

Сравнение режимов синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере

С.А.Филатова, В.А.Камынин, Н.Р.Арутюнян, А.С.Пожаров, Е.Д.Образцова, П.А.Итрин, В.Б.Цветков

Проведено сравнение двух режимов синхронизации мод в полностью волоконном гольмиевом лазере: за счет нелинейного вращения поляризации (НВП) и гибридной синхронизации мод (НВП при использовании одностенных углеродных нанотрубок), а также исследованы характеристики полученного импульсного излучения. Импульсная генерация была получена на длинах волн 2072 и 2082 нм с шириной спектра на полувысоте 3.7 и 3.3 нм соответственно. Длительность импульсов в обоих случаях не превышала 1.5 пс, а энергия в импульсе – 0.4 нДж при синхронизации мод за счет НВП и 0.3 нДж в режиме гибридной синхронизации мод. Показано, что в случае гибридной синхронизации мод отношение сигнал/шум лучше на 3 дБ по сравнению с синхронизацией мод за счет НВП. Отмечена возможность самозапуска лазерной системы, реализованной за счет гибридной синхронизации мод.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, синхронизация мод, нелинейное вращение поляризации, гибридная синхронизация мод, одностенные углеродные нанотрубки.

1. Введение

Компактные лазерные источники ультракоротких импульсов (УКИ), излучающие в спектральном диапазоне 2–3 мкм, представляют интерес как для научных, так и для прикладных задач. Такие источники могут использоваться в качестве задающих генераторов (ЗГ) для нелинейного преобразования частоты в область среднего инфракрасного (ИК) и терагерцевого (ТГц) диапазонов [1, 2], а также в качестве ЗГ для объемных усилителей [3]. Наличие пиков поглощения воды в спектральной области около 2 мкм делает такие источники пригодными для медицинских применений, например в дерматологии и хирургии [4]. Они могут использоваться также для обработки материалов [5], лазерной локации [6], сканирования газов [7] и атмосферной связи [8]. Среди оптических волокон на кварцевой основе наибольшие длины волн генерации позволяют получать световоды, легированные ионами гольмия (Ho^{3+}), которые обладают широкой полосой усиления 2000–2200 нм [9]. Таким образом, разработка и реализация компактных гольмиевых волоконных лазеров,

генерирующих ультракороткие импульсы, является актуальной задачей.

Генерация импульсов длительностью менее 100 пс может быть достигнута в режиме синхронизации мод. К настоящему моменту в большинстве опубликованных работ по импульсным гольмиевым волоконным лазерам режим синхронизации мод реализован за счет использования насыщающихся поглотителей, таких как углеродные нанотрубки [10], графен [11, 12], черный фосфор [13], а также зеркала с полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM) [14, 15]. Представлены также работы по реализации режима синхронизации мод за счет нелинейного вращения поляризации (НВП), основанного на нелинейном эффекте Керра в оптических волокнах [16, 17]. Стоит отметить, что при работе с импульсными лазерами, работающими на основе НВП, наблюдаются сложности с самозапуском лазерной системы. Для решения этой проблемы в резонаторе лазера объединяют два насыщающихся поглотителя [18], быстрый и медленный, получая таким образом гибридную синхронизацию мод. Медленный насыщающийся поглотитель (время отклика 300–700 фс), имеющий низкий порог насыщения, инициирует синхронизацию мод. Быстрый поглотитель, основанный на эффекте Керра или НВП (так называемый искусственный насыщающийся поглотитель), обладающий малым временем отклика (около 10 фс), обеспечивает эффективное формирование импульсов. Гибридная синхронизация мод активно используется в эрбиевых [19, 20] и тулиевых [21, 22] волоконных лазерах. В работе [16] в схему гольмиевого волоконного лазера, работающую на основе НВП, добавили зеркало с насыщающимся поглотителем, получив таким образом гибридную синхронизацию мод и обеспечив возможность самозапуска системы. Однако эта схема содержала объемные элементы и не являлась полностью волоконной.

Таким образом, представляет интерес сравнение в одинаковых условиях разных режимов синхронизации

С.А.Филатова, В.А.Камынин, А.С.Пожаров. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: filsim2910@gmail.com

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

Е.Д.Образцова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 10

П.А.Итрин. Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г., после доработки – 17 октября 2018 г.

мод (НВП и гибридная синхронизация мод) в полностью волоконном гольмиевом лазере, а также исследование характеристик полученного импульсного излучения.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 представлена схема экспериментальной установки полностью волоконного гольмиевого лазера с гибридной синхронизацией мод. В качестве источника излучения накачки использовался волоконный лазер на основе иттербиевого (Yb) GTWave-волокна, работающий в непрерывном режиме на длине волны 1125 нм. Выбор такой длины волны накачки обусловлен наличием у ионов гольмия перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$, а также спектральной зависимостью эффективности Yb-лазера. Для иттербиевых лазеров на основе GTWave-волокна наблюдается резкое снижение эффективности генерации на длинах волн более 1120 нм [23]. Поэтому в большинстве экспериментов с гольмиевыми волоконными лазерами мы использовали длину волны 1125 нм, а не 1150 нм, достигая при этом достаточно высокой эффективности генерации. Мощность непрерывного волоконного Yb-лазера составляла 8 Вт, но для накачки импульсного гольмиевого волоконного лазера использовалась мощность не более 3.3 Вт. Излучение от лазера накачки поступало в кольцевой резонатор гольмиевого лазера (длиной около 14 м) через волоконный мультиплексор, работающий в диапазоне 1125/2100 нм.

Кольцевой резонатор лазера состоял из гольмиевого волокна длиной ~ 6 м и одномодового волокна SMF-28e – примерно 8 м. Активное волокно было изготовлено по MCVD-технологии, его параметры: разность показателей преломления сердцевинки и оболочки 0.007, диаметр сердцевинки 16 мкм и длина волны отсечки около 2 мкм. Концентрация ионов гольмия в волокне составила $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а поглощение волокна на длине волны накачки (1125 нм), измеренное методом обрыва, – 5 дБ/м. Использование активного волокна длиной 6 м обусловлено стремлением получить как можно большую длину волны излучения. В работе [24] проводились эксперименты по изменению длины волны излучения в зависимости от длины активного волокна в резонаторе. Общая внутррезонаторная дисперсия лазера вычислялась по формуле, приведенной в работах [17, 25], и составила примерно -1.5 ps^2 . Дисперсия групповых скоростей (β_2) на длине волны 2080 нм для одномодового волокна SMF-28e была $-0.102 \text{ ps}^2/\text{m}$ [26]. Зная дисперсию групповых скоростей резонатора и одномодового волокна, а также длину ис-

пользуемых волокон, можно вычислить дисперсию β_2 для гольмиевого волокна, она равна $-0.112 \text{ ps}^2/\text{m}$.

Для выделения одного направления распространения генерируемого излучения использовался волоконный изолятор, работающий в области 2 мкм. Потери излучения в прямом направлении составили 0.6 дБ, а в обратном – более 30 дБ. Режим синхронизации мод за счет НВП был реализован с помощью волоконного поляризатора и двух контроллеров поляризации. Для реализации режима гибридной синхронизации мод в схеме лазера, работавшего на основе НВП, между оптическими разъемами FC/APC фиксировалась прозрачная пленка карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) с однородно диспергированными одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ), которые являлись медленным насыщающимся поглотителем.

В работах [27, 28] дано подробное описание изготовления и характеристик суспензий отдельных ОУНТ в 1%-ном водном растворе КМЦ. Целлюлоза выбрана в качестве ключевого элемента, поскольку она является одновременно эффективным поверхностно-активным веществом и материалом матрицы. В связи с этим необходимы только два элемента (КМЦ и ОУНТ) для изготовления суспензии, из которой создаются пленки с высоким оптическим качеством. Целлюлоза – высокогибкий полимер, из которого можно сформировать (после сушки суспензии) тонкие пленки толщиной до 4–6 мкм. Подобные пленки уже использовались в эрбиевых и тулиевых волоконных лазерах [29, 30]. В работе [30] наибольшая достигнутая длина волны генерации составила 1.9 мкм. Поскольку в настоящей работе центральная длина волны излучения гольмиевого волоконного лазера смещена в длинноволновую область (2080 нм), мы использовали коммерчески доступные трубки TuBall с большим диаметром (более 2 нм). На рис.2 представлен спектр пропускания пленки с ОУНТ, используемой в наших экспериментах. Поглощение вблизи длины волны ~ 2600 нм связано с переходом E_{11} в плотности состояний ОУНТ. Ширина данного перехода достаточна для того, чтобы получить синхронизацию мод на длине волны 2082 нм. Ширина полос поглощения связана с распределением диаметров нанотрубок.

Для вывода излучения из резонатора лазера применялся волоконный ответвитель с коэффициентом деления 9/1, который обеспечивал выведение 90% мощности. Схема гольмиевого волоконного лазера с синхронизацией

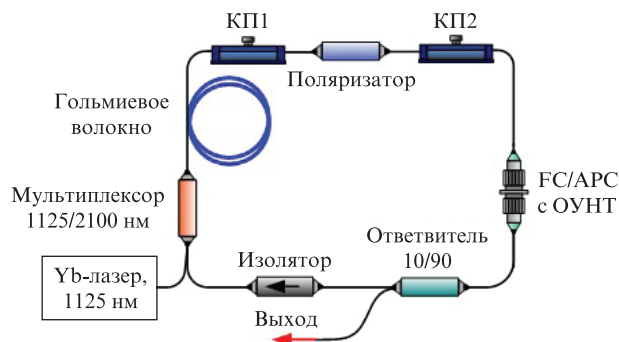


Рис.1. Схема гольмиевого волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод: КП1 и КП2 – контроллеры поляризации; ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки.

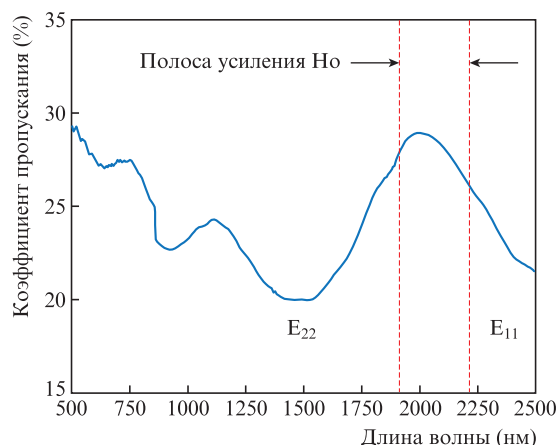


Рис.2. Спектр пропускания пленки карбоксиметилцеллюлозы с однородно диспергированными одностенными углеродными нанотрубками.

мод за счет НВП отличалась лишь отсутствием пленки с ОУНТ между оптическими разъемами.

При исследовании характеристик лазера было использовано следующее оборудование: оптический анализатор спектра (Avesta ASP-IR-2.6), цифровой анализатор спектра с шириной полосы 3 ГГц (Gwinstek GSP-7830), 60-МГц фотодиод, осциллограф Tektronix TDS 2022C (200 МГц), а также сканирующий автокоррелятор (Avesta AA-20DD).

3. Результаты экспериментов

Для сравнения характеристик лазерного излучения при различных режимах синхронизации мод сначала было проведено исследование характеристик излучения гольмиевого лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет НВП. Далее между оптическими разъемами фиксировалась пленка с ОУНТ, и исследовались характеристики излучения гольмиевого лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод. Затем характеристики лазерного излучения, полученные при разных режимах синхронизации мод, сравнивались.

Стабильная импульсная генерация за счет НВП была получена при мощности накачки 3 Вт, а в режиме гибридной синхронизации мод порог генерации увеличился, и мощность накачки, необходимая для импульсной генерации, составила 3.3 Вт. При этом средняя мощность излучения лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет НВП, достигала 6.4 мВт, а при гибридной синхронизации мод средняя мощность излучения снизилась до 4.7 мВт. На рис.3 представлены спектры излучения импульсного гольмиевого волоконного лазера, работающего

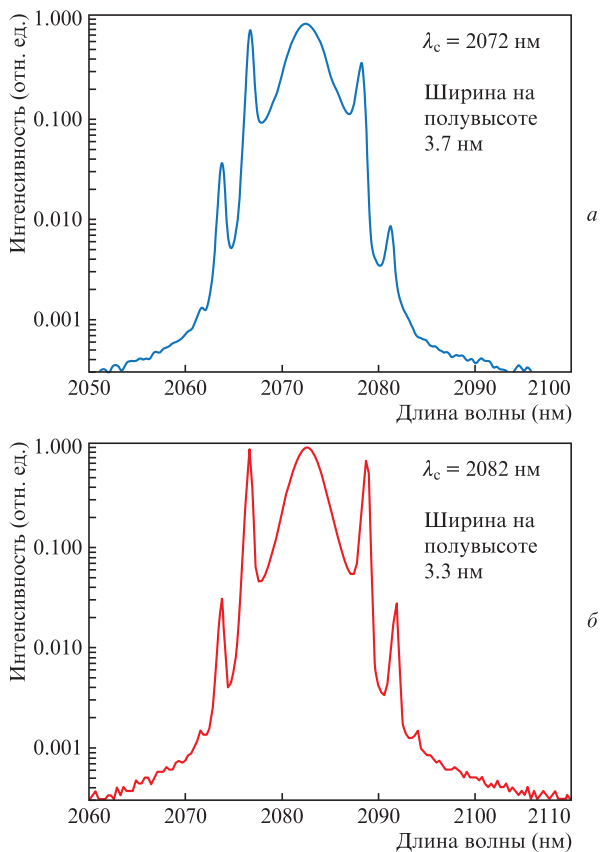


Рис.3. Спектры излучения гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет нелинейного вращения поляризации (а) и в режиме гибридной синхронизации мод (б).



Рис.4. Схема измерения длительности импульсного излучения.

го в разных режимах синхронизации мод. Оба спектра имеют типичную форму с пиками Келли, характерными для солитонного режима работы лазера и образующимися за счет спектральной интерференции между солитонной волной и дисперсионной волной [31]. Из рис.3 видно, что центральные длины волн генерации, как и ширины спектров на полувысоте, отличаются и составляют в случае синхронизации мод за счет НВП 2072 нм и 3.7 нм, а при гибридной синхронизации мод 2082 нм и 3.3 нм соответственно.

Для измерения длительности импульсов на сканирующем автокорреляторе (АК) была собрана схема, представленная на рис.4. Контроллер поляризации использовался для управления поляризацией, поскольку чувствительность АК зависит от поляризации лазерного излучения. Так как АК оборудован волоконным входом, то для ввода излучения применялся оптический разъем FC/PC. Для предотвращения попадания отраженного излучения в кольцевой резонатор лазера, в схему был добавлен волоконный изолятор, идентичный тому, что находился в резонаторе лазера. Длина одномодового волокна в данной схеме составила 0.7 м.

Измеренные автокорреляционные функции (АКФ) приведены на рис.5. Для лазера, работающего за счет НВП,

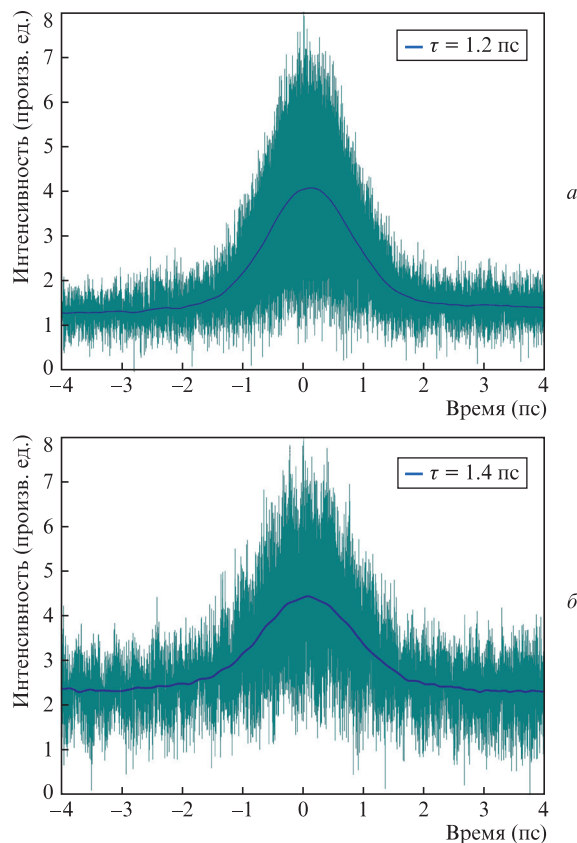


Рис.5. Автокорреляционные функции импульсного излучения гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет НВП (а) и в режиме гибридной синхронизации мод (б).

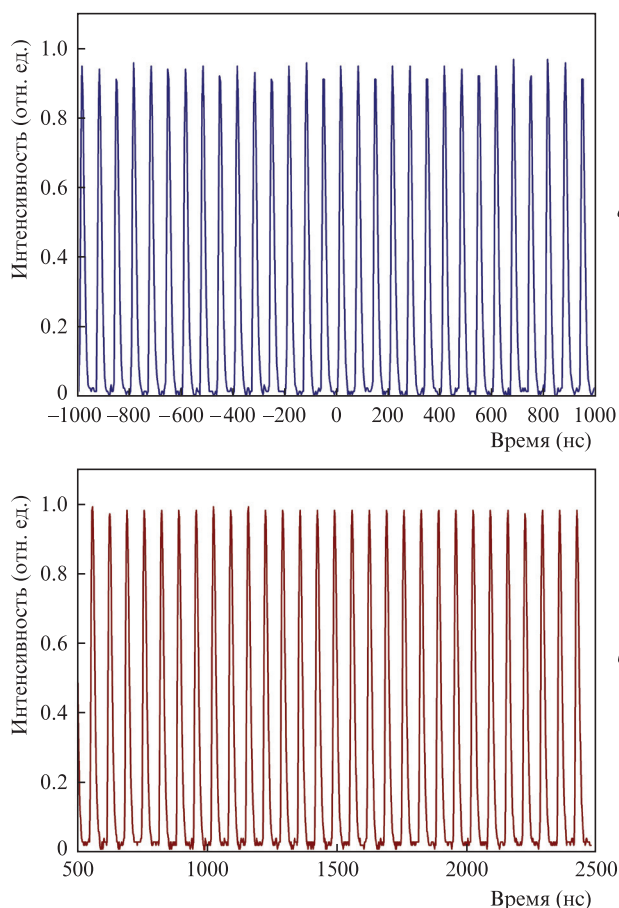


Рис.6. Последовательности импульсов гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет НВП (*a*) и в режиме гибридной синхронизации мод (*b*).

измеренная длительность импульсов составила 1.2 пс. В случае гибридной синхронизации мод (рис.5,*b*) автокорреляционная функция довольно зашумлена; это свидетельствует о том, что измерения проводились на пороге чувствительности автокоррелятора. Длительность импульсов при этом была 1.4 пс. В обоих случаях длительность импульсов соответствует ширине спектра на полувысоте.

Частота следования импульсов составляла 14.9 МГц и соответствовала длине резонатора ~ 14 м. Последовательности импульсов для двух режимов синхронизации мод показаны на рис.6. Различие полученных осциллограмм состоит в том, что в случае режима синхронизации мод за счет НВП (рис.6,*a*) видны некоторые флуктуации амплитуды, которые существенно меньше в случае гибридной синхронизации мод (рис.6,*b*).

На рис.7 представлены радиочастотные спектры на основной частоте работы лазеров. Видно, что для гибридной синхронизации мод отношение сигнал/шум на 3 дБ лучше, чем для лазера, работающего за счет НВП.

В табл.1 для сравнения представлены характеристики излучения гольмиевого волоконного лазера для различных режимов синхронизации мод.

Следует отметить, что процесс запуска лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод, отличается от такового для лазера, работающего в режиме НВП. Для достижения импульсной генерации в случае НВП мощность накачки должна превысить рабочее значение, а после достижения импульсной генерации должна

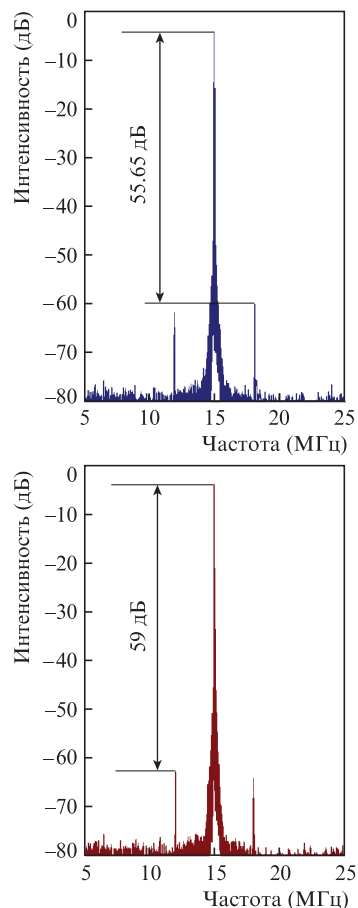


Рис.7. Радиочастотный спектр излучения гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет НВП (*a*) и в режиме гибридной синхронизации мод (*b*).

Табл.1.

Характеристики излучения	Синхронизация мод за счет НВП	Гибридная синхронизация мод
λ (нм)	2072	2082
Ширина спектра на полувысоте (нм)	3.7	3.3
Частота следования импульсов (МГц)	14.9	14.9
Длительность импульса (пс)	1.2	1.4
$\langle P \rangle$ (мВт)	6.4	4.7
$P_{\text{реак}}$ (Вт)	358	220
Энергия (нДж)	0.4	0.3

быть уменьшена для предотвращения генерации сопутствующего непрерывного излучения. В свою очередь, первый запуск лазера с гибридной синхронизацией мод сопровождается подстройкой КП, но во время дальнейшего включения лазер начинает работать без какой-либо регулировки КП или мощности накачки. Мы полагаем, что это можно назвать самозапускаемой системой.

4. Заключение

В работе проведено сравнение в одинаковых условиях разных режимов синхронизации мод (НВП и гибридная синхронизация мод) в полностью волоконном гольмиевом лазере. Исследованы характеристики полученного

импульсного излучения. Продемонстрирована импульсная генерация на длинах волн 2072 и 2082 нм с шириной спектра на полувысоте 3.7 и 3.3 нм соответственно. Длительности импульсов в обоих случаях составили 1.2 и 1.4 пс, а энергия в импульсе – 0.4 нДж для синхронизации мод за счет НВП и 0.3 нДж в случае гибридной синхронизации мод. В режиме гибридной синхронизации мод получено лучшее соотношение сигнал/шум. Отмечена возможность самозапуска лазерной системы, работающей в режиме гибридной синхронизации мод.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН в рамках Программы фундаментальных исследований № I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов». Насыщающиеся поглотители на основе одностенных углеродных нанотрубок были изготовлены и охарактеризованы в рамках проекта № 14-22-00243 Российского научного фонда.

- Leindecker N., Marandi A., Byer R.L., Vodopyanov K.L., Jiang J., Hartl I., Fermann M., Schunemann P.G. *Opt. Express*, **20** (7), 7046 (2012).
- Imeshev G., Fermann M.E., Vodopyanov K.L., Fejer M.M., Yu X., Harris J.S., Bliss D., Lynch C. *Opt. Express*, **14** (10), 4439 (2006).
- Malevich P., Andriukaitis G., Flöry T., Verhoef A.J., Fernández A., Ališauskas S., Pugžlys A., Baltuška A., Tan L.H., Chua C.F., Phua P.B. *Opt. Lett.*, **38** (15), 2746 (2013).
- Serebryakov V.A., Boiko É.V., Petrishchev N.N., Yan A.V. *J. Opt. Technol.*, **77** (1), 6 (2010).
- Gattass R.R., Mazur E. *Nature Photon.*, **2** (4), 219 (2008).
- Cariou J.P., Augere B., Valla M. *Comptes Rendus Phys.*, **7** (2), 213 (2006).
- Walsh B.M. *Laser Phys.*, **19** (4), 855 (2009).
- Li Z., Heidt A.M., Daniel J.M.O., Jung Y., Alam S.U., Richardson D.J. *Opt. Express*, **21** (8), 9289 (2013).
- Hemming A., Simakov N., Haub J., Carter A. *Opt. Fiber Technol.*, **20** (6), 621 (2014).
- Chamorovskiy A.Y., Marakulin A.V., Kurkov A.S., Okhotnikov O.G. *Laser Phys. Lett.*, **9** (8), 602 (2012).
- Sotor J., Pawliszewska M., Sobon G., Kaczmarek P., Przewolka A., Pasternak I., Cajzl J., Peterka P., Honzátko P., Kašík I., Strupinski W., Abramski K. *Opt. Lett.*, **41** (11), 2592 (2016).
- Dvoyrin V., Tolstik N., Sorokin E., Sorokina I., Kurkov A. *Proc. CLEO: 2015* (Munich, OSA, 2015, paper CJ_7_4).
- Pawliszewska M., Ge Y., Li Z., Zhang H., Sotor J. *Opt. Express*, **25** (15), 16916 (2017).
- Tolstik N., Sorokin E., Bugar I., Sorokina I.T. *Proc. Conf. «High-Brightness Sources and Light-Driven Interaction»* (Long Beach, US, OSA, 2016, paper MM6C-4).
- Chamorovskiy A., Marakulin A.V., Ranta S., Tavast M., Rautiainen J., Leinonen T., Kurkov A.S., Okhotnikov O.G. *Opt. Lett.*, **37** (9), 1448 (2012).
- Li P., Ruehl A., Bransley C., Hartl I. *Laser Phys. Lett.*, **13** (6), 065104 (2016).
- Filatova S.A., Kamynin V.A., Zhluktova I.V., Trikshev A.I., Tsvetkov V.B. *Laser Phys. Lett.*, **13** (11), 115103 (2016).
- Kurtner F.X., Der Au J.A., Keller U. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4** (2), 159 (1998).
- Dvoretzkiy D.A., Sazonkin S.G., Orekhov I.O., Kudelin I.S., Pnev A.B., Karasik V.E., Denisov L.K., Lyapin S.G., Davydov V.A. *Proc. Conf. «Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring» (PIERS)* (St. Petersburg, Russia, IEEE, 2017, pp 1598–1600).
- Chernysheva M., Al Aaraimi M., Kbashi H., Arif R., Sergeev S.V., Rozhin A. *Opt. Express*, **24** (14), 15721 (2016).
- Chernysheva M.A., Krylov A.A., Mou C., Arif R.N., Rozhin A.G., Rummelli M.H., Turitsyn S.K., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 425 (2014).
- Chernysheva M., Bednyakova A., Al Aaraimi M., Howe R.C., Hu G., Hasan T., Gambetta A., Galzerano G., Rummelli M., Rozhin A. *Sci. Rep.*, **7**, 44314 (2017).
- Kurkov A.S. *Laser Phys. Lett.*, **4** (2), 93 (2006).
- Камынин В.А., Филатова С.А., Жлуктова И.В., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1082 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1082 (2016)].
- Kadel R., Washburn B.R. *Appl. Opt.*, **51** (27), 6465 (2012).
- Pawliszewska M., Martynkien T., Przewłoka A., Sotor J. *Opt. Lett.*, **43** (1), 38 (2018).
- Krylov A.A., Sazonkin S.G., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Dvoretzkiy D.A., Obraztsova E.D., Dianov E.M. *JOSA B*, **33** (2), 134 (2016).
- Chernysheva M.A., Krylov A.A., Arutyunyan N.R., Pozharov A.S., Obraztsova E.D., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 448 (2014).
- Tausenev A.V., Obraztsova E.D., Lobach A.S., Chernov A.I., Konov V.I., Kryukov P.G., Konyashchenko A.V., Dianov E.M. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (17), 171113 (2008).
- Solodyankin M.A., Obraztsova E.D., Lobach A.S., Chernov A.I., Tausenev A.V., Konov V.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33** (12), 1336 (2008).
- Kelly S.M. *Electron. Lett.*, **28** (8), 806 (1992).