

Спектральная и временная динамики ультракоротких импульсов в гольмиевом волоконном усилителе

С.А.Филатова, В.А.Камынин, И.В.Жлуктова, А.И.Трикшев, Н.Р.Арутюнян, М.Г.Рыбин, Е.Д.Образцова, Д.Т.Батов, В.С.Воропаев, В.Б.Цветков

Проведена оптимизация гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод, и гольмиевого волоконного усилителя для получения стабильных импульсов наименьшей длительности. Зарегистрировано изменение временных и спектральных характеристик импульсного излучения в зависимости от мощности накачки лазера. Генерация получена в диапазоне длин волн 2066–2068 нм с шириной спектра на полувысоте от 3 до 4 нм. Длительность генерируемых импульсов не превышала 1 пс, а энергия варьировалась от 0.2 до 0.5 нДж. Для последующего увеличения энергии использовались гольмиевые волоконные усилители на основе двух образцов активного волокна. Продемонстрированы уменьшение ширины центральной части автокорреляционной функции и существенное уширение спектров. Максимальная средняя мощность на выходе усилителя превышала 200 мВт.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, синхронизация мод, нелинейное вращение плоскости поляризации, гибридная синхронизация мод, одностенные углеродные нанотрубки, УКИ, гольмиевый усилитель, спектральное преобразование.

1. Введение

Исследование спектральной и временной динамик лазерных импульсов в волоконных усилителях является актуальной задачей современной оптики и лазерной физики. Несмотря на разработанный метод усиления чирпированных импульсов малой длительности [1], удостоенный Нобелевской премии по физике за 2018 год, продолжается поиск простых, полностью волоконных систем для усиления импульсов. Так, в работе [2] приведены данные по распространению в иттербиевом волоконном усилителе пикосекундных импульсов, приобретающих на выходе несимметричную временную форму. Кроме того, интерес вызывают и усилители УКИ, работающие в спектральном диапазоне вблизи 2 мкм и более, поскольку УКИ с высокой энергией в данном спектральном диапазоне востребованы для обработки полимеров и воздействия на биологические ткани [3, 4]. На сегодняшний день имеется ряд работ, демонстрирующих преобразование импульсов при их распространении как в тулиевых [4], так и в гольмиевых [5, 6] волоконных усилителях. В работе [5] показано существенное уширение спектра и сужение

центральной части автокорреляционной функции (АКФ) до 170 фс. Стоит отметить, что в большинстве работ по исследованию преобразования импульсного излучения в гольмиевых усилителях в качестве задающих генераторов (ЗГ) используются гольмиевые лазеры с объемными элементами в резонаторе. Для реализации полностью волоконной лазерной системы с самозапускающимся источником импульсов одним из оптимальных решений является применение ЗГ, работающих в режиме гибридной синхронизации мод [7–9]. Кроме того, в работах по усилению УКИ не приводится сравнение результатов преобразования импульсного излучения при различных концентрациях ионов гольмия в активном волокне усилителя и при разных длинах этого волокна.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению временной и спектральной динамик УКИ в гольмиевых волоконных усилителях. Для получения подобных импульсов была проведена оптимизация ЗГ с целью создания самозапускающегося и самовоспроизводящегося источника излучения [9].

2. Экспериментальная установка

2.1. Задающий генератор

На рис.1 представлена схема полностью волоконного гольмиевого лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод. В качестве источника накачки использовался непрерывный иттербиевый (Yb) волоконный лазер с длиной волны генерации 1125 нм и максимальной мощностью излучения до 8 Вт. Излучение Yb-лазера поступало в кольцевой резонатор гольмиевого лазера длиной около 10 м через волоконный мультиплексор 1125/2100 нм.

Кольцевой резонатор лазера состоял из гольмиевого волокна (длиной 4 м) и одномодового волокна SMF-28e (длиной 6 м). Активное волокно, изготовленное по MCVD-технологии, имело разность показателей преломления

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

Н.Р.Арутюнян, М.Г.Рыбин, Е.Д.Образцова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Д.Т.Батов, В.С.Воропаев. Научный и образовательный центр «Фотоника и ИК-техника», МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/1

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

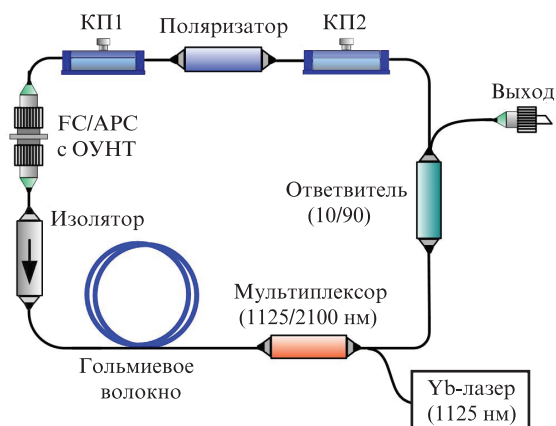


Рис.1. Схема гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод: КП1 и КП2 – контроллеры поляризации; ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки.

сердцевины и оболочки 0.007, диаметр сердцевины 16 мкм и длину волны отсечки ~ 2 мкм. Концентрация ионов гольмия в волокне составила $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а коэффициент поглощения волокна на длине волны накачки (1125 нм), измеренный методом обрыва, был равен 5 дБ/м. Общая внутрирезонаторная дисперсия лазера вычислялась по формуле, использованной в работе [10], и составила примерно -1.1 пс^2 .

Для выделения одного направления распространения генерируемого излучения применялся волоконный изолятор, работающий в области длин волн, превышающих 2 мкм. Потери излучения в прямом направлении были равны 0.6 дБ, а в обратном – более 30 дБ. Для вывода излучения из резонатора лазера использовался волоконный ответвитель с коэффициентом деления 10/90, который обеспечивал выведение 90% мощности излучения. Режим гибридной синхронизации мод реализовывался с помощью объединения в резонаторе лазера так называемых быстрого и медленного насыщающихся поглотителей. Быстрый насыщающийся поглотитель основан на эффекте нелинейного вращения плоскости поляризации. Для его реализации в резонатор лазера дополнительно помещались волоконный поляризатор и пара контроллеров поляризации. В качестве медленного насыщающегося поглотителя использовались одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), которые были однородно диспергированы на прозрачную пленку карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Пленка с нанотрубками фиксировалась между оптическими разъемами FC/APC, которые располагались в резонаторе лазера за изолятором для снижения лучевой нагрузки.

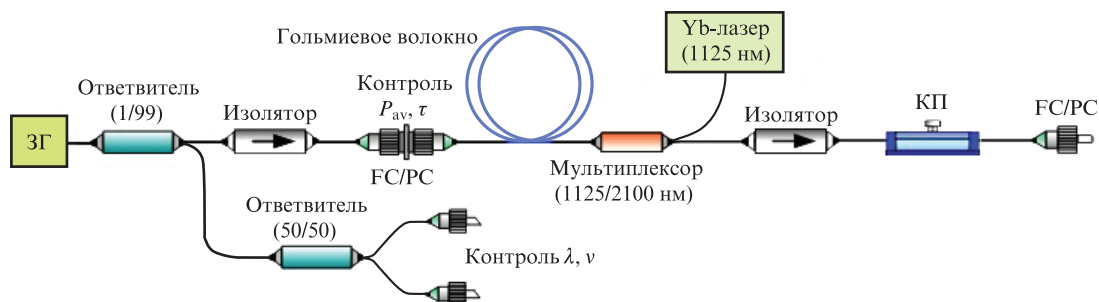


Рис.2. Схема полностью волоконной лазерной системы ЗГ–гольмиевый волоконный усилитель (P_{av} – средняя мощность, τ – длительность импульсов, ν – частота их следования).

В работах [11, 12] подробно описаны характеристики и процесс изготовления суспензий отдельных ОУНТ в 1% -ном водном растворе КМЦ. Подобные пленки уже применялись в эрбиевых и тулиевых волоконных лазерах [13, 14]. Поскольку в настоящей работе центральная длина волны излучения гольмиевого волоконного лазера смещена в длинноволновую область ($\lambda > 2050 \text{ нм}$), были использованы коммерчески доступные трубки TuBall большого (более 2 нм) диаметра.

2.2. Усилитель

Ультракороткие импульсы ЗГ усиливались в гольмиевом волоконном усилителе. На рис.2 представлена схема экспериментальной установки. Излучение ЗГ направлялось в усилитель через волоконный ответвитель 1/99, чтобы иметь возможность контролировать характеристики ЗГ. Для подавления обратной связи на выходе ЗГ был установлен изолятор. Встречная накачка усилителя осуществлялась через мультиплексор излучением иттербиевого волоконного лазера, работающего в непрерывном режиме на длине волны генерации 1125 нм. Мощность накачки варьировалась от 0 до 8 Вт. В качестве активной среды усилителя использовались волокна, легированные ионами гольмия с концентрациями $6.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (длина волокна 2 м) и $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (длина волокна 4.6 м). Дисперсия гольмиевых волокон оценивалась величиной $-0.11 \text{ пс}^2/\text{м}$. На выходе усилителя располагались изолятор и контроллер поляризации для согласования с измерительным оборудованием и предотвращения обратной связи.

При исследовании характеристик лазерного излучения использовалось следующее оборудование: оптический анализатор спектра (Avesta, ASP-IR-2.6), радиочастотный анализатор спектра (Rhode & Schwartz, FSL 3) с шириной полосы 3 ГГц, фотодетектор ET 5000A с шириной полосы 10 ГГц, осциллограф (Tektronix, TDS 2022C) с шириной полосы 200 МГц, а также автокоррелятор (APE, Pulse Check 15).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Задающий генератор

Стабильная импульсная генерация наблюдалась при мощности излучения накачки $P_{pump} = 3.2 \text{ Вт}$. Средняя выходная мощность P_{av} при этом была равна 4.5 мВт. На рис.3,а представлен спектр излучения лазера с центральной длиной волны $\lambda_c = 2068 \text{ нм}$ и шириной спектра на полувысоте $\Delta\lambda = 3 \text{ нм}$. Спектр помимо центрального пика имеет боковые пики, характерные для солитонного режи-

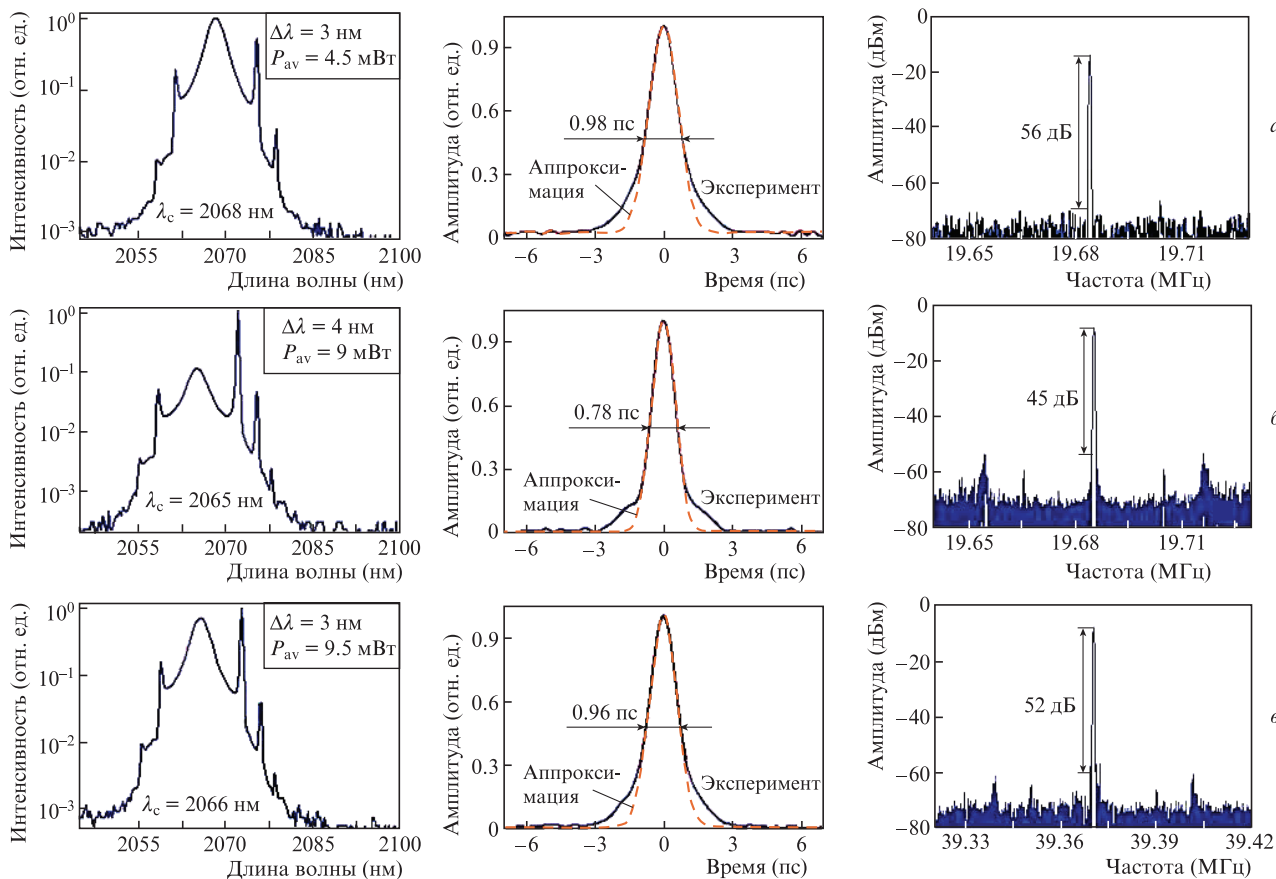


Рис.3. Характеристики лазерного излучения при мощностях излучения накачки 3.2 (а), 3.5 (б) и 3.6 Вт (в).

ма работы лазера при аномальной внутривибронаторной дисперсии. Частота следования импульсов ν соответствовала длине резонатора и составила ~ 19.7 МГц, а длительность импульсов τ при этом равнялась ~ 1 пс. На радиочастотном спектре видно, что отношение сигнал/шум составляет 56 дБ.

С увеличением мощности накачки происходила перекачка энергии в дисперсионную волну, что вызывало увеличение боковых пиков в оптическом спектре лазера (рис.3,б). При этом наблюдалась модуляция импульсов, которая подтверждалась наличием спутников рядом с основной частотой следования импульсов, представленных на радиочастотном спектре на рис.3,б. Кроме того, имели место деформация и уменьшение длительности импульсов до 0.8 пс. Дальнейшее повышение мощности накачки приводило к образованию еще одного импульса, который занимал энергетически выгодное положение между импульсами, излучавшимися на основной частоте. В итоге это вызывало удвоение частоты следования импульсов до ~ 39.37 МГц (см. радиочастотный спектр на рис.3,в). Также наблюдалось преобразование формы оптического спектра в ее первоначальный вид, соответствующий минимальной мощности накачки 3.2 Вт. Это свидетельствует об уменьшении доли мощности в дисперсионной волне. Увеличение энергии импульса при росте мощности накачки может быть использовано для получения многоимпульсной генерации, а значит и более высоких частот следования импульсов (гармоническая синхронизация мод). Данный метод уже активно применяется для генерации импульсов с высокой частотой следования, например в эрбиевых волоконных лазерах [15, 16].

В табл.1 для сравнения представлены характеристики излучения гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод, при различных мощностях излучения накачки.

Табл.1.

P_{pump} (Вт)	λ_c (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	ν (МГц)	τ (пс)	P_{av} (мВт)	P_{peak} (Вт)	E (нДж)
3.2	2068	3	19.7	0.98	4.5	202	0.2
3.5	2065	4	19.7	0.78	9	586	0.46
3.6	2066	3	39.4	0.96	9.5	250	0.24

Таким образом, оптимизация мощности излучения накачки позволила найти стабильный самозапускающийся и самовоспроизводящийся режим, необходимый для дальнейшего исследования спектральной и временной динамики импульсов в волоконном усилителе.

3.2. Усилитель

На рис.4,а,б показаны спектры и АКФ импульсов излучения на выходе гольмиевого волоконного усилителя длиной 2 м с концентрацией активных ионов $6.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при различной выходной мощности. В качестве усиливаемого сигнала использовались импульсы с характеристиками, приведенными в табл.1 для мощности накачки 3.2 Вт.

Измерение АКФ и спектров позволило отследить одновременную деформацию спектров и импульсов при повышении мощности накачки. Как видно из рис.4,а, сначала ($P_{\text{av}} = 18$ и 82 мВт) длительность импульса уменьшается, спектры при этом сохраняют гладкую форму (при уве-

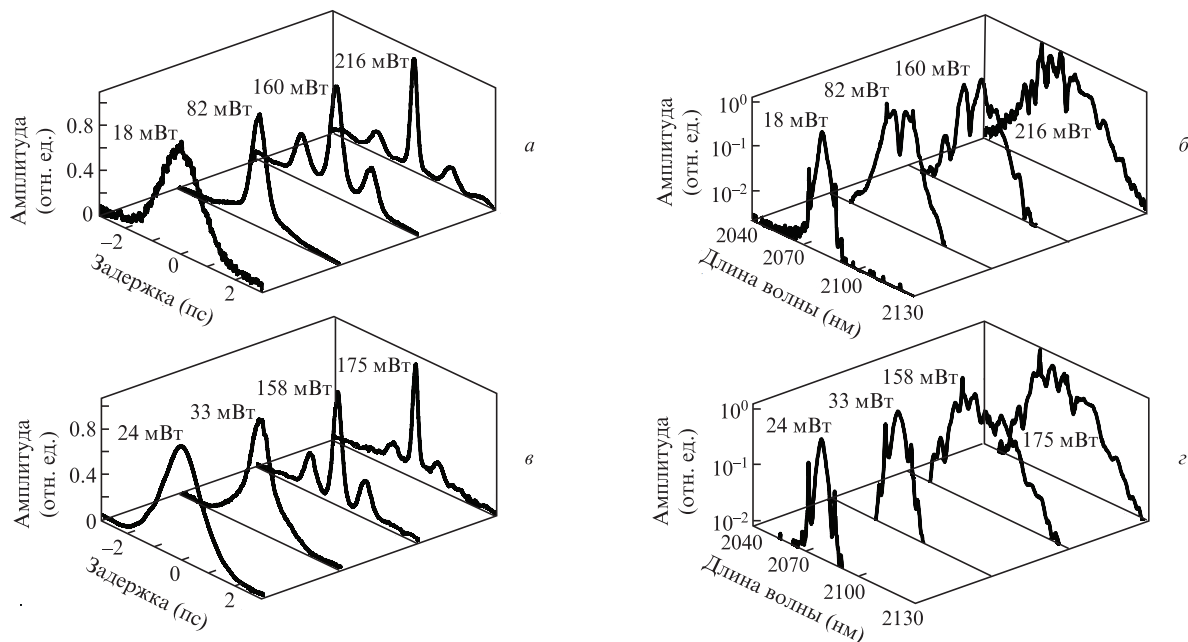


Рис.4. АКФ (а, в) и спектры (б, з) импульсов излучения на выходе гольмиевого волоконного усилителя с концентрациями активных ионов 6.5×10^{19} (а, б) и 2×10^{19} см^{-3} (в, з) при различных мощностях $P_{\text{ав}}$.

личении пиков Келли). Этот этап характеризуется сохранением солитона первого порядка при минимальном вкладе ВКР. Дальнейшее повышение мощности накачки приводит к генерации солитонов более высокого порядка, что позволяет получить меньшую длительность импульса [5]. Последующее увеличение мощности накачки обуславливает распад импульса и генерацию ВКР-солитонов. Спектры приобретают изрезанную форму (рис.4,б; $P_{\text{ав}} = 160$ и 216 мВт), а в форме АКФ хорошо различимы три пика, соответствующие распавшимся импульсам.

Использование волокна длиной 4.6 м с меньшей концентрацией активных ионов (2×10^{19} см^{-3}) приводит к аналогичным спектральной и временной динамикам. Можно предположить, что основной вклад в распад импульсов вносит волокно, входящее в состав изолятора и контроллера поляризации.

Таким образом, для получения импульсов с наименьшей длительностью в одностадийном усилителе необходимо соблюдать баланс между усилением и совместным действием дисперсии и нелинейности на УКИ.

4. Заключение

В ходе оптимизации схемы гольмиевого волоконного лазера было изменено расположение разъемов с нанотрубками для снижения лучевой нагрузки, длина используемого гольмиевого волокна уменьшилась до 4 м и, следовательно, общая длина резонатора уменьшилась до ~ 10 м. При этом частота следования импульсов увеличилась до ~ 19.7 МГц, что соответствовало длине резонатора. Было выполнено исследование временных и спектральных характеристик лазерного излучения в зависимости от мощности накачки. Проведенная оптимизация ЗГ позволила получить стабильный самозапускающийся и самовоспроизводящийся режим генерации со средней мощностью 5 мВт и длительностью импульсов 1 пс.

Были исследованы также временная и спектральная динамики УКИ при распространении их в гольмиевых волоконных усилителях с концентрациями активных ио-

нов 2×10^{19} и 6.5×10^{19} см^{-3} . Наблюдалось уменьшение ширины центральной части АКФ и существенное уширение спектров. Получено импульсное излучение в области длин волн, превышающих 2 мкм, со средней мощностью более 200 мВт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90205.

1. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **55** (6), 447 (1985).
2. Sidorenko P., Fu W., Wise F.W. *Proc. Eur. Conf. on Lasers and Electro-Optics* (Munich, 2019, С. cj_7_6).
3. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (London: Intech Open, 2010, p. 471).
4. Elahi P., Kalaycioglu H., Akcaalan O., Cagri Senel C., Ilday F.O. *Opt. Lett.*, **42** (19), 3808 (2017).
5. Wang M., Zhang H., Wei R., et al. *Opt. Lett.*, **43** (19), 4619 (2018).
6. Hinkelmann M., Wandt D., Morgner U., Neumann J., Kracht D. *Opt. Express*, **25** (17), 20522 (2017).
7. Дворецкий Д.А., Сазонкин С.Г., Воропаев В.С., Негин М.А., Леонов С.О., Пнев А.В., Карасик В.Е., Денисов Л.К., Крылов А.А., Давыдов В.А., Образцова Е.Д. *Квантовая электроника*, **46** (11), 979 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (11), 979 (2016)].
8. Chernysheva M., Bednyakova A., Al Araimi M., Howe R.C., Hu G., Hasan T., Gambetta A., Galzerano G., et al. *Sci. Rep.*, **7**, 44314 (2017).
9. Filatova S.A., Kamynin V.A., Arutyunyan N.R., Pozharov A.S., Trikshev A.I., Zhluktova I.V., Zolotovskii I.O., Obraztsova E.D., Tsvetkov V.B. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35** (12), 3122 (2018).
10. Kadel R., Washburn B.R. *Appl. Opt.*, **51** (27), 6465 (2012).
11. Krylov A.A., Sazonkin S.G., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Dvoretzkiy D.A., Obraztsova E.D., Dianov E.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33** (2), 134 (2016).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. Триксев А.И., Камынин В.А., Цветков В.Б., Итрин П.А. *Квантовая электроника*, **48** (12), 1109 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (12), 1109 (2018)].
16. Chen H., Chen S.P., Jiang Z.F., Hou J. *Opt. Express*, **23** (2), 1308 (2015).