

УДК 681.7.068, 681.7.069

**Б.И. Галаган<sup>1</sup>, Б.И. Денкер<sup>1</sup>, О.Н. Егорова<sup>2</sup>,  
В.А. Камынин<sup>1,3</sup>, А.А. Поносова<sup>1,4</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>,  
С.Л. Семенов<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1,5</sup>**

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

<sup>2</sup> Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Пермский научный центр Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

<sup>4</sup> АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

<sup>5</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## **ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ИСТОЧНИК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ КОМПОЗИТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С НАКАЧКОЙ В ОБОЛОЧКУ**

Впервые создан компактный цельноволоконный широкополосный источник инфракрасного излучения, в качестве активной среды которого использовано композитное оптическое волокно с сердцевиной из высоколегированного  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  фосфатного стекла и оболочкой из кварцевого стекла. Заготовка волокна получена методом «стержень в трубке». Для формирования сердцевины волокна были использованы лазерные фосфатные стекла с абсолютными концентрациями ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$   $1,3 \cdot 10^{20}$  и  $1,7 \cdot 10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$  соответственно. Продемонстрирована возможность использования разработанных волокон в широкополосных источниках излучения. Ширина спектра излучения по уровню  $-10$  дБ составила 12,69 нм при максимальной мощности 4,5 мВт.

**Ключевые слова:** высоколегированное  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  фосфатное стекло, метод «стержень в трубке», композитное волокно, широкополосный волоконный источник излучения, инфракрасное излучение, спектр излучения.

**B.I. Galagan<sup>1</sup>, B.I. Denker<sup>1</sup>, O.N. Egorova<sup>2</sup>, V.A. Kamynin<sup>1,3</sup>,  
A.A. Ponosova<sup>1,4</sup>, S.E. Sverchkov<sup>1</sup>, S.L. Semenov<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1,5</sup>**

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

<sup>2</sup> Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Perm, Russian Federation

<sup>4</sup> Perm Scientific-Industrial Instrument Company, Perm, Russian Federation

<sup>5</sup> National Research Nuclear University MEPhI  
(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

## **CLADDING-PUMPED BROADBAND HIGH-CONCENTRATION ER<sup>3+</sup>/YB<sup>3+</sup>-CODOPED COMPOSITE OPTICAL FIBER IR-LIGHT SOURCE**

For the first time to the best of our knowledge a compact all-fiber broadband infrared light source is developed using high-concentration Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped phosphate-core silica-cladding composite optical fiber as gain medium. The fiber blank was fabricated by “rod-in-tube” technique. The laser phosphate glass was used for the fiber core. The absolute concentrations of Er<sup>3+</sup> ions and Yb<sup>3+</sup> ions were 1,3·10<sup>20</sup> and 1,7·10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup>. The spectrum width at -10 dB was 12,69 nm in case of the highest output power of 4,5 mW.

**Keywords:** high-concentration Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped phosphate glass, rod-in-tube technique, composite fiber, broadband fiber light source, infrared light, radiation spectrum.

### **Введение**

Широкополосные волоконные источники излучения на основе кварцевых оптических волокон, легированных ионами Er<sup>3+</sup>, находят применение в волоконно-оптических гироскопах [1–4], системах низкокогерентной рефлектометрии [5] и пр. Для данных источников характерны высокая пространственная когерентность, большая ширина спектра [2, 3] и высокая временная стабильность [6]. Однако такие устройства требуют применения дорогостоящих одномодовых источников накачки. Их компактность ограничена относительно низким допустимым уровнем легирования ионами редкоземельных элементов кварцевой матрицы.

В последнее время были разработаны фосфатные, теллуритные [7, 8], фторидные и другие волокна, легированные ионами редкоземельных элементов. Фосфатные стекла позволяют без кластеризации вводить редкоземельные элементы в концентрациях на порядок выше,

чем кварцевые [9, 10], и получать высокие значения усиления на единицу длины световода. Кроме того, фосфатная матрица является наиболее благоприятной для передачи энергии электронного возбуждения в системе иттербий – эрбий [11].

Фосфатные волокна успешно зарекомендовали себя в качестве усиливающей среды в волоконных лазерах [9, 12–14] и усилителях [15–17], в то же время исследованию широкополосных источников излучения на основе фосфатных волокон посвящено незначительное количество работ [18, 19].

К основным проблемам использования фосфатных активных световодов относятся низкая стойкость фосфатных стекол к атмосферной влаге и сложность их сварки с подводными кварцевыми оптическими волокнами, что препятствует созданию цельноволокнистых источников.

В Институте общей физики РАН совместно с Научным центром волоконной оптики РАН были разработаны высоколегированные  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  композитные волокна с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой, позволяющие одновременно использовать преимущества оптических свойств фосфатной усиливающей среды и высокие механические и химические свойства кварцевых оптических волокон [9, 20].

Целью настоящей работы стало описание создания и исследования цельноволокнистого компактного широкополосного волоконного источника излучения на основе композитного волокна с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой.

## 1. Экспериментальные методы и образцы

*Технология изготовления и свойства высоколегированных  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  композитных оптических волокон.* Заготовка оптического волокна была получена методом «стержень в трубке» (rod-in-tube technique). Для формирования сердцевины в печи с индукционным нагревом в тигле Pt было сварено стекло следующего состава: 65 мол. %  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 7 мол. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 12 мол. %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 9 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  и 7 мол. % окислов редкоземельных элементов ( $\text{RE}_2\text{O}_3$ ). Абсолютные концентрации активных ионов составили  $1,7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ Yb}^{3+}$  и  $1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ Er}^{3+}$ .

Затем из фосфатного стекла были изготовлены стержни диаметром 4,4 мм. Данные стержни вставлялись в трубку из кварцевого стекла (Heraeus F300), после чего полученная заготовка консолидировалась

при температуре около 2000 °С и перетягивалась на меньший диаметр. Для достижения необходимого соотношения между диаметрами сердцевины и оболочки исходная заготовка помещалась в дополнительную опорную кварцевую трубу и сплавлялась с ней. Внешний диаметр заготовки после «жакетирования» составлял 13,5 мм, тогда как диаметр фосфатной сердцевины – порядка 1 мм. Затем заготовка подвергалась механической обработке для получения квадратного поперечного сечения кварцевой оболочки оптического волокна с целью обеспечения эффективного поглощения накачки сердцевиной при накачке в оболочку. В процессе вытяжки на волокно наносилось полимерное покрытие с показателем преломления меньшим, чем у оболочки, что позволило реализовать накачку волокна в оболочку. Все описанные операции были выполнены при тех же режимах и на том же оборудовании, которые обычно используются для изготовления световодов на основе кварцевого стекла [9].

На рис. 1 представлено изображение торца волокна, полученное методом сканирующей электронной микроскопии. Сторона поперечного сечения внутренней оболочки полученного световода составила 100 мкм, диаметр сердцевины – 13,5 мкм. Измеренная числовая апертура сердцевины составила 0,3, световод являлся многомодовым. Результаты рентгеновского микроанализа показали, что вследствие взаимодиффузии компонентов сердцевины и оболочки при вытяжке световода концентрация оксида фосфора в сердцевине снизилась до 30 мол. %, оксидов редкоземельных элементов – до 4–5 мол. %.

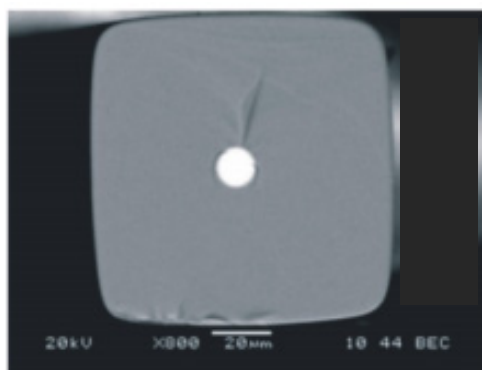


Рис. 1. Поперечное сечение торца волокна

«Серые» потери в сердцевине в области длин волн 1,2–1,3 мкм составили 2 дБ/м. Поглощение излучения накачки на длине волны 971 нм при вводе в оболочку составило 0,3 дБ/см. Поглощение в сердцевине на длине волны 1535 нм было 1,5 дБ/см.

*Оптическая схема широкополосного волоконного источника ИК-излучения.* Совместное легирование фосфатной сердцевины ионами иттербия и эрбия позволило реализовать эффективную накачку в оболочку в полосу поглощения иттербия. Экспериментальная схема широкополосного однокаскадного источника с сонаправленной накачкой в оболочку представлена на рис. 2. В качестве накачки был использован лазерный диод с многомодовым волоконным выходом с мощностью до 1100 мВт, центральной длиной волны 971,5 нм и шириной спектра на полувысоте 4 нм. Для защиты лазерного диода от излучения в полосе люминесценции ионов эрбия на 1,5 мкм к его выходу подваривалось оптическое волокно с ведущей полимерной оболочкой, сердцевина которого была легирована 4 мол. % ионов тулия, эффективно поглощающего это излучение.

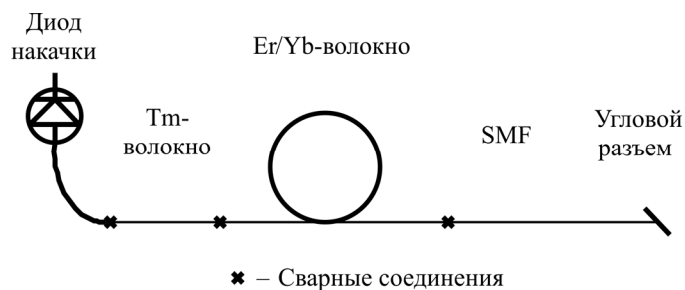


Рис. 2. Принципиальная схема широкополосного источника

В качестве активной среды использовалось композитное оптическое волокно длиной 68 см. Для вывода излучения из световедущей жилы активного световода к нему подваривалось стандартное одномодовое волокно, которое одновременно служило фильтром для распространяющейся в оболочке накачки.

## 2. Результаты и их обсуждение

В процессе исследований были измерены спектры излучения волоконного источника при различных мощностях накачки. На рис. 3 представлен спектр излучения, полученный в диапазоне длин волн от

950 до 1700 нм при максимальной мощности накачки 1080 мВт. Источник продемонстрировал излучение в области длин волн 1000–1100 нм, характерной для люминесценции иттербия, и в области 1450–1650 нм, характерной для люминесценции эрбия. Крайний левый пик на рис. 3 соответствует остаточному излучению накачки.

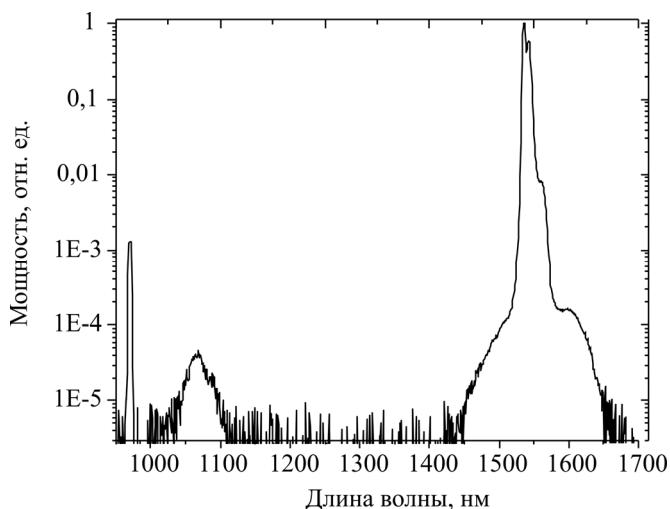


Рис. 3. Спектр излучения на выходе широкополосного источника при мощности накачки 1080 мВт

На рис. 4 представлены доли мощности выходного излучения, приходящиеся на непоглощенное излучение накачки, и на излучение, соответствующее оптическим переходам ионов эрбия и иттербия. От 70 до  $\approx 99$  % мощности на выходе источника обусловлено излучением ионов эрбия. Таким образом, при мощности накачки более 600 мВт доля излучения ионов эрбия превышает 95 %.

Максимальный вклад ионов иттербия в интегральную мощность излучения составляет не более 2 %. Такая низкая интенсивность люминесценции ионов иттербия связана с эффективной передачей энергии с уровня  $^2F_{5/2}$  ионов сенсibilизатора  $Yb^{3+}$  на верхний лазерный уровень  $^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$ .

Спектры излучения волоконного источника при различных мощностях накачки представлены на рис. 5. На спектрах наблюдаются два ярко выраженных пика вблизи 1535 и 1543 нм, соотношение интенсивностей которых меняется в зависимости от мощности накачки.

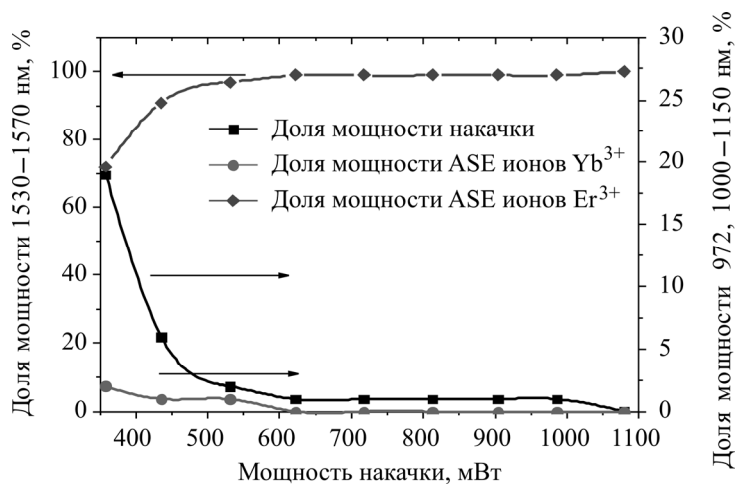


Рис. 4. Распределение долей мощности выходного излучения, приходящихся на ионы эрбия, иттербия и непоглощенную накачку

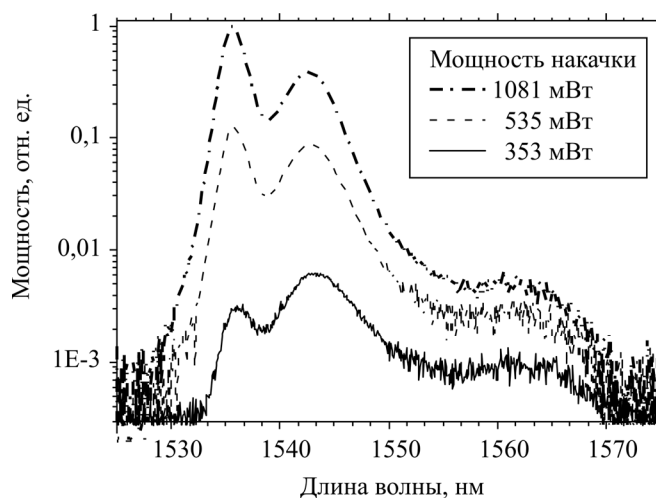


Рис. 5. Сравнение нормализованных спектров широкополосного излучения при различных мощностях накачки

Максимальная выходная мощность составила 4,5 мВт при мощности накачки 1081 мВт. При этом ширина спектра по уровню  $-10$  дБ равнялась 12,7 нм, а ширина пиков на полувысоте вблизи 1535 и 1543 нм составляла порядка 2 и 5 нм соответственно. Уменьшение мощности выходного излучения до 0,91 мВт сопровождается увеличением ширины спектра до 13,9 нм по уровню  $-10$  дБ, что соответствует мощности накачки 353 мВт (см. рис. 5).

Спектр излучения имеет сложную форму с двумя пиками. Ширина пика на полувывоте в области 1543 нм при максимальной мощности накачки составляет около 5 нм. Эта величина, согласно [3], уже соответствует требованиям, предъявляемым к ширине спектра источников ИК-излучения волоконно-оптических гироскопов. Для сравнения укажем, что в широкополосных источниках, созданных на основе коммерчески доступных волокон, легированных ионами эрбия, ширина спектра на полувывоте составляет 7 нм, однако длина световодов превышает 15 м. Таким образом, есть основания надеяться, что на исследованном типе оптического волокна могут быть созданы эффективные широкополосные компактные источники ИК-излучения для практического использования.

### **Заключение**

Впервые создан компактный полностью волоконный широкополосный источник излучения, в качестве активной среды для которого использован композитный световод с фосфатной сердцевиной, легированной системой иттербий – эрбий, и кварцевой оболочкой. Высокое содержание ионов иттербия (более  $10^{21}$  см<sup>-3</sup>) позволило реализовать эффективную накачку в оболочку на длине волны 971 нм. Данный широкополосный волоконный источник может представлять практический интерес. К преимуществам созданной на композитном волокне схемы необходимо отнести использование многомодовой накачки и уменьшение длины активной среды в 10–20 раз по сравнению с характерными длинами кварцевых волокон в аналогичных схемах.

*Работа была поддержана РФФИ в рамках проекта 14-29-08168 офи\_м.*

### **Список литературы**

1. Jinlong Ch., Manqing T. Experimental optimization of an erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32. – № 10. – ID 104007 (5 pages).
2. Rao P.N., Shrivastava S.K. 1,3 mW 1550 nm Er-doped super fluorescent fiber source for missile fiber optics gyroscope // Journal of Advanced Physics. – 2014. – Vol. 5, № 3. – P. 993–1000.



3. Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications / P.F. Wysocki, M.J.F. Digonnet, B.Y. Kim, H.J. Shaw // *Journal of Lightwave Technology*. – 1994. – Vol. 12, № 3. – P. 550–567.

4. Широкополосный волоконный источник / А.А. Поносова, О.Л. Кель, А.И. Семерикова, А.С. Курков // *Фотон-экспресс*. – 2015. – Т. 6, № 126. – С. 91–92.

5. Efficient superfluorescent light sources with broad bandwidth / R. Paschotta, J. Nilsson, A.C. Tropper, D.C. Hanna // *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 1997. – Vol. 3, № 4. – P. 1097–1099.

6. Hall D.C., Burns W.K., Moeller R.P. High-stability Er<sup>3+</sup>-doped superfluorescent fiber sources // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 1995. – Vol. 13, № 7. – P. 1452–1460.

7. Broadband emission in Er<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup>-codoped tellurite fibre / L. Huang, A. Jha, Sh. Shen, X. Liu // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12, № 11. – P. 2429–2434.

8. Preparation and ASE spectrum of single-mode Erbium-doped tellurite glass fiber with D-type cladding geometry / J. Zhang, Sh. Dai, G. Wang, Sh. Xu, Sh. Li, L. Hu // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2004. – Vol. 20, № 6. – P. 671–674.

9. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser / O.N. Egorova, S.L. Semjonov, V.V. Velmiskin, Yu.P. Yatsenko, S.E. Sverchkov, B.I. Galagan, B.I. Denker, E.M. Dianov // *Optical Express*. – 2014. – Vol. 22, № 7. – P. 7625–7630.

10. Dorosz D. Rare earth ions doped alumosilicate and phosphate double clad optical fibers // *Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences*. – 2008. – Vol. 56, № 2. – P. 103–111.

11. Лазерные фосфатные стекла / Н.Е. Алексеев, В.П. Гапонцев, М.Е. Жаботинский, В.Б. Кравченко, Ю.П. Рудницкий. – М.: Наука, 1980. – 352 с.

12. Novel Er: Yb phosphate glass fiber laser pumped by a 946 nm Nd: YAG laser / A. Claesson [et al.] // *Lasers and Electro-Optics – 2001: Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on*. – IEEE, 2001. – P. 305.

13. Waveguide lasers in phosphate glasses made using UV-written gratings / S. Honkanen, A. Schülzen, J. Albert, N. Peyghambarian // *SPIE Newsroom*. – 2008. – P. 2. – URL: <http://spie.org/newsroom/0998-wave>

guide-lasers-in-phosphate-glasses-made-using-uv-written-gratings (дата обращения: 10.04.2016).

14. All-polarization maintaining femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber / G. Sobon, J. Sotor, K.M. Abramski // *Laser Physics Letters*. – 2012. – Vol. 9, № 8. – P. 581–586.

15. Nandi P., Jose G. Superfluorescence from Yb- and Yb–Er-doped phosphotellurite glass fibres // *Optical Fiber Technology*. – 2008. – Vol. 14, № 14. – P. 275–280.

16. Fabrication and characterization of a high-gain Yb–Er-codoped phosphate glass optical amplifier / G.C. Scarpignato, D. Milanese, J. Lousteau, N.G. Boetti, E. Mura // *Hindawi Publishing Corporation Journal of Engineering*. – 2013. – ID 858341 (4 pages).

17. Performance of high-concentration  $\text{Er}^{3+}$ – $\text{Yb}^{3+}$ -codoped phosphate fiber amplifiers / Y. Hu, Sh. Jiang, T. Luo, K. Seneschal, M. Morrell, F. Smektala, S. Honkanen, J. Lucas, N. Peyghambarian // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2001. – Vol. 13, № 7. – P. 657–659.

18. Compact high power broadband  $\text{Er}^{3+}$ – $\text{Yb}^{3+}$ -codoped superfluorescent fiber source / F. Song, Zh. Cheng, Ch. Zou, L. Han, X. Yu, J. Zhang, X. Jiang, P. Han, J. Tian // *Applied Physics Letters*. – 2008. – № 93. – ID 091108 (3 pages).

19. Theoretical study on erbium ytterbium co-doped super-fluorescent fiber source / G. Wentao, D. Feng, T. Manqing, J. Jian, G. Xiaofeng // *Journal of Semiconductors*. – 2016. – Vol. 37, № 1. – ID 014010 (5 pages).

20. Composite laser fiber with Yb–Er-codoped phosphate glass core and silica cladding / B.I. Denker, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, A.S. Kurkov, Ya.E. Sadovnikova, S.L. Semenov, S.E. Sverchkov, V.V. Velmiskin, E.M. Dianov // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10, № 5. – ID 055109 (3 pages).

## References

1. Jinlong Ch., Manqing T. Experimental optimization of an Erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes. *Journal of Semiconductors*, 2011, vol. 32, no. 10. ID 104007.

2. Rao P.N., Shrivastava S.K. 1,3 mW 1550 nm Er-doped super fluorescent fiber source for missile fiber optics gyroscope. *Journal of Advanced Physics*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 993-1000.

3. Wysocki P.F., Dignonnet M.J.F., Kim B.Y., Shaw H.J. Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, no. 3, pp. 550-567.

4. Ponosova A.A., Kel' O.L., Semerikova A.I., Kurkov A.S. Широкополосный волоконный источник [Broadband fiber source]. *Foton-ekspress*, 2015, vol. 6, no. 126, pp. 91-92.

5. Paschotta R., Nilsson J., Tropper A.C., Hanna D.C. Efficient superfluorescent light sources with broad bandwidth. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, vol. 3, no. 4, pp. 1097-1099.

6. Hall D.C., Burns W.K., Moeller R.P. High-stability  $\text{Er}^{3+}$ -doped superfluorescent fiber sources. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1995, vol. 13, no. 7, pp. 1452-1460.

7. Huang L., Jha A., Shen Sh., Liu X. Broadband emission in  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Tm}^{3+}$ -codoped tellurite fibre. *Optics Express*, 2004, vol. 12, no. 11, pp. 2429-2434.

8. Zhang J., Dai Sh., Wang G., Xu Sh., Li Sh., Hu L. Preparation and ASE spectrum of single-mode Erbium-doped tellurite glass fiber with D-type cladding geometry. *Journal of Materials Science and Technology*, 2004, vol. 20, no. 6, pp. 671-674.

9. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser. *Optical Express*, 2014, vol. 22, no. 7, pp. 7625-7630.

10. Dorosz D. Rare earth ions doped aluminosilicate and phosphate double clad optical fibers. *Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 103-111.

11. Alekseev N.E., Gapontsev V.P., Zhabotinskii M.E., Kravchenko V.B., Rudnitskii Iu.P. Lazernye fosfatnye stekla [Phosphate laser glass]. Moscow, 1980. 352 p.

12. Claesson A. [et al.] Novel Er: Yb phosphate glass fiber laser pumped by a 946 nm Nd: YAG laser. *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference "Lasers and Electro-Optics"*, 2001, p. 305.

13. Honkanen S., Schülzen A., Albert J., Peyghambarian N. Waveguide lasers in phosphate glasses made using UV-written gratings. *SPIE Newsroom*, 2008, p. 2, available at: <http://spie.org/newsroom/0998-waveguide-lasers-in-phosphate-glasses-made-using-uv-written-gratings> (accessed 10 April 2016).

14. Sobon G., Sotor J., Abramski K.M. All-polarization maintaining femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber. *Laser Physics Letters*, 2012, vol. 9, no. 8, pp. 581-586.

15. Nandi P., Jose G. Superfluorescence from Yb- and Yb-Er-doped phosphotellurite glass fibres. *Optical Fiber Technology*, 2008, vol. 14, no. 14, pp. 275-280.

16. Scarpignato G.C., Milanese D., Lousteau J., Boetti N.G., Mura E. Fabrication and characterization of a high-gain Yb–Er-codoped phosphate glass optical amplifier. *Journal of Engineering*, 2013. ID 858341.
17. Hu Yo., Jiang Sh., Luo T., Seneschal K., Morrell M., Smektala F., Honkanen S., Lucas J., Peyghambarian N. Performance of high-concentration Er<sup>3+</sup>–Yb<sup>3+</sup>-codoped phosphate fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 7, pp. 657-659.
18. Song F., Cheng Zh., Zou Ch., Han L., Yu X., Zhang J., Jiang X., Han P., Tian J. Compact high power broadband Er<sup>3+</sup>–Yb<sup>3+</sup>-codoped superfluorescent fiber source. *Applied Physics Letters*, 2008, no. 93. ID 091108.
19. Wentao G., Feng D., Manqing T., Jian J., Xiaofeng G. Theoretical study on erbium ytterbium co-doped super-fluorescent fiber source. *Journal of Semiconductors*, 2016, vol. 37, no. 1. ID 014010.
20. Denker B.I., Galagan B.I., Kamynin V.A., Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Semenov S.L., Sverchkov S.E., Velmiskin V.V., Dianov E.M. Composite laser fiber with Yb, Er co-doped phosphate glass core and silica cladding. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 5. ID 055109.

Получено 12.04.2016