

УДК 666.189.21:666.22

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ БРЭГГОВСКИХ СВЕТОВОДОВ

© 2019 г. М. Ю. Салганский¹*, В. Ф. Хопин¹, А. Н. Гурьянов¹, М. М. Бубнов², М. Е. Лихачев²

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук, Россия, 603951 Нижний Новгород, ул. Тropicина, 49

²Научный центр волоконной оптики Российской академии наук, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

*e-mail: misalgan@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.06.2018 г.

Разработан модифицированный метод химического осаждения из парогазовой фазы (MCVD-метод) многослойных брэгговских световодов на основе высокочистого кварцевого стекла. Показано, что чередование слоев с разной температурой плавления приводит к искажению слоев в осаждаемой брэгговской структуре и резкому росту оптических потерь вследствие нарушения условий брэгговского отражения. Оптимизация химического состава слоев в брэгговской структуре позволила подавить избыточные оптические потери и достичь предельных оптических потерь, определяемых лишь волноводными свойствами самой брэгговской структуры.

Ключевые слова: брэгговский световод, MCVD-метод, профиль показателя преломления, германо-силикатное стекло, оптические потери

DOI: 10.1134/S0002337X19010093

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый прогресс в создании новых типов волоконных устройств приводит к необходимости достижения параметров, которые не могут быть получены с использованием стандартных конструкций волоконных световодов. В этой связи большой интерес представляют новый тип световодных структур, обладающих уникальными свойствами (размером одномодовой сердцевины, дисперсией, чувствительностью к изгибам и т.п.), недостижимыми для стандартных световодов. Так, в работах [1–4] продемонстрирована возможность изготовления принципиально новой волноводной структуры – брэгговского световода с большим размером поля моды. Структура брэгговского световода состоит из чередующихся концентрических слоев с высоким и низким показателями преломления, окружающих сердцевину, показатель преломления которой такой же или ниже чем у кварцевого стекла. Локализация света в сердцевине брэгговских световодов осуществляется за счет резонансного отражения излучения от кольцевых слоев с высоким показателем преломления, окружающих сердцевину. Последующие работы показали высокую перспективность предложенной структуры для целого ряда применений [5–12].

Так как свет локализуется в сердцевине брэгговского световода не за счет полного внутреннего отражения, а за счет френелевского отражения от периодически расположенных слоев с высо-

ким и низким показателями преломления, то особенностью таких структур является наличие потерь на вытекание излучения, которые можно снизить до приемлемого уровня путем увеличения количества пар слоев с высоким и низким показателями преломления и путем увеличения разности показателей преломления между ними (детально зависимость потерь на вытекание в прямых и изогнутых брэгговских световодах исследована в работах [13, 14]). Особенно остро данная проблема встает при изготовлении брэгговских структур с аномальной дисперсией в области 1 мкм [3]. Для достижения высокой волноводной дисперсии требуется большая депрессия сердцевины световода, что в свою очередь существенно увеличивает потери на вытекание в таких структурах [13, 14] и требует значительного увеличения количества пар слоев с высоким и низким показателями преломления, окружающих сердцевину. Изготовление таких структур – сложная физико-химическая задача, рассмотрение особенностей которой является целью настоящей работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения заготовок световодов использовался метод модифицированного химического осаждения из газовой фазы внутри опорной кварцевой трубы (MCVD-метод) [15]. Исходными соединениями служили высокочистые хлориды Si-

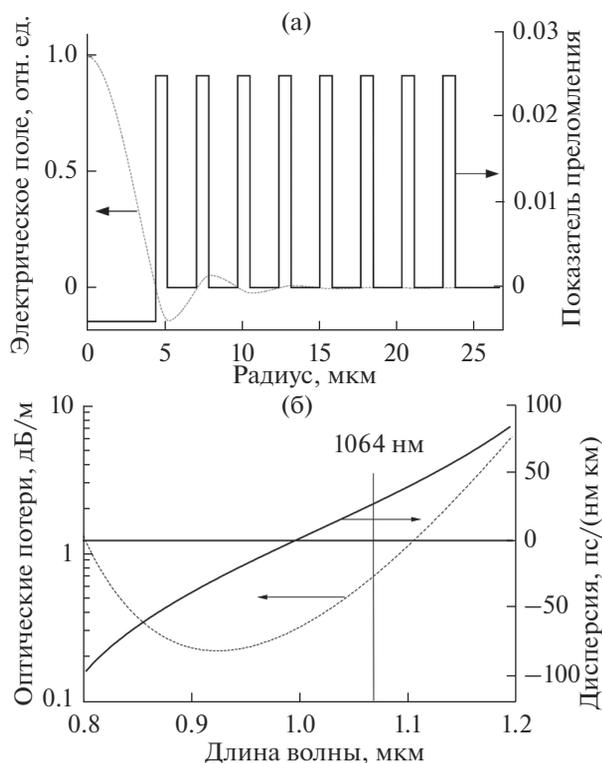


Рис. 1. Спроектированный профиль показателя преломления (а) и рассчитанные спектральные зависимости оптических потерь на вытекание в брэгговском световоде (б).

Cl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , CCl_4 , $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ и O_2 . В качестве опорных использовались трубы фирмы Heraeus марки F300 с различными внешними диаметрами (15–25 мм) и толщиной стенки (1.5 или 2 мм).

Методика получения заготовок световодов заключалась в следующем. Вначале на внутреннюю поверхность опорной трубы наносился защитный слой из высокочистого стекла состава $\text{SiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--F}$ с показателем преломления, близким к показателю преломления кварцевого стекла. Затем за несколько проходов осаждался слой стекла состава $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ определенной толщины с заданным показателем преломления. Далее осаждался слой чистого или слабо легированного фтором кварцевого стекла. Затем аналогичным образом проводилось поочередное осаждение заданного количества чередующихся слоев стекла с высоким и низким показателями преломления. После осаждения чередующихся слоев осаждался материал сердцевин. После этого подача реагентов прекращалась и трубчатая заготовка за 2–4 прохода при пониженной скорости движения горелки (не более 30–35 мм/мин) схлопывалась в сплошной стеклянный стержень – заготовку волноконного световода.

Температура внешней поверхности трубы в нагретой зоне контролировалась ИК-пирометром фирмы IRCON. Нагрев трубы осуществлялся кислородно-водородной горелкой. Круговая симметрия трубы обеспечивалась за счет поддержания избыточного давления внутри трубы ~50–70 Па.

Профиль показателя преломления в заготовках измерялся анализатором преформ 2610 фирмы PhotonKinetics в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Элементный состав стекол определялся на тонких срезах (2мм) преформы с помощью рентгеновского анализатора электронного микроскопа JEOL 5910LV.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта для исследования была выбрана структура брэгговского световода с аномальной дисперсией в области 1 мкм. Как показывают расчеты, в данном случае требуется изготовление брэгговского световода с сердцевинной, обладающей высокой депрессией (более 0.003) относительно уровня слоев оболочки с низким показателем преломления. Так, в работе [3], где впервые предложена такая структура, уровень оптических потерь не был указан, была лишь продемонстрирована локализация излучения в сердцевине световода при распространении на коротких (менее метра) отрезках световода. Как показали наши расчеты, уровень оптических потерь в минимуме в данном случае превышал несколько десятков дБ/м. Как установлено в работах [13, 14], именно вследствие большой депрессии сердцевинны наблюдаются высокие потери на вытекание и требуется большое количество пар отражающих слоев. Стоит отметить, что данный подход существенно увеличивает размер сердцевинны и трудоемкость ее изготовления. Альтернативным подходом является увеличение разности показателей преломления между слоями, окружающими сердцевину. Так, в рамках настоящей работы была использована конструкция брэгговского световода, аналогичная [6], с разностью показателей преломления между слоями в оболочке около 0.025 и диаметром сердцевинны 9 мкм. Уже при 8 парах отражающих слоев потери на вытекание становятся приемлемо низкими (менее 1 дБ/м в области 1.06 мкм, где достигалась аномальная дисперсия), что позволяет использовать относительно короткие (несколько метров) отрезки световода. Профиль показателя преломления, рассчитанное распределение электрического поля и хроматическая дисперсия в такой структуре показаны на рис. 1.

Для создания заготовок брэгговских световодов слои с высоким показателем преломления формировались из кварцевого стекла, легированного оксидом германия, а слои с низким показателем преломления – из чистого или слабо леги-

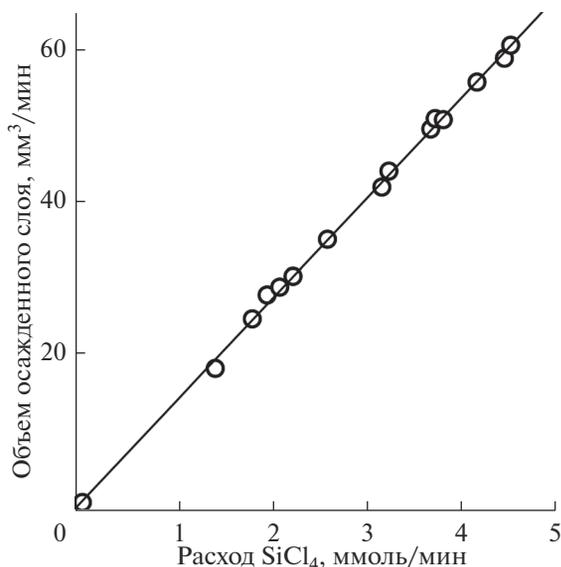


Рис. 2. Зависимость объема осажденного слоя кварцевого стекла от расхода SiCl_4 .

рованного фтором кварцевого стекла. При этом было необходимо строго контролировать показатель преломления и толщину каждого слоя.

Величина показателя преломления кварцевого стекла, легированного оксидом германия, растет линейно с увеличением содержания GeO_2 во всем диапазоне концентраций [16, 17]. Следовательно,

$$\Delta n = K C, \quad (1)$$

где C – мольная доля GeO_2 в германосиликатном стекле, K – коэффициент рефрактивности GeO_2 .

Поскольку объем V слоя германосиликатного стекла определяется как сумма объемов стеклообразных компонентов [17], то для каждого слоя

$$V_{\text{слоя}} = V_{\text{SiO}_2} \left(1 + \frac{M_{\text{GeO}_2}}{M_{\text{SiO}_2}} \frac{d_{\text{SiO}_2}}{d_{\text{GeO}_2}} \frac{\Delta n}{K - \Delta n} \right), \quad (2)$$

где M и d – соответственно молекулярная масса и плотность компонентов.

Таким образом, для контроля объема осажденного слоя германосиликатного стекла необходимо знать количество SiO_2 , использованного для его создания, величину K и, исходя из требуемой формы профиля показателя преломления (ППП), создать нужную разность показателей преломления слоя и кварцевого стекла. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость объема осажденного слоя кварцевого стекла от расхода тетрахлорида кремния для скорости движения горелки вдоль трубы ~ 120 мм/мин. Эффективность осаждения составляет около 50%.

Поскольку имеющиеся в литературе сведения по зависимости показателя преломления от концентрации оксида германия в германосиликатном

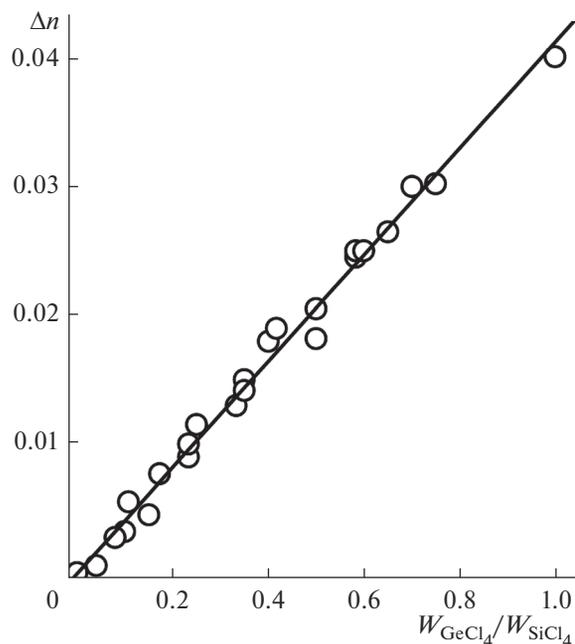


Рис. 3. Зависимость Δn сердцевины заготовки световода от объемного соотношения паров хлоридов германия и кремния в парогазовой смеси при концентрации кислорода ≥ 0.93 .

стекле противоречивы, представляется затруднительным сравнение свойств световодов, зависящих от концентрации оксида германия в сердцевине, приведенных различными авторами. Поэтому в данной работе для таких сравнений использовались зависимости свойств световодов от величины Δn или $\Delta = \frac{\Delta n}{n_D} \times 100\%$, где $n_D = 1.458$ – показатель преломления чистого кварцевого стекла ($\lambda = 589$ нм).

На рис. 3 приведена измеренная при оптимальной для конверсии тетрахлорида германия температуре зоны реакции калибровочная зависимость разности показателей преломления осажденного легированного и чистого кварцевого стекла от соотношения тетрахлоридов германия и кремния в парогазовой смеси при объемной доле O_2 не менее 0.93. Следует отметить, что для получения одного и того же показателя преломления слоя осажденного легированного стекла в данном случае требуется, по крайней мере, в три раза меньше тетрахлорида германия при том же количестве тетрахлорида кремния, чем следует из данных, приведенных в [18].

В данной работе для расчета расхода реагентов и послойного формирования заданного PPP сердцевины заготовок волоконных световодов использовалось уравнение (2) и данные, приведенные на рис. 2 и 3.

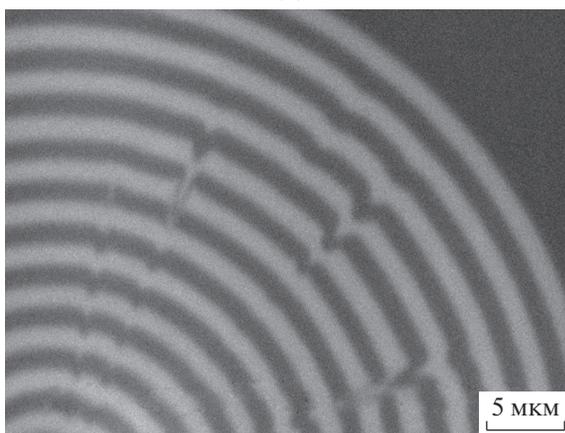
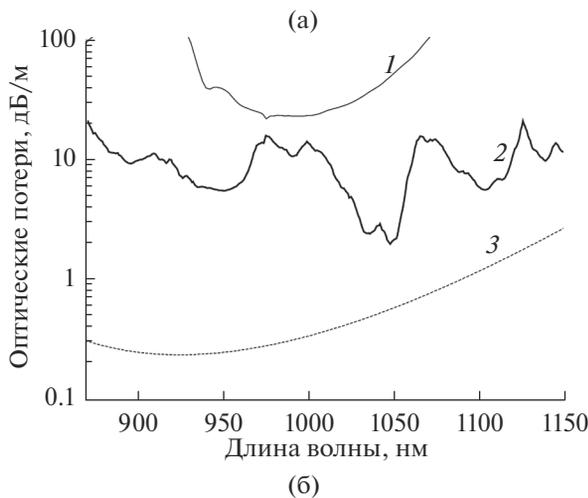


Рис. 4. Оптические потери в брэгговских световодах: 1 – световод, аналогичный световоду из работы [3], 2 – световод BF-1, 3 – теоретический расчет уровня оптических потерь в модельном световоде, представленном на рис. 1 (а); увеличенное изображение колец брэгговского зеркала, содержащих дефекты (получено при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL 5910LV) (б).

В первом эксперименте по изготовлению многослойного брэгговского световода было увеличено количество пар слоев с высоким и низким показателями преломления до 11. Слои с высоким показателем преломления изготавливались путем легирования кварцевого стекла оксидом германия в концентрации около 15 мол. %, слои с низким показателем преломления изготавливались из нелегированного кварцевого стекла. Сердцевина с пониженным показателем преломления формировалась путем фторирования кварцевого стекла. Из полученной заготовки был вытяннут световод BF-1, в котором были измерены оптические потери методом последовательного уменьшения его длины (cut-back method). Как видно из рис. 4а, оптические потери оказались почти на порядок меньше оптических потерь в конструкции брэгговского световода из работы [3] (нами

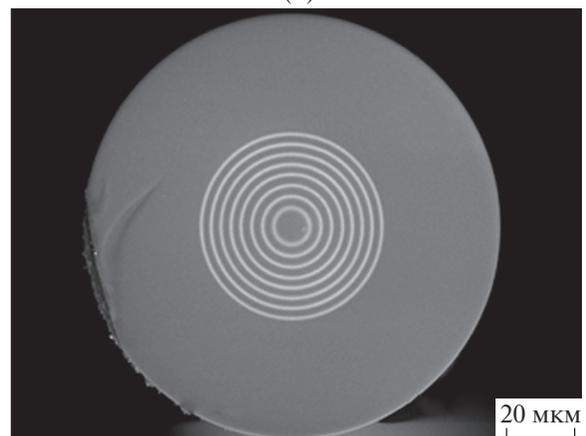
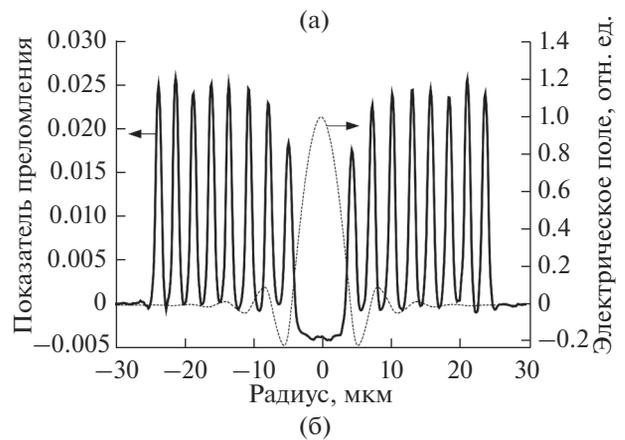


Рис. 5. ППП брэгговского световода BF-2, пунктирной линией указано распределение в ближнем поле интенсивности оптического поля брэгговской моды (а); микрофотография торца световода BF-2 (б).

был изготовлен световод с таким же профилем и измерены его потери). В то же время оптические потери выше расчетных более чем на порядок и спектр оптических потерь не плавный (в отличие от теоретической кривой), а содержит большое количество случайно расположенных пиков. Дополнительное исследование изготовленного световода BF-1 показало наличие большого количества дефектов в его сечении (см. рис. 4б), которые приводят к нарушению условия брэгговского отражения и резонансному (на определенных длинах волн) вытеканию брэгговской моды.

Данные дефекты, по всей видимости, возникли при осаждении слоев с низким показателем преломления поверх слоев с высоким показателем преломления, легированных до высокой концентрации оксидом германия. Действительно, при проплавлении слоя из нелегированного кварцевого стекла требовалась относительно высокая температура процесса. При этом легкоплавкий германо-силикатный слой мог деформироваться в процессе осаждения, что и наблюдается на рис. 4б.

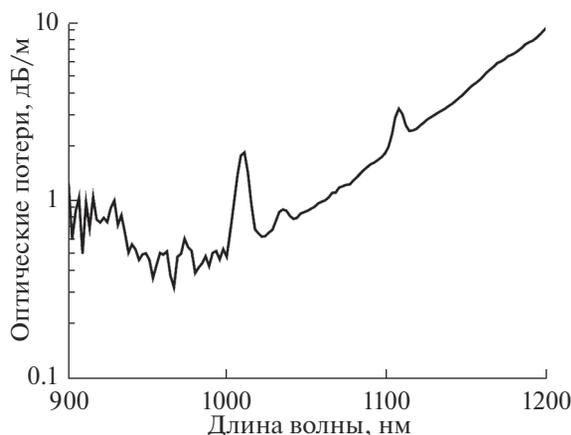


Рис. 6. Спектр оптических потерь в брэгговском световоде BF-2 при радиусе изгиба около 20 см.

С целью решения возникшей проблемы состав слоев с низким показателем преломления был оптимизирован. Так, для снижения температуры плавления слоя с низким показателем преломления он был солегирован 0.5 мас. % фтора и 1.5 мол. % оксида германия. Оба лиганда понижают температуру плавления, но при этом изменяют показатель преломления с разным знаком, так что в сумме показатель преломления слоя не изменился. Количество осаждаемых пар слоев было уменьшено до 8. Из полученной заготовки был вытянут световод BF-2.

Измеренный профиль показателя преломления и изображение торца световода BF-2, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа, представлены на рис. 5. Можно видеть, что оптимизация состава слоев с высоким и низким показателями преломления позволила подавить образование дефектов в структуре брэгговского световода. Данный факт также подтверждается прямым измерением оптических потерь в световоде BF-2 (см. рис. 6), которые снизились практически до уровня расчетных. Пики на длинах волн 1010 и 1110 нм связаны с перекачкой мощности из брэгговской моды в кольцевые моды вследствие фазового синхронизма на этих длинах волн (природа происхождения данных пиков подробно описана в работе [5]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Установлено, что последовательное осаждение в MCVD-процессе большого количества слоев с существенно различающимися параметрами (температурой плавления) приводит к образованию дефектов в осаждаемой структуре. Проведена оптимизация MCVD-процесса для получения брэгговских световодов с большим количеством пар слоев с высоким и низким показателями пре-

ломления. Подобраны оптимальный состав слоев и методика их осаждения, позволяющие получать бездефектные световоды с заданными параметрами. Реализована и исследована структура брэгговского световода, обладающая аномальной дисперсией в области 1 мкм и относительно низкими оптическими потерями (менее 1 дБ/м на рабочей длине волны).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена по госзаданию ФАНО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. *Melekhin V.N., Manenkov A.B.* Dielectric Tubes as a Waveguide with Small Attenuation // *J. Tech. Phys.* 1968. V. 38. P. 2113–2115.
2. *Yeh P., Yariv A.* Theory of Bragg fiber // *J. Opt. Soc. Am.* 1978. V. 68. P. 1196–1201.
3. *Bréchet F., Roy P., Marcou J., Pagnoux D.* Single-Mode Propagation into Depressed-Core-Index Photonic Bandgap fibre Designed for Zero-Dispersion Propagation at Short Wavelengths // *Electron. Lett.* 2000. V. 36(6). P. 514–515.
4. *Février S., Viale P., Gerome F., Leproux P., Roy P., Blondy J.M., Dussardier B., Monnom G.* Very Large Effective Area Singlemode Photonic Bandgap fibre // *Electron. Lett.* 2003. V. 39. P. 1240.
5. *Février S., Jamier R., Blondy J.-M., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Y., Guryanov A.N.* Low-loss Singlemode Large Mode Area All-Silica Photonic Bandgap Fiber // *Opt. Express.* 2006. V. 14. P. 562.
6. *Likhachev M.E., Levchenko A.E., Bubnov M.M., Février S., Jamier R., Humbert G., Salganskii M.Yu., Khopin V.F., Guryanov A.N.* Low-Loss Dispersion-Shifted Solid-Core Photonic Bandgap Bragg Fiber // *Optical Communication (ECOC), 2007, 33rd Eur. Conf. and Exhibition of. VDE, 2007, p. We 7.1.2.*
7. *Dianov E.M., Likhachev M.E., Février S.* Solid Core Photonic Bandgap Fibers for High Power Fiber Lasers // *IEEE Selected Topics Quantum Electron.* 2009. V. 15(1). P. 20–29.
8. *Gaponov D.A., Février S., Devautour M., Roy P., Likhachev M.E., Aleshkina S.S., Salganskii M.Y., Yashkov M.V., Guryanov A.N.* Management of the High-Order Mode Content in Large (40 μm) Core Photonic Bandgap Bragg Fiber Laser // *Opt. Lett.* 2010. V. 35. P. 2233.
9. *Février S., Gaponov D., Devautour M., Roy P., Daniault L., Hanna M., Papadopoulos D.N., Druon F., Georges P., Likhachev M.E., Salganskii M.Y., Yashkov M.V.* Photonic Bandgap Fibre Oscillators and Amplifiers // *Opt. Fiber Technol.* 2010. V. 16(6). P. 419–427.
10. *Daniault L., Gaponov D.A., Hanna M., Février S., Roy P., Druon F., Georges P., Likhachev M.E., Salganskii M.Y., Yashkov M.V.* High Power Femtosecond Chirped Pulse Amplification in Large Mode Area Photonic Bandgap Bragg Fibers // *Appl. Phys. B: Lasers and Optics.* 2011. V. 103(3). P. 615–621.

11. *Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Denisov A.N., Bubnov M.M., Salganskii M.Yu., Laptev A.Yu., Guryanov A.N., Uspenskii Y.A., Popov N.L., Février S.* Very-Large-Mode-Area Photonic Bandgap Bragg Fiber Polarizing in a Wide Spectral Range // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. P. 3566–3568.
12. *Gaponov D., Delahaye H., Lavoute L., Jossent M., Salganskii M., Likhachev M., Hideur A., Granger G., Février S.* High-Energy Self-Frequency-Shifted Solitons in Large Mode Area Bragg Fiber Pumped by 2 μm Chirped Pulse Amplifier // *High-Brightness Sources and Light-driven Interactions*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018). p. MM2C.7.
13. *Алешкина С.С., Лихачев М.Е., Успенский Ю.А., Бубнов М.М.* Экспериментально-теоретическое исследование оптических потерь в прямых и в изогнутых брэгговских световодах // *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40(10). С. 893–898.
14. *Uspenskii Yu.A., Popov N.L., Likhachev M.E., Aleshkina S.S., Bubnov M.M.* Leakage and Bend Losses in Solid-Core Bragg Fibers // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2015. V. 32. P. 1294–1308.
15. *Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L.* An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance // *IEEE J. Quant. Electron.* 1982. V. 18. P. 459–476.
16. *Колесова В.А., Шер Е.С.* Двухкомпонентные стекла системы $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы*. 1973. Т. 9. № 6. С. 1018–1020.
17. *Huang Y.Y., Sarkar A., Schultz P.C.* Relationship between Composition, Density and Refractive Index for Germania Silica Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 1978. № 27. P. 29–37.
18. *Modone E., Parisi G., Roba G.* Very Low-Loss and Highly Reproducible Optical Fibres by a Pressurized MCVD Method // *Alta Freq.* 1983. V. 52. № 2. P. 98–102.