

УДК 681.7.068/.069

**И.А. Волков¹, В.А. Камынин², С.Н. Ушаков^{1, 2},
К.Н. Нищев¹, В.Б. Цветков^{2, 3}**

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,
Саранск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Москва, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА И ВРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ ШУМОПОДОБНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Экспериментально исследована динамическая эволюция оптического спектра и временного профиля прямоугольного шумоподобного импульса в волоконно-кольцевом эрбиевом лазере с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного вращения плоскости поляризации в области сильной аномальной дисперсии. Экспериментально показана область значений мощности накачки, при которой волоконный лазер может стабильно поддерживать режим прямоугольного шумоподобного импульса, а также режимы генерации вне этой области.

Ключевые слова: волоконный лазер, пассивная синхронизация мод, шумоподобный прямоугольный импульс.

**I.A. Volkov¹, V.A. Kamynin², S.N. Ushakov^{1, 2},
K.N. Nishchev¹, V.B. Tsvetkov^{2, 3}**

¹ National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

³ National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

THE STUDY OF THE DYNAMIC EVOLUTION OF THE OPTICAL SPECTRUM AND TIME PROFILE OF A NOISE-LIKE RECTANGULAR PULSE

The dynamic evolution of the optical spectrum and time profile of a noise-like rectangular pulse in a fiber-ring Erbium laser with passive mode-locking based on nonlinear polarization rotation in the

region of strong anomalous dispersion is experimentally studied. The range of values of the pump power is shown experimentally, in which the fiber laser can stably support the rectangular noise-like pulse regime, as well as the generation regime outside this region.

Keywords: fiber laser, passive mode-locking, noise-like rectangular pulse.

Введение

В течение последних десятилетий волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод вызывали интерес главным образом из-за их способности генерировать стабильные последовательности ультракоротких оптических импульсов, которые имеют обширный спектр возможных применений. Однако в последние годы все больше внимания привлекают источники, работающие за пределами стационарных режимов. На границе стабильной солитонной работы солитонные пульсации и взрывы [1, 2] являются иллюстрациями того, как монотонность устойчивой последовательности импульсов, неизменно повторяющихся на основной частоте резонатора, может быть нарушена. Если несколько импульсов циркулирует в резонаторе, множество сложных механизмов взаимодействия с участием непрерывных или дисперсионных волн [3, 4], динамики усиления [5] и даже акустические волны [6] определяют широкий спектр коллективных состояний (солитонные кристаллы, молекулы и т.д. [7]) и динамику (например, солитонный дождь [3]).

Другим особенно интересным, но все же сложным режимом лазеров с пассивной синхронизацией мод является режим шумоподобного импульса [8–17]. Подобные лазеры описаны еще в конце 1990-х годов [8], но не привлекли широкого интереса до недавнего времени. Шумоподобные импульсы – это большие (нс) волновые пакеты с мелкими (суб-пс) внутренними элементами, отображающими хаотическую эволюцию. Этот режим радикально отличается от режима солитонов, представляя собой плавный и широкий оптический спектр без пиков Келли и двухмасштабную автокорреляционную функцию, состоящую из узкого когерентного пика на широком и интенсивном пьедестале. Свойства шумоподобного импульса, например, большая энергия импульса (до 100 с нДж [9, 15]) и широкий оптический спектр (в некоторых случаях за пределами 100 нм [13, 15]), делают их привлекательными для приложений, таких как генерация суперконтинуума [18–20], нелинейное преобразование частоты [21, 22], микрообработка [23] и медицинская визуализация [24]. Шумоподобные импульсы также вы-

зывают растущий интерес благодаря их связи с оптическими «волнами-убийцами» [25–28].

Шумоподобные импульсы обычно наблюдаются в относительно длинных резонаторах при сильной накачке. В отличие от солитонов, которые требуют правильного выбора параметров резонатора, шумоподобные импульсы не требуют специальных настроек и могут быть найдены как в нормальном, так и в аномальном режимах дисперсии, на разных рабочих длинах волн и для различных лазерных архитектур. Однако их точная характеристика из-за их внутренней сложности и чрезвычайной изменчивости их тонкой структуры чрезвычайно сложна. В простейшем сценарии в резонаторе циркулирует только один шумоподобный импульс. Несмотря на свою хаотическую эволюцию в предельном (суб-пс) масштабе, в более широком (\sim нс) масштабе он обычно отображает плавную, довольно стабильную временную огибающую, повторяемую с частотой обхода резонатора, создавая регулярную последовательность импульсов. В работе [14] метод пространственно-временного отображения, основанный на получении последовательностей областей действия с разрешением суб-нс, выявил удивительную динамику, в частности квазипериодическую долгосрочную эволюцию огибающей шумоподобного импульса. В других случаях при неясных обстоятельствах шумоподобный импульс может расщепляться на несколько фрагментов [16], которые могут синхронизироваться, приводя к гармонической синхронизации мод [29, 30], или запускать широкий спектр разнообразной коллективной динамики [17].

В этой статье мы исследуем генерацию и динамическую эволюцию шумоподобного импульса с прямоугольным временным профилем в волоконном кольцевом лазере с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного вращения плоскости поляризации. Получены стабильные прямоугольные шумоподобные импульсы на основной частоте повторения 1,1 МГц с максимальной энергией одиночного импульса до 30 нДж. Ширина временного профиля прямоугольного шумоподобного импульса может быть настроена с 7,5 до 19 нс путем изменения мощности накачки при фиксированных контроллерах поляризации (КП).

Экспериментальная установка

Схема волоконного кольцевого лазера с длиной резонатора \sim 190 м представлена на рис. 1. Резонатор включает в себя 3 м волокна,

легированного ионами $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ (SM-EYDF-6/125-HE Nufern), и 180 м стандартного одномодового волокна ЕЗ (АО «Оптическое волоконные системы»). В качестве накачки волоконно-кольцевого лазера используется лазерный диод (BWT K976F06FA), работающий на длине волны 976 нм с выходной мощностью до 4 Вт. Излучение накачки вводится в резонатор при помощи объединителя накачки с сигнальной жилой (2+1)×1. Изолятор используется для обеспечения однонаправленного распространения оптического излучения. Поляризационный делитель вместе с двумя контроллерами поляризации позволяет реализовать режим синхронизации мод за счет НВПП. Различные режимы генерации достигались путем тщательной подстройки контроллеров поляризации. Выход лазера соединялся с помощью оптической розетки с разветвителем 1×3, что позволяло одновременно контролировать спектральные и временные характеристики лазера.

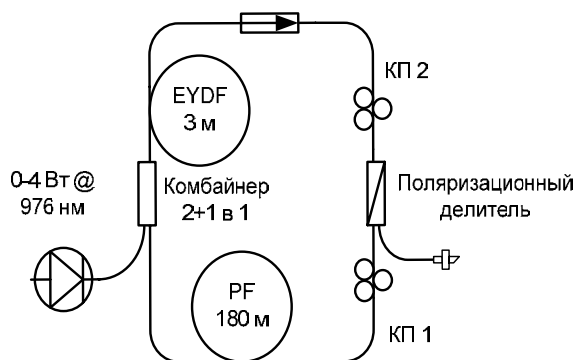


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: EYDF – волокно, легированное ионами $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$; PF – пассивное волокно; КП 1, КП 2 – контроллеры поляризации 1,2

Оптические спектры выходных импульсов волоконно-кольцевого лазера регистрировались анализатором оптического спектра (Yokogawa AQ6370C), спектральный диапазон 600–1700 нм, разрешение 0,2 нм. Последовательность импульсов регистрировалась с помощью высокоскоростного приемника излучения на основе InGaAs PIN-фотодиода (5 ГГц) и осциллографа GWINSTEK GDS-3000 (500 МГц).

Результаты и обсуждение

Самостартующая импульсная генерация, при которой наблюдались прямоугольные шумоподобные импульсы, начиналась с мощно-

сти накачки более 0,9 Вт и правильной настройки контроллеров поляризации. Гладкий широкий оптический спектр (рис. 2, а) и двухмасштабная автокорреляционная функция (рис. 2, б), полученные при мощности накачки 1,12 Вт, являются типичными для шумоподобных импульсов. Центральная длина волны в данном режиме составляет $\lambda_c = 1567$ нм, а ширина спектра на уровне 3дБ – 5,7 нм. Частота повторения импульсов – 1,1 МГц, что соответствовало длине резонатора, а измеренная по автокорреляционной функции длительность $\tau \approx 1,05$ пс. Ширина пьедестала превышала область сканирования автокоррелятора и связана с мощностью накачки (в случае шумоподобных импульсов высокая мощность накачки приводит к более длинным волновым пакетам [31]). Также стоит отметить, что положение уровня пьедестала связано с плотностью суб-импульсов в волновом пакете и статистическим распределением их интенсивностей [32]. Значение средней мощности составило 20 мВт, а энергию в импульсе можно оценить как 18 нДж.

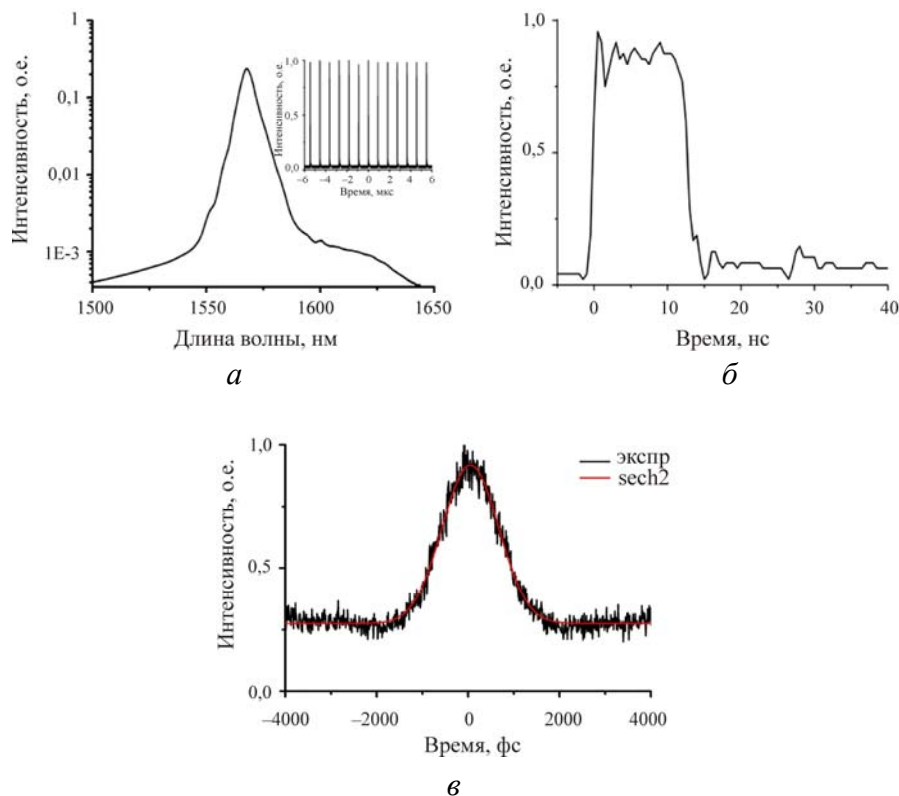


Рис. 2. Прямоугольный шумоподобный импульс: а – оптический спектр; б – временной профиль; в – автокорреляционная функция

Для прямоугольного шумоподобного импульса была исследована динамическая эволюция спектра и профиля импульсов. Для этого потребовалось совершить тонкую достройку контроллерами поляризации, после которой в положении контроллеров поляризации фиксировалась и изменялась только мощность накачки. Оптические спектры и соответствующие временные профили показаны на рис. 3.

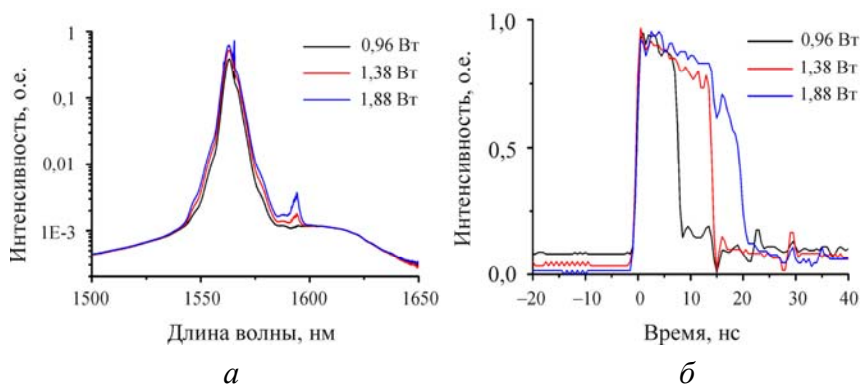


Рис. 3. Эволюция прямоугольного шумоподобного импульса:
a – оптический спектр; *б* – временной профиль

Как видно из рис. 3, *a*, значение центральной длины волны остается неизменным, а ширина спектра незначительно увеличивается с 3,1 до 3,5 нм. Более интересная наблюдается эволюция временного профиля импульса. На рис. 3, *б*, показана временная эволюция шумоподобных прямоугольных импульсов при разных мощностях накачки, где измеренная ширина импульса увеличивается с 7,5 до 19 нс при мощности накачки от 0,96 до 1,88 Вт. Продолжая увеличивать мощность накачки, система становится неустойчивой и переходит в гармонический режим пассивной синхронизации мод, оптический спектр и осциллограмма которого представлены на рис. 4. Эта ситуация сильно отличается от эффекта диссипативного солитонного резонанса, где энергия импульса может накапливаться бесконечно до большого значения без нарушения импульса.

Центральная длина волны составила $\lambda_c = 1567$ нм, а ширина спектра на уровне 3 дБ – 3,15 нм. Частота повторения импульсов увеличилась с 1,1 до 3,3 МГц. При последующем увеличении мощности импульсная генерация срывалась. Стоит отметить, что произошло смещение центральной длины волны. Такое поведение может быть связано с состоянием волнового пакета шумоподобного импульса [31].

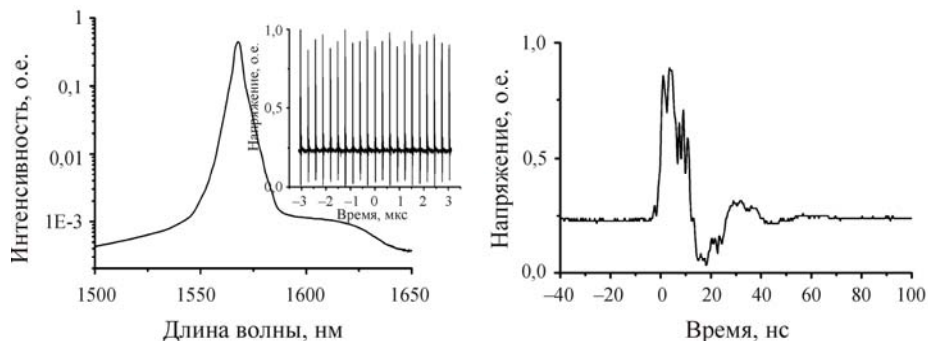


Рис. 4. Оптический спектр (а) и временной профиль импульсов (б) в гармоническом режиме

При мощности накачки менее 0,96 Вт система испытывает нестабильность и переходит в режим модуляции добротности пассивной синхронизации мод. Оптический спектр и временной профиль представлены на рис. 5.

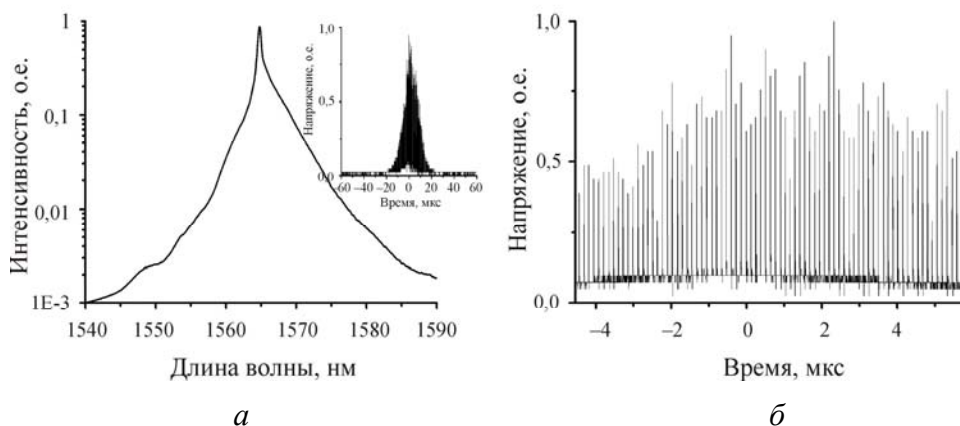


Рис. 5. Оптический спектр (а) и временной профиль (б) импульса в режиме модуляции добротности пассивной синхронизации мод

Формирование режима модуляции добротности связано с модуляцией потерь на основе двулучепреломления при низком уровне мощности накачки. Кроме того, при модуляции добротности имеются случайные мелкие структуры, особенно модулированная огибающая. Такое переходное состояние режима модуляции добротности нестабильно до появления режима непрерывной волны.

Заключение

В данной работе были экспериментально продемонстрированы генерация и эволюция шумоподобных прямоугольных импульсов, полученных в волоконном кольцевом лазере с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного вращения плоскости поляризации, работающего в области аномальной дисперсии. Стабильные прямоугольные шумоподобные импульсы с фиксированной частотой 1,1 МГц были достигнуты при правильной настройке контролеров поляризации и мощности накачки. Показано, что длительность временного профиля импульса перестраивается от 7,5 до 19 нс за счет увеличения мощности накачки, а максимальная энергия одиночного импульса доходит до 30 нДж. Данные импульсы могут эволюционировать в стабильную гармоническую синхронизацию при мощности накачки более 1,88 Вт, а при низкой – в комбинированный режим модуляции добротности и пассивной синхронизации мод.

Список литературы

1. Akhmediev N., Soto-Crespo J.M., Town G. // *Phys. Rev.* – 2001. – E 63. – 56602.
2. Runge A.F.J., Broderick N.G.R, Erkintalo M. // *Optica*. – 2015. – 2. – 36–9.
3. Chouli S., Grelu P. // *Phys. Rev.* – 2010. – A 81 063829.
4. Sanchez F., Grelu P., Leblond H., Komarov A., Komarov K., Salhi M., Niang A., Amrani F., Lecaplain C., Chouli S. // *Opt. Fiber Technol.* – 2014. – 20. – 562–74.
5. Zaviyalov A., Grelu P., Lederer F. – *Opt. Lett.* – 2012. – 37. – 175–7.
6. Grudin A.B., Gray S. // *J. Opt. Soc. Am.* – 1997. – B 14. – P. 144–54.
7. Amrani F., Haboucha A., Salhi M., Leblond H., Komarov A., Sanchez F. // *Appl. Phys.* – 2010. – B 99. – P. 107–14.
8. Li J., Zhang Z., Sun Z., Luo H., Liu Y., Yan Z., Mou C., Zhang L., Turitsyn S.K. // *Opt. Express*. – 2014. – 22. – 7875–82.
9. Jeong Y., Vazquez-Zuñiga L.A., Lee S., Kwon Y. // *Opt. Fiber Technol.* – 2014. – 20. – 575–92.
10. Santiago-Hernandez H., Pottiez O., Paez-Aguirre R., Ibarra-Villalon H.E., Tenorio-Torres A., Duran-Sanchez M., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A. and Hernandez-Garcia J.C. // *Laser Phys.* – 2015. – 25. – 045106.

11. Santiago-Hernandez H., Pottiez O., Duran-Sanchez M., Alvarez-Tamayo R.I., Lauterio-Cruz J.P., Hernandez-Garcia J.C., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A. // *Opt. Express.* – 2015. – 23. – 18840–9.
12. Li D., Shen D., Li L., Chen H., Tang D., Zhao L. // *Opt. Express.* – 2015. – 23. – 25889–95.
13. Chang W., Soto-Crespo J.M., Vouzas P., Akhmediev N. // *J. Opt. Soc. Am.* – 2015. – B 32. – 1377–83
14. Churkin D.V., Sugavanam S., Tarasov N., Khorev S., Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Turitsyn S.K. // *Nat. Commun.* – 2015. – 6. – 7004.
15. Lauterio-Cruz J.P., Hernandez-Garcia J.C., Pottiez O., Estudillo-Ayala J.M., Kuzin E.A., Rojas-Laguna R., Santiago-Hernandez H., Jauregui-Vazquez D. // *Opt. Express.* – 2016. – 24. – 13778–87.
16. Huang Y-Q, Qi Y-L, Luo Z-C, Luo A-P, Xu W-C // *Opt. Express.* – 2016. – 24. – 7356–63.
17. Garcia-Sanchez E., Pottiez O., Bracamontes-Rodriguez Y., Lauterio-Cruz J.P., Ibarra-Villalon H.E., Hernandez-Garcia J.C., Bello-Jimenez M., Kuzin E.A. // *Laser Phys. Lett.* – 2016. – 13. – 105106.
18. Hernandez-Garcia J.C., Pottiez O., Estudillo-Ayala J.M. // *Laser Phys.* – 2012. – 22. – 221–6.
19. Zaytsev A., Lin C-H, You Y-J, Chung C-C, Wang C-L, Pan C-L // *Opt. Express.* – 2013. – 21. – 16056–62.
20. Lin S-S, Hwang S-K, Liu J-M // *Opt. Express.* – 2014. – 22. – 4152–60.
21. Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Kukarin S.V. – *Opt. Express.* – 2014. – 22. – 1058–64.
22. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Ankudinov I. // *Opt. Express.* – 2014. – 22. – 20770–5.
23. Özgören K., Öktem B., Yilmaz S., Ilday F.Ö., Eken K. // *Opt. Express.* – 2011. – 19. – 17647–52.
24. You Y-J, Wang C., Lin Y-L, Zaytsev A., Xue P., Pan C-L // *Laser Phys. Lett.* – 2016. – 13. – 025101.
25. Lecaplain C., Grelu P. // *Phys. Rev.* – 2014. – A 90 013805.
26. Runge A.F.J., Agugaray C., Broderick N.G.R., Erkintalo M. // *Opt. Lett.* – 2014. – 39. – 319–22.
27. Pottiez O., Paez-Aguirre R., Cruz J.L., Andrés M.V., Kuzin E.A. // *Opt. Commun.* – 2016. – 377. – 41–51.
28. Liu Z., Zhang S., Wise F.W. // *Opt. Lett.* – 2015. – 40. – 1366–9.

29. Boucon A., Barviau B., Fatome J., Finot C., Sylvestre T., Lee M.W., Grelu P., Millot G. // *Appl. Phys.* – 2012. – B 106. – 283–7.

30. Pottiez O., Hernández-García J.C., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A., Durán-Sánchez M., González-García A. // *Laser Phys.* – 2014. – 24. – 115103.

31. Torres-Muñoz O.S., Pottiez O., Bracamontes-Rodriguez Y., Lauterio-Cruz J.P., Ibarra-Villalon H.E., Hernandez-Garcia J.C., Bello-Jimenez M., Kuzin E.A. // *Opt. Express.* – 2019. – 27. – 17521–38.

References

1. Akhmediev N., Soto-Crespo J.M., Town G. *Phys. Rev.*, 2001, E 63, p. 56602.

2. Runge A.F.J., Broderick N.G.R., Erkintalo M. *Optica*, 2015, 2, pp. 36-39.

3. Chouli S., Grelu P. *Phys. Rev.*, 2010, A 81 063829.

4. Sanchez F., Grelu P., Leblond H., Komarov A., Komarov K., Salhi M., Niang A., Amrani F., Lecaplain C., Chouli S. *Opt. Fiber Technol.*, 2014, 20, pp. 562-574.

5. Zaviyalov A., Grelu P., Lederer F. *Opt. Lett.*, 2012, 37, pp. 175-177.

6. Grudinin A.B., Gray S. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, B 14, pp. 144-154.

7. Amrani F., Haboucha A., Salhi M., Leblond H., Komarov A., Sanchez F. *Appl. Phys.*, 2010, B 99, pp. 107-114.

8. Li J., Zhang Z., Sun Z., Luo H., Liu Y., Yan Z., Mou C., Zhang L., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, 2014, 22, pp.7875-7882.

9. Jeong Y., Vazquez-Zuñiga L.A., Lee S., Kwon Y. *Opt. Fiber Technol.*, 2014, 20, pp. 575-592.

10. Santiago-Hernandez H., Pottiez O., Paez-Aguirre R., Ibarra-Villalon H.E., Tenorio-Torres A., Duran-Sanchez M., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A. and Hernandez-Garcia J.C. *Laser Phys.*, 2015, 25, 045106.

11. Santiago-Hernandez H., Pottiez O., Duran-Sanchez M., Alvarez-Tamayo R.I., Lauterio-Cruz J.P., Hernandez-Garcia J.C., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A. *Opt. Express.*, 2015, 23, pp. 18840-18849.

12. Li D., Shen D., Li L., Chen H., Tang D., Zhao L. *Opt. Express.*, 2015, 23, 25889-25895.

13. Chang W., Soto-Crespo J.M., Vouzas P., Akhmediev N. *J. Opt. Soc. Am.*, 2015, B 32, pp. 1377-1383.

14. Churkin D.V., Sugavanam S., Tarasov N., Khorev S., Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Turitsyn S.K. *Nat. Commun.*, 2015, 6, p. 7004.

15. Lauterio-Cruz J.P., Hernandez-Garcia J.C., Pottiez O., Estudillo-Ayala J.M., Kuzin E.A., Rojas-Laguna R., Santiago-Hernandez H., Jauregui-Vazquez D. *Opt. Express.*, 2016, 24, pp. 13778-13787.
16. Huang Y.-Q., Qi Y.-L., Luo Z.-C., Luo A.-P., Xu W.-C. *Opt. Express.*, 2016, 24, pp. 7356-7363.
17. Garcia-Sanchez E., Pottiez O., Bracamontes-Rodriguez Y., Lauterio-Cruz J.P., Ibarra-Villalon H.E., Hernandez-Garcia J.C., Bello-Jimenez M., Kuzin E.A. *Laser Phys. Lett.*, 2016, 13, p. 105106.
18. Hernandez-Garcia J.C., Pottiez O., Estudillo-Ayala J.M. *Laser Phys.*, 2012, 22, pp. 221-226.
19. Zaytsev A., Lin C.-H., You Y.-J., Chung C.-C., Wang C.-L., Pan C.-L. *Opt. Express.*, 2013, 21, pp. 16056-16062.
20. Lin S.-S., Hwang S.-K., Liu J.-M. *Opt. Express.*, 2014, 22, pp. 4152-4160.
21. Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Kukarin S.V. *Opt. Express.*, 2014, 22, pp. 1058-1064.
22. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Ankudinov I. *Opt. Express.*, 2014, 22, pp. 20770-20705.
23. Özgören K., Öktem B., Yilmaz S., Ilday F.Ö., Eken K. *Opt. Express.*, 2011, 19, pp. 17647-17652.
24. You Y.-J., Wang C., Lin Y.-L., Zaytsev A., Xue P., Pan C.-L. *Laser Phys. Lett.*, 2016, 13, p. 025101.
25. Lecaplain C., Grelu P. *Phys. Rev.*, 2014, A 90 013805.
26. Runge A.F.J., Agueraray C., Broderick N.G.R., Erkintalo M. *Opt. Lett.*, 2014, 39, pp.319-322.
27. Pottiez O., Paez-Aguirre R., Cruz J.L., Andrés M.V., Kuzin E.A. *Opt. Commun.*, 2016, 377, pp. 41-51.
28. Liu Z., Zhang S., Wise F.W. *Opt. Lett.*, 2015, 40, pp. 1366-1369.
29. Boucon A., Barviau B., Fatome J., Finot C., Sylvestre T., Lee M.W., Grelu P., Millot G. *Appl. Phys.*, 2012, B 106, pp. 283-287.
30. Pottiez O., Hernández-García J.C., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A., Durán-Sánchez M., González-García A. *Laser Phys.*, 2014, 24, p. 115103.
31. Torres-Muñoz O.S., Pottiez O., Bracamontes-Rodriguez Y., Lauterio-Cruz J.P., Ibarra-Villalon H.E., Hernandez-Garcia J.C., Bello-Jimenez M., Kuzin E.A. *Opt. Express.*, 2019, 27, pp. 17521-17538.