

УДК 681.7.068; 535: 621.373.8

И.Н. Немов, М.И. Скворцов, Е.А. Злобина, С.И. Каблуков

Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК РАЗНОЙ ДЛИНЫ, ЗАПИСАННЫХ В ГРАДИЕНТНОМ МНОГОМОДОВОМ СВЕТОВОДЕ

В градиентном многомодовом (ММ) волоконном световоде записаны сильноотражающие ($R \approx 80\%$) волоконные брэгговские решетки (ВБР) разной длины (1,6 и 9 мм). Исследованы спектры пропускания/отражения в зависимости от модового состава излучения и генерационные характеристики ВКР-лазера с использованием данных ММ ВБР в качестве плотных зеркал резонатора. Показано, что короткие решетки обладают лучшими характеристиками.

Ключевые слова: брэгговская решетка, градиентный световод, ВКР-лазер, диодная накачка, эффективная группа мод, многомодовое волокно.

I.N. Nemov, M.I. Skvortsov, E.A. Zlobina, S.I. Kablukov

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

COMPARISON OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FIBER BRAGG GRATINGS WITH VARIOUS LENGTH WRITTEN IN GRADED-INDEX MULTIMODE FIBER

Fiber Bragg gratings (FBGs) are written in graded index multimode (MM) fiber with high reflection ($R \approx 80\%$) and various length (1,6 and 9 mm). Spectra of FBG transmission/reflection are investigated as dependence of modal composition and generation characteristics of Raman laser with MM FBG as a high reflection mirror in cavity. It is shown that short gratings have better characteristics.

Keywords: fiber Bragg grating, graded index fiber, SRS-laser, diode pumping, principal mode, multimode fiber.

Введение

Открытие фоточувствительности к УФ-излучению сердцевины волокна, легированной Ge, привело к огромному росту исследований волоконных брэгговских решеток в одномодовом волокне [1]. Их спек-

тральные характеристики, способы изготовления и применение хорошо изучены к настоящему времени. В то же время ВБР могут быть изготовлены и в многомодовом волокне. Большая числовая апертура ММ волокна и относительно большая площадь сердцевины позволяют создавать более мощные и дешевые оптические системы. Однако спектральные характеристики ВБР в ММ волокне достаточно сложны для применения, в частности в многомодовых волоконных лазерах [2], из-за множества пиков, соответствующих отражению поперечных мод световода с различными константами распространения.

В последнее время уделяется много внимания возможности использования эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) для создания полностью волоконных ВКР-лазеров [3]. Поскольку в ВКР-лазерах в качестве активной среды используются пассивные световоды, они обладают рядом преимуществ перед традиционными волоконными лазерами, в которых используется волокно с сердцевиной, легированной редкоземельными металлами. ВКР-лазеры обладают быстрым откликом на изменение уровня накачки, малым квантовым дефектом, малым уровнем спонтанной эмиссии, и в таких лазерах отсутствует эффект фотопотемнения, являющийся серьезной проблемой волоконных лазеров, особенно работающих на длине волны менее 1 мкм [4]. Волоконные ВКР-лазеры с длиной волны генерации менее 1 мкм были реализованы недавно на основе градиентных световодов с прямой накачкой мощными многомодовыми лазерными диодами [5, 6].

Для накачки ВКР-лазеров такого типа используются коммерчески доступные многомодовые полупроводниковые лазеры мощностью до ≈ 100 Вт (с длиной волны 940 [5] или 915 [6] нм), излучение которых можно напрямую завести в сердцевину ММ волокна с градиентным профилем показателя преломления. В качестве плотного зеркала резонатора такого лазера использовались ВБР, записанные в многомодовом градиентном световоде. В такой схеме проявляется эффект чистки пучка при ВКР-преобразовании [7, 8], в результате которого генерируется излучение с поперечными модами низших порядков. Спектральные характеристики ВБР в ММ волокне изучались в ряде работ, в которых вводилось понятие эффективной моды (principal mode), обозначающее группу мод волновода, имеющих близкую константу распространения и выглядящих на спектре отражения ВБР как один пик отражения, а также определяемую параметрами волновода отстройку между резонансными

длинами волн [9]. В градиентном световоде поддерживается в два раза меньшее количество мод, чем в ступенчатом, однако в спектре пропускания ВБР четче видны дополнительные пики, соответствующие модам перекачки между эффективными модами [10, 11].

Данная работа посвящена исследованию спектральных характеристик ВБР в ММ волокне с градиентным профилем показателя преломления в зависимости от физической длины ВБР как в пассивном режиме, так и при их использовании в качестве зеркал резонатора ВКР-лазеров на основе градиентных световодов (в активном режиме).

1. Описание эксперимента

Исследуемые ВБР записывались в схеме Ллойда [1, 12]. В качестве источника излучения использовался аргоновый лазер с удвоением частоты. Длина волны лазера – 244 нм, «записывающая» мощность – около 20 мВт. Были записаны две сильноотражающие ($R \approx 80\%$) ВБР в ММ градиентном световоде 62,5/125 мкм с разной длиной модифицируемого участка (1,6 и 9 мм). Разная длина получалась путем увеличения или уменьшения базового размера пучка с помощью конфокальной телескопической системы из двух цилиндрических линз с фокусными расстояниями 300 и 60 мм.

Измерение спектра пропускания ВБР и изучение его зависимости от количества поперечных мод излучения проводилось на установке, схематично показанной на рис. 1. Установка состоит из источника белого света Yokogawa AQ4305, волокна, ограничивающего модовый состав излучения, ВБР, записанной в градиентном ММ волокне с пигтейлами из того же градиентного волокна Corning MM 62,5/125, и анализатора спектра Yokogawa AQ6370.

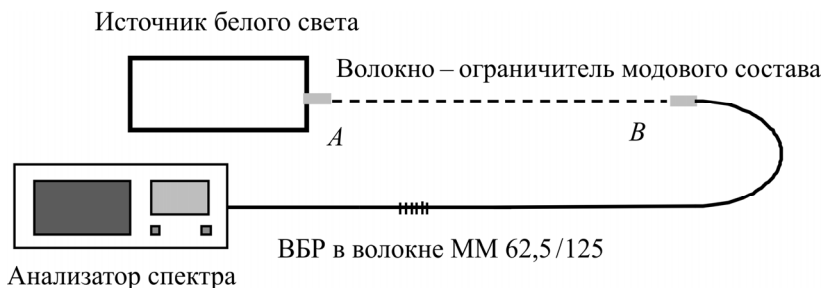


Рис. 1. Схема измерения спектра пропускания ВБР с различными волокнами, ограничивающими количество мод излучения: Corning SMF-28e+, Thorlabs SM980-5.8-125

Для управления модовым составом пробного излучения использовались разные волокна, ограничивающие модовый состав:

- 1) A и B соединены напрямую, ограничения модового состава нет;
- 2) между A и B вставлен патчкорд из волокна Corning SMF-28 длиной 2 м, режим с малым количеством мод;
- 3) между A и B вставлен патчкорд из волокна Thorlabs SM980-5.8-125 длиной 5 м, одномодовый режим.

Для оценки количества распространяющихся мод использовалось значение нормализованной частоты V [13]:

$$V = \frac{2\pi a NA}{\lambda},$$

где a – радиус сердцевинки; NA – числовая апертура волокна; λ – длина волны излучения.

В ММ волокне с градиентным профилем показателя преломления количество мод равно [14]

$$M \approx V^2 \left[\frac{\alpha}{2(\alpha + 2)} \right]_{\alpha=2} = \frac{\pi^2 a^2}{\lambda^2} NA^2,$$

где α – степенной множитель зависимости показателя преломления (в нашем случае ММ 62,5/125, сердцевина световода имеет параболический профиль показателя преломления с $\alpha = 2$).

Количество мод в волокнах SMF-28e+ и SM980 находилось из приведенной в работе [13] зависимости показателя преломления моды от нормализованной частоты. Полученные значения сведены в таблицу.

Параметры волокон – ограничителей модового состава

Волокно	a , мкм	NA	V	M
ММ 62,5/125	31,25	$0,275 \pm 0,015$	56,6	≈ 800
SMF-28e+	4,1	0,14	3,78	≈ 5
SM980	2,9	0,13–0,15	2,48	≈ 1

По значению M видно, что градиентное волокно ММ 62,5/125 на данной длине волны работает в многомодовом режиме, SMF-28e+ – в многомодовом с малым количеством мод, а SM980 проводит только одну – основную поперечную моду излучения.

Кроме пассивного режима, записанные решетки проверялись в активном режиме: каждая из этих решеток в паре с прямым сколом на противоположном конце градиентного волокна длиной 1,1 км образовывала резонатор ВКР-лазера аналогично схеме в работе [6]. Спектры генерации сравнивались при значительном превышении мощности накачки над порогом генерации, когда мощность генерации на ≈ 954 нм составляла несколько ватт.

2. Результаты эксперимента

Спектры пропускания решеток 9 и 1,6 мм, измеренные с максимальным разрешением анализатора спектра (0,02 нм) и нормированные на спектральную характеристику источника, представлены на рис. 2, а и 3, а соответственно. На всех графиках пунктиром обозначен спектр, измеренный с ограничивающим волокном SMF-28e+, сплошной линией – спектр с волокном SM980, а штрихпунктиром – без ограничивающего волокна.

Сравнение спектров с разными ограничивающими волокнами показывает, что при уменьшении количества мод в излучении, которое подается на вход ВБР, глубина провала, соответствующего основной моде, увеличивается. Отметим, что измерение непосредственно через многомодовое волокно всегда давало широкий спектр с малой амплитудой провала в пропускании ($<10\%$), на котором отдельные провалы практически не разрешаются.

На рис. 2, б полученные из спектров пропускания решетки 9 мм с одномодовым и маломодовым ограничивающими волокнами (SM980 и SMF28) спектры отражения сравниваются со спектрами генерации ВКР-лазера. В ВКР-лазере данная решетка используется как плотное зеркало резонатора.

На рис. 2 видны различные поперечные моды. Разницу длин волн между соседними поперечными модами можно оценить из разности их постоянных распространения β . При этом, учитывая, что при отражении от ВБР с периодом Λ выполняется условие фазового синхронизма

$$\beta = \frac{\pi}{\Lambda}, \text{ получим [4]}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 NA}{\pi a n_1^2},$$

где λ – длина волны фундаментальной моды, $\lambda = 954$ нм; n_1 – показатель преломления оболочки.

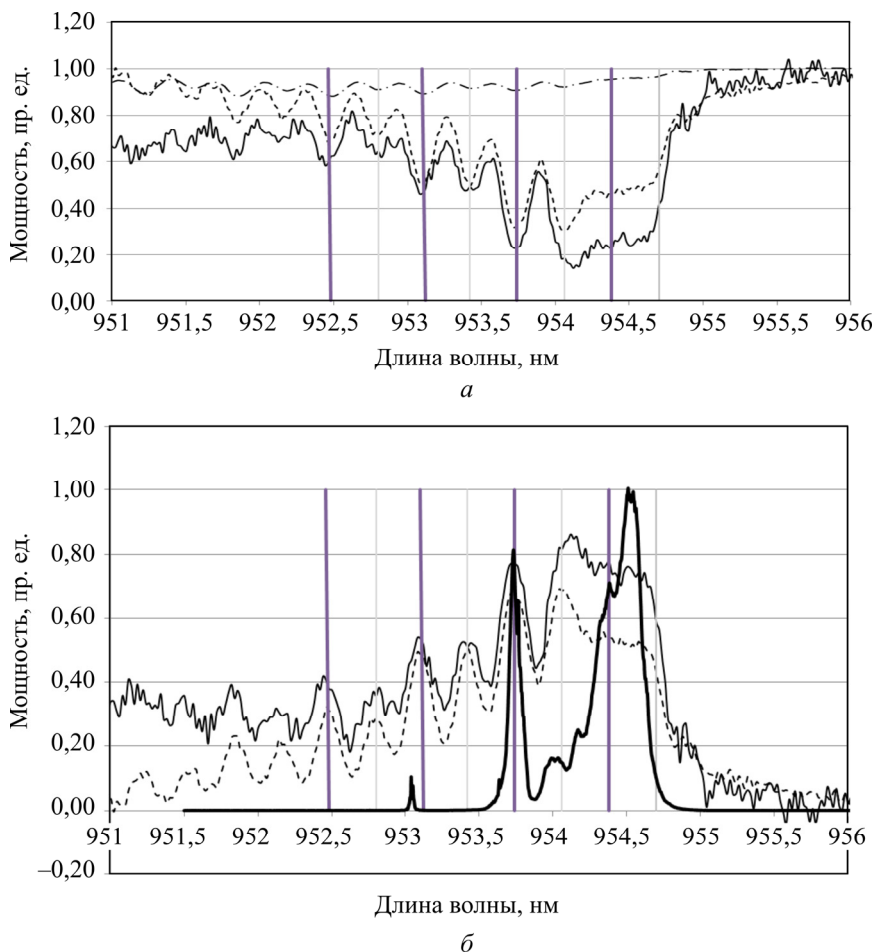


Рис. 2. Спектр пропускания решетки 9 мм (а) и полученный из него спектр отражения для SMF28 и SM980 в сравнении со спектром генерации ВКР-лазера на этой решетке при заведенной мощности накачки 46 Вт и выходной мощности 2,5 Вт на 954 нм (б); жирными вертикальными линиями обозначены длины волн, соответствующие отражению в различные эффективные группы мод; тонкими линиями выделены длины волн, соответствующие модам перекачки между группами

Используя значения $NA = 0,28$, $a = 30,3$ мкм, $n_1 = 1,45$, взятые из спецификации для волокна Corning MM 62,5/125, можно оценить разницу длин волн между соседними пиками отражения основных (эффективных) мод: $\Delta\lambda \approx 0,6$ нм. Измеренная в эксперименте разница составила 0,64 нм (см. рис. 2, а). Кроме основных мод, в спектре отражения видны также моды перекачки ВБР с меньшей амплитудой, отстоящие примерно на 0,32 нм от основных мод.

Сравнение спектра пропускания ВБР при ограничении излучения волокнами SM980/SMF28 и спектра генерации ВКР-лазера демонстрирует удовлетворительное совпадение длин волн пиков поперечных мод. Отметим, что в генерации (см. рис. 2, б) видны три основных пика. При этом промежуточные моды перекачки (с меньшей амплитудой) в генерации не наблюдаются.

На рис. 3 приведены спектры отражения решетки 1,6 мм с разными ограничивающими световодами (а) и полученный из них спектр пропускания (SMF28 и SM980) (б) в сравнении со спектром генерации ВКР-лазера с резонатором, в котором данная решетка используется как плотное зеркало.

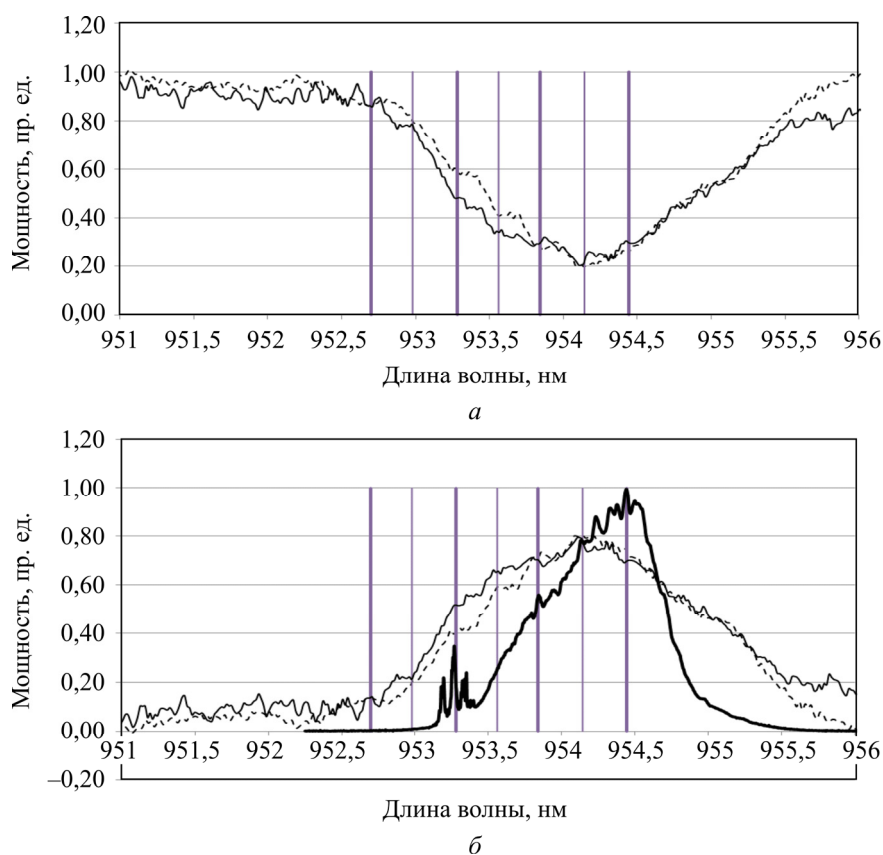


Рис. 3. Спектр пропускания решетки длиной 1,6 мм (а) и полученный из него спектр отражения для SMF28 и SM980 в сравнении со спектром генерации ВКР-лазера на этой решетке при заведенной мощности накачки 48 Вт и выходной мощности 4,3 Вт на 954 нм (б); жирными вертикальными линиями обозначены длины волн, соответствующие отражению в различные эффективные группы мод; тонкими линиями выделены длины волн, соответствующие модам перекачки

Для короткой ВБР спектральные пики, соответствующие разным поперечным модам, начинают сильно перекрываться. Расстояние между пиками удовлетворительно согласуется с теоретическим значением и составляет 0,56–0,6 нм. Спектр генерации также содержит три основных пика, которые сильно перекрываются. В отличие от длинной решетки, амплитуда боковых пиков здесь меньше (не превышает 0,5 от основного), порог генерации ниже, и проходящая через решетку мощность меньше (около 11 % от выходной мощности ВКР-лазера, в отличие от 16 % для длинной ВБР). Последний факт можно связать с наличием провалов в спектре отражения длинной ВБР, которые эффективно увеличивают пропускание в обратном направлении.

Заключение

В данной работе продемонстрировано отличие спектральных характеристик коротких и длинных ВБР, записанных в многомодовом градиентном световоде. При этом измеренные спектры пропускания (отражения) принципиально различаются при освещении решетки одномодовым и многомодовым излучением (в последнем случае спектр широкий, амплитуда его мала и особенности спектра замываются). При этом спектр пропускания при малом количестве мод несильно отличается от одномодового, поэтому для сравнения характеристик многомодовых ВБР можно использовать как одномодовое, так и маломодовое излучение.

Сравнение характеристик длинной (9 мм) и короткой (1,6 мм) ВБР с мало/одномодовым освещением показало следующее: в спектре длинной ВБР пики различных поперечных мод хорошо разрешаются, расстояние между ними примерно соответствует расчетному значению (0,6 нм). При этом в спектре отражения видны также моды перекачки ВБР с меньшей амплитудой, отстоящие примерно на 0,32 нм от основных мод. Для короткой ВБР спектральные пики, соответствующие разным поперечным модам, начинают сильно перекрываться. В спектре генерации ВКР-лазера присутствуют 3 пика, отстоящие на 0,6 нм, при этом амплитуда боковых пиков меньше для короткой ВБР и они сильно перекрываются. Кроме того, для короткой ВБР порог генерации ВКР-лазера ниже и мощность, проходящая назад через решетку, меньше (при большей выходной мощности лазера вперед).

Таким образом, для оптимизации выходных параметров волоконного ВКР-лазера на основе градиентного волокна и многомодовой ВБР требуется оптимизация длины многомодовой ВБР. В рассмотренном конкретном случае лучшие мощностные характеристики были продемонстрированы для короткой ВБР.

Работа выполнена за счет Российского научного фонда (грант № 14-22-00118).

Список литературы

1. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. – Academic Press, 1999.
2. Multimode fiber lasers based on Bragg gratings and double-clad Yb-doped fibers / A.S. Kurkov, D.A. Gruk, O.I. Medvedkov [et al.] // Laser Physics Letters. – 2004. – № 1 (9). – P. 473-475.
3. Dianov E.M., Prokhorov A.M. Medium-power CW Raman fiber lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – № 6 (6). – P. 1022–1028.
4. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High power fiber lasers: current status and future perspectives // JOSA B. – 2010. – № 27 (11). – P. B63–B92.
5. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μ m / S.I. Kablukov, E.I. Dontsova, E.A. Zlobina, I.N. Nemov, A.A. Vlasov, S.A. Babin // Laser Physics Letters. – 2013. – № 10. – P. 085103.
6. 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping / E.A. Zlobina, S.I. Kablukov, M.I. Skvortsov, I.N. Nemov, S.A. Babin // Laser Physics Letters. – 2016. – № 13 (3). – P. 035102.
7. Use of a continuous wave Raman fiber laser in graded-index multimode fiber for SRS beam combination / N.B. Terry, K.T. Engel, T.G. Alley, T.H. Russell // Optics Express. – 2007. – № 15 (2). – P. 602–607.
8. Моделирование эффекта чистки пучка и оптимизация параметров ВКР-лазера на основе градиентного световода с прямой диодной накачкой / Е.А. Злобина, Е.И. Донцова, С.И. Каблуков, С.А. Бабин // Прикладная фотоника. – 2015. – № 2 (1). – P. 31–43.
9. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers / T. Mizunami, T.V. Djambova, T. Niiho, S. Gupta // Journal of Lightwave Technology. – 2000. – № 18. – P. 230–235.

10. Sang X., Yu C., Yan B. Bragg gratings in multimode optical fibres and their applications // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2006. – № 8 (4). – P. 1616–1621.

11. Fiber comb filters based on UV-writing Bragg gratings in graded-index multimode fibers / Y. Liu, J. Lit, X. Gu, L. Wei // *Optics Express*. – 2005. – № 13 (21). – P. 8513.

12. Абдуллина С.Р., Власов А.А., Бабин С.А. Сглаживание спектра волоконных брэгговских решеток в схеме записи с интерферометром Ллойда // *Квантовая электроника* – 2010. – Т. 40, № 3. – С. 259–263.

13. Agrawal G.P. *Fiber-optic communications systems*. – New York, 2002.

14. Gloge D., Marcatili E.A.J. Multimode theory of graded-core fibers // *Bell System Technical Journal*. – 1973. – № 52 (9). – P. 1563–1578.

References

1. Kashyap R. *Fiber Bragg gratings*. Academic Press, 1999.

2. Kurkov A.S., Gruk D.A., Medvedkov O.I. [et al.] Multimode fiber lasers based on Bragg gratings and double-clad Yb-doped fibers. *Laser Physics Letters*, 2004, no. 1 (9), pp. 473-475.

3. Dianov E.M., Prokhorov A.M. Medium-power CW Raman fiber lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, no. 6 (6), pp. 1022-1028.

4. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High power fiber lasers: current status and future perspectives. *JOSA B*, 2010, no. 27 (11), pp. B63-B92.

5. Kablukov S.I., Dontsova E.I., Zlobina E.A., Nemov I.N., Vlasov A.A., Babin S.A. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μ m. *Laser Physics Letters*, 2013, no. 10, p. 085103.

6. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Skvortsov M.I., Nemov I.N., Babin S.A. 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping. *Laser Physics Letters*, 2016, no. 13 (3), p. 035102.

7. Terry N.B., Engel K.T., Alley T.G., Russell T.H. Use of a continuous wave Raman fiber laser in graded-index multimode fiber for SRS beam combination. *Optics Express*, 2007, no. 15 (2), pp. 602-607.

8. Zlobina E.A., Dontsova E.I., Kablukov S.I., Babin S.A. Modelirovanie efekta chistki puchka i optimizatsiia parametrov VKR-lazera na osnove gradientnogo svetovoda s priamoj diodnoi nakachkoi [Modeling of the beam cleaning effect and optimization of the Raman fiber laser based on

graded-index fiber with direct diode pumping]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, no. 1, pp. 31-43.

9. Mizunami T., Djambova T.V., Niiho T., Gupta S. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, no. 18, pp. 230-235.

10. Sang X., Yu Ch., Yan B. Bragg gratings in multimode optical fibres and their applications. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006, no. 8 (4), pp. 1616-1621.

11. Liu Yu, Lit J., Gu X., Wei L. Fiber comb filters based on UV-writing Bragg gratings in graded-index multimode fibers. *Optics Express*, 2005, no. 13 (21), p. 8513.

12. Abdullina S.R., Vlasov A.A., Babin S.A. Sglazhivanie spektra volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme zapisi s interferometrom Lloyda [Smoothing the spectrum of the fiber Bragg grating in Lloyd interferometer recording scheme]. *Kvantovaya elektronika*, 2010, vol. 40, no. 3, pp. 259-263.

13. Agrawal G.P. *Fiber-optic communications systems*. New York, 2002.

14. Gloge D., Marcetili E.A.J. Multimode theory of graded-core fibers. *Bell System Technical Journal*, 1973, no. 52 (9), pp. 1563-1578.

Получено 15.06.2016