УДК 631.373

**Р.В. Дробышев^{1,2}, В.С. Терентьев¹, Ю.А. Тимиртдинов¹,
И.А. Лобач^{1,2,3}, С.И. Каблук¹**

¹ Институт автоматизации электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Пермь, Россия

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С МОДУЛЯЦИЕЙ УСИЛЕНИЯ

Впервые продемонстрирована возможность генерации иттербиевого волоконного лазера с широким спектром в режиме модуляции усиления. Разработанный лазер генерирует последовательность стабильных импульсов с частотой повторения ≈ 50 кГц с пиковой мощностью более 1 Вт и шириной спектра более 13 нм по уровню -10 дБ.

Ключевые слова: волоконный лазер, импульсный лазер, иттербий, модуляция усиления, широкополосная генерация.

**R.V. Drobyshev^{1,2}, V.S. Terent'ev¹, Yu.A. Timirtdinov¹,
I.A. Lobach^{1,2,3}, S.I. Kablukov¹**

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Laboratory of Photonics, Perm Scientific Center
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

GAIN-SWITCHED BROADBAND YB-DOPED FIBER LASER

A pulsed gain-switched broadband ytterbium-doped fiber laser demonstrated for the first time. The laser generates sequence of stable pulses at repetition rate of about ≈ 50 kHz with peak power of more than 1 W and spectrum linewidth of more than 13 nm at a level of -10 dB

Keywords: fiber laser, pulsed laser, ytterbium, gain-switched, broadband generation.

Широкополосные источники оптического излучения могут применяться в схемах низкокогерентной интерферометрии (для оптической томографии [1], измерения вращения [2], скорости и вибраций [3] и т.д.) или для характеристики спектральных свойств элементов (в частности, для опроса датчиков на основе волоконных брэгговских решеток [4]). Подобные широкополосные источники могут быть реали-

зованы различными способами. Самым простым широкополосным источником является обычная лампочка. Для ее практического применения из-за низкой спектральной плотности мощности требуется использование высокочувствительных фотодетекторов. Значительно большую величину спектральной плотности мощности можно получить в источниках усиленной спонтанной эмиссии (или суперлюминесцентных источниках). В них отсутствует резонатор, что приводит к усилению спонтанного излучения. Как правило, для этих целей применяют полупроводниковые структуры [5] или волоконные схемы [6].

Например, для реализации волоконной схемы широкополосного источника с шириной спектра порядка 47 нм и выходной мощностью более 20 мВт был применен специальный иттербиевый световод [6].

Широкий спектр генерации также может быть получен в кольцевых лазерных схемах при генерации коротких импульсов. В кольцевом однонаправленном иттербиевом лазере с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации был получен спектр с шириной более 130 нм [7]. Дальнейшее уширение спектра можно получить в схемах генераторов (супер-) континуума с накачкой ультракороткими импульсами [8]. Механизм формирования широкого спектра может состоять из ряда нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция, четырехволновое смещение, вынужденное комбинационное рассеяние света и т.д. В этом случае спектр генерации состоит из множества продольных мод лазера накачки, фазово связанных между собой. Это свойство позволяет применять генераторы суперконтинуума для высокоточной метрологии [8].

Такая структура спектра принципиально отличается от спектров, получаемых в суперлюминесцентных источниках, в которых нет модовой структуры из-за отсутствия резонатора. Известно, что добавление обратной связи приводит к возникновению узкополосной лазерной генерации. Кроме того, отсутствие резонатора существенно ограничивает масштабирование выходной мощности суперлюминесцентного источника, любое малое паразитное отражение приводит к появлению лазерной генерации [9]. Для увеличения выходной мощности применяются специальные методы подавления паразитных отражений [9] или усилительные схемы [10]. В этих случаях выходная мощность может достигать сотен ватт. Малая ширина спектра связана с характером однородного (в случае иттербия) усиления и конкуренцией продоль-

ных мод, вызванной эффектом пространственного выжигания дыр в активной среде. В частности, это может приводить к различным динамическим эффектам, таким как самоиндуцированное сканирование оптической частоты [11].

Для подавления эффектов конкуренции мод применяются разные подходы, например добавление различных фазовых модуляторов [12] или высоконелинейных волокон [13]. Как правило, в таких схемах получают многоволновую лазерную генерацию. Так, в работе [13] в кольцевой схеме эрбиевого кольцевого лазера была получена генерация на 24 линиях с полной шириной более 20 нм. В настоящей работе предлагается новый тип источника широкополосного излучения на основе иттербиевого волоконного лазера. Отличительной особенностью источника является наличие широкополосного резонатора, что позволяет получать лазерную генерацию с возможностью достижения высоких выходных мощностей. При этом, в отличие от генератора континуума, в предложенной схеме не требуется применения достаточно сложных техник формирования ультракоротких импульсов. Для подавления конкуренции между модами применена техника модуляции усиления с помощью амплитудной модуляции накачивающего излучения [14]. В этом случае, как предполагается, в течение времени, сравнимом со временем релаксационных осцилляций, в генерацию может одновременно выйти большое количество продольных мод, что проявляется в широкополосной генерации излучения. Полная ширина спектра на полувысоте такого источника составила порядка 8 нм при средней мощности более 100 мВт. При этом пиковая мощность генератора может достигать более 1 Вт. В работе также обсуждаются вопросы увеличения ширины спектра и выходной мощности.

На рис. 1 приведена схема широкополосного волоконного иттербиевого лазера с модуляцией усиления. В качестве активной среды использовалось активное волокно с двойной оболочкой длиной 2,8 м, легированное ионами иттербия (Nufern PM-YDF-5/130-VIII). Резонатор лазера был сформирован широкополосным плотным зеркалом с одной стороны и отражением Френеля от торца сколотого под прямым углом волокна с другой. Плотное зеркало было сформировано методом магнитронного распыления титановой и кремниевой мишеней в атмосфере аргона и кислорода. Нанесение слоев диэлектриков проводилось на прямой торец волоконного световода с сохранением линейного со-

стояния поляризации излучения типа PANDA. Контроль нанесения слоев велся интерференционным методом на длине волны 1064 нм. Смена напыляемых материалов производилась при достижении экстремума (максимума для TiO_2 и минимума для SiO_2) коэффициента отражения от торца данного волокна. В итоге было изготовлено многослойное покрытие, содержащее 11 четвертьволновых слоев со структурой $(\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2)^5 + \text{TiO}_2$ (более подробное описание процесса изготовления зеркала приведено в работе [15]). Спектр отражения сформированного зеркала представлен на рис. 2. На данном рисунке можно увидеть, что коэффициент отражения, примерно равный 80 %, слабо меняется с длиной волны в области 950–1100 нм. Дополнительно в резонатор был добавлен волоконный ответвитель 95/5 с целью проведения характеристики излучения. Стоит отметить, что все элементы лазера были изготовлены из волокна типа PANDA с сохранением линейного состояния поляризации.

Рис. 1. Схема волоконного иттербиевого лазера с модуляцией усиления

Рис. 2. Спектр отражения напыленного зеркала

Оптическая накачка производилась при помощи многомодового лазерного диода с центральной длиной волны вблизи 975 нм через объединитель накачивающего излучения типа $(2+1) \times 1$ с сигнальным входом. При этом на лазерный диод через драйвер подавался сигнал смещения от генераторов непрерывного и переменного напряжения. Синусоидальная модуляция переменной составляющей тока диода осуществлялась с помощью генератора Agilent 33250A с частотой модуляции от 20 до 50 кГц. Типичная временная динамика интенсивности накачивающего излучения представлена на рис. 3. Поскольку излучение накачки формирует инверсию населенности в активной среде, то модуляция накачки приводила к модуляции усиления.

Рис. 3. Динамика интенсивности лазера накачки при модуляции тока от 0 до 4,4 А и частоте модуляции 50 кГц

В ходе экспериментов измерялись временная динамика интенсивности, спектр генерации, мощность и состояние поляризации генерируемого излучения. Измерения динамики интенсивности проводились при помощи быстрого фотодиода и осциллографа LeCroy WavePro 7Zi-A. Спектр генерации измерялся с помощью анализатора спектров Yokogawa AQ6370. Анализ выходной поляризации излучения производился с помощью поляриметра Thorlabs, TXP PAX5720IR2-T.

Стоит отметить, что в режиме свободной генерации (т.е. в отсутствии модуляции усиления) временная динамика интенсивности состояла из нерегулярных импульсов, а спектр генерации — из неста-

бильных узкополосных пичков вследствие конкуренции большого количества продольных мод.

При некоторых параметрах модуляции накачивающего излучения можно было получить генерацию регулярных импульсов с практически одинаковой амплитудой. Например, при рабочих параметрах модуляции – частоте модуляции тока лазерного диода 50 кГц с амплитудой от 0 до 4,4 А (динамика интенсивности накачки представлена на рис. 3) – была получена генерация регулярных импульсов (рис. 4, *а*). Радиочастотный спектр при этом состоит из множества узких пиков, отстоящих друг от друга на частоту модуляции (рис. 4, *б*). Высокое значение отношения сигнал – шум (≈ 40 дБ) и малая ширина каждой линии (≈ 30 Гц) свидетельствуют о высокой степени регулярности импульсов. Каждый импульс имеет колоколообразную

Рис. 4. Динамика интенсивности сигнала лазера (*а*) и соответствующий радиочастотный спектр (*б*), динамика интенсивности на масштабе одного импульса (*в*) и соответствующий радиочастотный спектр (*г*)

форму с длительностью порядка 2 мкс (рис. 4, в). Длительность импульсов практически не зависела от частоты модуляции. Анализ радиочастотного спектра на высоких частотах показал, что генерация состоит из множества продольных мод резонатора (рис. 4, г). Из-за большого количества мод и случайных соотношений между фазами мод импульс представляет собой квазинепрерывный сигнал с медленной амплитудной огибающей.

Рис. 5. Нормированные спектры генерации лазера при различных средних выходных мощностях

Важной особенностью реализованного лазера стало достаточно большое значение ширины спектра генерации. Оптический спектр данного лазера расположен в диапазоне 1055–1075 нм (рис. 5). Ширина составила порядка 8,3 и 13,4 нм по уровню -3 и -10 дБ соответственно. На рис. 5 показаны нормированные спектры генерации при различных выходных мощностях. Можно заметить, что форма практически не зависит от средней мощности в рабочей области параметров. Кроме того, форма спектра была стабильной во времени и воспроизводилась. Можно также увидеть небольшую модуляцию в спектре с периодом порядка 0,3 нм (≈ 100 ГГц). Такая модуляция соответствует спектральному селектору типа Фабри–Перо с базой порядка 1 мм. Предполагается, что модуляция может быть следствием поляризационных эффектов. Действительно, несмотря на то что лазер был изготовлен на основе волокон с поддержкой линейного состояния поляризации, измеренная степень поляризации составила всего $\approx 7\%$. При этом состояние поляри-

зации поляризованной составляющей имеет линейный характер. Это свидетельствует о том, что в лазере может происходить частичная поляризационная селекция на некоторых элементах лазера: одна поляризационная мода имеет несколько большие потери, чем ортогональная.

Выходная мощность лазера зависит от параметров модуляции: чем больше частота повторения, тем выше мощность. На рис. 6 приведена зависимость выходной мощности от средней мощности накачки при рабочих значениях модуляции. На графике можно увидеть, что порог генерации составляет порядка 350 мВт, а дифференциальная эффективность – более 20 %.

Рис. 6. Зависимость средней выходной мощности генерации лазера от средней мощности накачки

Подобный режим можно было получить в ограниченной области значений параметров накачивающего излучения. При неоптимальных параметрах модуляции режим исчезает, сигнал становится непериодичным, амплитуда импульсов и спектр – хаотичными. Предполагается, что оптимальная частота модуляции должна быть вблизи частоты релаксационных осцилляций [14]. Режим удалось наблюдать в диапазоне от 2,1 до 2,6 А среднего тока накачки, с амплитудой модуляции от 1,5 до 3 А, частотой модуляции от 30 до 60 кГц. При этом значение частоты на нижней границе возрастало при увеличении тока накачки.

Таким образом, в ходе работы был собран и исследован волоконный иттербиевый лазер с модуляцией усиления. Отличительной особенностью источника стал воспроизводимый широкополосный спектр генерации с шириной порядка 13 нм по уровню –10 дБ. Анализ радио-

частотного спектра показал, что генерация состоит из множества продольных мод, что свидетельствует о лазерном характере генерации. Этот факт принципиально отличает реализованный источник от источника усиленной спонтанной эмиссии. При этом относительные фазы между продольными модами не являются постоянными, что принципиально отличает источник от генератора суперконтинуума. Последний факт подтверждается тем, что результат сложения множества мод представляет собой квазинепрерывный сигнал с медленной амплитудной огибающей.

Подобный спектр удалось получить с помощью модуляции усиления сигнала. В этом случае импульсы являются достаточно регулярными, о чем свидетельствует малая ширина пиков в радиочастотном спектре. Оптимальная частота модуляции, исходя из общих соображений, должна быть согласована с частотой релаксационных осцилляций [14]. Результаты свидетельствуют о том, что при такой частоте модуляции конкуренция мод не успевает развиваться и в генерацию одновременно выходит множество продольных мод. При большом количестве мод эффектом пространственного выжигания дыр в инверсии населенности можно пренебречь. С другой стороны, спектр генерации существенно уже, чем спектр люминесценции в иттербии. Это говорит о том, что существует иной механизм, ограничивающий ширину спектра генерации, который может быть связан со спектральными свойствами потерь или усиления.

Поскольку в работе были применены достаточно широкополосные зеркала, то, вероятнее всего, механизм спектральной селекции связан с характером усиления в иттербии. Подобный эффект селекции наблюдался в лазере на основе вынужденного комбинационного рассеяния света со случайной распределенной обратной связью [16]. Для установления механизма спектральной селекции требуются дополнительные исследования. На данный момент времени ширина спектра полученной генерации меньше, чем у рассмотренных во введении источников. Ожидается, что установление механизмов формирования спектра в комплексе с подбором соответствующих характеристик потерь в резонаторе (например, см. работу [17]) помогут существенно увеличить значение ширины спектра до десятков нанометров.

Другой важной особенностью реализованного источника являются наличие резонатора и импульсный характер генерации, что позволя-

ет получать достаточно высокие выходные мощности. В частотности, пиковая мощность широкополосного источника составила более 1 Вт. Высокие значения пиковой мощности в комплексе с детектированием, синхронизованным с модуляцией накачки, позволяют производить высокочувствительные измерения.

Ожидается, что разработанный источник излучения может быть применен в схемах низкокогерентной интерферометрии или для характеристики спектральных свойств элементов. В частности, полученная ширина спектра генерации соответствует требованиям, предъявляемым к ширине спектров источников ИК-излучения волоконно-оптических гироскопов [18], и близка к результатам, полученным в работе [19]. Однако для практического применения требуется количественно исследовать вопрос временной стабильности разработанного источника.

Экспериментальная работа частично была выполнена на оборудовании центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» при Институте автоматики и электрометрии СО РАН. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда. Работа И.А. Лобача произведена при частичной финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН № 15-10-6-25.

Список литературы

1. Optical coherence tomography – principles and applications / A.F. Fercher [et al.] // Rep. Prog. Phys. – 2003. – № 66. – P. 239.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech House Publishers, 2014.
3. Brinkmeyer E., Waterholter T. Fiber optic CW doppler lidar using a synthetic broadband source // Proc. SPIE 8894. Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IX. – 2013. – P. 889402.
4. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. – Bentham Science Publisher, 2011.
5. Широкополосный источник излучения на основе квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов для оптической когерентной томографии высокого разрешения / Д.С. Адлер, Т.Х. Ко, А.К. Конорев, Д.С. Мамедов, В.В. Прохоров, Д.Д. Фуджимото, С.Д. Якубович // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 10. – С. 915–918.

6. Широкополосный источник излучения на основе иттербиевого волоконного световода с распределенной по длине накачкой / Д.А. Грух, В.А. Богатырев, А.А. Сысолятин, В.М. Парамонов, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2004. – № 34 (3). – С. 247–248.

7. Generation of broadband noise-like pulse from Yb-doped fiber laser ring cavity / M. Suzuki, R.A. Ganeev, S. Yoneya, H. Kuroda // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40. – P. 804–807.

8. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // УФН. – 2006. – № 176. – С. 623–649.

9. Wang P., Sahu J.K., Clarkson W.A. 110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with $M^2 = 1,6$ // Opt. Lett. – 2006. – № 31. – P. 3116–3118.

10. High power narrow-band fiber-based ASE source / O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth, J. Rothhardt, S. Rhein, A. Kliner, M. Strecker, T. Schreiber, J. Limpert, R. Eberhardt, A. Tünnermann // Opt. Express. – 2011. – № 19. – P. 4421–4427.

11. Дробышев Р.В., Лобач И.А., Каблуков С.И. Волоконный иттербиевый лазер с самосканированием частоты на основе волокна с увеличенной площадью поля моды // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 413–426.

12. Multiwavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating an SOA-based phase modulator / J. Yao, J. Yao, Z. Deng, J. Liu // IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – Vol. 17, № 4. – P. 756–758.

13. Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber / A. Zhang, H. Liu, M.S. Demokan, H.Y. Tam // IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – Vol. 17, № 12. – P. 2535–2537.

14. The all-fiber cladding-pumped Yb-doped gain-switched laser / C. Larsen, K.P. Hansen, K.E. Mattsson, O. Bang // Opt. Express. – 2014. – № 22. – P. 1490–1499.

15. Терентьев В.С., Симонов В.А. Волоконный отражательный интерферометр на основе диэлектрической дифракционной структуры для селекции мод волоконного лазера // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 321–330.

16. High-order random Raman lasing in a PM fiber with ultimate efficiency and narrow bandwidth / S.A. Babin [et al.] // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. – P. 22625. DOI: 10.1038/srep22625

17. Harumoto M., Shigehara M., Suganuma H. Gain-flattening filter using long-period fiber gratings // *J. Lightwave Technol.* – 2002. – № 20. – P. 1027.

18. 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.

19. Широкополосный волоконный источник инфракрасного излучения на основе высоколегированного $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ композитного оптического волокна с накачкой в оболочку / Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, А.А. Поносова, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков // *Прикладная фотоника.* – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 146–157.

References

1. A.F. Fercher [et al.]. “Optical coherence tomography - principles and applications”, *Rep. Prog. Phys.* 66 239 (2003).

2. H.C Lefevre, “The Fiber-Optic Gyroscope” (Artech House Publishers, 2014).

3. E. Brinkmeyer, T. Waterholter, “Fiber optic CW doppler lidar using a synthetic broadband source”, *Proc. SPIE 8894, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IX*, 889402 (2013).

4. A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert, “Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation” (Bentham Science Publisher, 2011).

5. D.S. Adler, T.H. Ko, A.K. Konorev, D.S. Mamedov, V.V. Prohorov, D.D. Fudzhimoto, S.D. Jakubovich, “Shirokopolosnyj istochnik izlucheniya na osnove kvantovorazmernyh superljuminescentnyh diodov dlja opticheskoy kogerentnoj tomografii vysokogo razresheniya”, *Kvantovaya elektronika*, 34:10, 915–918 (2004).

6. D.A. Gruh, V.A. Bogatyrev, A.A. Sysoljatin, V.M. Paramonov, A.S. Kurkov, E.M. Dianov, “Shirokopolosnyj istochnik izlucheniya na os-

nove itterbievogo volokonnoho svetovoda s raspredelennoj po dline nakhachkoj", *Kvantovaja jelektronika*, 34 (3), 247–248 (2004).

7. M. Suzuki, R.A. Ganeev, S. Yoneya, and H. Kuroda, "Generation of broadband noise-like pulse from Yb-doped fiber laser ring cavity," *Opt. Lett.* 40, 804-807 (2015).

8. A.M. Zheltikov, "Da budet belyj svet: generacija superkontinuum sverhkorotkimi lazernymi impul'sami", *UFN* 176 623–649 (2006).

9. P. Wang, J.K. Sahu, W.A. Clarkson, "110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with M²=1.6" *Opt. Lett.* 31, 3116-3118 (2006).

10. O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth, J. Rothhardt, S. Rhein, A. Kliner, M. Strecker, T. Schreiber, J. Limpert, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "High power narrow-band fiber-based ASE source" *Opt. Express* 19, 4421-4427 (2011).

11. R.V. Drobyshev, I.A. Lobach, S.I. Kablukov "Volokonnyj itterbievyj lazer s samoskanirovaniem chastoty na osnove volokna s uvelichennoj ploshhad'ju polja mody", *Prikladnaja fotonika*, t.3, №4, 413-426 (2016).

12. J. Yao, J. Yao, Z. Deng and J. Liu, "Multiwavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating an SOA-based phase Modulator", in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 756-758, (2005).

13. A. Zhang, H. Liu, M.S. Demokan and H.Y. Tam, "Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber", in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2535-2537, Dec. 2005.

14. C. Larsen, K.P. Hansen, K.E. Mattsson, and O. Bang, "The all-fiber cladding-pumped Yb-doped gain-switched laser" *Opt. Express* 22, 1490-1499 (2014).

15. V.S. Terent'ev, V.A. Simonov, "Volokonnyj otrazhatel'nyj interferometr na osnove dijelektricheskoy difrakcionnoj struktury dlja selekcii mod volokonnoho lazera", *Prikladnaja fotonika*, t.3, №3, 321-330 (2016).

16. S.A. Babin et al. High-order random Raman lasing in a PM fiber with ultimate efficiency and narrow bandwidth. *Sci. Rep.* 6, 22625; doi: 10.1038/srep22625 (2016).

17. M. Harumoto, M. Shigehara, and H. Suganuma, "Gain-Flattening Filter Using Long-PeriodFiber Gratings" *J. Lightwave Technol.* 20, 1027 (2002).

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

19. B.I. Galagan, B.I. Denker, O.N. Egorova, V.A. Kamynin A.A. Ponosova, S.E. Sverchkov, S.L. Semenov, V.B. Cvetkov “Shirokopolosnyj volokonnyj istochnik infrakrasnogo izlucheniya na osnove vysokolegirovanogo $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ kompozitnogo opticheskogo volokna s nakachkoj v obolochku”, *Prikladnaja fotonika* T. 3, № 2 (2016), pp. 146-157.

Получено 10.04.2017