

УДК 681.7.068/.069

**В.А. Камынин<sup>1,2</sup>, А.И. Трикшев<sup>1,2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1,3</sup>,  
И.О. Золотовский<sup>2</sup>, Д.А. Коробко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы  
Ульяновского государственного университета, Ульяновск, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

## **ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ВНЕШНИМ ФИЛЬТРОМ НА ОСНОВЕ РЕШЕТКИ БРЭГГА**

Продемонстрирован источник ультракоротких импульсов с перестраиваемой центральной длиной волны излучения в диапазоне 1077–1081 нм. Частота следования импульсов составила 1 МГц. Использование внешней перестраиваемой волоконной брегговской решетки позволило сократить длительность импульсов с 500 до 100 пс и изменить центральную длину волны выходного излучения.

**Ключевые слова:** иттербиевый волоконный лазер, синхронизация мод, нелинейное вращение плоскости поляризации, волоконная брегговская решетка.

**V.A. Kamynin<sup>1,2</sup>, A.I. Trikshev<sup>1,2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1,3</sup>,  
I.O. Zolotovskii<sup>2</sup>, D.A. Korobko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> S.P. Kapitsa Technological Research Institute of Ulyanovsk State University,  
Ulyanovsk, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation

## **ALL-FIBER PASSIVELY MODE LOCKED YB-DOPED LASER WITH EXTERNAL TUNABLE FIBER BRAGG GRATING BASED FILTER**

A short pulse laser system with tunable central wavelength in 1077–1081 nm spectral region was demonstrated. Repetition rate of the output pulses was 1 MHz. External tunable fiber Bragg grating allowed us to reduce pulse duration from 500 to 100 ps and change central wavelength of the output radiation.

**Keywords:** ytterbium-doped fiber laser, mode-lock, nonlinear polarization rotation, fiber Bragg grating.

Источники импульсов пикосекундной длительности нашли широкое применение в системах обработки материалов, медицинском и научном оборудовании и т.д. [1–3]. Для большей части подобных приложений необходимы импульсы относительно высоких энергий, которые могут быть достигнуты в кристаллических усиливающих средах с диодной или ламповой накачкой. Для эффективной работы данного типа усилителей необходимо максимальное совпадение спектра усиления со спектром сигнала. Для решения такой проблемы в данной работе предложена импульсная, полностью волоконная лазерная система с настраиваемой центральной длиной волны в спектральной области 1077–1081 нм. Пассивная синхронизация мод реализована за счет эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации в волоконном резонаторе с нормальной дисперсией длиной 200 м [4, 5]. Перестройка длины волны излучения осуществлялась деформацией волоконной брэгговской решетки, установленной в одном из выходов циркулятора. В результате эксперимента было показано, что после прохождения брэгговской решетки длительность импульса сокращается с 500 до 100 пс.

Задающий генератор (рис. 1, I) представлял собой кольцевой волоконный лазер мощностью 1,8 мВт. В качестве активной среды использовалось легированное иттербием волокно с многоэлементной первой оболочкой (GTWave) [6] длиной 1,5 м (6/125 мкм;  $N_{Acog} = 0,11$ ;  $N_{Ac1} = 0,45, 0,8$  дБ/м @976 нм). Накачка осуществлялась с помощью многомодового полупроводникового лазерного диода с центральной длиной волны 975 нм. Общая длина резонатора составила около 200 м ( $D = -38$  (пс/нм/км) @ 1060 нм).

Спектр выходного излучения задающего генератора представлен на рис. 2, а. Осциллограмма импульса показана на рис. 2, б. Длительность импульса на полувысоте, измеренная осциллографом с частотой 16 ГГц, составила около 500 пс.

Для выделения необходимой спектральной части излучения, на выходе лазера помещался волоконный циркулятор с перестраиваемой волоконной брэгговской решеткой (ПВБР) на одном из портов (см. рис. 1, II) таким образом, чтобы ненужное излучение отфильтровывалось из системы, а отраженное с нужной длиной волны использовалось для дальнейшего усиления. Кроме того, такая схема позволила наблюдать излучение, распространяющееся через ПВБР (точка Б, см. рис. 1) и отраженное от решетки излучение (точка В, см. рис. 1).

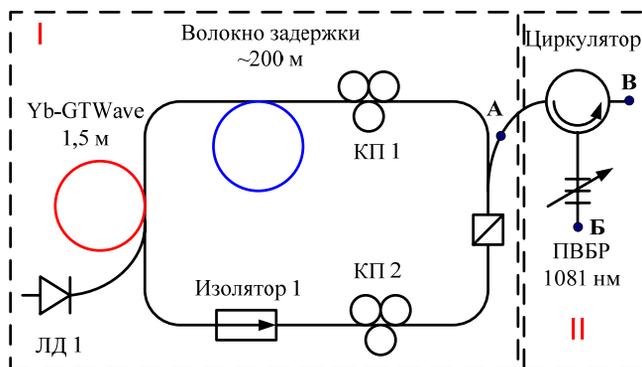


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: I – лазер, работающий в режиме синхронизации мод; II – фильтр на основе циркулятора и перестраиваемой брэгговской решетки (ПВБР 1081 нм); Yb-GTWave – активное GTWave-волокно, легированное ионами Yb<sup>3+</sup>; ЛД 1 – многомодовый диод накачки; КП 1, 2 – контроллеры поляризации

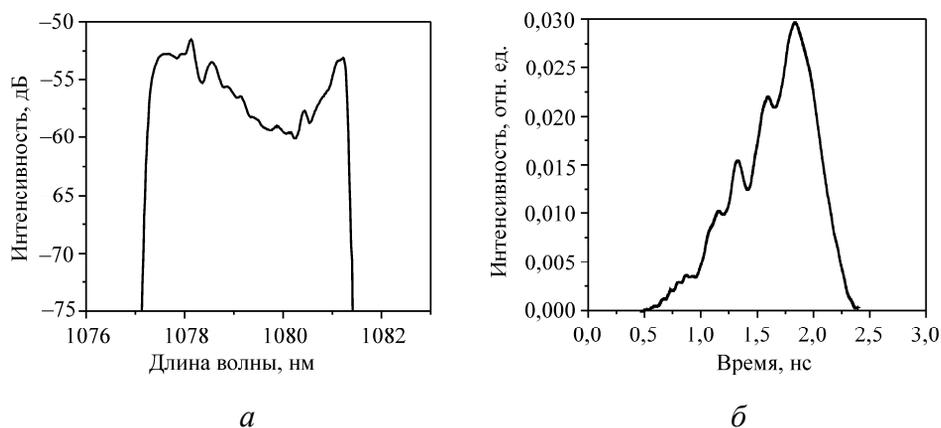


Рис. 2. Спектр (а) и соответствующая осциллограмма (б) на выходе задающего генератора (точка А, см. рис. 1)

Спектр излучения и осциллограмма одиночного импульса на длине волны 1081 нм, отраженного от решетки, показаны на рис. 3, а и б соответственно.

Как видно, длительность импульса сократилась с 500 до 100 пс по сравнению с выходным излучением задающего генератора, а центральная длина волны излучения стала соответствовать пику отражения ПВБР. Это может быть вызвано выделением части излучения из chirпированного импульса. При сжатии решетки происходил сдвиг спектра отражения в коротковолновую область излучения (рис. 4, а).

Стоит отметить, что длительность импульса по-прежнему не превышала 100 пс (рис. 4, б).

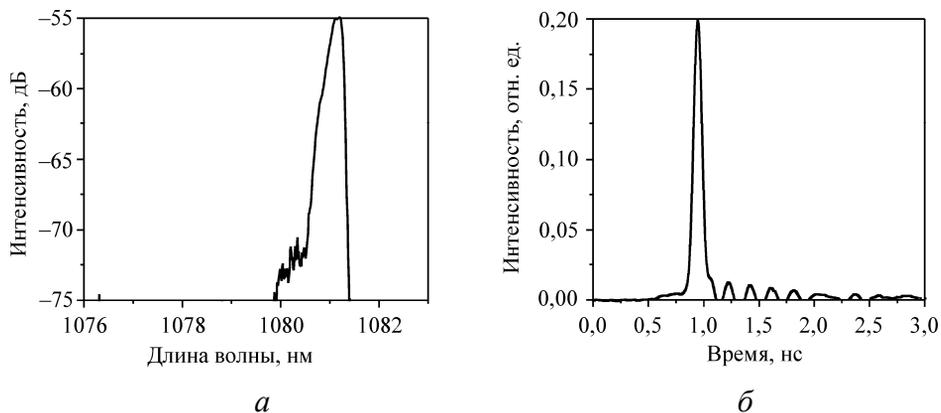


Рис. 3. Спектр (а) и соответствующая осциллограмма (б) после отражения от ПВБР на длине волны 1081 нм (точка В, см. рис. 1)

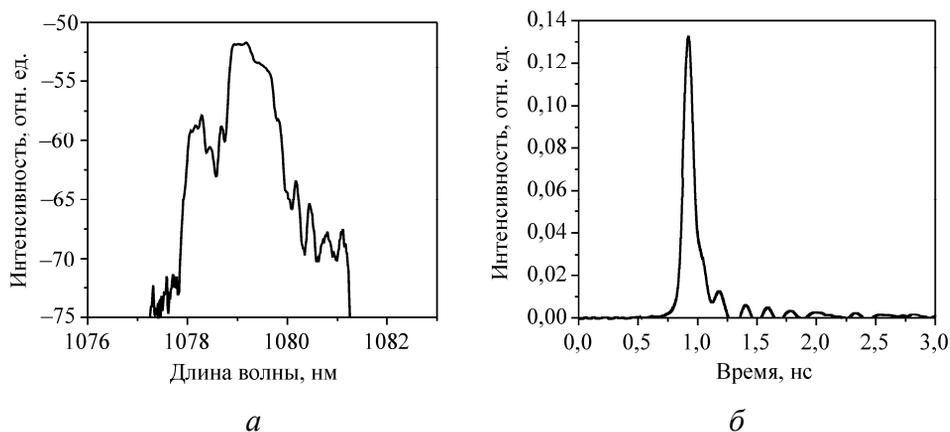


Рис. 4. Спектр (а) и соответствующая осциллограмма (б) после отражения от ПВБР на длине волны 1079 нм (точка В, см. рис. 1)

Лазерное излучение, прошедшее через решетку (рис. 5, а, б), имело характерные провалы в спектре выходного излучения, соответствующие отраженной от ПВБР части. Импульс имеет сложную структуру, однако форма огибающей совпадает с импульсом задающего лазера с точностью до провала, обусловленного отраженной частью chirпированного импульса.

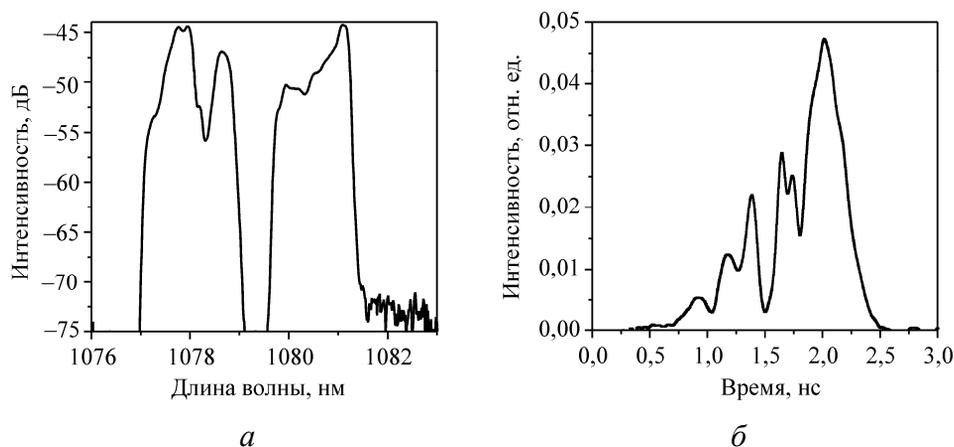


Рис. 5. Спектр (а) и соответствующая осциллограмма (б) после прохождения излучения через ПВБР на длине волны 1079 нм (точка Б, см. рис. 1)

Таким образом, был продемонстрирован способ подстройки длины волны задающего генератора в диапазоне длин волн 1079–1081 нм при помощи внешнего перестраиваемого волоконного фильтра. Применение в структуре данного фильтра волоконной брэгговской решетки позволило сократить длительность импульсов с 500 до 100 пс и изменять центральную длину волны выходного излучения.

### Список литературы

1. Development and application of fiber lasers for medical applications / M.C. Pierce, S.D. Jackson, P.S. Golding, B. Dickinson, M.R. Dickinson, T.A. King, P. Sloan // 144 Proceedings of SPIE “Optical Fibers and Sensors for Medical Applications”. – 2001. – Vol. 4253.
2. Sclerectomy with nanojoule energy level per pulse by femtosecond fiber laser in vitro / Ling Jin, Fagang Jiang, Nengli Dai, Jinggang Peng, Minglie Hu, Shutong He, Kun Fang, Xiaobo Yang // Optics Express. – 2015. – Vol. 23 (17). – P. 22012–22023.
3. Fiber-lasers for ultrafast optics / M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, D. Harter // Appl. Phys. B. – 1997. – Vol. 65. – P. 259–275.
4. Xueming Liu. Dissipative soliton evolution in ultra-large normal-cavity-dispersion fiber lasers // Optics Express. – 2009. – Vol. 17 (12). – P. 9549–9557.
5. Мощный импульсный иттербиевый волоконный лазер с энергией импульса 10 мкДж / А.И. Трикшев, В.А. Камынин, В.Б. Цветков,

О.Н. Егорова // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 12. – С. 1085–1088.

6. Волоконные Yb-, Er–Yb- и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой / И.А. Буфетов, М.М. Бубнов, М.А. Мелькумов, В.В. Дудин, А.В. Шубин, С.Л. Семенов, К.С. Кравцов, А.Н. Гурьянов, М.В. Яшков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 4. – С. 328–334.

### **References**

1. Mark C. Pierce, Stuart D. Jackson, Paul S. Golding, Ben Dickinson, Mark R. Dickinson, Terence A. King, Philip Sloan, “Development and application of fiber lasers for medical applications”, *Optical Fibers and Sensors for Medical Applications*, 144 Proceedings of SPIE Vol. 4253 (2001).

2. Ling Jin, Fagang Jiang, Nengli Dai, Jingtang Peng, Minglie Hu, Shutong He, Kun Fang, and Xiaobo Yang, “Sclerectomy with nanojoule energy level per pulse by femtosecond fiber laser in vitro”, *Optics Express* 23 (17), pp. 22012-22023 (2015).

3. M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, D. Harter. “Fiber-lasers for ultrafast optics”, *Appl. Phys. B* 65, 259–275 (1997).

4. Xueming Liu, "Dissipative soliton evolution in ultra-large normal-cavity-dispersion fiber lasers", *Optics Express* 17 (12), pp. 9549-9557 (2009).

5. A.I. Trikshev, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov, O.N. Egorova, “Moshchnyy impul'snyy itterbievyy volokonnyy lazer s energiyey impul'sa 10 mкDzh”, *Kvantovaya elektronika*, 46:12 (2016), 1085–1088 [*Quantum Electron.*, 46:12 (2016), 1085–1088]

6. I.A. Bufetov, M.M. Bubnov, M.A. Mel'kumov, V.V. Dudin, A.V. Shubin, S.L. Semenov, K.S. Kravtsov, A.N. Gur'yanov, M.V. Yashkov, E.M. Dianov. “Vолоконные Yb-, Er–Yb- i Nd-lazery na svetovodakh s mnogoelementnoy pervoy obolochkoy”, *Kvantovaya elektronika*, 35:4 (2005), 328–334 [*Quantum Electron.*, 35:4 (2005), 328–334]

Получено 26.06.2017