхронизации мод, поскольку большие значения модуляции позволяют генерировать излучение в импульсном режиме при малых мощностях накачки, а также повышают энергию в импульсе и КПД источника УКИ.

Следующий важный параметр насыщаемого поглотителя, определяющий предельную длительность импульса, — это время отклика. С одной стороны, малое время отклика (менее 100 фс) позволяет генерировать импульсы с предельно короткой длительностью, однако при таких значениях устойчивый запуск синхронизации мод затруднен. При значениях времени отклика более 100 фс обеспечивается надежный запуск режима генерации УКИ. Отметим, что важно найти компромисс между предельной длительностью и надежным запуском режима генерации. Одним из решений является комбинация «медленного» и «быстрого» насыщающихся поглотителей, т. е. гибридная синхронизация мод.

Наиболее предпочтительным способом получения УКИ является механизм синхронизации мод, основанный на нелинейной эволюции поляризации (НЭП) излучения в волоконном световоде (основанный на эффекте Керра [4]), так как при его использовании возможно получение наименьшей длительности импульса (предельное время отклика составляет ~ 5 фс). Однако лазеры с данным

механизмом синхронизации мод имеют высокий порог генерации, а параметры генерируемого излучения зависят от внешних воздействующих факторов.

Перспективными устройствами, используемыми в резонаторе лазера УКИ в качестве медленного просветляющегося поглотителя, являются углеродные наноструктуры (одностенные углеродные нанотрубки — ОУН), у которых более длительное время релаксации (сотни фемтосекунд) и низкий порог запуска режима синхронизации мод по сравнению с эффектом, основанным на НЭП.

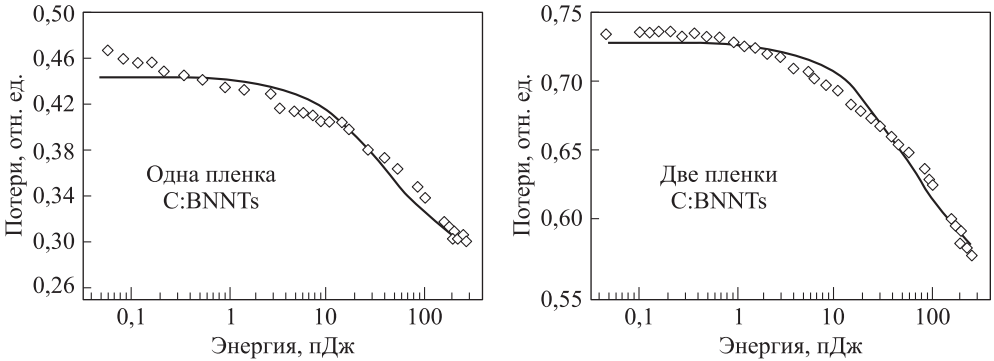


Рис. 1. Нелинейные потери одной и двух пленок с легированными бор-азотом углеродными нанотрубками

Одностенные углеродные нанотрубки являются перспективными для использования в лазерах с быстрым насыщаемым поглотителем (гибридная синхронизация мод). Одностенные углеродные нанотрубки имеют более простую и дешевую технологию изготовления, возможность использования в линейном и кольцевом резонаторах, могут быть диспергированы в различные полимерные матрицы, что приводит к формированию тонких пленок высокого оптического качества, которые затем без особых проблем интегрируются в резонатор волоконного лазера.

Легированные бор-азотом углеродные нанотрубки (C:BNNTs) используются в качестве насыщающегося поглотителя, параметры насыщения и глубина модуляции которого достаточны для надежного запуска синхронизации мод в эрбиевых волоконных УКИ-лазерах [5, 6]. Графики зависимости нелинейного поглощения от энергии импульса показаны на рис. 1 для одной и двух пленок, а численные значения основных параметров таких пленок сведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры одной и двух пленок с легированными бор-азотом углеродными нанотрубками

Параметр	Пленки с ОУН	
	одна	две
$\Delta T, \%$	$14,9 \pm 0,6$	$15,8 \pm 0,6$
$F_{\text{sat}}, \text{мкДж} / \text{см}^2$	24	37
$\tau_p^{\text{min}}, \text{пс}$	0,37	0,37
$P_{ML}, \text{мВт}$	85	100

Эрбиевый УКИ-лазер на основе волокна с высокими нелинейными оптическими свойствами. Экспериментальная установка разработанного полностью волоконного УКИ-лазера с синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации с высоконелинейным резонатором показана на рис. 2, а.

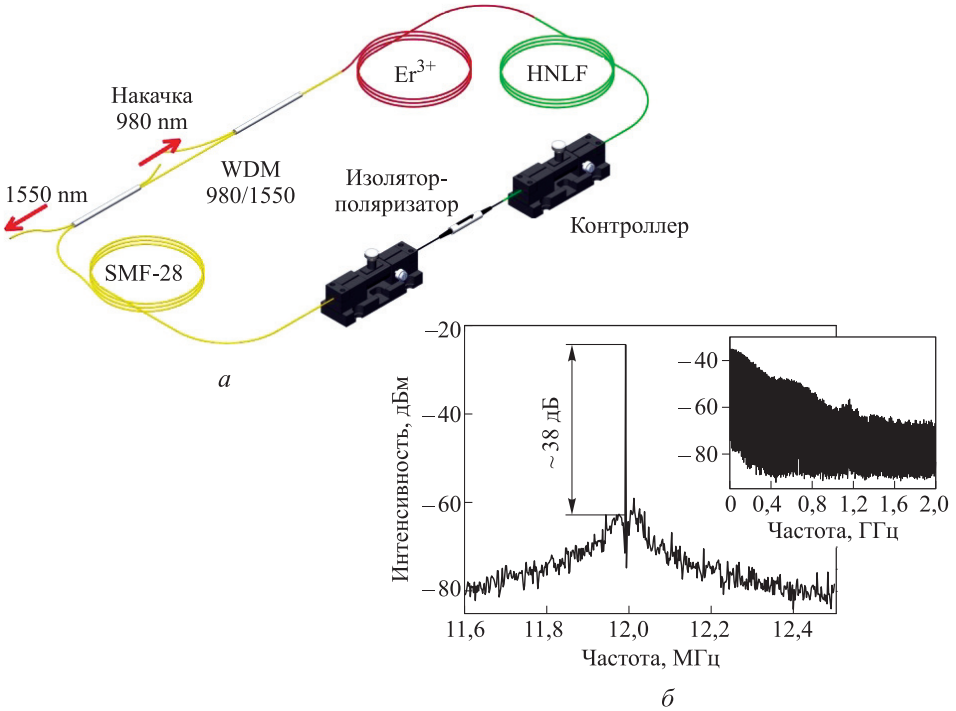


Рис. 2. Экспериментальная установка волоконного УКИ-лазера с синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации в высоконелинейном резонаторе (а); радиочастотный спектр генерации УКИ (б)

Режим пассивной синхронизации мод основан на действии НЭП, который имеет высокую эффективность с применением высоконелинейного световода (HNLF) в составе резонатора. Так, HNLF позволяет уменьшить общую длину резонатора, а также уменьшить порог по мощности для надежного запуска режима синхронизации мод.

Резонатор волоконного лазера образован активным эрбиевым волокном длиной 3,6 м с поглощением $\sim 6,5$ дБ/м на длине волны накачки и коэффициентом дисперсии, равным $-17,4$ пс/(нм · км), на длине волны 1550 нм. Высоконелинейный световод HNLF представляет собой одномодовый германосиликатный световод с содержанием оксида германия в сердцевине ~ 50 % мол., коэффициент дисперсии световода составил -100 пс/(нм·км), а его длина в схеме $\sim 1,5$ м. Стоит отметить, что суммарное внутррезонаторное значение параметра дисперсии групповой скорости (ДГС) β_2 в схеме лазера составило $+0,022$ пс² при соответствующей подобранной длине волокна SMF-28.

Разработанный лазер позволяет генерировать УКИ в режиме солитонов с управляемой дисперсией (УД-солитоны), минимальной длительностью 84 фс и средней выходной мощностью 30 мВт, спектр которых приведен на рис. 3, а. На рис. 2, б показан радиочастотный спектр генерации УКИ, снятый с приемника излучения на частоте следования импульсов, которое соответствует общей длине резонатора 17,3 м, на рис. 3, б — автокорреляция по интенсивности с гауссовым приближением и выходными параметрами УКИ.

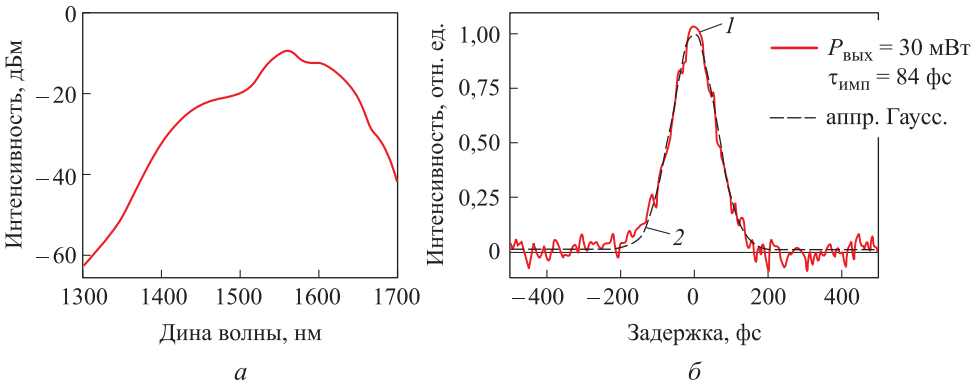


Рис. 3. Спектр генерации УКИ (а); автокорреляция по интенсивности с гауссовым приближением и выходными параметрами УКИ (б)

Волоконные эрбиевые лазеры с гибридной синхронизацией мод на основе насыщающихся поглотителей с ОУН и эффектом НЭП. На рис. 4 приведены схемы резонаторов полностью волоконных лазеров с гибридной синхронизацией мод, реализуемой с помощью действия двух механизмов: ОУН и метода нелинейной эволюции поляризации. Основным отличием схем является значение внутрирезонаторной ДГС.

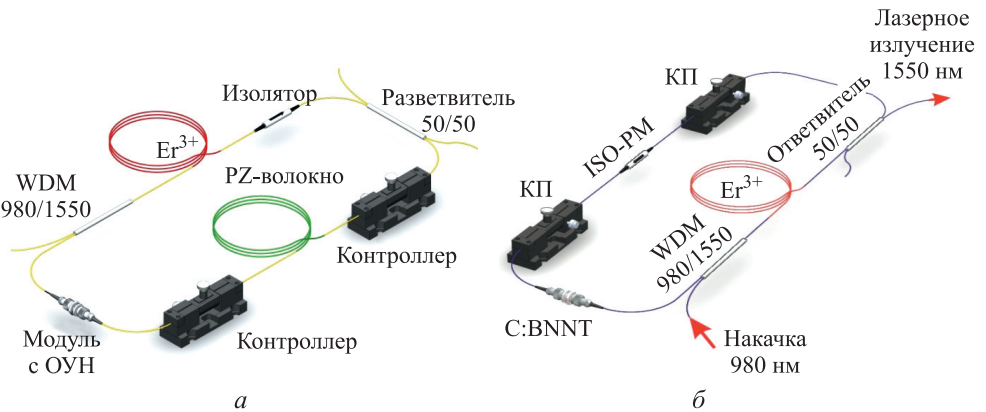


Рис. 4. Экспериментальные установки полностью волоконных лазеров УКИ с гибридной синхронизацией мод:

а — ДГС примерно $+0,015 \text{ пс}^2$; б — ДГС примерно $-0,021 \text{ пс}^2$

В обеих схемах накачка активного эрбиевого световода осуществлялась лазерным диодом на длине волны 980 нм через спектральный демультиплексор WDM 980/1550. Для синхронизации мод использовались два механизма: быстрый — НЭП, для достижения предельно коротких импульсов; и медленный — ОУН, для стабильного запуска режима синхронизации мод. Две пленки ОУН были установлены в резонатор между двумя FC/APC коннекторами, соединенными оптической розеткой. Механизм НЭП был реализован путем использования поляризатора, осуществляющего дискриминацию импульсов по интенсивности, и двух механических контроллеров поляризации (КП), необходимых для настройки режима синхронизации мод. В схеме на рис. 4, а в качестве поляризатора использовался поляризационный световод [7], а в схеме на рис. 4, б — коммерчески доступный изолятор-поляризатор. В обеих схемах для односторонней генерации были установлены изоляторы, а для вывода излучения использовались разветвители 50/50. Для точной настройки внутррезонаторной ДГС выполнен расчет длин световодов, которые имели разные знаки дисперсии. Более подробное описание экспериментальных установок и результатов измерений приведено в [8, 9].

В резонаторе (см. рис. 4, а) генерировались УКИ с гиперболическим спектром, характерным для симиларитонов (рис. 5, а). Автокорреляционная функция по интенсивности на различных мощностях накачки с приближением функцией Гаусса приведена на рис. 5, б. Полностью волоконный лазер генерировал УКИ с минимальной длительностью импульса 92,6 фс, частотой следования 38,1 МГц, и средней оптической мощностью 6,9 мВт со стабильными частотными характеристиками [10].

На рис. 6 приведены автокорреляция по интенсивности и фаза полученного в резонаторе (см. рис. 4, б) дечирпированного импульса с гауссовой формой спектра, а на рис. 6 приведен полученный спектр генерации при максимальной выходной мощности, а также эволюция длительности импульса на выходе из волоконного резонатора. Отметим, что длительность по полувысоте дает значение ширины дечирпированного гауссового импульса ~90 фс.

На рис. 7, а показан спектр электрических сигналов на основной частоте повторения осциллятора, которая в точности соответствует длине резонатора ~4,93 м, в диапазоне 42 МГц с разрешением 300 Гц. Отметим, что график имеет ярко выраженный пик на частоте 42,22 МГц с отношением сигнал/шум 63 дБ. На вставке к рис. 7, а приведен график частотного спектра в области частот от 10 до 2 ГГц с разрешением 30 кГц. Высокое отношение сигнал/шум для режима генерации в ВЧ-области частот свидетельствует о стабильности полученной синхронизации мод.

Таким образом, получена генерация стабильных дечирпированных импульсов с частотой повторения 42,22 МГц со средней выходной мощностью 16,7 мВт и длительностью импульса 90 фс, что соответствует энергии в импульсе ~0,4 нДж и 4,4 кВт пиковой мощности, полученной сразу из резонатора.

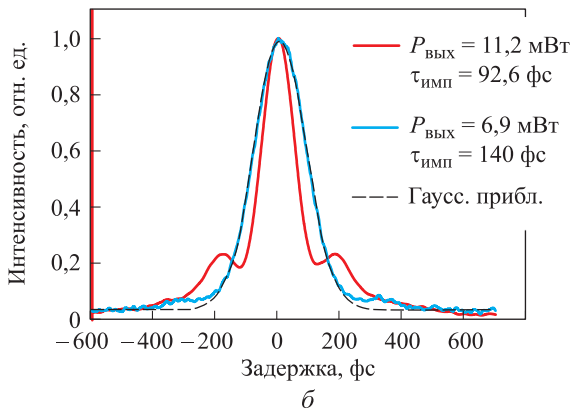
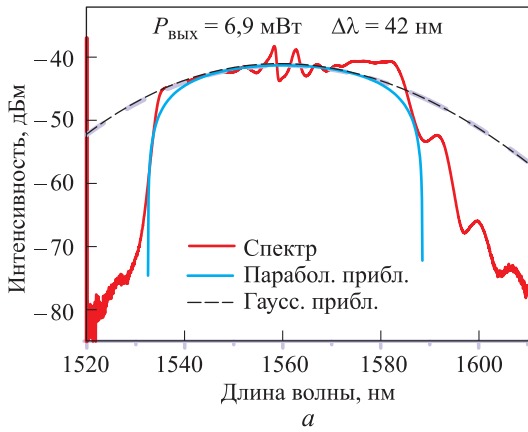


Рис. 5. Спектр УКИ и параболическое приближение (а); автокорреляционная функция по интенсивности для различных мощностей накачки и приближение УКИ функцией Гаусса (б)

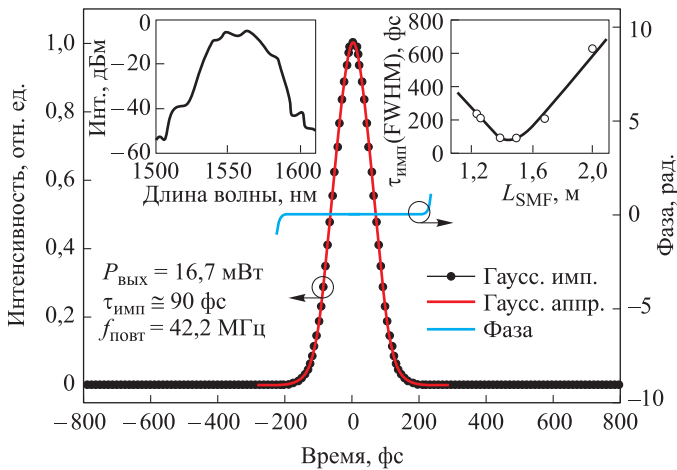


Рис. 6. Автокорреляция по интенсивности и фаза импульсов с гауссовой формой, на вставках — зависимость длительности импульса от длины выходного волокна SMF и спектр генерации

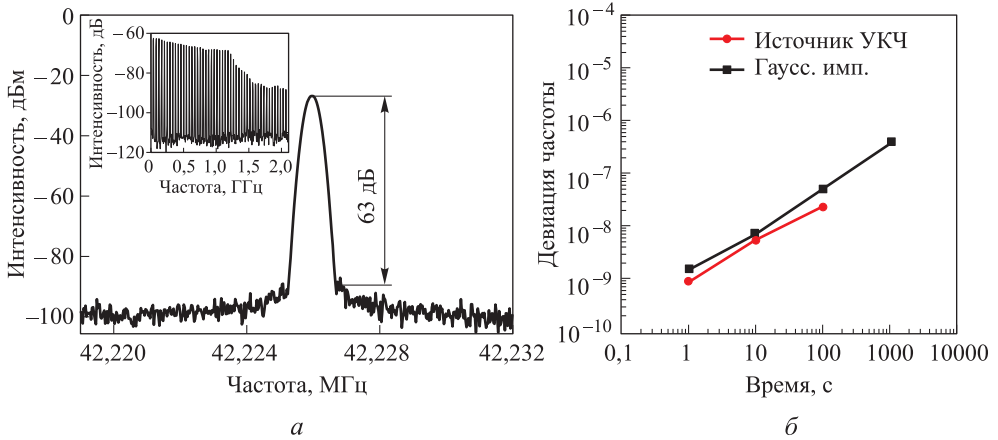


Рис. 7. Радиочастотный спектр генерации УКИ на частоте повторения импульсов (а); девиация частоты следования импульсов в зависимости от времени (б)

Известно, что девиация Аллана частоты повторения УКИ-лазеров является одним из ключевых параметров источников для их возможного применения в оптической частотной метрологии. На рис. 7, б показана девиация частоты повторения источника УКИ (см. рис. 4, б) с гауссовой формой импульса по сравнению с коммерческим волоконным источником УКИ с длительностью импульса 100 фс «Авеста-Проект» (г. Троицк, Московская область) [11]. Разработанный лазер имеет сравнительно низкую девиацию частоты повторения на тех же интервалах времени по сравнению с коммерческим лазером, а значит, может быть использован в качестве эффективного источника УКИ в метрологии частоты и времени.

Показатели качества. Основные выходные характеристики разработанных лазеров и коммерческих источников приведены в табл. 2. Отметим, что в лазере с гибридной синхронизацией мод с использованием PZ-волокна (см. рис. 4, а) относительный шум интенсивности (RIN) составляет примерно -120 дБс/Гц, а ширина линии комба (одной спектральной компоненты) 32 кГц. В то же время в лазере с гибридной синхронизацией мод с использованием изолятора-поляризатора (см. рис. 4, б) RIN составил менее -130 дБс/Гц, а ширина линии комба 18,1 кГц, что является хорошим показателями качества для лазеров данного типа [10].

Таблица 2

Основные характеристики разработанных лазеров по сравнению с лазером EFO-80/100 «Авеста-Проект»

Характеристика	Схема с гибридной синхронизацией мод		Схема с использованием волокна HNLF	EFO-80/100 «Авеста-Проект»
	PZ-волокно	ISO-PM		
Длительность импульса, фс	92,6	90	84	<80

Характеристика	Схема с гибридной синхронизацией мод		Схема с использованием волокна HNLF	EFO-80/100 «Авеста-Проект»
	PZ-волокно	ISO-PM		
Центральная длина волны, нм	1560	1560	1560	1560
Средняя выходная мощность, мВт	11,2	16,7	30	10
Частота повторения импульсов, МГц	38,1	42,2	12	70
Энергия в импульсе, нДж	0,3	0,4	2,5	0,15

Заключение. Разработанные волоконные лазеры по своим основным характеристикам могут составить конкуренцию существующим на рынке лазерам УКИ. В то же время полученные параметры разработанных лазеров позволяют использовать их в областях, где предъявляются особые требования к стабильности частоты повторения импульсов, выходной мощности и низким шумам источников излучения. Простота изготовления и юстировки полностью волоконной схемы резонатора лазера может существенно сократить издержки на производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Udem Th., Holzwarth R., Hansch T.W.* Optical frequency metrology // *Nature*. 2002. No. 416. P. 233–237. DOI: 10.1038/416233a
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v416/n6877/abs/416233a.html>
2. *Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., et al.* Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock // *Laser Phys*. 2007. Vol. 17. No. 11. P. 1286–1291. DOI: 10.1134/S1054660X07110023
URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1054660X07110023>
3. *Jepsen P.U., Jacobsen R.H., Keiding S.R.* Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas // *J. Opt. Soc. Am. B*. 1996. Vol. 13. No. 11. P. 2424–2436. DOI: 10.1364/JOSAB.13.002424
URL: <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-13-11-2424>
4. *Fermann M.* Ultrafast fiber laser technology // *IEEE Journal of Sel. Topics in QE*. 2009. Vol. 15. No. 1. P. 191–206. DOI: 10.1109/JSTQE.2008.2010246
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4773318>
5. *Krylov A.A., Sazonkin S.G., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., et al.* Performance peculiarities of carbon-nanotube-based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2016. Vol. 33. No. 2. P. 134–142. DOI: 10.1364/JOSAB.33.000134
URL: <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-33-2-134>

6. *Arutyunyan N.R., Arenal R., Obratsova E.D., Stephand O., et al.* Incorporation of boron and nitrogen in carbon nanomaterials and its influence on their structure and opto-electronical properties // *Carbon*. 2012. Vol. 50. No. 3. P. 791–799.
7. *Chernykh D., Krylov A., Levchenko A., Grebenyukov V., et al.* Hybrid mode-locked erbium-doped all-fiber soliton laser with a distributed polarizer // *Appl. Opt.* 2014. Vol. 53. No. 29. P. 6654–6662. DOI: 10.1364/AO.53.006654
URL: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-53-29-6654>
8. *Krylov A.A., Sazonkin S.G., Lazarev V.A., Dvoretzkiy D.A., et al.* Ultra-short pulse generation in the hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser with a distributed polarizer // *Laser Phys. Lett.* 2015. Vol. 12. No. 6. P. 065001–065006. DOI: 10.1088/1612-2011/12/6/065001
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-2011/12/6/065001/meta>
9. *Дворецкий Д.А., Сазонкин С.Г., Воронаев В.С.* Генерация ультракоротких импульсов с минимальной длительностью 90 фс в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с гибридной синхронизацией мод // *Квантовая электроника*. 2016. Т. 46. № 11. С. 979–981.
URL: [http://www.mathnet.ru/php](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=16493&option_lang=rus)
[archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=16493&option_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=16493&option_lang=rus)
10. *Lazarev V., Krylov A., Dvoretzkiy D., Sazonkin S., et al.* Stablesimilariton generation in an all-fiber hybrid mode-locked ring laser for frequency metrology // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2016. Vol. 63. No. 7. P. 1028–1033. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2542368 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7434073>
11. *Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., et al.* Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock // *Laser Physics*. 2007. Vol. 17. No. 11. P. 1286–1291. DOI: 10.1134/S1054660X07110023
URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1054660X07110023>

Куделин Игорь Сергеевич — студент магистратуры МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Дворецкий Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Сазонкин Станислав Григорьевич — аспирант, инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Орехов Илья Олегович — студент бакалавриата МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Крылов Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Научного центра волоконной оптики РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 38).

Пнёв Алексей Борисович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Карасик Валерий Ефимович — д-р техн. наук, профессор, директор НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Денисов Лев Константинович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Куделин И.С., Дворецкий Д.А., Сазонкин С.Г., Орехов И.О., Крылов А.А., Пнёв А.Б., Карасик В.Е., Денисов Л.К. Исследование стабильности выходных характеристик полностью волоконных кольцевых эрбиевых лазеров ультракоротких импульсов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 4–16.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-4-16

STABILITY STUDY OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF ALL-FIBER ULTRASHORT PULSE RING ERBIUM LASERS

I.S. Kudelin¹

D.A. Dvoretzkiy¹

ddvoretzkiy@gmail.com

S.G. Sazonkin¹

I.O. Orekhov¹

A.A. Krylov²

A.B. Pnev¹

V.E. Karasik¹

L.K. Denisov¹

¹ Scientific Educational Centre Photonics and IR-Technology Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this paper, we summarize the results of research of all-fiber erbium-doped ultrashort pulse lasers and their applications in various fields. We present the main parameters of all-fiber erbium-doped ultrashort pulse lasers with a pulse duration of 100 fs and an average output power up to 30 mW without the use of amplifiers, as well as we discuss the various areas of application. Furthermore, we give a comparative analysis of the developed lasers with commercially available lasers "Avesta-Project" (Troitsk). The developed fiber lasers are close in their basic characteristics to the commercial ultrashort pulse fiber lasers. At the same time, measured parameters allow us to use them in areas where there are special requirements to the pulse repetition frequency stability, stability of output power and low noise performance

Keywords

Fiber lasers, ultrashort-pulses, non-linear polarization evolution, hybrid mode-locking, passive mode-locking

REFERENCES

- [1] Udem Th., Holzwarth R., Hansch T.W. Optical frequency metrology. *Nature*, 2002, no. 416, pp. 233–237. DOI: 10.1038/416233a
Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v416/n6877/abs/416233a.html>
- [2] Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., Shelkovikov A.S. Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock. *Laser Phys.*, 2007, vol. 17, no. 11, pp. 1286–1291. DOI: 10.1134/S1054660X07110023
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1054660X07110023>
- [3] Jepsen P.U., Jacobsen R.H., Keiding S.R. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1996, vol. 13, no. 11, pp. 2424–2436. DOI: 10.1364/JOSAB.13.002424
Available at: <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-13-11-2424>
- [4] Fermann M. Ultrafast fiber laser technology. *IEEE Journal of Sel. Topics in QE*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 191–206. DOI: 10.1109/JSTQE.2008.2010246
Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4773318>
- [5] Krylov A.A., Sazonkin S.G., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Dvoretzkiy D.A., Obraztsova E.D., Dianov E.M. Performance peculiarities of carbon-nanotube-based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser modelocking. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2016, vol. 33, no. 2, pp. 134–142. DOI: 10.1364/JOSAB.33.000134
Available at: <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-33-2-134>
- [6] Arutyunyan N.R., Arenal R., Obraztsova E.D., Stephand O., Loiseaux A., Pozharova A.S., Grebenyukova V.V. Incorporation of boron and nitrogen in carbon nanomaterials and its influence on their structure and opto-electronical properties. *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 791–799.
- [7] Chernykh D., Krylov A., Levchenko A., Grebenyukov V., Arutyunyan N., Pozharov A., Obraztsova E., Dianov E. Hybrid mode-locked erbium-doped all-fiber soliton laser with a distributed polarizer. *Appl. Opt.*, 2014, vol. 53, no. 29, pp. 6654–6662. DOI: 10.1364/AO.53.006654
Available at: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-53-29-6654>
- [8] Krylov A.A., Sazonkin S.G., Lazarev V.A., Dvoretzkiy D.A., Leonov S.O., Pnev A.B., Karasik V.E., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsova E.D., Dianov E.M. Ultra-short pulse generation in the hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser with a distributed polarizer. *Laser Phys. Lett.*, 2015, vol. 12, no. 6, pp. 065001–065006. DOI: 10.1088/1612-2011/12/6/065001
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-2011/12/6/065001/meta>
- [9] Dvoretzkiy D.A., Sazonkin S.G., Voropaev V.S., Negin M.A., Leonov S.O., Pnev A.B., Karasik V.E., Denisov L.K., Krylov A.A., Davydov V.A., Obraztsova E.D. Generation of ultra-short pulses with a minimum duration of 90 fs in a hybrid mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser. *Quantum Electron*, 2016, vol. 46, no. 9, pp. 979–981. DOI: 10.1070/QEL16142
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QEL16142>
- [10] Lazarev V., Krylov A., Dvoretzkiy D., Sazonkin S., Leonov S., Pnev A., Shelestov D., Tarabrin M., Karasik V., Kireev A., Gubin M. Stable similariton generation in an all-fiber hybrid mode-locked ring laser for frequency metrology. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 7, pp. 1028–1033. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2542368
Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7434073>

[11] Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., Shelkovikov A.S. Femtosecond Er³⁺ fiber laser for application in an optical clock. *Laser Physics*, 2007, vol. 17, no. 11, pp. 1286–1291. DOI: 10.1134/S1054660X07110023
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1054660X07110023>

Kudelin I.S. — Master's degree student, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Dvoretzkiy D.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher at Scientific Educational Centre Photonics and IR-Technology Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sazonkin S.G. — post-graduate student, engineer at Scientific Educational Centre Photonics and IR-Technology Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Orekhov I.O. — Bachelor's degree student, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Krylov A.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Researcher at Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 38, Moscow, 119333, Russian Federation).

Pnev A.B. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Scientific Educational Centre Photonics and IR-Technology Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Karasik V.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of Scientific Educational Centre Photonics and IR-Technology Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Denisov L.K. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kudelin I.S., Dvoretzkiy D.A., Sazonkin S.G., Orekhov I.O., Krylov A.A., Pnev A.B., Karasik V.E., Denisov L.K. Stability Study of Output Characteristics of All-Fiber Ultrashort Pulse Ring Erbium Lasers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 4–16.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-4-16