

Запись длиннопериодных волоконных решеток ограниченным щелью пучком фемтосекундного излучения ($\lambda = 1026$ нм)*

А.В.Достовалов, А.А.Вольф, С.А.Бабин

Представлены результаты по созданию длиннопериодных волоконных решеток (ДПВР) в стандартном телекоммуникационном световоде SMF-28e+ по технологии фемтосекундной модификации показателя преломления. Предложен метод записи ограниченным щелью пучком, который позволяет записать ДПВР с меньшими нерезонансными потерями, при этом амплитуда резонансного пика заметно выше, чем в случае записи пучком с гауссовым профилем. Представленный метод может быть использован при записи ДПВР, используемых в качестве спектральных фильтров волоконных лазеров и чувствительных элементов сенсорных систем.

Ключевые слова: фемтосекундная модификация показателя преломления, длиннопериодные волоконные решетки, спектральные фильтры.

1. Введение

Длиннопериодные волоконные решетки (ДПВР) показателя преломления, наряду с волоконными брэгговскими решетками (ВБР), нашли широкое применение в телекоммуникационных системах в качестве оптоволоконных элементов для выравнивания спектра усиления эрбиевых усилителей [1], в сенсорных устройствах в качестве чувствительных элементов [2], в волоконных лазерах в качестве спектральных фильтров [3] и др. Наиболее распространенный метод создания ДПВР – модификация показателя преломления УФ излучением фоточувствительной сердцевины волоконного световода (ВС) [4].

Альтернативным и быстро развивающимся методом модификации показателя преломления внутри прозрачных материалов является технология фемтосекундной записи [5]. Ключевыми преимуществами данного метода являются возможность модификации нефоточувствительных материалов, например стандартных телекоммуникационных ВС без предварительного повышения фоточувствительности насыщением сетки стекла молекулярным водородом или ВС с чисто кварцевой сердцевиной, а также возможность записи решеток через защитное покрытие ВС без его разрушения [2] (например, прозрачные для ИК длин волн акрилат и полиимид), что значительно повышает механическую прочность ДПВР и ВБР. Одной из реализаций технологии создания ДПВР с помощью фемтосекундного излучения является метод поточечной ла-

зерной записи, при использовании которого изменение показателя преломления внутри сердцевины происходит за счет нелинейного поглощения лазерного излучения, сфокусированного с помощью микрообъектива [6]. Однако этот метод имеет ряд недостатков, в частности значительные нерезонансные потери и плохую воспроизводимость результатов из-за трудности точного позиционирования области модификации внутри сердцевины ВС на всей длине ДПВР, которая может достигать нескольких сантиметров.

В настоящей работе представлены результаты записи ДПВР с помощью ограниченного щелью пучка фемтосекундного излучения на длине волны 1026 нм [7] в стандартном телекоммуникационном световоде SMF-28e+, что позволяет преодолеть обозначенные выше недостатки поточечной схемы записи: существенно снизить уровень нерезонансных потерь, увеличить амплитуду резонансного пика, а также повысить воспроизводимость экспериментальных результатов.

2. Экспериментальная установка

Запись ДПВР осуществлялась на установке, схема которой представлена на рис.1. Излучение фемтосекундного иттербиевого лазера (длина волны 1026 нм, длительность импульса 232 фс, частота повторения 1 кГц), пройдя систему поворотных зеркал, фокусировалось в область сердцевины световода при помощи асферической линзы с фокусным расстоянием $f = 11$ мм ($NA = 0.3$). Необходимый уровень энергии импульса устанавливался с помощью системы ослабления пучка, состоящей из двух полуволновых пластинок и поляризатора.

Размер пучка на входе фокусирующей оптике определялся расширителем пучка. В экспериментах по записи ДПВР ограниченным щелью пучком непосредственно перед фокусирующей линзой устанавливалась щель длинной стороной вдоль оси волокна. Волоконный световод располагался на высокоточном автоматизированном трехкоординатном столе Aerotech ABL1000, который позволял перемещать образец в процессе записи с постоянной ско-

* Доложена на 6-м Российском семинаре по волоконным лазерам, Новосибирск, апрель 2014 г.

А.В.Достовалов, А.А.Вольф. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: dostovalov@iae.nsk.su

С.А.Бабин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 6 августа 2014 г., после доработки – 21 сентября 2014 г.

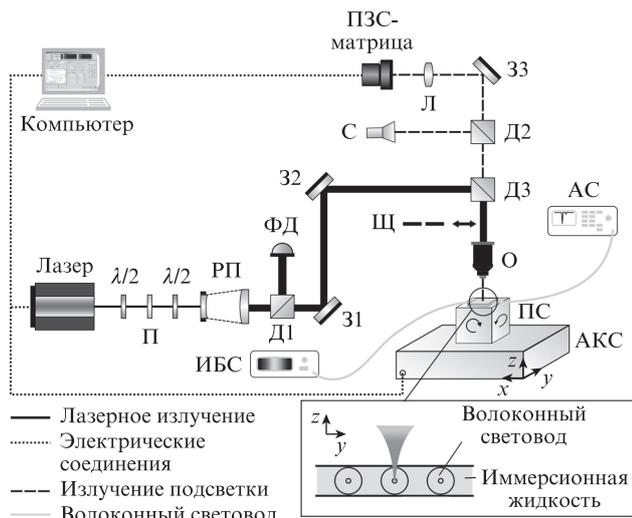


Рис.1. Схема экспериментальной установки записи ДПВР: АКС – автоматический координатный стол; ПС – поворотный стол; О – фокусирующая оптика; Щ – щель; АС – анализатор спектра; Д1–Д3 – дихроичные зеркала; З1–З3 – зеркала; Л – линза; РП – расширитель пучка; П – поляризатор; С – подсветка; ИБС – источник белого света; ФД – измеритель энергии импульсов.

ростом, при этом интервал времени между открытием и закрытием затвора лазера определялся периодом модуляции ДПВР. Механический поворотный стол позволял выставлять плоскостность поверхности образца по всей области записи. С помощью подсветки и камеры выполнялась настройка положения области фокусировки внутри сердцевины волокна. Энергия импульсов лазерного излучения контролировалась измерителем энергии импульсов Coherent J-10MT-10KHZ. Запись ДПВР производилась в волоконном световоде Corning SMF-28e+ (диаметр оболочки 125 мкм, диаметр сердцевины 8.2 мкм, длина волны отсечки 1260 нм) со снятым защитным покрытием. Для компенсации влияния кривизны поверхности ВС на фокусировку излучения световод располагался между двух параллельных пластин из плавленого кварца, пространство между которыми заполнялось иммерсионной жидкостью. Показатель преломления иммерсионной жидкости подбирался близким к показателю преломления оптического волокна для уменьшения скачка преломления на границах. Регистрация спектров волоконных решеток осуществлялась с помощью источника белого света Yokogawa AQ4305 и анализатора спектров Yokogawa AQ6370.

3. Результаты

Для проверки работоспособности предложенной схемы фокусировки была осуществлена пробная поточечная запись решетки показателя преломления с периодом 50 мкм внутри сердцевины волоконного световода при энергии лазерных импульсов 2 мкДж и скорости перемещения образца 5 мкм/с (рис.2). Видно, что область модификации перекрывает сердцевину волокна и не меняет своего положения относительно сердцевины при перемещении в продольном направлении, следовательно, может использоваться для записи ДПВР.

На рис.3 представлен спектр пропускания ДПВР в зависимости от длины созданной по описанной выше технологии решетки со следующими параметрами: общая

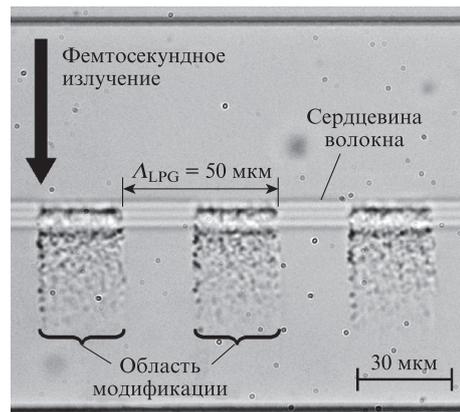


Рис.2. Фрагмент пробной записи ДПВР в стандартном волоконном световоде SMF-28e+.

длина решетки $L = 28$ мм, энергия импульса $E = 375$ нДж, период решетки $\Delta_{LPG} = 500$ мкм. Видно, что на начальном участке (до 16 мм) глубина пика поглощения в районе 1340 нм растет и достигает 9.3 дБ, при этом нерезонансные потери составляют 1 дБ в коротковолновой области спектра ($\lambda < \lambda_{LPG} = 1340$ нм, где λ_{LPG} – резонансная длина волны максимального пика поглощения ДПВР) и 0.5 дБ для длинноволновой области спектра ($\lambda > \lambda_{LPG}$). При увеличении длины ДПВР до 28 мм глубина начального пика поглощения уменьшается до 3.4 дБ и появляются резонансные пики на других длинах волн, что говорит об эффективной связи с другими оболочечными модами. Еще одним недостатком прямой поточечной схемы записи

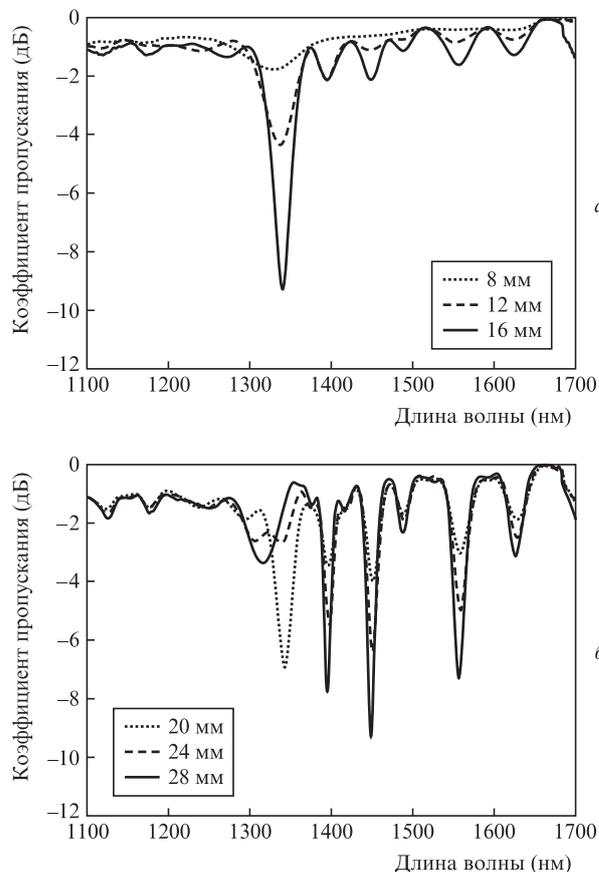


Рис.3. Спектры пропускания ДПВР при поточечной записи и длине решетки 8, 12 и 16 мм (а), а также 20, 24 и 28 мм (б).

является высокая чувствительность спектра пропускания к положению области модификации внутри сердцевинки волокна, что приводит к низкой воспроизводимости результатов.

Данные проблемы также отмечались в других работах, связанных с прямой поточечной записью ДПВР фемтосекундным излучением [8]. Главным образом они вызваны асимметричностью размеров области модификации в продольном и поперечном направлениях. Кроме того, рост нерезонансных потерь связан с образованием неоднородностей, на которых происходит рассеяние излучения [9]. Помимо этого, поскольку поперечный размер области модификации (1.4 мкм) значительно меньше диаметра сердцевинки, требуется точная настройка положения лазерного пучка относительно сердцевинки на всей длине решетки. Например, при длине решетки 10 мм и отклонении от начального положения на уровне 2 мкм волокно должно быть выровнено с точностью выше 0.01°.

По этой причине метод записи, который позволил бы увеличить поперечный размер области модификации без существенного изменения продольного, может значительно улучшить спектральные характеристики ДПВР, а также повысить воспроизводимость результатов. В предыдущих работах по фемтосекундной модификации ВС были предложены различные методы увеличения перекрытия области модификации и поля моды сердцевинки, в том числе непрерывное сканирование в поперечном к оси волокна направлении [10], использование фокусирующей оптики с малой числовой апертурой [11]. При этом амплитуда основного пика возрастала, однако уровень нерезонансных потерь также увеличивался за счет роста рассеяния на неоднородностях в сердцевине волокна и неоднородного распределения области модификации.

Для создания радиально-симметричных модификаций в объеме прозрачных материалов были продемонстрированы методы записи астигматическим пучком с использованием цилиндрической линзы [12] и пучком, ограниченным щелью [13]. Отсутствие требования высокой точности настройки, а также возможность быстрого изменения геометрии пучка делают метод записи ограниченным щелью пучком более предпочтительным для записи волноводных структур показателя преломления. Так, например, авторами работы [7] было показано, что при модификации плавленного кварца пучками, ограниченными щелью, поперечное сечение области изменения показателя преломления имеет радиально-симметричное распределение, по этой причине данный метод является привле-

кательным для записи ДПВР с радиально-симметричным распределением изменения показателя преломления поперек волокна.

На рис.4,а представлена схема записи ДПВР ограниченным щелью пучком. Изначально круглый пучок (с диаметром D_0) после прохождения щели преобразуется в пучок с различными размерами вдоль (D_0) и поперек (D_s , зависит от размера щели) волокна. На рис.4,б, в представлено распределение интенсивности в плоскости yz при стандартной фокусировке гауссова пучка и для пучка, ограниченного щелью. Для гауссова пучка распределение интенсивности имеет вид [14]

$$I_c(x, y, z) = \frac{1}{1 + z^2/z_0^2} \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{r_0^2(1 + z^2/z_0^2)}\right], \quad (1)$$

а для пучка с эллиптическим сечением [13]

$$I_e(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{1 + z^2/z_0^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + z^2/z_0^{*2}}} \times \exp\left[\frac{-2x^2}{r_0^2(1 + z^2/z_0^2)}\right] \exp\left[\frac{-2y^2}{r_0^{*2}(1 + z^2/z_0^{*2})}\right]. \quad (2)$$

В этих формулах начало координат совпадает с положением геометрического фокуса пучка; $r_0 = \lambda/(\pi NA)$ – размер перетяжки пучка в точке фокуса; λ – длина волны излучения; $z_0 = kr_0^2/2$ – рэлеевская длина; $k = k_0n$ – волновое число; n – показатель преломления среды; k_0 – волновое число в вакууме; $r_0^* = (R_x/R_y)r_0$; $z_0^* = kr_0^{*2}/2$; R_x, R_y – полуоси эллипса. Таким образом, в случае пучка, ограниченного щелью, интенсивность имеет практически радиально-симметричное распределение и поперечный размер модификации значительно возрастает.

Для тестирования данного метода записи были проведены модификации показателя преломления с использованием ограниченного щелью пучка при различных энергиях импульса в диапазоне 1.1–1.6 мкДж и времени воздействия 0.5–1 с (рис.4,з). Видно, что в данном случае размеры области модификации поперек (w_s) и вдоль (w_0) волокна различаются. Отношение w_s/w_0 , примерно равное 5, зависит от отношения диаметра пучка ($D_0 = 6$ мм) к ширине щели ($D_s = 1$ мм), причем чем меньше ширина щели при постоянном диаметре пучка, тем более широкую область модификации в поперечном к оси волокна направлении можно получить. Как видно из рис.4, при данном размере пучка ширина щели в 1 мм позволяет

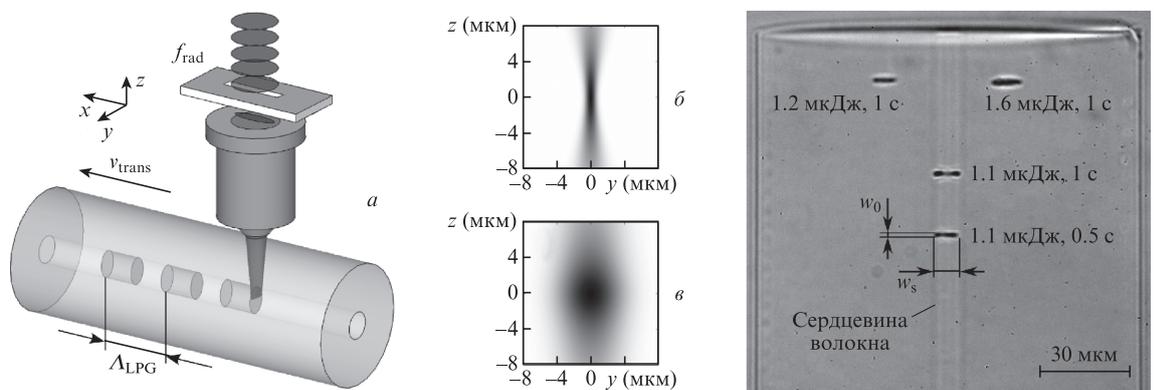


Рис.4. Схема записи ДПВР ограниченным щелью пучком (а), расчетное распределение интенсивности для случая стандартной фокусировки гауссова пучка (б) и для пучка, ограниченного щелью (в), а также изображение модификаций, полученных ограниченным щелью пучком (г).

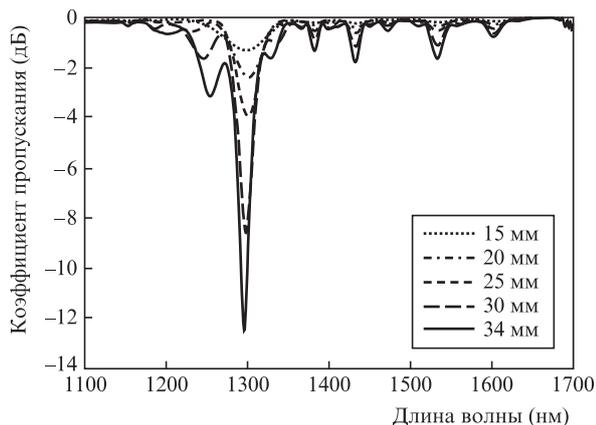


Рис.5. Спектры пропускания ДПВР, записанных ограниченным щелью пучком при различных длинах решетки.

полностью модифицировать сердцевину волокна и поэтому является оптимальной при данном диаметре сердцевины волокна, по этой причине в дальнейших экспериментах использовался именно такой размер щели.

На рис.5 представлены спектры пропускания ДПВР при различных длинах решетки, записанной с использованием ограниченного щелью пучка с параметрами $E = 1$ мкДж, $L = 34$ мм, $\Lambda_{LPG} = 500$ мкм. Потери в коротковолновой области уменьшились до 0.17 дБ, в длинноволновой до 0.2 дБ, при этом удалось записать решетку большей длины, а глубина пика поглощения в данном случае возросла до 12.6 дБ. Таким образом, продемонстрировано улучшение характеристик создаваемых решеток за счет применения предложенного метода записи.

Как известно, повторное воздействие фемтосекундного излучения на модифицированную ранее область может привести к дополнительному увеличению модуляции показателя преломления в этой области [10]. Поэтому для увеличения глубины модуляции ДПВР и, следовательно, увеличения амплитуды резонансного пика был применен метод многократной записи решетки, т.е. после первой записи производилась вторая из той же начальной точки по x , что и первая, но с небольшим (~ 1 мкм) смещением поперек волокна вдоль z . Спектры ДПВР, записанной в несколько проходов в случае пучка с гауссовым профилем ($E = 375$ нДж, $L = 20$ мм, $\Lambda_{LPG} = 500$ мкм) и пучка, ограниченного щелью ($E = 1.05-1.1$ мкДж, $L = 20$ мм, $\Lambda_{LPG} = 500$ мкм), представлены на рис.6.

Видно, что в первом случае (рис.6,а) данный способ увеличения амплитуды приводит к существенному росту нерезонансных потерь относительно первоначальной записи и, кроме того, амплитуда резонансного пика из-за возбуждения других оболочечных мод перестает расти и, наоборот, заметно снижается. При использовании метода записи ограниченным щелью пучком (рис.6,б) уровень нерезонансных потерь увеличивается незначительно, зато глубина пика поглощения увеличивается до 18.3 дБ.

На рис.7 представлено сравнение экспериментального и расчетного спектров ДПВР. Расчет осуществлялся для параметров ДПВР и ВС, представленных выше, и был основан на математической модели теории связанных мод и на решении связанных уравнений методом Т-матриц [15]. В расчетах использовано значение модуляции показателя преломления ДПВР 8.2×10^{-4} . Из сравнения данных спектров видно, что пик поглощения ДПВР на $\lambda = 1295$ нм соответствует связи мод LP_{01} и LP_{02} , тогда как другие пики

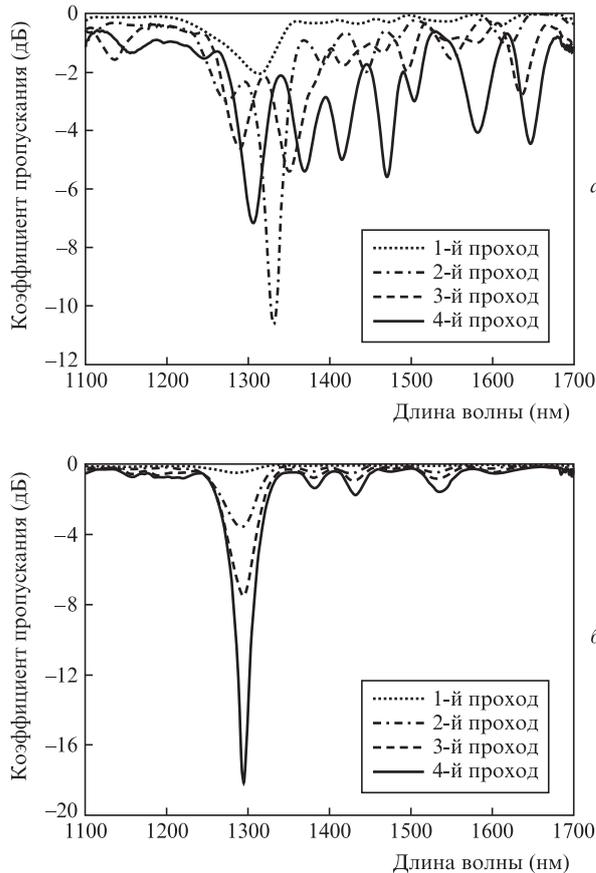


Рис.6. Спектры пропускания ДПВР, записанной в несколько проходов в случае пучка с гауссовым профилем (а) и пучка, ограниченного щелью (б).

поглощения являются резонансами, связанными с модами высшего порядка LP_{04} и LP_{05} .

Известно, что связь между модами оболочки и сердцевины зависит от показателя преломления внешней среды [2]. Для ДПВР, записанной в несколько проходов ограниченным щелью пучком, был измерен спектр пропускания в воздушной среде (рис.8). Смещение в коротковолновую область пиков ДПВР в присутствии иммерсионной жидкости совпадает с результатами, полученными в работах по применению ДПВР в рефрактометрии [16]. Кроме этого, сравнение спектров ДПВР в различных внешних условиях также свидетельствует о связи мод LP_{01} и LP_{02} для основного пика поглощения ДПВР, поскольку, как известно,

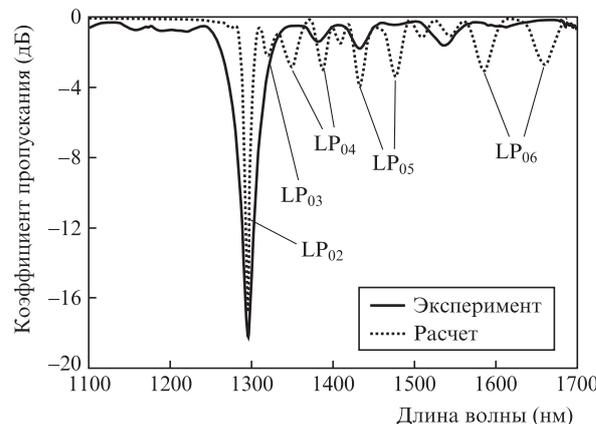


Рис.7. Сравнение экспериментального и расчетного спектров ДПВР.

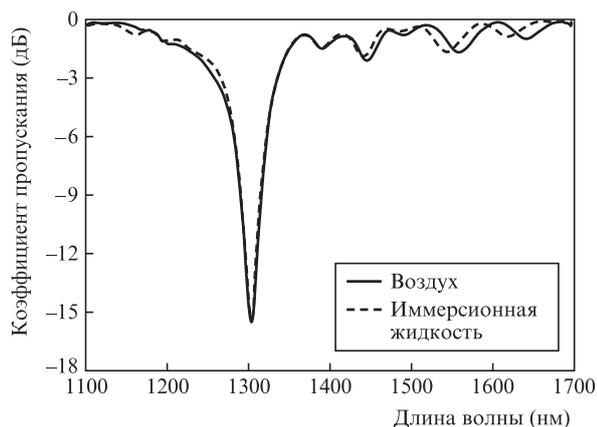


Рис.8. Сравнение спектров пропускания ДПВР в иммерсионной жидкости и в воздухе.

смещение для мод низшего порядка гораздо меньше, чем для мод более высоких порядков [17]. Необходимо отметить, что представленные спектры ДПВР являются не типичными для традиционной ДПВР, где наблюдается увеличение амплитуды пиков с увеличением порядка оболочечной моды [18], хотя подобное поведение спектра ДПВР, записанной фемтосекундным излучением в световоде SMF-28, наблюдалось в [19].

4. Заключение

Продемонстрирована запись ДПВР в нефоточувствительных световодах ограниченным щелью пучком фемтосекундного излучения. За счет более равномерной модификации показателя преломления внутри сердцевины волокна данный метод позволяет записать ДПВР с нерезонансными потерями не более 0.2 дБ, при этом амплитуда резонансного пика заметно выше, чем при записи пучком с гауссовым профилем. Показано, что амплитуду пика ДПВР можно увеличить до 18.3 дБ посредством многократной записи. Представленный метод может быть использован при записи ДПВР, используемых в качестве спектральных фильтров волоконных лазеров, поскольку

позволяет создавать решетки в нефоточувствительных световодах с минимальными нерезонансными потерями, а также в качестве сенсоров, поскольку позволяет записывать ДПВР без снятия защитной оболочки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00118).

1. Wysocki P.F., Judkins J.B., Espindola R.P., Andrejco M., Vengsarkar A.M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9**, 1343 (1997).
2. Bhatia V., Vengsarkar A.M. *Opt. Lett.*, **21**, 692 (1996).
3. Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J.E. *J. Lightwave Technol.*, **14**, 58 (1996).
4. Dianov E.M., Starodubov D.S., Vasiliev S.A., Frolov A.A., Medvedkov O.I. *Opt. Lett.*, **22**, 221 (1997).
5. Osellame R., Cerullo G., Ramponi R. *Femtosecond Laser Micromachining* (Berlin: Springer, 2012).
6. Hindle F., Fertein E., Przygodzki C., Durr F., Paccou L., Bocquet R., Niay P., Limberger H.G., Douay M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16**, 1861 (2004).
7. Ams M., Marshall G., Spence D., Withford M. *Opt. Express*, **13**, 5676 (2005).
8. Zhang N., Yang J.-J., Wang M., Zhu X.-N. *Chin. Phys. Lett.*, **23**, 3281 (2006).
9. Williams R.J., Jovanovic N., Marshall G.D., Smith G.N., Steel M.J., Withford M.J. *Opt. Express*, **20**, 13451 (2012).
10. Li B., Jiang L., Wang S., Tsai H.-L., Xiao H. *Opt. Laser Technol.*, **43**, 1420 (2011).
11. Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T., Watanabe M., Kazansky P.G., Hirao K. *Opt. Lett.*, **24**, 646 (1999).
12. Cerullo G., Osellame R., Taccheo S., Marangoni M., Polli D., Ramponi R., Laporta P., De Silvestri S. *Opt. Lett.*, **27**, 1938 (2002).
13. Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K., Masuda M., Toyoda K., Kawachi M., Shihoyama K. *Opt. Lett.*, **28**, 55 (2003).
14. Laufer G. *Introduction to Optics and Lasers in Engineering* (New York: Cambridge University Press, 1996).
15. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press, 1999).
16. Patrick H., Kersey A., Bucholtz F. *J. Lightwave Technol.*, **16**, 1606 (1998).
17. Libish T.M., Bobby M.C., Linesh J., Mathew S., Pradeep C., Nampoori V.P.N., Radhakrishnan P. *Optoelectron. Lett.*, **8**, 101 (2012).
18. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С., Медведков О.И., Протопопов В.Н. *Квантовая электроника*, **24** (2), 151 (1997).
19. Sun X.Y., Huang P., Zhao J.F., Zhang N., Zhu X.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8796**, 87962K (2013).