

Брэгговские решетки второго порядка в одномодовых халькогенидных световодах

М.Бернье, К.Асятрян, Р.Уэлли, Т.Галстян, С.А.Васильев,
О.И.Медведков, В.Г.Плотниченко, П.И.Гнусин, Е.М.Дианов

В одномодовом волоконном световоде на основе халькогенидного стекла (As_2S_3) излучением гелий-неонового лазера записаны брэгговские решетки, резонансная длина волны которых во втором порядке дифракции находится в ближнем ИК диапазоне спектра. Запись проводилась стандартным для изготовления брэгговских решеток в германо-силикатных волоконных световодах методом: с помощью фазовой маски, обеспечивающей эффективную дифракцию записываемого излучения в $+1$ -й и -1 -й порядки. В спектрах записанных решеток отсутствуют резонансы, связанные с возбуждением мод оболочки волоконного световода, что обусловлено фоточувствительностью материала оболочки.

Ключевые слова: одномодовые халькогенидные световоды, брэгговские решетки, фазовые маски.

1. Введение

Волноводные структуры на основе халькогенидного стекла имеют важное практическое значение вследствие малых оптических потерь в ИК области спектра (1–12 мкм) [1–3]. Высокая оптическая нелинейность халькогенидного стекла делает их перспективными для создания полностью волоконных оптических перестраиваемых фильтров, переключателей, модуляторов и других нелинейных устройств [4–6].

Облучение халькогенидного стекла излучением оптического диапазона приводит к целому ряду фотоиндуцированных явлений, одним из которых является изменение показателя преломления стекла, которое сохраняется после окончания действия излучения. Это изменение может быть использовано для создания планарных волноводов и решеток показателя преломления [7–10].

Изготовление волоконных брэгговских решеток (ВБР) в халькогенидных волоконных световодах (ВС) имеет ряд особенностей по сравнению с изготовлением решеток в германо-силикатных ВС. Прежде всего, для записи используется более длинноволновое излучение ($\lambda = 0.5$ –1 мкм), попадающее в край полосы фундаментального поглощения халькогенидного стекла. Отметим, что при выборе лазерного источника для записи фотоиндуцированных решеток в халькогенидном ВС следует учитывать то обстоятельство, что химические составы стекла сердцевины и оболочки близки, и поэтому глубина проникновения записываемого излучения должна быть сравнима с диаметром световода, а не с диаметром его сердцевины, как в случае германо-силикатных ВС, где оболочка из легированного кварцевого стекла не погло-

щает записываемое УФ излучение. Кроме того, халькогенидные стекла имеют значительно больший показатель преломления, следствием чего является существенное уменьшение периода решетки. Так, волоконная брэгговская решетка с резонансной длиной волны 1550 нм для резонанса первого порядка в стекле на основе As_2S_3 должна иметь период ~ 350 нм. Столь малый период решетки при относительно больших длинах волн записываемого излучения существенно усложняет схемы записи брэгговских решеток в халькогенидных волноводных структурах.

Несмотря на указанные трудности, для записи ВБР в первом порядке дифракции в одномодовых халькогенидных световодах было предложено несколько методик. Так, в работе [9] ВБР с резонансной длиной волны 1550 нм были записаны в одномодовом ВС на основе стеклообразного селенида мышьяка (As_2Se_3) с использованием призмы с высоким показателем преломления и иммерсионной жидкости. В работе [10] ВБР в первом порядке была записана в одномодовом ВС на основе As_2S_3 излучением гелий-неонового лазера при значительном наклоне пучка (79°) к плоскости фазовой маски, обеспечивающей дифракцию в 0-й и -1 -й порядки.

К сожалению, эти и другие описанные в литературе методы записи ВБР уступают по технологической простоте и качеству полученных решеток традиционной методике записи с использованием фазовой маски, обеспечивающей дифракцию в $+1$ -й и -1 -й порядки [11]. Эта методика, с успехом применяемая для изготовления с помощью лазерного УФ излучения высококачественных ВБР в первом порядке дифракции в волоконных световодах, легированных германием, не может применяться в халькогенидных световодах при записи ВБР в первом порядке из-за их малого периода и большой длины волны записываемого излучения.

Для устранения описанных проблем мы предлагаем использовать в халькогенидных световодах брэгговские резонансы высокого порядка, что возможно благодаря нелинейной зависимости наведенного показателя преломления от дозы облучения в стеклах данного типа. Запись решеток во втором порядке дифракции широко при-

M. Bernier, K. Asatryan, R. Vallée, T. Galstian. Center for Optics, Photonics and Lasers, Department of Physics, Engineering Physics and Optics, Université Laval, pavillon d'Optique-photonique, 2375, rue de la Terrasse, Québec, Canada G1V 0A6; e-mail: galstian@phy.ulaval.ca
С.А.Васильев, О.И.Медведков, В.Г.Плотниченко, П.И.Гнусин, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: paulteo@inbox.ru

меняется в случае германосиликатных ВС, когда используемый метод записи не позволяет обеспечить малый период изменения показателя преломления, например при пошаговой записи ВБР [12, 13]. Кроме того, излучение, отражаемое ВБР во второй порядок, имеет фазовый синхронизм первого порядка в направлении, перпендикулярном оси световода [14], что позволяет определять положение решетки и управлять пространственным распределением ее параметров.

В настоящей работе представлена методика записи ВБР в халькогенидном ВС с использованием фазовой маски, обеспечивающей дифракцию записывающего излучения в +1-й и -1-й порядки, и со сканированием пучка записывающего излучения.

2. Методика записи ВБР

Одномодовый ВС на основе сульфида мышьяка, использованный в наших экспериментах, был изготовлен из высококачественного стекла методом двойного тигля [15]. Сердцевина световода имела стехиометрический состав ($As_{40}S_{60}$), а оболочка содержала избыточное количество серы ($As_{38}S_{62}$). Относительная разность Δ показателей преломления сердцевины и оболочки была равна $\sim 0.3\%$ при длине волны отсечки первой высшей моды ~ 1.1 мкм. Диаметры сердцевины и оболочки составляли при этом 4 и 125 мкм соответственно. Световод был покрыт защитной оболочкой из тефлона f-42 толщиной ~ 10 мкм.

Для записи ВБР использовалось излучение гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8$ нм) мощностью 20 мВт. Излучение фокусировалось на поверхность ВС цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 30 мм. Эллиптическая перетяжка пучка в фокальной плоскости линзы имела поперечные размеры $L \times W \approx 1.5$ мм \times 10 мкм (рис.1). Таким образом, плотность мощности излучения в перетяжке равнялась ~ 170 Вт/см². Световод фиксировался на задней плоскости фазовой маски, изготовленной из кварцевого стекла и имеющей штрихи прямоугольного профиля (скважность 50%). Глубина штрихов маски оптимизировалась для минимизации интенсивности излучения гелий-неонового лазера в нулевом порядке дифракции. Период штрихов маски составлял 1070 нм. В результате при нормальном падении излучения на плоскость маски формировались три дифракционных порядка (0-й и ± 1 -е) с дифракционной эффективностью $\sim 44\%$ (~ 9 мВт) для ± 1 -х порядков и $\sim 12\%$ (~ 2.45 мВт) для нулевого порядка. Поляризация излучения была парал-

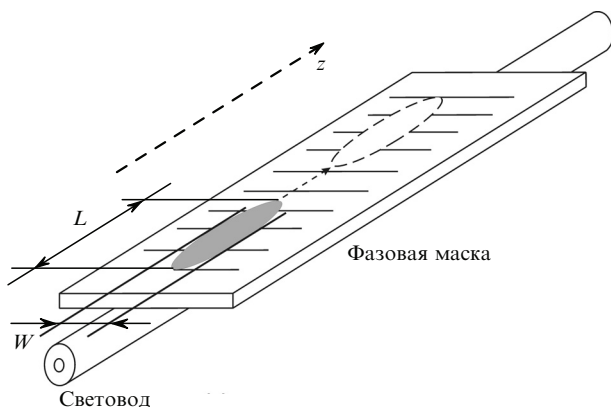


Рис.1. Схема записи ВБР в халькогенидном световоде.

лельна штрихам маски, что необходимо для создания высококонтрастной интерференционной картины.

Пучок записывающего излучения перемещался относительно неподвижных маски и световода вдоль направления оси ВС с помощью линейного транслятора со скоростью 11 мкм/с. Максимальное смещение транслятора было равно 20 мм. При таких условиях интегральная доза облучения сердцевины ВС при записи ВБР составляла ~ 20 кДж/см². При записи решетки защитное покрытие ВС не удалялось, поскольку оно прозрачно для излучения гелий-неонового лазера.

Для измерения спектральных характеристик ВБР использовался волоконный источник суперконтинуума, излучение которого вводилось в световод с помощью объектива с увеличением $20\times$. Для выведения из световода возбуждаемых мод оболочки участок световода вблизи входного торца был очищен от полимерного покрытия и погружен в иммерсионную жидкость (жидкий галлий), что обеспечивало необходимую степень затухания оболочечных мод [3]. Выходной конец ВС был состыкован со стандартным одномодовым волоконным световодом SMF-28, соединенным с оптическим спектроанализатором ANDO-6317B, спектральное разрешение которого при измерениях составляло 0.01 нм. Резонансная длина волны ВБР во втором порядке дифракции при использовании указанной фазовой маски была равна ~ 1290 нм.

3. Результаты и обсуждение

Спектры пропускания ВБР, измеренные в процессе записи при нескольких положениях транслятора z , показаны на рис.2. Отметим, что собственная длина ВБР превышала z на геометрическую длину записывающего пучка $L \sim 1.5$ мм.

Видно, что при перемещении транслятора (при увеличении длины ВБР) происходит монотонное увеличение коэффициента отражения ВБР и уменьшение спектральной ширины резонанса. Спектральное положение резонансной длины волны ($\lambda_{ВБ} = 1290.6$ нм), которое определяется средним значением наведенного показателя преломления, как и ожидалось, остается неизменным. Отметим, что при записи ВБР в спектрах пропускания не наблюдались неселективные оптические потери. Вместе с тем практически с самого начала облучения в спектре ВБР присутствовал дополнительный пик, смещенный на

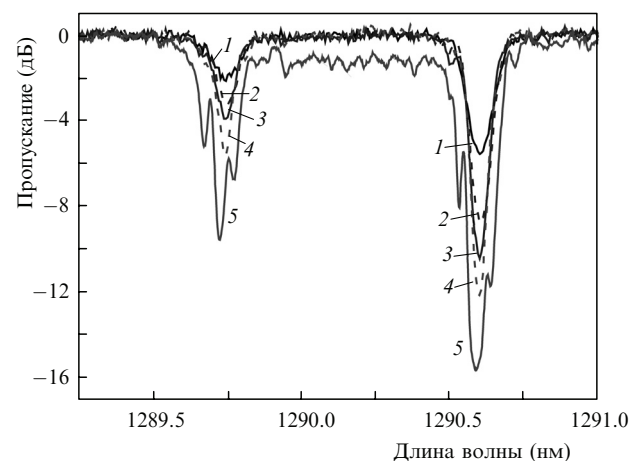


Рис.2. Спектры пропускания ВБР, измеренные в процессе записи при положениях транслятора $z = 3$ (1), 4.5 (2), 6.5 (3), 8 (4) и 20 мм (5).

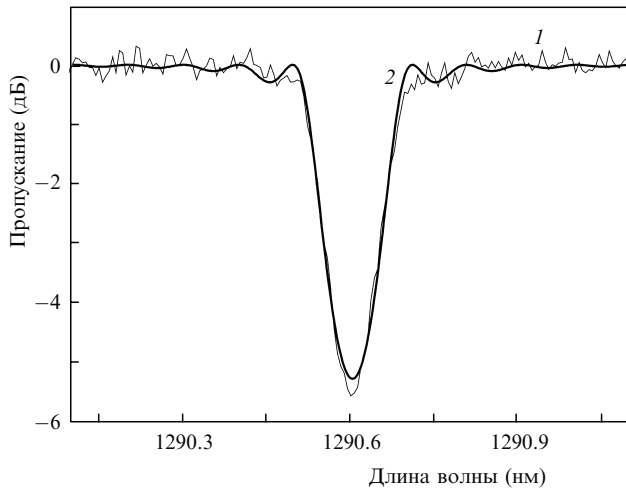


Рис.3. Спектр пропускания ВБР в области основного резонанса, измеренный при $z = 3$ мм (1), и его теоретическая аппроксимация (2).

0.85 нм в коротковолновую область относительно основного резонанса ВБР, интенсивность которого возрастала с ростом интенсивности основного резонансного пика.

При $z = 20$ мм наблюдалось искажение спектра пропускания ВБР (рис.2), тем не менее, несмотря на его заметную неоднородность, коэффициент отражения решетки достиг $\sim 97\%$, при этом спектральная ширина брэгговского резонанса на полувысоте составила ~ 0.14 нм. Мы полагаем, что неоднородность спектра ВБР, главным образом, связана с механической нестабильностью системы записи и может быть устранена.

При длине ВБР менее 10 мм измеренные спектры пропускания с хорошей точностью аппроксимировались теоретическими зависимостями, рассчитанными для однородной решетки. На рис.3 экспериментальный и расчетный спектры пропускания ВБР приведены для $z = 3$ мм. Амплитуда модуляции наведенного показателя преломления ВБР во втором порядке дифракции в этом случае составила $\sim 2 \times 10^{-4}$.

При в целом хорошем согласии расчетного и экспериментального спектров вблизи центральной длины волны глубина резонанса в экспериментальном спектре оказывается несколько большей. Аналогичное отклонение экспериментальных зависимостей от расчетных наблюдалось для кривых 2–4, представленных на рис.2. Такое отклонение возникает, например, в том случае, когда при измерении в неполяризованном свете спектр ВБР имеет относительно небольшое поляризационное расщепление. Двухлучепреломление в записанных в халькогенидных световодах ВБР может быть как собственным, связанным с несовершенством технологии изготовления ВС, так и индуцированным записывающим излучением [2, 16]. Величина двухлучепреломления, наблюдавшегося в наших экспериментах, составила $\sim 3 \times 10^{-5}$.

Для выяснения причины возникновения резонансного пика в спектре пропускания ВБР в коротковолновой области относительно основного резонанса (рис.2) с использованием оптического циркулятора был измерен спектр отражения ВБР при $z = 20$ мм. Оказалось, что в спектре отражения ВБР присутствуют оба пика, соответствующие наблюдаемым в спектре пропускания минимумам (рис.4). Это позволяет предположить, что дополнительный коротковолновый пик отражения связан с возбуждением LP_{11} -моды, распространяющейся в сердцевине ВС.

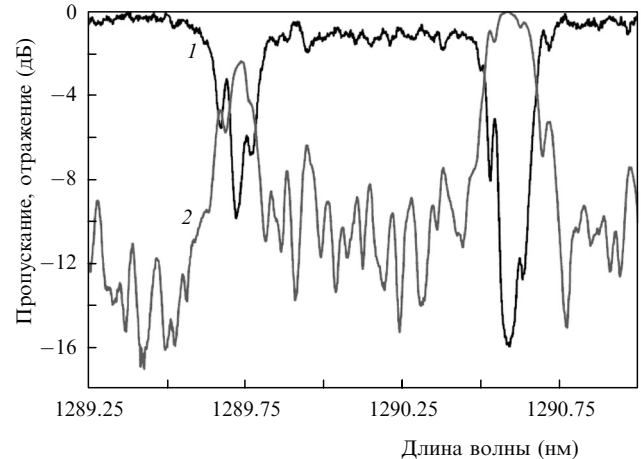


Рис.4. Спектры пропускания (1) и отражения (2) ВБР, измеренные при $z = 20$ мм.

Дело в том, что даже при небольшом наклоне штрихов решетки или в том случае, если штрихи ВБР имеют радиальную неоднородность, на ВБР может создаваться значительная связь LP_{01} - и LP_{11} -мод [17]. По видимому, связь указанных мод обусловлена именно наклоном штрихов ВБР, т. к. радиальная неоднородность наведенного показателя преломления не должна быть большой вследствие относительно малого коэффициента поглощения излучения гелий-неонового лазера халькогенидным стеклом.

Дополнительным подтверждением того, что коротковолновый пик отражения обусловлен взаимодействием LP_{01} - и LP_{11} -мод на ВБР, является хорошее совпадение расчетного значения спектральной отстройки $\Delta\lambda$ положения этого пика относительно основного резонанса ВБР, которое в нашем случае может быть вычислено по формуле $\Delta\lambda \approx \lambda_{BG} B A / 2$ (B – продольный фазовый параметр основной моды ВС [18]), с экспериментальным значением (0.85 нм).

Выше уже упоминалось, что оболочка халькогенидного световода, как и его сердцевина, является фоточувствительной, поэтому в световодах этого типа возбуждение мод оболочки на ВБР существенно затруднено [19, 20]. Действительно, из рис.2 видно, что в спектрах пропускания ВБР не наблюдается резонансов, связанных с возбуждением оболочечных мод световода.

Эксперименты по исследованию температурной стабильности фотоиндуцированного изменения показателя преломления показали, что отжиг в течение 30 мин при 75°C заметно не повлиял на спектральные характеристики изготовленных ВБР. Вместе с тем аналогичный отжиг решетки при температуре 100°C привел к уменьшению амплитуды модуляции фотоиндуцированного показателя преломления во втором порядке дифракции примерно на 10% .

4. Заключение

Таким образом, нами была предложена и реализована новая методика записи ВБР излучением гелий-неонового лазера в одномодовых ВС на основе халькогенидного стекла. В этой методике применялась стандартная для создания ВБР в германосиликатных световодах схема записи с использованием фазовой маски, обеспечивающей эффективную дифракцию записывающего излуче-

ния в +1-й и -1-й порядки. В силу нелинейной зависимости наведенного показателя преломления от дозы облучения в халькогенидных световодах эта методика позволила записывать однородные ВБР во втором порядке брэгговского отражения с резонансной длиной волны в ближнем ИК диапазоне спектра. Записанные ВБР характеризуются высоким коэффициентом отражения и малой спектральной шириной. Отметим, что из-за фоточувствительности оболочки световода на основе халькогенидного стекла спектры пропускания ВБР не содержат резонансов, связанных с возбуждением оболочечных мод. Предложенная методика может быть использована для формирования брэгговских решеток в планарных оптических волноводах на основе халькогенидного стекла.

1. Seddon A.B. *J. Non-Cryst. Solids*, **184**, 44 (1995).
2. Zakery A., Elliott S.R. *J. Non-Cryst. Solids*, **330**, 1 (2003).
3. Devyatykh G.G., Dianov E.M., Plotnichenko V.G., Pushkin A.A., Pyrkov Yu.N., Skripachev I.V., Snopatin G.E., Churbanov M.F., Shiryayev V.S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 229 (2000).
4. Asobe M., Kanamori T., Kubodera K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 2325 (1993).
5. Harbold J.M., Ilday F.Ö., Wise F.W., Sanghera J.S., Nguyen V.Q., Shaw L.B., Aggarwal I.D. *Opt. Lett.*, **27**, 119 (2002).
6. Nguyen H.C., Yeom D.-I., Mägi E.C., Kuhlmeier B.T., de Sterke C.M., Eggleton B.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, 1393 (2008).
7. Saliminia A., Villeneuve A., Galstian T.V., LaRochelle S., Richardson K. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 837 (1999).
8. Asobe M., Ohara T., Yokohama I., Kaino T. *Electron. Lett.*, **32**, 1611 (1996).
9. Brawley G.A., Ta'eed V.G., Bolger J.A., Sanghera J.S., Aggarwal I.D., Eggleton B.J. *Electron. Lett.*, **44**, 846 (2008).
10. Florea C., Sanghera J.S., Shaw B., Aggarwal I.D. *Opt. Mater.*, **31**, 942 (2009).
11. Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1035 (1993).
12. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I. *Electron. Lett.*, **40**, 1170 (2004).
13. Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennion I. *Opt. Express*, **15**, 18318 (2007).
14. Sun N.-H., Liao J.-J., Lin S.-C., Chiang J.-S., Liu W.-F. *Proc. IEEE Optoelectronics and Communication Conf.* (Hong Kong, 2009, WG6).
15. Dianov E.M., Plotnichenko V.G., Pyrkov Yu.N., Smol'nikov, Koleskin S.A., Devyatykh G.G., Churbanov M.F., Snopatin G.E., Skripachev I.V., Shaposhnikov R.M. *Inorg. Mater.*, **39**, 627 (2003).
16. Tikhomirov V.K., Elliott S.R. *J. Phys.: Condens. Matter*, **7**, 1737 (1995).
17. Hill K.O., Meltz G. *J. Lightwave Technol.*, **15** (8), 1263 (1997).
18. Унгер Х.-Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы* (М.: Мир, 1980).
19. Ishikawa S., Taru T., Inoue A., Shibata T., Murashima K., Tuchiya I. *SEI Techn. Rev.*, **55**, 8 (2003).
20. Nielsen M.L., Berendt M.O., Bjarklev A., Dyndgaard M.G. *Opt. Fiber Technol.*, **6**, 49 (2000).