

УДК 621.373.826

**А.Р. Рахматуллина^{1, 2}, А.А. Поносова¹, И.С. Азанова^{1, 2},
А.Б. Волынцев², О.Л. Кель¹**

¹ ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»,
Пермь, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

НЕПРЕРЫВНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 1518 ДО 1585 НМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕВОГО КВАРЦЕВОГО ВОЛОКНА

Непрерывная лазерная генерация с большой долей мощности вынужденного излучения по отношению к спонтанной эмиссии с широким спектральным диапазоном лазерной генерации (40 нм) была реализована в схемах лазеров на одномодовом эрбиевом кварцевом волокне с концентрацией ионов эрбия $4,5 \cdot 10^{19}$ ионов/см³. Растворение активного элемента без образования кластер-групп позволило получить высокую эффективность лазерной генерации при длинах активного волокна меньше 1 м.

Ключевые слова: высоколегированное эрбиевое волокно, одночастотный лазер, минимальная длина резонатора, высокая эффективность лазерной генерации.

**A.R. Rakhmatullina^{1, 2}, A.A. Ponosova¹, I.C. Azanova^{1, 2},
A.B. Volyntsev², O.L. Kel¹**

¹ Perm Scientific and Production Instrument-Making Campaign,
Perm, Russian Federation

² Perm State National Research University, Perm

CONTINUOUS FIBER LASER IN A WIDE SPECTRAL RANGE FROM 1518 TO 1585 NM BASED ON HIGH-DOPED ERBIUM SILICA FIBER

Continuous lasing with a large fraction of the power of stimulated emission with respect to spontaneous emission in a wide spectral range of laser generation (40 nm) was implemented in lasers based on single-mode erbium quartz fiber with an ion concentration of erbium ions ($4,5 \cdot 10^{19}$ ions on cm³). The dissolution of the active element without the formation of cluster groups allowed us to obtain a high lasing efficiency with active fiber lengths less than 1 m.

Keywords: highly doped erbium fiber, single-frequency laser, minimum resonator length, high lasing efficiency.

Введение

В настоящее время для решения ряда задач, таких как измерение расстояния, спектроскопия высокого разрешения, интерферометрия [1, 2], стандарты частоты и системы когерентного сложения, требуется лазерное излучение в области 1,5 мкм с большой длиной пространственной когерентности, которая достигается за счет очень узкого спектра излучения.

В общем случае спектр генерации лазера состоит из большого количества продольных мод. Сокращая длину резонатора, возможно получение излучения, содержащего минимальное число мод, и достижение наибольшей пространственной когерентности. В многочисленных работах продемонстрированы конфигурации одночастотных волоконных лазеров с наиболее узким спектром излучения [3–5]. Однако для всех конфигураций характерны низкая дифференциальная эффективность и малая выходная мощность в связи с малыми концентрациями ионов эрбия в активных средах.

Мощностные характеристики источников могут быть увеличены за счет применения более высоколегированных эрбиевых световодов. Вместе с тем эффективность генерации эрбиевых световодов со средней и высокой концентрацией ионов может быть ограничена неустраняемыми потерями, обусловленными перепоглощением излучения внутри кластер-групп [6].

В настоящее время наиболее высокая степень легирования достигнута в фосфатных, теллуридных и других специальных лазерных стеклах. В них можно вводить концентрацию эрбия без кластеризации до 10^{20} ионов/см³. Однако такие волокна имеют ряд недостатков.

В кварцевом стекле достижимо введение концентрации ионов эрбия до 10^{19} ионов/см³, что на порядок меньше, чем в лазерных стеклах. Но при этом такое волокно уже можно производить серийно, и на его основе возможно создать полностью волоконную схему лазера.

Вторым ключевым параметром одночастотных лазеров наряду с шириной линии излучения является также спектральный диапазон перестройки частоты излучения. Важной характеристикой этого параметра является отношение мощности вынужденного излучения к мощности спонтанной эмиссии в большом диапазоне длин волн.

Таким образом, целью данной работы было изучение характеристик лазерной генерации в кварцевых эрбиевых волокнах с высокой

концентрацией ионов эрбия. В частности, нужно было оценить возможность получения лазерной генерации при малых длинах резонатора и спектральный диапазон перестройки частоты излучения, а также сопоставление данных характеристик волокна с возможностью использования их в лазерных схемах.

1. Экспериментальные образцы и методики

Технология изготовления и свойства эрбиевых световодов

В качестве рабочей среды лазера было использовано активное волокно, легированное ионами эрбия производства ПАО «ЛНППК», г. Пермь. Преформа оптического волокна изготовлена методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD). Кварцевая сердцевина преформы была легирована оксидами алюминия, германия и эрбия.

Алюминий вводился для предотвращения кластеризации ионов эрбия. Со-легирование сердцевины оксидом германия было необходимо для увеличения числовой апертуры световода.

Элементный состав в поперечном сечении исходной преформы определен методом рентгеновского микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400, оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром.

На рис. 1 представлено СЭМ-изображение поперечного сечения преформы (а) и распределение легирующих компонентов вдоль сечения сердцевины (б). Концентрации оксидов алюминия и германия составили ≈ 6 и 5 мол.% соответственно. Ионы эрбия также были обнаружены, но их содержание близко к пределу обнаружения данным методом.

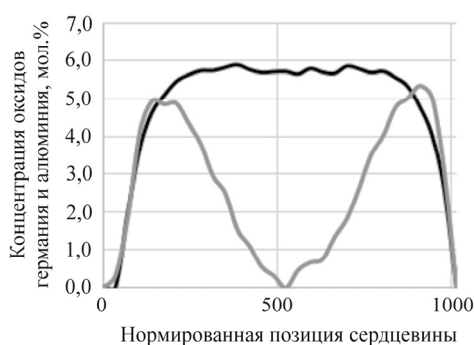


Рис. 1. Распределение элементов вдоль сечения сердцевины преформы:

— Al₂O₃ мол.% (основная); — GeO₂ мол.% (основная)

Профиль показателя преломления (рис. 2) в преформе измерен с помощью системы анализа заготовок РК-2600 Photon Kinetics. Числовая апертура составила 0,22.

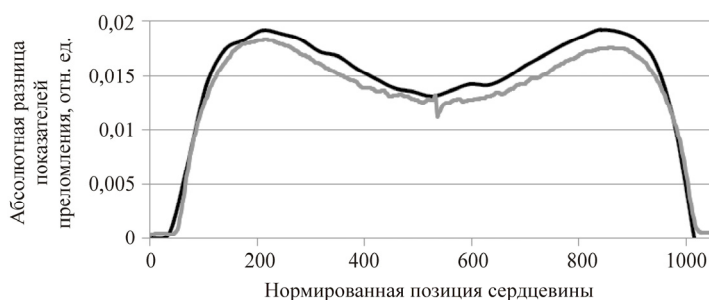


Рис. 2. Профиль показателя преломления сердцевинки образца:
— По РМА; — РК2600

Вытянутое волокно имело диаметр кварцевой оболочки $125,0 \pm 1,0$ мкм и диаметр сердцевинки около 5 мкм.

Исследованное эрбиевое волокно было маломодовым на длине волны накачки (980 нм) и одномодовым в рабочем диапазоне длин волн (1550 нм). Длина волны отсечки, измеренная методом изгиба [7], составила 992 ± 3 нм.

Затухание измерено методом обрыва (рис. 3). Потери на длине волны 1200 нм не превышали 15 дБ/км. Спектр поглощения активного волокна измерен методом обрыва [8] (рис. 4). Поглощение на длине волны накачки 980 нм соответствует переходу электронов из основного состояния $^4I_{15/2}$ на уровень $^4I_{11/2}$, а на длине волны 1480 нм $^4I_{15/2}$ на уровень $^4I_{13/2}$.

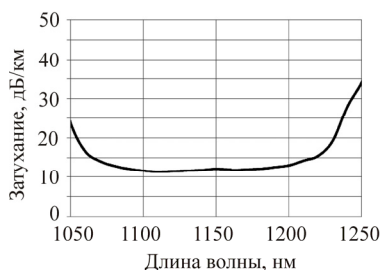


Рис. 3. Зависимость затухания от длины волны

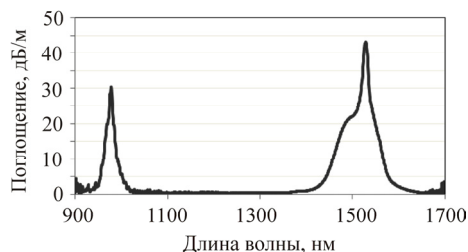


Рис. 4. Спектр поглощения

На длине волны накачки 980 нм поглощение составило 30 дБ/м, что соответствует концентрации ионов эрбия [9] $N = 4,5 \cdot 10^{19}$ ионов/см³.

Экспериментальная схема лазера

Для исследования спектральных, амплитудно-частотных и мощностных характеристик излучения целесообразно использовать простую схему лазера для более точной интерпретации полученных результатов, так как влияние на излучение дополнительных компонентов непредсказуемо.

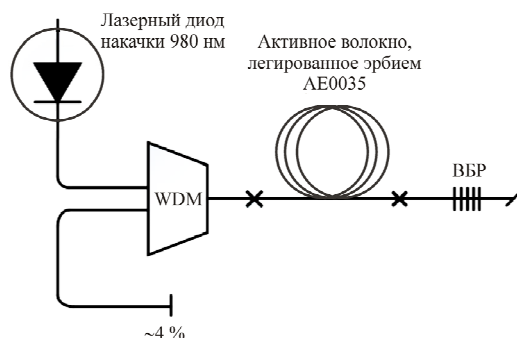


Рис. 5. Оптическая схема волоконного лазера

На рис. 5 представлена конфигурация волоконного лазера. Лазер состоит из полупроводникового источника накачки с одномодовым на 980 нм волоконным выходом и выходной мощностью до 186 мВт, спектрально-селективного ответвителя, отрезка эрбиевого волоконного световода, и брэгговской решетки.

Оптическое волокно с высоколегированной Er^{3+} сердцевиной было использовано в качестве активной среды. Длина активного волокна варьировалась от 0,75 до 2 м.

Лазерный резонатор образован волоконной брэгговской решеткой (ВБР) с одной стороны и торцом волокна, сколотым под прямым углом – с другой. Прямой скол торца обеспечивает коэффициент отражения, близкий к 4 % [10]. В эксперименте было последовательно использовано 7 ВБР с коэффициентом отражения, близким к 80 % и отличающимся значением центральной длины волны отражения в диапазоне 1518–1585 нм (1518, 1530, 1541, 1553, 1561, 1569, 1584 нм) для изучения спектральных характеристик лазерной генерации.

В эксперименте проводилось измерение спектральных характеристик выходного излучения, а также интегральной мощности для разных мощностей накачки и длин активного оптического волокна (от 0,75 до 2 м). Интегральная мощность была измерена при помощи измерителя оптической мощности FOD 1202H. Для измерения оптического спектра выходного излучения лазера был использован анализатор спектра Yokogawa AQ6370D с разрешением 0,02 нм.

Режим работы лазера оценивался по показаниям осциллографа модели GwInstek GDS-71062A на 1 ГГц, излучение в который вводи-

лось через фотоприемник MenlooSystems FPD 310 с диапазоном частот 1000 МГц.

Доля оптического излучения была рассчитана из данных, полученных с анализатора спектра по формуле:

$$\gamma = \frac{\sum_{\lambda} P_{\lambda}}{P_{\text{ср}}},$$

где P_{λ} – мощность на длинах волн лазерной генерации; $P_{\text{ср}}$ – интегральная мощность излучения.

2. Результаты и обсуждение

При больших длинах активного волокна (1,7 и 2 м) регистрировался импульсный режим генерации лазерного излучения. Длительность импульсов составляла $\Delta\tau = 10$ мкс для минимальной мощности накачки и $\Delta\tau = 800$ нс – для максимальной, энергия равнялась $W = 0,543$ мкДж и $W = 1,24$ мкДж (рис. 6). Возникновение импульсного режима связано с тем, что мощности накачки недостаточно для возбуждения ионов эрбия по всей длине волокна. Часть волокна, в которой не была достигнута инверсия населенности, срабатывает как насыщающийся поглотитель (элемент с нелинейным просветлением в зависимости от интенсивности падающего излучения).

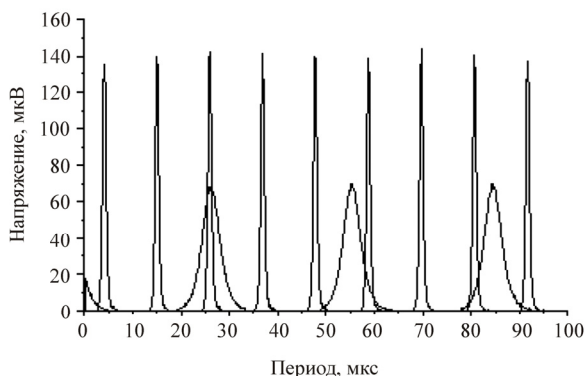


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики излучения непрерывного лазера (большая амплитуда – максимальная мощность, меньшая – минимальная мощность)

При последующем сокращении длины активного волокна был достигнут непрерывный режим лазерной генерации. На рис. 7 представлена зависимость максимальной выходной мощности лазера от длины волны генерации для нескольких длин активного волокна.

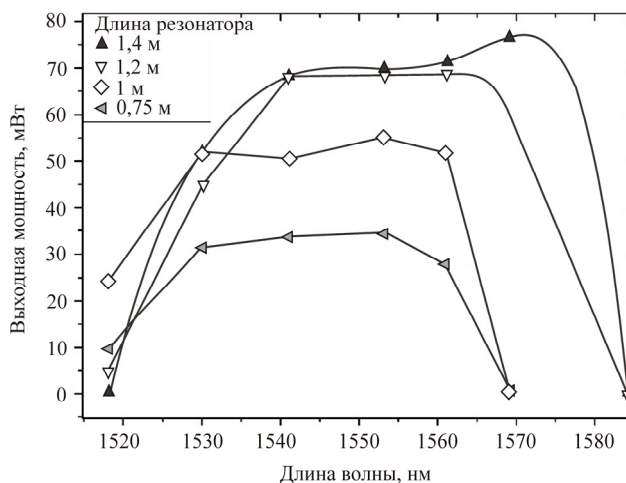


Рис. 7. Зависимость максимальной выходной мощности от длины волны генерации

На длине волны накачки 980 нм возможно получение энергетической эффективности 55 % при квантовой эффективности 86 % [11]. Расчетная максимальная эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации составляет порядка 55 % [11], но из-за того, что излучение частично распространяется по оболочке, максимальная достигнутая эффективность в проделанных ранее работах для аналогичной схемы лазера составляла 50 % [9]. Для лазера с длиной волны 1561 нм была получена наибольшая дифференциальная эффективность при длине активного волокна 1,4 м, которая составила 46 %, что соответствует квантовой эффективности 73 % (рис. 8). Однако диапазон спектральной перестройки при длине резонатора 1,4 м значительно сокращался в связи с тем, что на крайних длинах волн резонаторов происходила генерация на отличной длине волны.

Для схем с ВБР с длиной волны отражения в диапазоне от 1530 до 1570 нм при длине активного волокна до 1 м, а также для ВБР на 1518 нм при длине активного волокна 1,2 м, когда мощность накачки была достаточна для создания инверсии населенности, эффективность генерации была ~30–40 %. Поэтому для использования в схеме перестраиваемого волоконного лазера больше подойдет длина резонатора 1,2 м, так как на такой длине активного волокна достигается достаточная эффективность генерации в наиболее широком спектральном диапазоне.

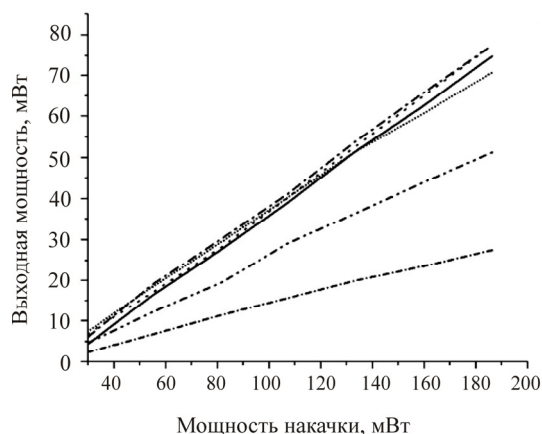


Рис. 8. Дифференциальная эффективность лазера при длине волны генерации 1561 нм: — 2 м; ···· 1,7 м; -·-·- 1,4 м; - - - 1,2 м; - - - 1 м; - · - · 0,75 м

Эффективность генерации – это не единственный параметр, характеризующий лазерное излучение. Исследование спектра излучения лазера позволило обнаружить помимо основной частоты лазерной генерации усиленное спонтанное излучение. На рис. 9 представлены типичные спектры излучения лазеров. Уровень усиленного спонтанного излучения подавлен более чем на 60 дБ по сравнению с уровнем сигнала, что является высокой качественной характеристикой излучения лазера.

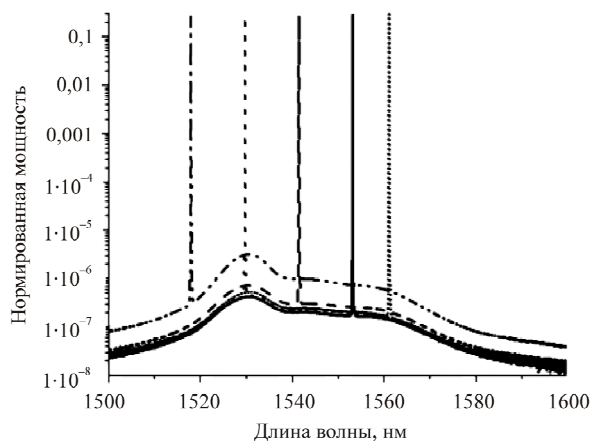


Рис. 9. Характерные спектры излучения лазеров с различными ВБР (для ВБР 1518 нм при длинах активного волокна меньше 1,4 м): — 1553 нм; - - 1541 нм; ···· 1530 нм; -·-·- 1518; ····· 1561 нм

Доля мощности сигнала в общей интегральной мощности для диапазона 1530–1570 нм и ВБР на 1518 нм при малой длине активного волокна составила 0,99 (см. рис. 9); для схем с ВБР на 1518 нм при длине активного волокна 1,4 м генерация смещалась в более длинноволновую область спектра, к пику люминесценции эрбия и доля его составляла 0,98 (рис. 10, *а*). Излучение в схеме с ВБР на 1584 нм также было смещено в область 1530 нм и отличалась малой эффективностью генерации $\sim 0,0003$ на длине волны отражения ВБР (рис. 10, *б*).

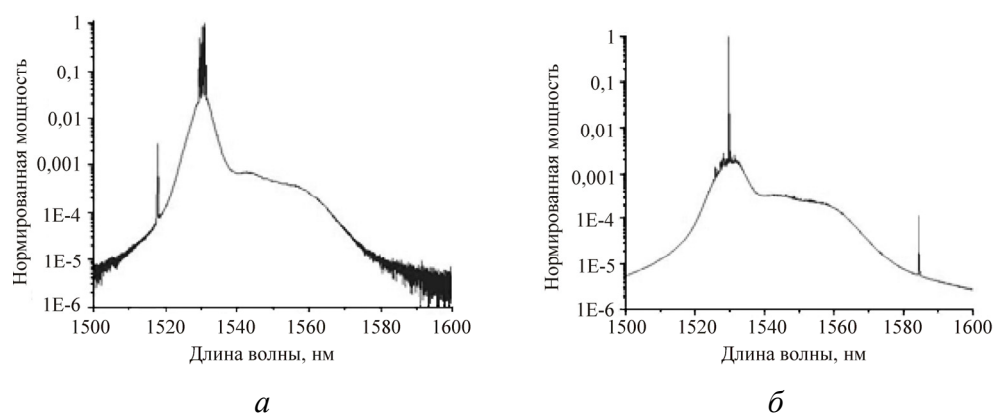


Рис. 10. Спектральная характеристика непрерывного лазера с ВБР на длине волны при мощности накачки 186 мВт: *а* – 1518 нм для длин активного волокна более 1,2 м; *б* – 1584 нм (характерный спектр для всех длин резонатора)

Таким образом, исследуемое волокно подходит для получения эффективной лазерной генерации в диапазоне длин волн 1530–1570 нм. В этом диапазоне наблюдается преобладание вынужденного излучения над спонтанным на величину ~ 60 дБ и высокая дифференциальная эффективность генерации.

На рис. 11 представлена зависимость максимальной выходной мощности от длины активного волокна. Максимальная выходная мощность в схеме непрерывного лазера с высокой концентрацией ионов эрбия достигается при длине активной среды 1,4 м. Однако в настоящее время наибольший интерес проявляется к получению лазерной генерации с использованием резонатора минимальной длины.

При сокращении длины активного волокна эффективность генерации резко падает до 10–15 %, но, несмотря на это, остается достаточной для генерации излучения в узком спектральном диапазоне. При

длине активного волокна менее 0,7 м наблюдалось резкое уменьшение выходной мощности лазера на всех длинах волн. Поэтому сборка DBR-лазера на данном волокне невозможна.

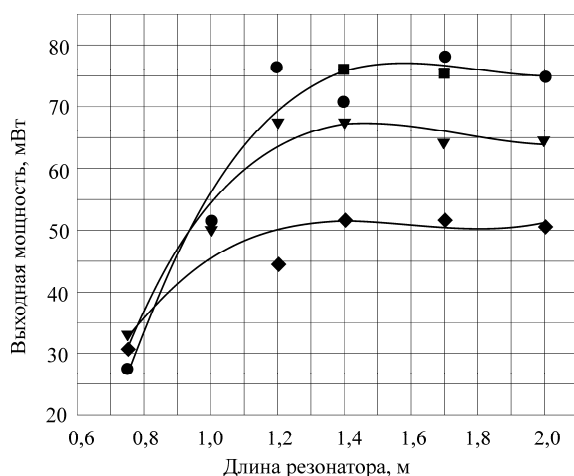


Рис. 11. Зависимость максимальной выходной мощности от длины резонатора; длина волны генерации: ■ 1569 нм; ● 1561 нм; ▼ 1541 нм; ◆ 1530 нм

Как показано в работе [9], объединяя принципы РОС-лазера и лазера со связными резонаторами, можно увеличить длину резонатора до 1 м. В связи с этим граница потери мощности исследуемого волокна позволяет собрать одночастотный лазер со средней шириной спектра.

Выводы

Введенное количество ионов эрбия хорошо растворилось в алюмосиликатной матрице световода, поэтому в волоконном лазере продемонстрирована достаточная эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение при достаточно короткой длине активного волокна. В связи с тем, что эффективность генерации достаточна на длинах активного волокна меньше 1 м, исследуемое волокно подходит для использования в одночастотных лазерах со средней шириной спектра.

Высокая дифференциальная эффективность генерации и подавление уровня спонтанного излучения по отношению к вынужденному на 60 дБ позволяют собрать на исследуемом волокне волоконный лазер с диапазоном перестройки по длинам волн порядка 40 нм.

Список литературы

1. Weihua Guan. High-power single-frequency fiber lasers / University of Rochester. – Rochester, New York, 2009. – P. 199.
2. Continuous-wave and giant-pulse operations of a single-frequency erbium-doped fiber laser / Yu.O. Barmenkov, A.V. Kir'yanov, J. Mora, J.L. Cruz, V. Miguel // *Photonics technology letters* – 2005. – Vol. 17, № 1. – P. 28–30.
3. Short single frequency erbium-doped fiber laser / J.L. Zyskind, V. Mizrahi, D.J. DiGiovanni, J.W. Sulhoff // *Electronics letters*. – 1992. – Vol. 28, № 15. – P. 1385–1387.
4. Vazquez-Zuniga Luis A., Jeong Yoonchan. Enhancement super-broadband noise-like pulse erbium-doped fiber ring laser with a highly nonlinear fiber for raman gain // *Photonics technology letters*. – 2012. – Vol. 24, № 17. – P. 1549–1551.
5. Li Shenping, Kuksenkov Dmitri V. Stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with low- nonlinear negative-dispersion singlemode fiber // *Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications*. – 2005. – Vol. 5709. – P. 18–22.
6. Безпрозванных В.Г. Кооперативные АП-конверсионные переходы в активных волоконных световодах // *Инновационная наука: междунар. науч. журнал*. – 2016. – № 1. – С. 15–18 .
7. Листвин А.В., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. – М.: Велком, 2002. – С. 106.
8. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУЛ, 2007. – 231 с.
9. Курков А.С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. – Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2012. – С. 184.
10. Воронин В.Г., Камынин В.А. Полностью волоконный лазер с внутривибраторным интерферометром Маха–Цандера // *Прикладная фотоника*. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 135–143.
11. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // *Lightwave Russian Edition*. – 2003. – № 1. – С. 14–19.

References

1. Weihua Guan. High-power single-frequency fiber lasers. Rochester, New York, 2009, p. 199.

2. Barmenkov Y.O., Kir'yanov A.V., Mora J., Cruz J.L., Miguel V. Continuous-wave and giant-pulse operations of a single-frequency erbium-doped fiber laser. *Photonics technology letters*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 28-30.

3. Zyskind J.L., Mizrahi V., DiGiovanni D.J., Sulhoff J.W. Short single frequency erbium-doped fiber laser. *Electronics letters*, 1992, vol. 28, no. 15, pp. 1385-1387.

4. Vazquez-Zuniga L.A., Jeong Y. Enhancement super-broadband noise-like pulse erbium-doped fiber ring laser with a highly nonlinear fiber for Raman gain. *Photonics technology letters*, 2012, vol. 24, no. 17, pp. 1549-1551.

5. Li Sh., Kuksenkov D.V. Stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with low- nonlinear negative-dispersion singlemode fiber. *Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications*, 2005, vol. 5709, pp. 18-22.

6. Bezprozvannykh V.G. Kooperativnye AP-konversionnye perekhody v aktivnykh volokonnykh svetovodakh [Cooperative AP-conversion transitions in active optical fibers]. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 1, pp. 15-18.

7. Listvin A.V., Shvyrkov D.V. Opticheskie volokna dlya liniy svyazi [Optical fiber for communication lines]. Moscow, Velkom, 2002, p. 106.

8. Burkov V.D., Ivanov G.A. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoy tekhniki [Physical and technological basics of fiber-optic technology]. Moscow, MGUL, 2007, 231 p.

9. Kurkov A.S. Volokonnye lazery: printsipy postroeniya i osnovnye svoystva [Fiber lasers: principles of construction and basic properties]. Ulyanovsk, 2012, 184 p.

10. Voronin V.G., Kamynin V.A. All-fiber laser with intracavity mach-zehnder interferometer. *Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 135-143.

11. Kurkov A.S., Naniy O.E. erbievye volokonno-opticheskie usiliteli [Erbium fiber optic amplifiers]. *Lightwave Russian Edition*, 2003, no. 1, pp. 14-19.

Получено 7.11.2018