

Запись брэгговских решёток в одномодовых волоконных световодах с помощью УФ фемтосекундного излучения

К.А.Загорюлько, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов, А.Драгомир, Д.Н.Никогосян

Впервые сообщается о записи брэгговских решёток в одномодовых волоконных световодах с помощью фазовой маски и УФ излучения в виде фемтосекундных импульсов (220 фс, 264 нм) с интенсивностью 31–77 ГВт/см². При этом глубина модуляции фотоиндуцированного показателя преломления достигала 1.9×10^{-3} в телекоммуникационном волокне SMF-28, насыщенном H₂, и 1.1×10^{-3} в волокне Nufern GF1 без насыщения H₂. Зависимость наведенного показателя преломления от интенсивности при равных дозах облучения насыщенного H₂ волокна SMF-28 указывает на то, что в нём наведенный показатель преломления связан с нелинейным поглощением.

Ключевые слова: волоконные решётки, фемтосекундные импульсы, фотоиндуцированный показатель преломления.

Для изготовления брэгговских и длиннопериодных решёток (БР и ДПР) в волоконных световодах (ВС) широко используется УФ излучение эксимерного KrF-лазера (248 нм) и второй гармоники непрерывного аргонового лазера (244 нм) [1, 2]. Под действием этого излучения в стекле сердцевины ВС может возникать необратимое изменение показателя преломления (ПП). Стандартное телекоммуникационное волокно типа SMF-28 с низким содержанием GeO₂ (молярная концентрация 3 %) имеет низкую фоточувствительность, и для увеличения наведенного ПП обычно используется предварительное насыщение этого ВС водородом [3]. Было показано, что в насыщенных H₂ германосиликатных ВС фоточувствительность увеличивается почти экспоненциально с ростом энергии УФ фотона [4] и механизм фотоиндуцированного изменения ПП в основном имеет однофотонный характер. Сообщалось, что при облучении волокон SMF-28 эксимерным F₂-лазером (157 нм) доза облучения, необходимая для записи ДПР, существенно снижалась (более чем на два порядка по сравнению с дозой при облучении на длине волны $\lambda = 248$ нм) [5, 6]. Однако при использовании этого лазера возникают трудности, обусловленные поглощением УФ излучения в воздухе, стекле оболочке и фазовой маске (в случае записи БР).

Эффекта, связанного с уменьшением длины волны, можно достичь, используя многофотонное поглощение при достаточно высокой интенсивности. В этом случае длина волны может не попадать в полосу поглощения, а энергия возбуждения может оказаться даже выше, чем энергия кванта на $\lambda = 157$ нм (7.9 эВ). Фемтосекундные лазеры, в принципе, обеспечивают высокую интенсивность за счёт малой длительности импульса. Также следует подчеркнуть, что фемтосекундными импульсами

можно облучать ВС без их повреждения или пробоя излучением с интенсивностями на несколько порядков выше, чем при использовании наносекундных импульсов эксимерных лазеров. Так, было сообщено о записи ДПР фемтосекундными импульсами на $\lambda = 800$ нм с интенсивностью около 10^{14} Вт/см². Для достижения столь высокой интенсивности применялась мощная лазерная система (задающий генератор с усилителем) на Ti:сапфире [7].

Используя гармоники ИК излучения фемтосекундных лазеров, можно уменьшить число фотонов, необходимых для многофотонного поглощения, и, тем самым, существенно снизить интенсивность. Сама же генерация гармоник весьма эффективна для фемтосекундных лазеров. В работе [8] была продемонстрирована запись ДПР с помощью излучения 2-й гармоники фемтосекундного лазера на Ti:сапфире на $\lambda = 400$ нм с интенсивностью $\sim 10^{10}$ Вт/см². При этом, в отличие от работы [7], не требовался усилитель. Также была продемонстрирована эффективная запись ДПР с помощью излучения 4-й гармоники фемтосекундного лазера на Nd:стекле (264 нм) [9, 10].

Для записи БР (период около 0.5 мкм) применяются различные интерференционные схемы, и существует мнение, что фемтосекундные лазеры малоприспособны для этой цели из-за низкой временной когерентности. Однако при использовании фазовых масок важна не временная, а пространственная когерентность пучка. Она может быть достаточно высокой у фемтосекундных лазеров. Совсем недавно [11, 12] БР были записаны с помощью специально изготовленных фазовых масок и высокоинтенсивного ($\sim 10^{13}$ Вт/см²) фемтосекундного излучения на $\lambda = 800$ нм. В настоящем письме мы сообщаем о записи БР с использованием стандартной фазовой маски и излучения 4-й гармоники фемтосекундного лазера на Nd:стекле (264 нм).

Применялся лазер Twinkle (производство фирмы Light Conversion Ltd., Литва), имеющий следующие параметры: длина волны 264 нм, энергия в импульсе 300 мкДж, длительность импульса 220 фс, диаметр пучка по полуширине 3 мм, частота следования 27 Гц. С помощью

К.А.Загорюлько, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: zagorulko@fo.gpi.ru

А.Драгомир, Д.Н.Никогосян. Department of Physics, National University of Ireland, University College Cork, Cork, Ireland

цилиндрической линзы из плавленого кварца с $F = 218$ мм излучение фокусировалось на ВС, с которого удалялась полимерная оболочка и перед которым на расстоянии ~ 100 мкм от сердцевины располагалась фазовая маска. Изменение интенсивности на волокне достигалось изменением расстояния от линзы до волокна. Фазовая маска имела период 1.07 мкм. Спектры пропускания записанных БР регистрировались с помощью суперлюминесцентного диода и спектроанализатора Ando AQ 6317C с разрешением 0.05 нм.

Сначала БР были записаны на волокне SMF-28, насыщенном H_2 (в течение двух дней при давлении 130 атм и температуре 80 °С), с использованием методики сканирующего пучка и фазовой маски [1]. Для этого в пучок перед маской и волокном помещались две щели. Первая щель шириной 2 мм находилась на расстоянии 5 см от маски для выделения наиболее интенсивной части пучка и получения достаточно равномерного распределения интенсивности по сечению пучка. Вторая щель шириной 3 мм закреплялась вместе с маской и волокном и ограничивала длину записываемой решётки. Держатель маски, волокна и этой щели перемещался поперёк пучка с помощью управляемого компьютером транслятора с шагом 100 мкм. Таким образом достигалось однородное облучение участка волокна длиной 3 мм пятном размером 2×0.15 мм.

На рис. 1, а, б представлены спектры пропускания двух

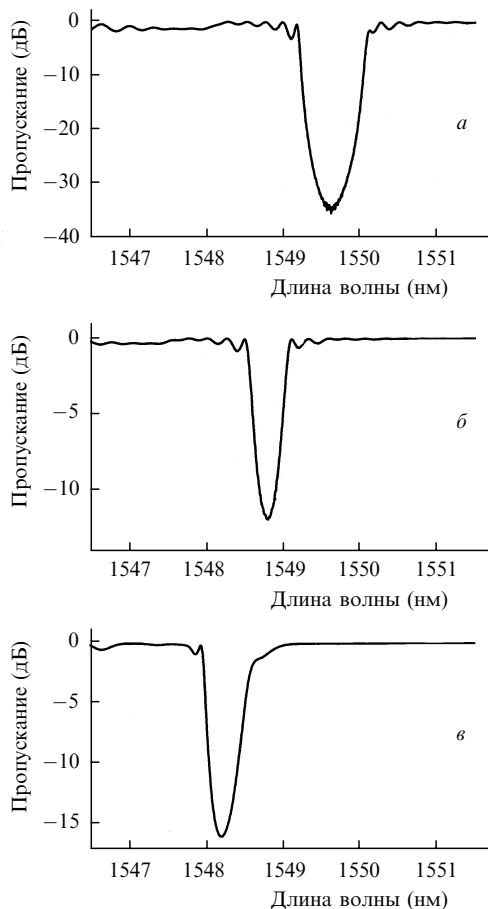


Рис. 1. Спектры пропускания БР для насыщенного H_2 волокна SMF-28 при интенсивности в импульсе $I = 47$ ГВт/см², полной дозе облучения $D_{tot} = 0.68$ кДж/см² (а) и $I = 31$ ГВт/см², $D_{tot} = 0.63$ кДж/см² (б), а также для волокна Nufern GF1 при $I = 77$ ГВт/см², $D_{tot} = 4.7$ кДж/см² (в).

БР, записанных при почти равных дозах облучения (соответственно 0.68 и 0.63 кДж/см²), но с разными интенсивностями (47 и 31 ГВт/см²). Резкое различие пиков потерь в спектрах пропускания БР (35 и 12 дБ) явно указывает на нелинейный характер поглощения в процессе записи (вероятно, двухфотонное поглощение). Видно, что спектры БР достаточно симметричны и имеют типичные спектральные компоненты на краях, характерные для однородных решёток [1].

Затем мы попытались записать БР в волокне Nufern GF1 с повышенной фоточувствительностью (волокно специально разработано для записи БР) без насыщения его H_2 . При этом использовался весь пучок (щели убирались). При интенсивности 77 ГВт/см² и дозе облучения 4.7 кДж/см² удалось записать решётку с пиком поглощения 16 дБ (рис. 1, в). В случае волокна Nufern GF1 спектр пропускания БР несколько асимметричен, вероятно, из-за неоднородного профиля интенсивности по сечению пучка.

Полагая длину решётки равной 3 мм, можно вычислить соответствующую модуляцию наведенного ПП по теории связанных мод [1]. Для насыщенного H_2 волокна SMF-28 зависимости рассчитанных таким образом изменений ПП (глубина модуляции) от дозы облучения при разных интенсивностях показаны на рис. 2, а. Максимальные значения наведенного ПП составляют 1.9×10^{-3} для пика в 35 дБ и 0.85×10^{-3} для пика в 12 дБ. Эти различия для двух интенсивностей указывают на нелинейность поглощения УФ излучения в процессе записи решёток. Заметим, что отношение наклонов начальных частей кривых (около 1.5) согласуется с отношением интенсивностей. Важно также отметить, что при интенсивности 47 ГВт/см² не наблюдается насыщения роста ПП при максимальной дозе, которое имеет место при интенсивности 31 ГВт/см².

Зависимость рассчитанного изменения ПП от дозы (в предположении однородности решётки длиной 3 мм) для волокна Nufern GF1 представлена на рис. 2, б. Макси-

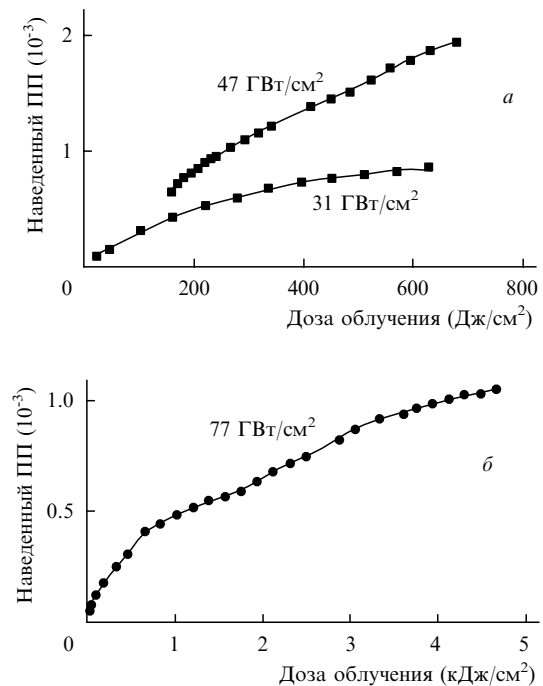


Рис. 2. Зависимости наведенного ПП от дозы облучения для волокон SMF-28 (а) и Nufern GF1 (б) при разных интенсивностях.

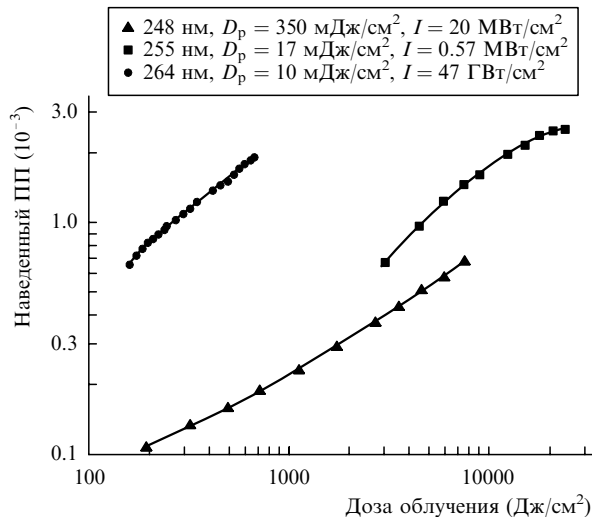


Рис.3. Зависимости наведенного ПП от дозы облучения в волокне SMF-28, насыщенном H_2 , при облучении различными лазерами (D_p – плотность энергии в импульсе).

малое значение наведенного ПП равно 1.1×10^{-3} при дозе облучения 4.7 кДж/см^2 . В работе [13] сообщалось о записи БР в более фоточувствительном волокне Nufern GF1AA с помощью второй гармоники излучения импульсного лазера на парах меди (длина волны 255 нм, частота следования импульсов 6 кГц, плотность энергии в импульсе 17 мДж/см^2 , интенсивность в импульсе 0.57 МВт/см^2). Для получения наведенного ПП 1.0×10^{-3} потребовалась доза 8 кДж/см^2 . В нашем случае при облучении менее фоточувствительного волокна то же самое изменение ПП достигалось при дозе 4.2 кДж/см^2 , т.е. почти в два раза меньшей. В отличие от работы [13] мы не наблюдали насыщения роста наведенного ПП. Вероятно, это указывает на различия в природе фоточувствительности.

На рис.3 показано сравнение наших результатов по облучению волокна SMF-28, насыщенного H_2 (при интенсивности 47 ГВт/см^2), с результатами работ, в которых использовались лазеры с близкими длинами волн: 255 нм [13] и 248 нм [14] (эксимерный КгF-лазер, плотность энергии в импульсе 350 мДж/см^2 , интенсивность в импульсе $\sim 20 \text{ МВт/см}^2$). Для получения изменения ПП 1.9×10^{-3} с помощью лазера с $\lambda = 255 \text{ нм}$ требовалась

доза облучения $\sim 12.5 \text{ кДж/см}^2$, а в нашем случае – 0.68 кДж/см^2 , т.е. в 18 раз меньше. Для лазера с $\lambda = 248 \text{ нм}$ изменение ПП достигало 6.5×10^{-4} при дозе $\sim 7 \text{ кДж/см}^2$, т.е. в 44 раза большей, чем в нашем случае. Таким образом, использование фемтосекундного УФ излучения с $\lambda = 264 \text{ нм}$ для записи БР более эффективно по сравнению с использованием наносекундного излучения на $\lambda = 248$ и 255 нм . Можно предположить, что это связано с двухфотонным поглощением.

Итак, мы показали, что можно с успехом применять фемтосекундное УФ излучение для записи БР высокого качества в одномодовых ВС с помощью фазовой маски. Высокая эффективность записи БР, вероятно, обусловлена высокой энергией возбуждения (9.4 эВ) в результате двухфотонного поглощения.

Авторы выражают благодарность С.Фахи (S.Fahy) за внимание к работе, Ю.В.Ларионову и А.А.Рыбалтовскому за полезные дискуссии. Также авторы благодарят Научный фонд Ирландии за финансовую поддержку.

1. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (New York: Acad. Press, 1999).
2. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Norwood, USA: Artech House Optoelectronics Library, 1999).
3. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. *Electron. Lett.*, **29**, 1191 (1993).
4. Grubsky V., Starodubov D.S., Feinberg J. *Opt. Lett.*, **24**, 729 (1999).
5. Chen K.P., Herman P.R., Tam R., Zhang J. *Electron. Lett.*, **36**, 2000 (2000).
6. Chen K.P., Herman P.R., Zhang J., Tam R. *Opt. Lett.*, **26**, 771 (2001).
7. Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T., Watanabe M., Kasansky P.G., Hirao K. *Opt. Lett.*, **24**, 646 (1999).
8. Загорюлько К.А., Крюков П.Г., Ларионов Ю.В., Рыбалтовский А.А., Дианов Е.М., Воробьев Н.С., Смирнов А.В., Щелев М.Я., Прохоров А.М. *Квантовая электроника*, **31**, 999 (2001).
9. Dragomir A., Nikogosyan D.N., Ruth A.A., Zagorulko K.A., Kryukov P.G. *Electron. Lett.*, **38**, 269 (2002).
10. Dragomir A., Nikogosyan D.N., Zagorulko K., Kryukov P.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4876**, 313 (2002).
11. Mihailov S.J., Smelser C.W., Lu P., Walker R.B., Grobnc D., Ding H., Unruh J. *Proc. OFC'2003* (Atlanta, USA, 2003, paper PD30-1).
12. Mihailov S.J., Smelser C.W., Lu P., Walker R.B., Grobnc D., Ding H., Henderson G., Unruh J. *Opt. Lett.*, **28**, 995 (2003).
13. Illy E.K., Booth H.J. *Proc. ECOC'2002* (Copenhagen, 2002, paper M602).
14. Swart P.L., Shlyagin M.G., Chtcherbakov A.A., Spirin V.V. *Electron. Lett.*, **38**, 1508 (2002).