
**ЛАЗЕРЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

УДК 535.453.374.621.375.8

**ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ**

© 2007 г. С. Р. Абдуллина, С. А. Бабин, А. А. Власов, С. И. Каблуков

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 09.03.2007 г.

Рассмотрен метод перестройки волоконной брэгговской решетки (ВБР) за счет изгибного сжатия–растяжения. С помощью данного метода получен относительный диапазон перестройки резонансной длины волны ВБР порядка 5%. Исследованы изменения формы спектра и коэффициента отражения ВБР в процессе перестройки. Обнаружено, что коэффициент отражения ВБР заметно возрастает с увеличением степени сжатия. Показано, что такое возрастание обусловлено наведенными сжатием изменениями амплитуды модуляции показателя преломления в ВБР. Разработанная ВБР была применена для перестройки длины волны излучения иттербиевого волоконного лазера, область перестройки составила ~45 нм около центральной длины волны 1080 нм.

PACS: 42.55.Wd

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что лазеры на основе волоконных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов, являются уникальными источниками непрерывного инфракрасного излучения, которые характеризуются высокой эффективностью генерации и возможностью перестройки длины волны излучения в широком спектральном диапазоне. Большинство перестраиваемых волоконных лазеров содержит достаточно громоздкую дифракционную решетку в качестве внешнего элемента, селективирующего длину волны излучения. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) позволяет сформировать резонансный отражатель непосредственно внутри волокна за счет периодического изменения показателя преломления. ВБР записывается в сердцевине волокна с помощью УФ излучения и характеризуется узким спектром отражения на брэгговской длине волны $\lambda = 2n\Lambda$, где n – эффективный показатель преломления волокна, Λ – индуцированный период модуляции показателя преломления [1, 2]. Брэгговскую длину волны можно перестраивать, например, изменяя длину ВБР (и, следовательно, период решетки Λ) при помощи растяжения и сжатия. В области телекоммуникационных длин волн ~1.55 мкм продемонстрирована возможность перестройки ВБР в диапазоне ~100 нм [3], однако при использовании ВБР в качестве элемента резонатора волоконных лазеров диапазон перестройки не превышал 35 нм для эрбиевого лазера, генерирующего вблизи 1.55 мкм [4], и 15 нм для неодимового лазера, генерирующего вблизи 0.9 мкм [5]. Для наиболее эффективного иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ), генерирующего вблизи 1.08 мкм, серьезных попыток

получения перестраиваемой генерации не предпринималось.

В данной работе представлены результаты исследований по перестройке брэгговской решетки с резонансной длиной волны ~1.08 мкм методом изгибного сжатия–растяжения и ее применения для изменения длины волны излучения ИВЛ. Предварительные эксперименты с перестраиваемой ВБР в качестве зеркала лазера продемонстрировали возможность перестройки длины волны излучения ИВЛ в диапазоне ~45 нм [6]. При такой большой перестройке характеристики перестраиваемой ВБР могут изменяться и оказывать влияние на выходной спектр и перестроечную кривую ИВЛ. Поэтому основная цель работы состояла в подробном исследовании влияния деформаций на спектр и коэффициент отражения ВБР.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Известны две основные принципиальные схемы перестройки ВБР: при помощи аксиального сжатия–растяжения [7] и изгибного сжатия–растяжения [3]. При этом механическая прочность ВБР на сжатие значительно выше, чем на растяжение. Известно, что схема сжатия, основанная на изгибе балки, является простой и надежной и обеспечивает большое относительное сжатие до $\epsilon \approx -0.087$ [3], при дальнейшем изгибе отмечается резкое возрастание потерь. Учитывая, что для аксиального сжатия необходимо закрепить ВБР внутри калиброванной трубки, а для изгибного сжатия достаточно просто приклеить ВБР к балке, мы выбрали последнее.

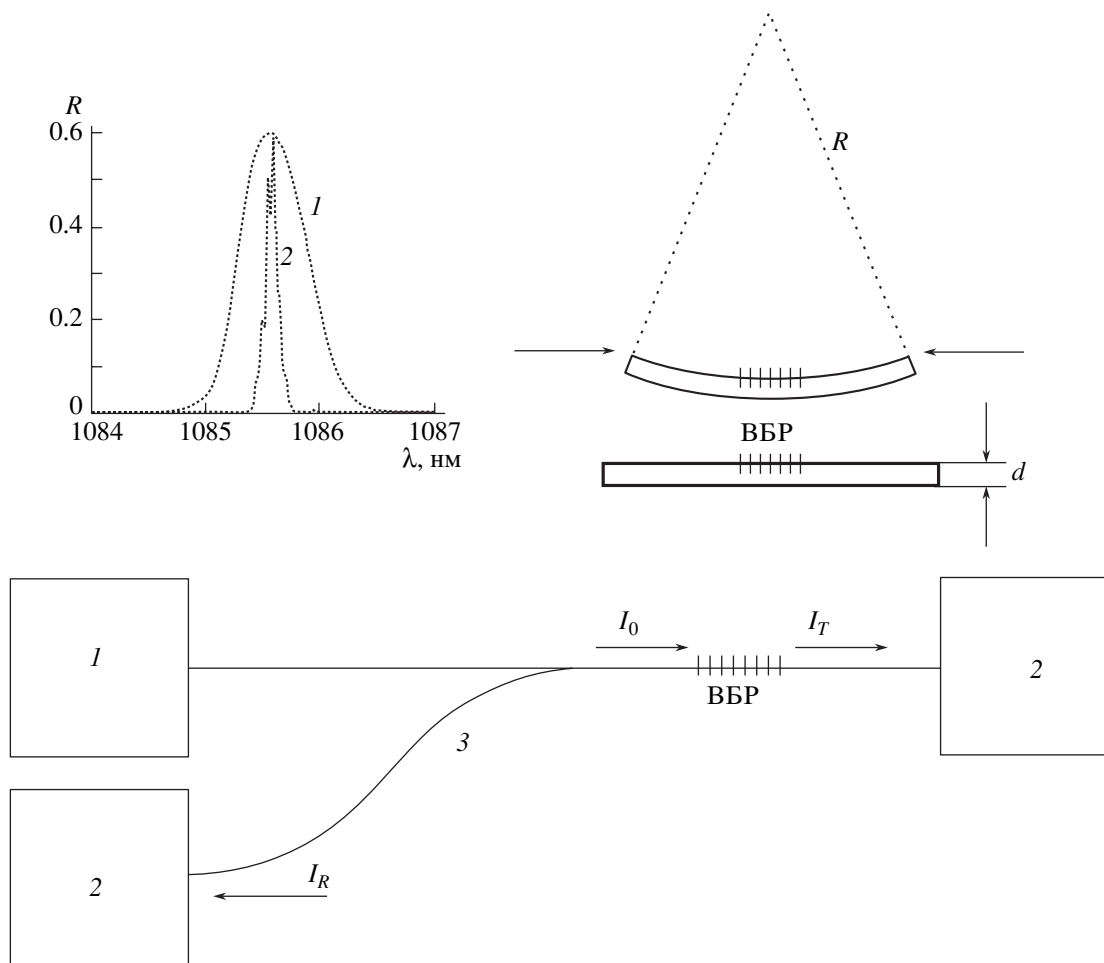


Рис. 1. Вверху: принцип перестройки ВБР. ВБР приклеена к плексигласовой балке толщиной d , сжатие балки приводит к ее изгибу с радиусом кривизны R и как результат уменьшению длины ВБР. Внизу: схема тестирования ВБР, 1 – широкополосный источник излучения, 2 – оптический спектроанализатор, 3 – волоконный ответвитель, I_0 , I_T , I_R – спектральные плотности мощности падающего, прошедшего и отраженного излучений соответственно. На вставке: 1 – типичный спектр отражения ВБР (коэффициент отражения $R_0 \approx 0.6$ в максимуме, $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии) и соответствующий спектр генерации иттербиевого волоконного лазера (2). Данные получены при коэффициенте сжатия ВБР $\epsilon \approx -0.01$.

Принцип перестройки ВБР за счет изгибного сжатия показан на рис. 1. Волокно с записанной решеткой приклеивается к балке из плексигласа толщиной d . Сжатие балки при помощи силы, приложенной к ее концам, приводит к изгибной деформации с радиусом кривизны R . В результате брэгговская длина волны изменяется, $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$,

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

где $P_e = 0.22$ – фотоупругий коэффициент, $\epsilon = -0.5d/R$ – коэффициент сжатия, λ_0 – брэгговская длина волны для свободного (не сжатого) состояния.

Для записи ВБР был применен разработанный ранее УФ источник повышенной мощности: широкоапертурный аргоновый лазер с внутрирезонаторным удвоением частоты в кристалле ВВО, ко-

торый позволяет получить непрерывное УФ излучение мощностью ~ 1 Вт с длиной волны 244 нм [8], что является оптимальным для записи ВБР в пике поглощения (~ 240 нм) волокна, легированного германием. В наших экспериментах использовалось оптическое волокно Flexcore 1060.

Для формирования периодического изменения интенсивности УФ излучения применялась интерференционная схема с фазовой маской. Излучение УФ фокусировалось через фазовую маску на оптическое волокно без защитного полимерного покрытия. Профиль штрихов фазовой маски обеспечивает концентрацию $\sim 75\%$ мощности в +1-х и -1-х порядках дифракции (что в первом приближении соответствует видности $s = 0.75$ интерференционной картины). Волокно размещалось непосредственно вблизи фазовой маски в области интерференции волн, дифрагировавших в

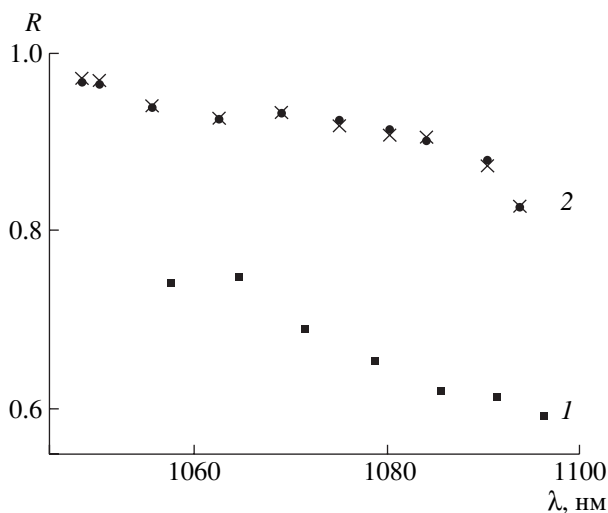


Рис. 2. Изменение коэффициента отражения R ВБР в зависимости от перестройки брэгговской длины волны. 1 – $R_0 \approx 0.6$ на длине волны $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии, 2 – $R_0 \approx 0.82$ на длине волны $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии, кружки – данные получены из измерения коэффициента пропускания, крестики – данные получены из измерения коэффициента отражения относительно отражения в свободном состоянии.

+1-е и –1-е порядки. Для регистрации спектральных характеристик ВБР при записи использовался оптический анализатор спектра ANDO 6317 с разрешением ~ 0.01 нм и широкополосный источник, в качестве которого использовалось спонтанное излучение иттербиевого волокна (рис. 1). Для получения сглаженного спектрального профиля отражения ВБР с подавленными боковыми резонансами был применен простой способ аподизации профиля ВБР за счет гауссовой формы записывающего УФ пучка. Типичный спектр отражения ВБР показан на рис. 1, слабое сжатие ($\epsilon \sim -0.01$) с помощью изгибающей конструкции практически не меняет спектр отражения ВБР.

При более сильных деформациях спектр решетки изменялся, поэтому было проведено детальное исследование этих изменений. Для этого контролировались спектры отражения и пропускания решетки при ее сжатии (см. схему измерений на рис. 1). Излучение широкополосного источника 1 через волоконный ответвитель 3 направлялось на ВБР. Спектр отраженного и прошедшего излучений регистрировался анализатором 2. Коэффициент отражения $R = 1 - T - \delta \approx 1 - T$ определялся по измеренному коэффициенту пропускания $T = I_T/I_0$ в пренебрежении потерями ($\delta \ll T$). Кроме того, относительное изменение коэффициента отражения определялось из отношения плотностей мощности на резонансной длине волны (в

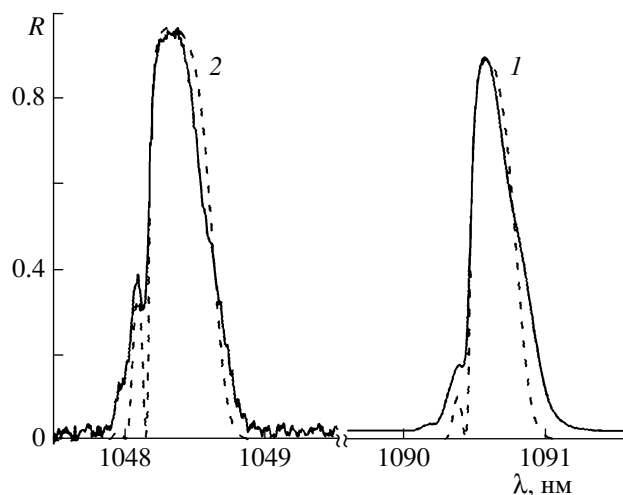


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента отражения R ($R_0 \approx 0.82$ на длине волны $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии) при сжатии от $\epsilon \approx -0.002$ (кривая 1) до $\epsilon \approx -0.05$ (2). Непрерывная линия – эксперимент, штриховая – численное моделирование с вариацией изменения показателя преломления $\Delta n = 0.5 \times 10^{-3}$ (1) и 0.72×10^{-3} (2) (предполагается отсутствие chirpa).

пике отражения) в спектрах пропускания I_T и отражения I_R :

$$\frac{I_T}{I_R} = \text{const}(R_0) \frac{1-R}{R}. \quad (2)$$

Константа $\text{const}(R_0)$ характеризует отношение потерь в ответвителе для прошедшего и отраженного излучений и определяется из условия выполнения соотношения (2) для несжатой решетки. Сравнение значений, полученных двумя методами, позволяет выяснить, как меняется коэффициент отражения при сжатии (изгибе) и насколько важен учет потерь δ .

Таким образом, были протестированы несколько образцов ВБР с коэффициентом отражения $R_0 = 60\text{--}90\%$ в максимуме $\lambda_0 \approx 1093$ нм (брэгговская длина волны в свободном состоянии), см. рис. 2, 3. Кроме того, перестраиваемые ВБР, изготовленные и охарактеризованные описанными выше способами, были использованы в качестве плотного зеркала резонатора ИВЛ. В качестве выходного зеркала использовался сколотый под прямым углом торец волокна. В свободном состоянии ВБР максимум генерации соответствовал λ_0 , при сжатии решеток была получена перестройка в коротковолновую область в соответствии с формулой (1), при этом спектр генерации был значительно уже спектральной ширины решетки (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений спектральных характеристик решеток при их изгибном сжатии представлены на рис. 2. Кривая 1 характеризует изменение коэффициента отражения R ВБР, спектр которой представлен на рис. 1 вверху слева ($R_0 \approx 0.6$ на длине волны $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии) в зависимости от перестройки брэгговской длины волны. Было проверено, что ширина спектра отражения ВБР (~ 0.7 нм на уровне -3 дБ) существенно не изменяется при сжатии, но коэффициент отражения в максимуме возрастает от $R_0 \approx 0.6$ до $R \approx 0.75$ при сильном сжатии ($\epsilon \sim -0.05$) (рис. 2, кривая 1). Аналогичное поведение коэффициента отражения решетки при сжатии было получено для ВБР с большей отражательной способностью. Изменение коэффициента отражения R при сжатии от свободного состояния ($R_0 \approx 0.82$ на длине волны $\lambda \approx 1093$ нм) до сильного сжатия ($\epsilon \sim -0.05$) показано на рис. 2 (кривая 2). Чтобы быть уверенными, только ли коэффициент отражения изменяется при сжатии, мы сравнили значения коэффициента отражения, измеренные разными способами в схеме, показанной на рис. 1 внизу. Согласие между двумя наборами данных (рис. 2, кривая 2) подтверждает, что при перестройке (сжатии) изменяется только коэффициент отражения, а нерезонансные потери малы и неизменны.

Измеренный спектр отражения высокоотражающей решетки $R(\lambda)$ в зависимости от степени сжатия представлен на рис. 3. Для высокоотражающей ВБР спектр шире, чем на рис. 1, и боковые резонансы в коротковолновой области, типичные для решеток с гауссовой аподизацией профиля без выравнивания среднего значения показателя преломления [9, 10], остаются заметными (рис. 3), при этом их амплитуда чувствительна к сжатию. Изучение изменения спектра при сжатии (и в особенности боковых резонансов) помогает нам прояснить механизмы, приводящие к наблюдаемому возрастанию коэффициента отражения. Измеренные спектры хорошо согласуются с рассчитанными численно в предположении, что изменяется только амплитуда модуляции показателя преломления Δn , наведенная УФ излучением. Используемый метод расчета гауссовых решеток описан в работе [10]. Напомним, что в случае интерференции гауссовых пучков

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{2z^2}{w^2}\right) \left(1 + s \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right)\right), \quad (3)$$

где w – радиус гауссова пучка, s – видность интерференционной картины, Λ – период интерференционной структуры, определяющийся фазовой маской. В условиях эксперимента $w \approx 1$ мм, $s \approx 0.75$, $\Lambda_0 \approx 0.36665$. Величина относительного изменения Δn , позволяющая адекватно аппроксимировать

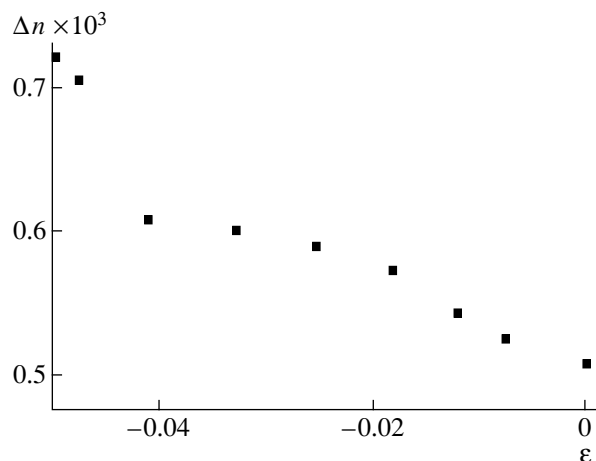


Рис. 4. Изменение амплитуды модуляции показателя преломления Δn , для высокоотражающей ВБР ($R_0 \approx 0.82$ на длине волны $\lambda_0 \approx 1093$ нм в свободном состоянии) при сжатии от $\epsilon = 0$ до $\epsilon \approx -0.05$.

экспериментальные спектры, составляет ~ 1.5 при сжатии от $\epsilon \approx 0$ (рис. 3, кривая 1) до $\epsilon \approx -0.05$ (рис. 3, кривая 2); такое увеличение наведенного показателя преломления приводит к уширению спектра, возрастанию амплитуды первого бокового резонанса и появлению второго. Также мы аппроксимировали и другие экспериментальные спектры ВБР (в промежуточных сжатых состояниях), моделируя их спектрами гауссово-аподизированной решетки без частотной модуляции (“чирпа”) с Δn в качестве параметра. Расчетные спектры достаточно хорошо соответствовали экспериментальным, полученное из аппроксимации значение амплитуды модуляции показателя преломления Δn монотонно возрастает с увеличением сжатия (рис. 4). Это означает, что примененная изгибная конструкция обеспечивает равномерное искривление и не наводит частотную модуляцию (чирп) волны, связанную с неравномерностью искривления на длине решетки (~ 2 мм), что обычно наблюдается при сильном сжатии и проявляет себя в понижении коэффициента отражения и более значительном уширении спектра ВБР [2, 11].

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, при перестройке методом изгибного сжатия на 45 нм коэффициент отражения ВБР возрастает в 1.2–1.3 раза при увеличении сжатия (от $\epsilon = 0$ до $\epsilon \approx -0.05$). Показано, что возрастание коэффициента отражения ВБР обусловлено деформацией с увеличением в ~ 1.5 раза амплитуды модуляции наведенного показателя преломления.

Известно, что при возникновении упругих деформаций в стекле проявляются фотоупругие свойства [1, 12]. Стекло становится анизотроп-

ным, что приводит к появлению двойного лучепреломления. При изгибе волокна наведенное двулучепреломление зависит еще и от поперечной координаты в соответствии с изменением аксиального напряжения, которое изменяет коэффициент преломления через стрессо-оптический коэффициент, причем при сжатии происходит увеличение коэффициента преломления волокна. Поскольку измеренное состояние поляризации выходного излучения не изменялось при перестройке (излучение оставалось случайно поляризованным), вклад фотоупругого эффекта был, по-видимому, не основным.

Существует несколько моделей, описывающих изменение коэффициента преломления волокна в процессе записи волоконных брэгговских решеток. Основные модели, рассматриваемые в литературе, – уплотнение и образование дефектов (центров окраски) [12]. Модель уплотнения базируется на индуцированных лазерным излучением изменениях плотности, что проявляется в изменениях показателя преломления. УФ излучение лазера при интенсивности ниже порога разрушения индуцирует термически обратимое линейное уплотнение в аморфном кварце, приводящее к изменениям коэффициента преломления. Ранее было найдено примерно линейное соотношение между коэффициентом преломления и изменением плотности. В работе [13] было также измерено изменение коэффициента преломления в гидростатически сжатом кварце и получены результаты в хорошем согласии с лазерным уплотнением аморфного кварца, что подтверждает гипотезу о том, что лазерное и гидростатически наведенное уплотнение возникают благодаря похожим физическим механизмом. Таким образом, можно говорить о том, что данный механизм уплотнения при записи решеток является чувствительным к сжатию и, по-видимому, реализуется в нашем случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе создана перестраиваемая ВБР, сжимаемая изгибом балки, которая применена для перестройки длины волны ИВЛ. Достигнута перестройка в диапазоне около 45 нм вблизи 1080 нм. Аппроксимация экспериментальных спектров для сжатой ВБР показывает, что сила ВБР (амплитуда модуляции показателя преломления Δn) растет при сжатии, что позволяет сделать вывод о том, что при записи решеток в волокне Flexcore 1060 реализуется механизм, чув-

ствительный к деформациям (механизм УФ индуцированного уплотнения стекла). Увеличение Δn при сжатии приводит к возрастанию (в 1.2–1.3 раза) коэффициента отражения ВБР, что благоприятно сказывается на характеристиках перестраиваемого волоконного лазера.

Авторы благодарят В.А. Акулова, Д.М. Афанасьева, М.А. Рыбакова и Д.В. Чуркина за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда CRDF (грант RUP1–1509-NO–05), программ Президиума и Отделения физических наук РАН, интеграционной программы СО РАН и Фонда содействия отечественной науке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kashyap R.* Fiber Bragg Gratings. San Diego: Academic, 1999.
2. *Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М.* // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 1085.
3. *Mokhtar M.R., Goh C.S., Butler S.A., Set S.Y., Kikuchi K., Richardson D.J., Ibsen M.* // Electr. Lett., 2003. V. 39. № 6. P. 509.
4. *Yoonchan J., Alegria C., Sahu J.K., Fu L., Ibsen M., Codemard C., Mokhtar M.R., Nilsson J.* // IEEE Photonics Technology Lett., 2004. V. 16. № 3. P. 756.
5. *Fu L.B., Ibsen M., Richardson D.J., Nilsson J., Payne D.N., Grudinin A.B.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 2005. V. 17. № 2. P. 306.
6. *Akulov V.A., Afanasiev D.M., Babin S.A., Kablukov S.I., Rybakov M.A., Vlasov A.A.* // 12th Conference on Laser Optics 2006 (St.-Petersburg, Russia, June 26–30, 2006), Tech. Program. 2006. P. 41. Paper ThR1- P. 33.
7. *Mohammad N., Szyszkowski W., Zhang W.J., Haddad E.I., Zou J., Jamroz W., Kruzelecky R.* // J. Lightwave Technol. 2004. V. 22. № 8. P. 2001.
8. *Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблукков С.И.* // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 9. С. 857.
9. *Mizrahi V., Sipe J.E.* // J. Lightwave Technol. 1993. V. 11. № 10. P. 1513.
10. *Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблукков С.И.* // Квант. электрон. 2006. V. 36. № 10. P. 966.
11. *Gapontsev V.P., Samartsev I.E., Zayats A.A., Loryan R.R.* // Proc. Conf. Adv. Solid State Lasers. Hilton Head, NC, 1991. Paper WC1–1. P. 214.
12. *Othonos A., Kalli K.* Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Norwood: Artech House, 1999.
13. *Fiori C., Devine R.A.B.* // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1986. V. 61. P. 187.